



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ – ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ
ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΕΠΑΦΗΣ**

Κωνσταντίνος Κοτσοβός

Διδακτορική Διατριβή

Επιβλέπουσα Τριμελής Επιτροπή

Δ. Τσαμάκης, Καθηγητής ΕΜΠ (Προεδρεύων)

Κ. Καγκαράκης, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Κ. Μισιακός, Ερευνητής Α΄ Βαθμίδας, ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος

ΙΟΥΝΙΟΣ 2005

*Στους γονείς μου,
Πολύβιο και Φιλίτσα*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Κωνσταντίνο Μισιακό, Ερευνητή του Ινστιτούτου Μικροηλεκτρονικής του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, τόσο για τη βοήθεια, πνευματική αλλά και υλική όσο και για την υπομονή που έδειξε στο χρόνο που διήρκεσε η διατριβή. Η συμβολή του ήταν πολύτιμη και καθοριστική για την εκπλήρωση της διατριβής, ιδιαίτερα στο πειραματικό σκέλος της, όπου χάρις στις γνώσεις και την εμπειρία του, οι αντιξοότητες, αν και πολλές, μπόρεσαν να παρακαμφθούν.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή ΕΜΠ κ. Δημήτρη Τσαμάκη, για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το θέμα και για τις πολύτιμες συμβουλές του. Ευχαριστώ επίσης και τον Ομότιμο Καθηγητή ΕΜΠ κ. Κωνσταντίνο Καγκαράκη για τις πολύτιμες υποδείξεις του κατά τα τελικά στάδια συγγραφής της διατριβής.

Δεν θα μπορούσα βεβαίως να παραλείψω την πολύ μεγάλη συμβολή των τεχνικών του εργαστηρίου, κ. Χριστίνα Γεωργίου, κ. Μανώλη Σέργη, κ. Μάγδα Λαγκουβάρδου, κ. Δημήτρη Τσορομώκο, για τον κόπο που κατέβαλαν στην κατασκευή των πειραματικών διατάξεων που ήταν πραγματικά επίπονη, όπως και τον κ. Γιάννη Μαυροπούλη για την τεχνική του βοήθεια στο χαρακτηρισμό των δομών. Επίσης θα ήθελα να αναφέρω την πολύτιμη βοήθεια της υπεύθυνης του εργαστηρίου μικροηλεκτρονικής κ. Ε. Τσώη σε κρίσιμα στάδια των διεργασιών αλλά και για την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφερε σε διάφορα θέματα. Ακόμα θα ήθελα να αναφέρω και την πολύτιμη συμβολή του Δρ. Δημήτρη Γουστουρίδη στην υλοποίηση του κατάλληλου συστήματος χαρακτηρισμού των δομών.

Επίσης θα ήθελα να τονίσω και την ηθική υποστήριξη των φίλων μου, σε όλο το διάστημα που διήρκεσε η διατριβή. Αισθάνομαι ιδιαίτερα ικανοποιημένος και τυχερός που απέκτησα πολλούς καλούς φίλους στο περιβάλλον που εκπόνησα την εργασία αυτή.

Τέλος, ευχαριστώ εγκάρδια τους γονείς μου για όλη την συμπαράσταση που μου παρείχαν, ηθική και υλική. Χάρις στις θυσίες τους μπόρεσα να ολοκληρώσω αυτό το στάδιο και να εμπλουτίσω τις εμπειρίες και τις γνώσεις μου.

Κωνσταντίνος Κοτσοβός

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σημερινή εποχή χαρακτηρίζεται από έντονη τεχνολογική ανάπτυξη η οποία έχει σαν βασικό στόχο την βελτίωση του ανθρωπίνου βιοτικού επιπέδου. Η εξέλιξη αυτή συμβαδίζει και με την αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων, όπου μέχρι στιγμής βασίζονται στην κατανάλωση καυσίμων, η πλειονότητα των οποίων είναι παράγωγα του πετρελαίου. Εντούτοις, η χρήση του πετρελαίου για παραγωγή ενέργειας επιβαρύνει έντονα το περιβάλλον και συμβάλλει στην αύξηση εκπομπών αερίων που εντείνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό με τις παροδικές διακυμάνσεις της τιμής πώλησής του που επηρεάζουν την αγορά, κατεύθυναν την επιστημονική έρευνα προς την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μια από αυτές είναι η ηλιακή, η οποία μέσω κατάλληλων διατάξεων, των φωτοβολταϊκών (φ/β) στοιχείων, μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική. Προκειμένου να είναι οικονομικά συμφέρουσα η αξιοποίηση αυτών των διατάξεων, η έρευνα επικεντρώνεται στην μείωση του κόστους, ενώ ταυτόχρονα επιδιώκεται αύξηση της απόδοσής τους.

Στην παρούσα διατριβή εξετάζονται φ/β στοιχεία με βάση το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, ένα από τα πιο διαδεδομένα υλικά στην κατασκευή τέτοιων δομών. Συγκεκριμένα, μελετώνται τα φ/β στοιχεία με βάση σημειακής επαφής, διατάξεις οι οποίες έχουν επιτύχει την καλύτερη απόδοση ως τώρα για αυτό το υλικό. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους είναι ότι οι επαφές της βάσης με το πίσω ηλεκτρόδιο γίνονται μέσω μικρών ανοιγμάτων (σημειακές επαφές, point contacts) για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες λόγω επανασύνδεσης φορέων. Στην εργασία δίνεται έμφαση στην μελέτη των ωμικών απωλειών που οφείλονται στην αντίσταση σειράς των στοιχείων, η οποία έχει επισημανθεί ως ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες μείωσης της απόδοσης σε φ/β στοιχεία αυτού του τύπου. Για αυτό το σκοπό, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο για την αριθμητική προσομοίωση αυτών των δομών σε 3 διαστάσεις και αναλύθηκαν 2 διαφορετικές παραλλαγές των στοιχείων αυτών, όπου η μία διαθέτει μία μόνο ένωση σχηματισμένη στη μπροστινή επιφάνεια ενώ η δεύτερη διαθέτει μια επιπλέον ένωση στην πίσω επιφάνεια. Στη συνέχεια σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν τέτοιες δομές με διαφορετικά μεγέθη και αποστάσεις των πίσω επαφών στο Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, ενώ πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις

χαρακτηριστικών τάσεως ρεύματος (IV) στα εργαστήρια χαρακτηρισμού του Ινστιτούτου και στο αντίστοιχο Εργαστήριο Ηλεκτροτεχνικών Υλικών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών και Μηχ/κών Η/Υ ΕΜΠ. Επιπλέον, έγιναν μετρήσεις για την εξαγωγή της αντίστασης σειράς των 2 διαφορετικών τύπων διατάξεων, οπότε προέκυψε μια πρωτότυπη συστηματική μελέτη σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο.

Η διατριβή απαρτίζεται από 3 διαφορετικά μέρη. Το πρώτο τμήμα αφορά το εισαγωγικό σκέλος, το δεύτερο περιγράφει το θεωρητικό μοντέλο και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ενώ το τρίτο και τελευταίο αναλύει την σχεδίαση και κατασκευή των πειραματικών δομών, και στη συνέχεια τα αποτελέσματα των μετρήσεων, τα οποία συγκρίνονται με τα θεωρητικά.

Πιο αναλυτικά, στην περίπτωση του εισαγωγικού τμήματος, στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται γενικά στοιχεία που σχετίζονται με την ηλιακή ακτινοβολία και τη λειτουργία των φ/β διατάξεων παραθέτοντας βασικά στοιχεία της θεωρίας των ημιαγωγών. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν τις απώλειες μετατροπής στα φ/β στοιχεία πυριτίου, καθώς και τα θεωρητικά όρια της βέλτιστης μετατροπής. Το τρίτο κεφάλαιο αποτελεί μια ανασκόπηση των σύγχρονων, πιο εξελιγμένων διατάξεων κρυσταλλικού πυριτίου που έχουν κατασκευαστεί. Το δεύτερο σκέλος αποτελείται επίσης από 3 κεφάλαια (4, 5 και 6). Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται το θεωρητικό μοντέλο και ο αλγόριθμος επίλυσης του προβλήματος, ενώ το 5^ο και 6^ο παραθέτουν τα αποτελέσματα από τις αριθμητικές προσομοιώσεις για τις διατάξεις 1 και 2 ενώσεων αντίστοιχα. Τέλος, το τρίτο μέρος, απαρτίζεται από 2 κεφάλαια (7 και 8). Το κεφάλαιο 7 δίνει τη φιλοσοφία και τις παραμέτρους σχεδιασμού των πειραματικών δομών καθώς και τις διαδικασίες κατασκευής τους. Το κεφάλαιο 8 αφορά το χαρακτηρισμό των διατάξεων και τη σύγκριση με τις προσομοιώσεις.

ABSTRACT

The subject of this doctoral thesis is the investigation of rear point contact (locally-diffused) solar cell structures based on crystalline silicon. The basic design difference of these devices compared with the conventional solar cells is that the back surface is covered with oxide and the contact with the metal is performed through small openings in the oxide instead of covering the whole surface. This work emphasizes on series resistance losses, one of the most significant limiting factors of solar cell's efficiency. Therefore, a method based on the numerical solution through Fast Fourier Transform (FFT) of the minority and majority carrier transport equations in three dimensions in the base of the cell operated in low injection has been developed. This method is used for the simulation of two different point contact structures, the single and double junction solar cell, where the emitter of the first one covers the whole front surface and the back surface area around the point contacts is covered by a high quality thermal oxide, while in the second one the back oxide is substituted by an additional emitter. Both device types were fabricated in the Microelectronics' Institute of NCSR Demokritos using photolithography techniques and their current-voltage (IV) curves and series resistance were obtained. Additional measurements were performed in the Electrical Materials laboratory, which belongs to the Faculty of Electrical and Electronic Engineering of NTUA. Simulated and experimental results were compared and optimal design rules were obtained for these types of solar cells.

This thesis is divided in three parts. The first one is referred to the introductory part; the second one describes the theoretical model, the numerical method and the simulation results and finally the third deals with the experimental devices and measurement results, which are compared with the corresponding numerical ones.

Specifically, the introductory part is consisted of three chapters. The first is a general treatment of semiconductor physics related to solar cells. The second chapter analyzes conversion losses in silicon solar cell devices, and the upper efficiency limits are derived. The last chapter of the introductory part is a general review of advanced silicon solar cell devices. The second part is also consisted of three chapters (4, 5 and 6). Chapter four describes the mathematical model and the simulation algorithm, while chapters 5

and 6 present simulation results of the single and double junction structures respectively. The final part is comprised of two chapters (7 and 8). Chapter 7 explains the design and processing steps of the two different experimental device types, while in chapter 8 measurement results are presented and compared with the simulations. There is also a separate chapter, where thesis conclusions and further outlook of this work are discussed.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1	Πρόλογος	1
1.2	Ιστορικά Στοιχεία	2
1.3	Η ηλιακή ακτινοβολία	4
1.4	Βασικές αρχές της φωτοβολταϊκής μετατροπής	7
1.4.1	<i>Απορρόφηση στους ημιαγωγούς</i>	7
1.4.2	<i>Μηχανισμοί επανασύνδεσης</i>	9
1.4.3	<i>Μεταφορά φορέων</i>	13
1.5	Δομή – Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού στοιχείου	16

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ανάλυση Φωτοβολταϊκών Στοιχείων Υψηλής Απόδοσης

2.1	Βασικές παράμετροι της έρευνας των φ/β στοιχείων πυριτίου	23
2.2	Μηχανισμοί απωλειών σε ένα φ/β στοιχείο	27
2.3	Ηλεκτρικές απώλειες	29
2.3.1	<i>Απώλειες επανασύνδεσης</i>	30
2.3.2	<i>Ωμικές απώλειες</i>	37
2.3.3	<i>Διαδικασίες βελτίωσης της απορρόφησης και μείωσης της ανάκλασης</i>	46
2.4	Θεωρητικά όρια της απόδοσης των φ/β στοιχείων πυριτίου	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Τύποι Φ/β Στοιχείων Πυριτίου

3.1	Εισαγωγή	63
3.2	Το φ/β στοιχείο COMSAT	63
3.3	Το φ/β στοιχείο PESC (Passivated Emitter Solar Cell)	65

3.4	Το φ/β στοιχείο των θαμμένων επαφών (Buried Contact)	66
3.5	Το φ/β στοιχείο Σημειακών Πίσω Επαφών (rear point contact)	67
3.6	Το φ/β στοιχείο PERL (Passivated Emitter, Rear Locally Diffused)	68
3.7	Παραλλαγές του φ/β στοιχείου PERL	71
3.7.1	<i>Το φ/β στοιχείο PERT (Passivated Emitter, Rear Totally Diffused)</i>	71
3.7.2	<i>Το φ/β στοιχείο RP-PERC (Random Pyramid – Passivated Emitter and Rear Cell)</i>	72
3.8	Διατάξεις με ενώσεις (εκπομπούς) στην μπροστινή και πίσω επιφάνεια	74
3.8.1	<i>Το φ/β στοιχείο EWT (Emitter Wrap Through)</i>	74
3.8.2	<i>Το φ/β στοιχείο MWA (Metallisation Wrap Around)</i>	76
3.8.3	<i>Το φ/β στοιχείο MWT (Metallisation Wrap Through)</i>	77
3.8.4	<i>Το φ/β στοιχείο POWER (Polycrystalline Silicon Wafer Result)</i>	78
3.8.5	<i>Το φ/β στοιχείο θαμμένων επαφών διπλής όψης (Double Sided Buried Contact, DSBC)</i>	79
3.8.6	<i>Το φ/β στοιχείο τριών ακροδεκτών τύπου n^+pn^+ (δύο ενώσεων)</i>	80
3.9	Το φ/β στοιχείο HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer)	82
3.10	Το φ/β στοιχείων πολλών στρωμάτων	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Τρισδιάστατο μοντέλο φ/β στοιχείων βάσης σημειακής επαφής

4.1	Εισαγωγή –Αναφορά βασικών αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης φ/β στοιχείων	89
4.2	Μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης- Υποθέσεις, εξισώσεις και οριακές συνθήκες	90
4.2.1	<i>Βασικές Υποθέσεις</i>	91
4.2.2	<i>Εξίσωση διάχυσης φορέων μειονότητας</i>	92
4.2.3	<i>Εξίσωση δυναμικού φορέων πλειονότητας</i>	92
4.2.4	<i>Οριακές Συνθήκες</i>	93
4.3	Μεθοδολογία επίλυσης των εξισώσεων μεταφοράς μέσω μετασχηματισμού Fourier	98

4.3.1	<i>Μοντέλο απορρόφηση φωτός</i>	98
4.3.2	<i>Διαδικασία επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης διάχυσης</i>	100
4.3.3	<i>Διαδικασία επίλυσης της εξίσωσης δυναμικού φορέων πλειονότητας</i>	102
4.4	Περιγραφή αλγορίθμου επίλυσης εξισώσεων μεταφοράς	105
4.4.1	<i>Αλγόριθμος επίλυσης της εξίσωσης διάχυσης φορέων μειονότητας</i>	105
4.4.2	<i>Αλγόριθμος υπολογισμού του δυναμικού φορέων πλειονότητας</i>	106
4.4.3	<i>Επίλυση του συνολικού προβλήματος</i>	108

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Προσομοίωση της διάταξης σημειακής επαφής μιας ένωσης

5.1	Εισαγωγή-Ανασκόπηση των υπαρχόντων μοντέλων	111
5.2	Παράμετροι προσομοίωσης της δομής μονής ένωσης	113
5.3	Γενική ανάλυση του δυναμικού φορέων πλειονότητας	114
5.3.1	<i>Χαρακτηριστική τάσεως ρεύματος (IV)</i>	114
5.3.2	<i>Ρεύμα - δυναμικό φορέων πλειονότητας</i>	115
5.4	Επίδραση των πίσω επαφών στο φωτόρευμα και την τάση ανοιχτού κυκλώματος	117
5.5	Επίδραση των πίσω επαφών στην αντίσταση σειράς	119
5.6	Επίδραση των πίσω επαφών στην απόδοση	122
5.7	Προσομοίωση της διάταξης σημειακών επαφών υπό χαμηλότερη νόθευση βάσης	125
5.7.1	<i>Μελέτη της αντίστασης σειράς και του παράγοντα πλήρωσης</i>	125
5.7.2	<i>Μελέτη της απόδοσης</i>	127
5.8	Συμπεράσματα	128

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Προσομοίωση της διάταξης δυο ενώσεων με βάση σημειακής επαφής

6.1	Εισαγωγή- Γενική ανασκόπηση	131
6.2	Παράμετροι προσομοίωσης και διάρθρωση του κεφαλαίου	132

6.3	Προσομοίωση διατάξεων για $L_n=800\mu\text{m}$	132
6.3.1	<i>Χαρακτηριστική IV ϕ/β στοιχείου 2 ενώσεων και κατανομή ρευμάτων πλειονότητας</i>	133
6.3.2	<i>Ρεύμα βραχυκυκλώματος (J_{sc}) και τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc})</i>	134
6.3.3	<i>Αντίσταση σειράς (R_s)</i>	136
6.3.4	<i>Απόδοση</i>	141
6.4	Προσομοίωση διατάξεων για $L_n=400\mu\text{m}$	142
6.4.1	<i>Ρεύμα βραχυκυκλώματος και τάση ανοιχτού κυκλώματος</i>	143
6.4.2	<i>Μέγιστη απόδοση</i>	145
6.5	Γενική επίδραση του μήκους διάχυσης στις διατάξεις σημειακής επαφής	147
6.6	Ανάλυση της δομής 2 ενώσεων για φωτισμό από την πίσω επιφάνεια	151
6.7	Σύγκριση των δομών 1 και 2 ενώσεων για διαφορετικό πάχος βάσης	152
6.8	Μελέτη της δομής 2 ενώσεων υπό διαφορετικές τάσεις πόλωσης των εκπομπών	153
6.9	Συμπεράσματα	156

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Πειραματικές δομές μονής και διπλής ένωσης- Σχεδίαση και Κατασκευή

7.1	Εισαγωγή	159
7.2	Περιγραφή βασικής σχεδίασης δομής μιας ένωσης- Μπροστινή επιφάνεια	159
7.2.1	<i>Διαμόρφωση εκπομπού</i>	160
7.2.2	<i>Παράθυρα νόθευσης κάτω από τα μπροστινά ηλεκτρόδια</i>	161
7.2.3	<i>Μπροστινό μέταλλο</i>	162
7.2.4	<i>Σημειακές πίσω επαφές</i>	164
7.2.5	<i>Πίσω εκπομπός (Δομή 2 ενώσεων)</i>	165
7.2.6	<i>Πίσω μέταλλο (Δομή 2 ενώσεων)</i>	165
7.2.7	<i>Επαφές πίσω εκπομπού (Δομή 2 ενώσεων)</i>	167
7.3	Σχεδιασμός αντανακλαστικών επιστρώσεων	168

7.4	Διαδικασία κατασκευής διατάξεων	170
7.4.1	Διάταξη μιας ένωσης	171
7.4.2	Διάταξη δύο ενώσεων	174

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Χαρακτηρισμός - Ηλεκτρικές μετρήσεις πειραματικών φ/β στοιχείων μονής και διπλής ένωσης

8.1	Εισαγωγή	181
8.2	Τεχνικές χαρακτηρισμού και απεικόνιση των πειραματικών δομών	181
8.2.1	Απεικόνιση πειραματικών δομών	182
8.2.2	Σύστημα χαρακτηρισμού	183
8.2.3	Συνδεσμολογία μετρήσεων για τη δομή μιας ένωσης	184
8.2.4	Συνδεσμολογία μετρήσεων για τη δομή 2 ενώσεων	185
8.2.5	Τεχνική μέτρησης αντίστασης σειράς (R_s)	187
8.3	Μετρήσεις χαρακτηριστικών IV σε συνθήκες σκότους	190
8.3.1	Δομή μονής ένωσης	190
8.3.2	Διάταξη 2 ενώσεων	197
8.4	Μετρήσεις αντιστάσεως σειράς	198
8.4.1	Πειραματικές τιμές αντίστασης σειράς των δομών μονής ένωσης	199
8.4.2	Σύγκριση πειραματικών τιμών της R_s με το μοντέλο για τη δομή μονής ένωσης	200
8.4.3	Πειραματικές τιμές αντίστασης σειράς δομών δύο ενώσεων	204
8.4.4	Σύγκριση πειραματικών τιμών της R_s με τις θεωρητικές για τη δομή 2 ενώσεων	206
8.4.5	Μετρήσεις αντιστάσεων σειράς με μία από τις 2 ενώσεις ανοιχτοκυκλωμένη	208
8.5	Μετρήσεις χαρακτηριστικών IV των διατάξεων υπό φωτισμό	210
8.5.1	Πειραματικές χαρακτηριστικές IV δομών μονής ένωσης	211
8.5.2	Πειραματικές χαρακτηριστικές διατάξεων 2 ενώσεων	215

8.6	Απόδοση διατάξεων στο ηλιακό φάσμα και φασματική απόκριση	224
8.7	Γενικά συμπεράσματα	226
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	229
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	
	Μέθοδος πινάκων (Matrix Method) για τον υπολογισμό των συντελεστών ανάκλασης και διάδοσης	
A.1	Περιγραφή της μεθόδου	233
A.2	Εφαρμογή της μεθόδου	236
<i>A.2.1</i>	<i>Απλό φιλμ σε υπόστρωμα απείρου πάχους</i>	236
<i>A.2.2</i>	<i>Διπλό φιλμ σε υπόστρωμα απείρου πάχους</i>	237

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πρόλογος

Η περίοδος που ζούμε χαρακτηρίζεται από έντονη τεχνολογική ανάπτυξη η οποία έχει σκοπό να διευκολύνει τον άνθρωπο σε όλες τις δραστηριότητές του, είτε πρόκειται για εργασία ή για την ψυχαγωγία του. Ιδιαίτερα στις προηγμένες τεχνολογικά χώρες, που έχουν βαριά βιομηχανία οι απαιτήσεις σε ενέργεια είναι αυξημένες. Μέχρι τώρα η κυριότερη πηγή ενέργειας είναι το πετρέλαιο, και θα παραμένει για μερικές δεκαετίες ακόμα, όσο τα υπάρχοντα αποθέματα επαρκούν και εξακολουθεί να είναι οικονομικά συμφέρουσα η αξιοποίησή τους. Εντούτοις η χρήση του δημιουργεί έντονα προβλήματα στο περιβάλλον τόσο λόγω της μόλυνσης από τα τοξικά κατάλοιπα της καύσης του όσο και από τα αέρια που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου που δημιουργεί αρνητικές επιδράσεις στο κλίμα του πλανήτη. Ήδη οι επιστήμονες και οι περιβαλλοντολογικές οργανώσεις προειδοποιούν για τους επερχόμενους κινδύνους. Έχοντας αυτά ως δεδομένα καθώς και τις οικονομικές κρίσεις που προκλήθηκαν στο παρελθόν από την άνοδο της τιμής του πετρελαίου, η επιστήμη αναζήτησε τρόπους αποδοτικής αξιοποίησης εναλλακτικών, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Μια από αυτές είναι η ηλιακή ενέργεια, η οποία μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Τα πλεονεκτήματα της μετατροπής αυτής είναι προφανή, καθώς η ηλιακή ενέργεια παρέχεται χωρίς να απαιτηθεί κατανάλωση υλικών πόρων, ενώ παράλληλα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν ελάχιστο κόστος συντήρησης. Από την άλλη πλευρά οι βασικές διαδικασίες παραγωγής τους βασίζονται στις τεχνικές της μικροηλεκτρονικής οι οποίες έχουν εξελιχθεί με ραγδαίο ρυθμό λόγω της ευρείας διάδοσης των υπολογιστών. Παρόλα αυτά, το κόστος παραγωγής και εγκατάστασης τέτοιων συστημάτων εξακολουθεί να είναι πολύ μεγαλύτερο από των συμβατικών σταθμών παραγωγής ενέργειας, γεγονός που έχει περιορίσει την εξάπλωσή τους σε συγκεκριμένες εφαρμογές, κυρίως σε δορυφόρους και διαστημικούς σταθμούς, όπου το κόστος παίζει δευτερεύοντα ρόλο. Για αυτό το λόγο η έρευνα επικεντρώνεται στη μείωση του κόστους των συστημάτων με την ανακάλυψη νέων αποδοτικότερων

υλικών, στη βελτίωση των διαδικασιών παραγωγής και της συνολικής αξιοπιστίας όλων των υποσυστημάτων παραγωγής ενέργειας.

Το πυρίτιο αποτελεί μέχρι τώρα το πιο διαδεδομένο υλικό παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων, τόσο λόγω της αφθονίας του στη φύση όσο και για το γεγονός ότι αποτελεί το βασικό στοιχείο παραγωγής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και μικροεπεξεργαστών. Συγκεκριμένα, το 80% των φ/β συστημάτων που πωλούνται σήμερα είναι από πυρίτιο [1]. Έτσι σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια γενική ανάλυση για τις ιδιότητες αυτού του ημιαγωγού και θα ακολουθήσουν οι βασικές αρχές της φωτοβολταϊκής μετατροπής.

1.2. Ιστορικά Στοιχεία

Το φαινόμενο της φωτοβολταϊκής μετατροπής παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Becquerel [2] το 1839, όπου διαπίστωσε την παραγωγή ρεύματος από την έκθεση ηλεκτροδίων από Άργυρο σε ακτινοβολία μέσα σε ένα ηλεκτρολύτη. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια από τους Adams και Day [3] το 1877. Αυτοί παρατήρησαν ότι η έκθεση ηλεκτροδίων από Σελήνιο σε ακτινοβολία, παρήγαγε μια ηλεκτρική τάση, επιτρέποντας έτσι την εξαγωγή ρεύματος.

Από τότε, η ιδιότητα αυτή δεν αξιοποιήθηκε καθόλου, μέχρι την ανακάλυψη του τρανζίστορ και τη θεωρητική μελέτη της ένωσης p-n από τον Shockley [4] και τους Bardeen και Brattain [5] το 1949, όπου τότε ουσιαστικά ξεκίνησε η εποχή των ημιαγωγών. Αργότερα ο Charpin κ.α [6] στα εργαστήρια Bell ανέπτυξαν το πρώτο φωτοβολταϊκό στοιχείο από κρυσταλλικό πυρίτιο, με απόδοση 6%, σημαντική για τη δεδομένη εποχή. Αυτή η απόδοση αυξήθηκε στο 10% σε λίγα χρόνια, όπου ξεκίνησαν και οι πρώτες εφαρμογές που αφορούσαν τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας σε δορυφόρους. Ωστόσο, η κύρια ώθηση στην εξάπλωση των φ/β στοιχείων δόθηκε το 1973 με την περιβόητη πετρελαϊκή κρίση. Από τότε δημιουργήθηκαν πολλά ερευνητικά ινστιτούτα προς αυτή την κατεύθυνση, η πλειονότητα των οποίων είχε δημόσια χρηματοδότηση. Όλες οι επιλογές για δραστική μείωση του κόστους εξετάστηκαν καθώς διαπιστώθηκε ότι το υπέρογκο κόστος των φ/β συστοιχιών ήταν το κυριότερο φράγμα για την εξάπλωσή τους και από τότε έχει γίνει σημαντική δουλειά προς αυτή την κατεύθυνση, η οποία βοηθήθηκε και από την βελτίωση των διαδικασιών της μικροηλεκτρονικής.

Κεφάλαιο 1

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, το πυρίτιο χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για την παραγωγή τέτοιων στοιχείων, και τα τελευταία χρόνια κυρίως το πολυκρυσταλλικό λόγω του μειωμένου κόστους και της σχετικά υψηλής του απόδοσης. Από την άλλη πλευρά σημαντική έρευνα γίνεται προς την ανακάλυψη νέων υλικών όπου αναπτύχθηκε το άμορφο πυρίτιο (a-Si), μια ένωση πυριτίου – υδρογόνου [7-8] το οποίο χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία μικρών ηλεκτρονικών συσκευών (ρολόγια, αριθμομηχανές κλπ.), όπου οι απαιτήσεις σε ρεύμα δεν είναι τόσο σημαντικές. Το συγκεκριμένο υλικό έχει το πλεονέκτημα του υψηλού συντελεστή απορρόφησης του φωτός, σε αντίθεση με το κρυσταλλικό πυρίτιο, οπότε οι αντίστοιχες φ/β διατάξεις είναι μικρού πάχους (λεπτά φιλμ).

Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως ετεροεπαφές ή ημιαγωγοί κατηγορίας III-V ή II-VI από τα οποία τώρα τελευταία η ένωση Χαλκού – Ινδίου – Σεληνίου (CuInSe_2 , Copper Indium Diselenide) είναι στο προσκήνιο λόγω της μακροχρόνιας σταθερότητας και σχετικά υψηλής απόδοσης που παρέχει (πάνω από 15%) [9]. Παλαιότερα ήταν αρκετά διαδεδομένη η κατασκευή φ/β στοιχείων με βάση το CdTe λόγω χαμηλού κόστους και αρκετά καλής απόδοσης (στην περιοχή του 10-14%) [10,11]. Παρόλα αυτά η αποδοχή τέτοιων στοιχείων ως κατάλληλα για μαζική παραγωγή είναι αμφισβητήσιμη, δεδομένης της τοξικότητας του Cd. Από την άλλη πλευρά, σύνθετα υλικά (κυρίως ενώσεις του αρσενιούχου Γαλλίου) συνδυάζονται σε πολλαπλές ενώσεις με διαφορετικούς συντελεστές απορρόφησης (tandem) για να αξιοποιηθεί καλύτερα το ηλιακό φάσμα και να επιτευχθεί η βέλτιστη μετατροπή [12-13]. Αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή απόδοση ανεξαρτήτως κόστους, ή σε συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας, όπου τα φ/β στοιχεία καταλαμβάνουν μικρή επιφάνεια. Πρόσφατα, οργανικά υλικά κατάλληλα για φ/β μετατροπή που προτάθηκαν από τον Graetzel [14-15] έχουν σχεδιαστεί, τα οποία έχουν πολύ χαμηλό κόστος παραγωγής, αλλά έχουν προβλήματα σταθερότητας αν και τώρα τελευταία έχουν ξεπεραστεί σε σημαντικό βαθμό.

Από το 1980 και μετά διαπιστώθηκε ότι η βελτιστοποίηση της απόδοσης είναι πολύ σημαντική προκειμένου να μειωθεί το κόστος ενός φ/β συστήματος. Έτσι ένα μεγάλο μέρος της έρευνας κατευθύνεται προς την επίτευξη υψηλών επιπέδων απόδοσης.

1.3. Η ηλιακή ακτινοβολία

Από τις μέχρι τώρα μελέτες είναι γνωστό ότι η ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο παράγεται με θερμοπυρηνική σύντηξη Υδρογόνου σε Ήλιο. Η αντίδραση αυτή γίνεται στο εσωτερικό του ήλιου σε θερμοκρασία αρκετών εκατομμυρίων βαθμών Κελσίου και παράγονται τεράστια ποσά ενέργειας. Η θερμοκρασία της επιφάνειάς του είναι δεδομένη προκειμένου να υπάρχει θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ αυτού και του σύμπαντος, η τιμή της οποίας είναι 5900 K. Σε αυτή τη θερμοκρασία είναι δεδομένο ότι όλα τα στοιχεία έχουν ιονιστεί σε κάποιο βαθμό, οπότε από την ανάλυση της ακτινοβολίας του προκύπτουν πολλές φασματικές γραμμές, και συνεπώς η επιφάνεια του ήλιου εκπέμπει σαν ένα μέλαν σώμα. Το ποσό της ηλιακής ενέργειας που φθάνει την επιφάνεια της γης καθορίζεται από τον λόγο των διαμέτρων του ήλιου και της γης, καθώς και την απόσταση που τους χωρίζει. Αν θεωρήσουμε αμελητέες τις αποκλίσεις που οφείλονται στην περιστροφή της γης γύρω από τον ήλιο, η τιμή της ισχύος της ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα, είναι $D_0=1.353 \text{ kW/m}^2$. Η τιμή αυτή, ονομάζεται ηλιακή σταθερά.

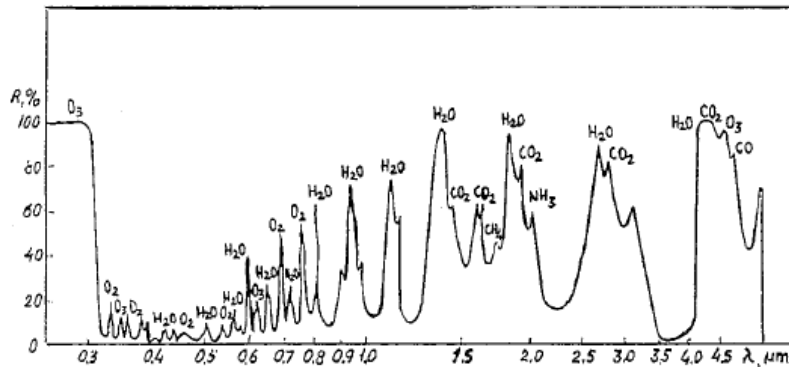
Ένα σημαντικό ποσοστό της ακτινοβολίας που φθάνει στη γη απορροφάται και σκεδάζεται περνώντας μέσα από την ατμόσφαιρα. Στο υπέρυθρο φάσμα απορρόφηση γίνεται από τους υδρατμούς και το διοξείδιο του άνθρακα, ενώ στο ορατό φάσμα κυρίως από το οξυγόνο στην περιοχή του ερυθρού (0.63 και 0.69 μm). Όσον αφορά το υπεριώδες φάσμα, η απορρόφηση γίνεται από το όζον στην περιοχή 0.2-0.35 μm . Πέρα από την απορρόφηση, παρατηρείται και σκέδαση λόγω των διαφόρων αερίων (σκέδαση Rayleigh) όπως και λόγω σωματιδίων σκόνης στην ατμόσφαιρα η οποία εξαρτάται από την ποσότητα και το μέγεθος αυτών. Άλλοι παράγοντες που καθορίζουν την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη γη είναι η θέση και η κλίση του ήλιου στον ουρανό και οι κλιματολογικές συνθήκες. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία υπό ορισμένες συνθήκες έχει προτυποποιηθεί και αναφέρεται με τα αρχικά AM (air mass) που ακολουθούνται από ένα αριθμό που δηλώνει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την κατακόρυφη πρόσπτωση. Το νούμερο αυτό εξαρτάται επίσης από το ύψος της τοποθεσίας σε σχέση με το επίπεδο της θάλασσας, δηλαδή μειώνεται όσο αυξάνει το ύψος της αναλογικά με την ατμοσφαιρική πίεση. Αυτά εκφράζονται με την ακόλουθη σχέση

$$AM = p / p_0 \sin \vartheta \quad (1.1)$$

Κεφάλαιο 1

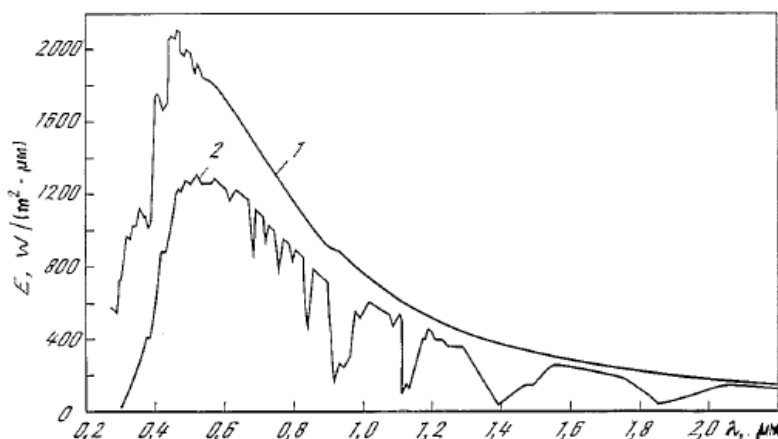
όπου p και θ ορίζουν αντίστοιχα την ατμοσφαιρική πίεση για συγκεκριμένο ύψος πάνω από τη γραμμή του ορίζοντα και την γωνία που βρίσκεται ο ήλιος για το συγκεκριμένο σημείο της επιφάνειας της γης [16], ενώ $p_0=1.013 \times 10^5$ Pa.

Το επόμενο σχήμα (σχ. 1.1) δείχνει το ποσοστό της φασματικής απορρόφησης από τα διάφορα αέρια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 1.1. Απορρόφηση του ηλιακού φάσματος από τα στοιχεία της ατμόσφαιρας, θεωρώντας στρώμα όζοντος πάχους 2 mm και αντίστοιχο πάχος υδρατμών 2 cm για συνθήκες ακτινοβολίας AM1 [16].

Συγκεκριμένα, AM0 αναφέρεται στην ακτινοβολία στο διάστημα, AM1 είναι η ακτινοβολία στον ισημερινό όπου έχουμε κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στο ύψος της θάλασσας για καθαρό ουρανό χωρίς σύννεφα και AM1.5 είναι η ακτινοβολία στην περίπτωση όπου διανύει διαδρομή 1.5 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την κάθετη πρόσπτωση. Συνεπώς, σύμφωνα με την (1.1) προκύπτει ότι οι συνθήκες AM1.5 υφίστανται όταν ο ήλιος βρίσκεται σε γωνία 41.8° από τον ορίζοντα. Στο σχήμα 1.2 φαίνεται η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας στο διάστημα (AM0) και στη γη για συνθήκες ακτινοβολίας AM1.5 [16].

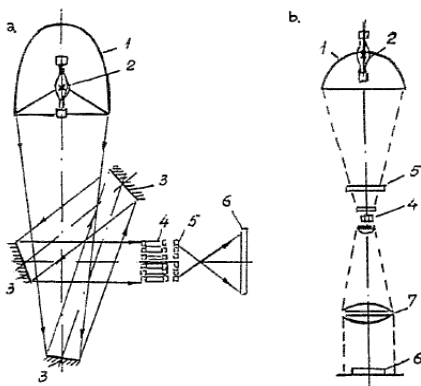


Σχήμα 1.2. Φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα (1) και εντός αυτής (2) για AM1.5 πάχος στρώματος υδρατμών 2 cm, όζοντος 3.4 mm και παράμετροι σκέδασης σωματιδίων $\alpha=1.3$ (δείκτης επιλεκτικότητας) και $\beta=0.12$ (συντελεστής θολότητας) [16].

Κεφάλαιο 1

Πέρα από τη θέση του ήλιου, οι κλιματολογικές συνθήκες και η γεωγραφική θέση παίζουν σημαντικό ρόλο στη σύσταση της ακτινοβολίας. Το φως, για παράδειγμα, λόγω της διάχυσης στην ατμόσφαιρα, περιέχει ένα μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας του στη μπλε περιοχή του φάσματος. Για αυτό το λόγο έχουν επικρατήσει συγκεκριμένα πρότυπα καθορισμού της απόδοσης των φ/β στοιχείων. Έτσι, για τις γήινες εφαρμογές, αυτό που έχει επικρατήσει είναι το συνολικό (global) AM1.5 φάσμα, που είναι το σύνολο άμεσης και έμμεσης ακτινοβολίας με πυκνότητα ροής ακτινοβολίας 834.6 W/m^2 όπως απεικονίζεται στο σχήμα 1.2. Η πυκνότητα ροής της ακτινοβολίας μετριέται με πρότυπα φ/β στοιχεία ειδικά κατασκευασμένα για αυτό το σκοπό [16].

Στην πράξη, οι παράμετροι των φ/β στοιχείων που κατασκευάζονται εκτιμώνται με χρήση εξομοιωτών του ηλιακού φάσματος οι οποίοι προσπαθούν να αναπαράγουν με τον πιο πιστό τρόπο όλες τις παραμέτρους του ηλιακού φάσματος του σχήματος 1.2. Συγκεκριμένα η δέσμη της παραγόμενης ακτινοβολίας πρέπει να είναι παράλληλη, η πηγή πρέπει να είναι χρονικά σταθερή, και η ακτινοβολία, όπως και η ροή της πρέπει να είναι ομοιόμορφες. Αυτό το πρότυπο μπορεί να αναπαραχθεί στο εργαστήριο με τη βοήθεια λυχνιών από Ξένο (Xe) και με το συνδυασμό κατάλληλων φίλτρων, και χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό φ/β στοιχείων. Ένα παραδείγματα ηλιακού εξομοιωτή είναι ο Spectrosun X-25 που παράγεται από τη Spectrolab, ο οποίος παράγει δέσμη ομοιόμορφη με σφάλμα $\pm 2 \%$ σε μια επιφάνεια 300 mm διαμέτρου και σε απόσταση 1,5-2 m από την υποδοχή των φίλτρων. Ο συγκεκριμένος διαθέτει σύνολο φίλτρων τα οποία μπορούν να αλλαχτούν για να αναπαράγουν τα φάσματα AM0 και AM1.5 σε προσέγγιση. Το σχεδιάγραμμα αυτού του εξομοιωτή και του αντίστοιχου της Ushio Electric φαίνονται στο σχήμα 1.3 [16]. Αντίστοιχοι εξομοιωτές φτιάχνονται και από άλλες εταιρίες, π.χ Oriel, Optical Radiation Corporation, Bosch, κ.λ.π.



Σχήμα 1.3. Οπτικό σύστημα του ηλιακού εξομοιωτή Spectrosun X-25 (a) και του αντίστοιχου της Ushio Electric (b): (1) ανακλαστήρας μεγάλης γωνίας, (2) λυχνία Ξένου υψηλής πίεσης, (3) επίπεδο κάτοπτρο, (4) μείκτης-ολοκληρωτής, (5) φίλτρο παρεμβολής, (6) φ/β στοιχεία υπό δοκιμή, (7) αντικειμενικός φακός [16].

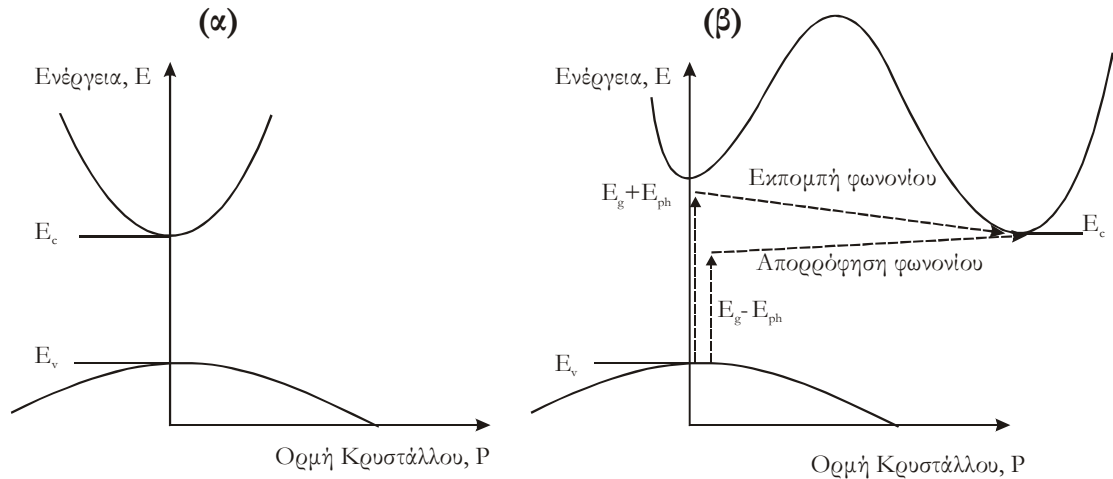
Γενικά η κατασκευή ενός καλού εξομοιωτή είναι δύσκολη και δαπανηρή, οπότε αυτό που πρέπει να εξεταστεί είναι οι απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής, για να επιλεγθεί ο κατάλληλος.

1.4. Βασικές αρχές της φωτοβολταϊκής μετατροπής

1.4.1 Απορρόφηση στους ημιαγωγούς

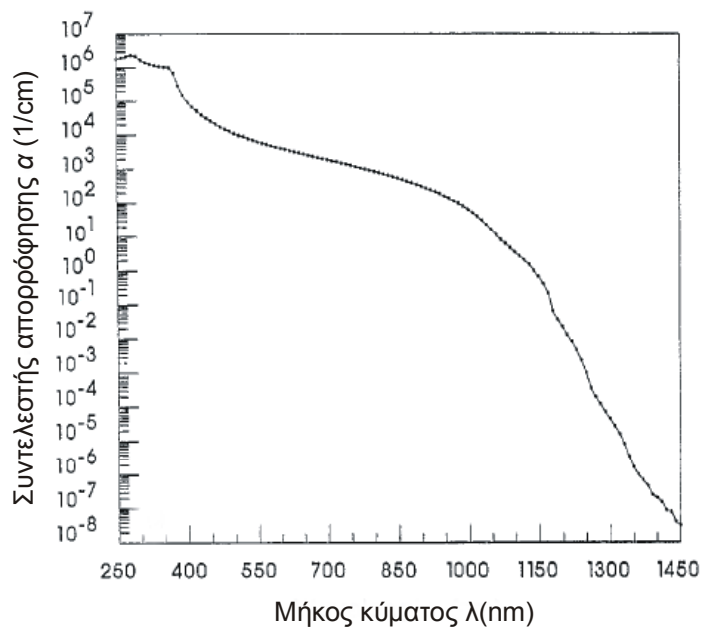
Για να επιτευχθεί η φωτοβολταϊκή μετατροπή, απαιτείται μετατροπή της ενέργειας των φωτονίων σε ηλεκτρική. Αυτό είναι εφικτό με τα ημιαγωγικά υλικά. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα στους ημιαγωγούς βασίζεται στην κίνηση ηλεκτρονίων και οπών. Το χαρακτηριστικό μέγεθος που καθορίζει την δυνατότητα απορρόφησης της ακτινοβολίας είναι το ενεργειακό χάσμα E_g του ημιαγωγού, το οποίο είναι η ενεργειακή διαφορά μεταξύ του ελαχίστου της ζώνης αγωγιμότητας (E_c) και του μέγιστου της ζώνης σθένους (E_v). Αν το ένα ακρότατο βρίσκεται ακριβώς κάτω από το άλλο, όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα της ενέργειας του κρυστάλλου συναρτήσει της ορμής του p (σχ. 1.4α) τότε το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού είναι άμεσο, ειδάλλως όταν το ελάχιστο της ζώνης αγωγιμότητας και το μέγιστο της ζώνης σθένους εμφανίζονται σε διαφορετικές τιμές της ορμής του κρυστάλλου, τότε λέγεται έμμεσο (σχ. 1.4β). Στην περίπτωση που ο ημιαγωγός διαθέτει άμεσο ενεργειακό διάκενο, (π.χ GaAs) τότε η E_g είναι η ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να έχει ένα φωτόνιο προκειμένου να διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, προκειμένου να δημιουργήσει ένα ζεύγος ηλεκτρονίου οπής. Στην περίπτωση που το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού είναι έμμεσο (π.χ Si), δεδομένου ότι η αρχή διατήρησης της ορμής προϋποθέτει ότι η ορμή του κρυστάλλου πρέπει να παραμένει αναλλοίωτη κατά την απορρόφηση του φωτονίου, για να μεταβεί ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους, απαιτείται αλλαγή στην ορμή του (σχ. 1.4β) η οποία μπορεί να δοθεί μέσω θερμικών ταλαντώσεων του πλέγματος, π.χ από ένα φωνόνιο ενέργειας (E_{ph}). Αυτή η διαδικασία, προϋποθέτει τη συμμετοχή δυο σωματιδίων, οπότε έχει σημαντικά χαμηλότερη πιθανότητα να συμβεί σε σχέση με την άμεση μετάβαση. Έτσι, το βασικό χαρακτηριστικό ενός ημιαγωγού αμέσου ενεργειακού διακένου είναι ότι αρκεί ένα πολύ λεπτό στρώμα αυτού για να αξιοποιηθεί το ωφέλιμο φάσμα, ενώ αντίθετα για τους ημιαγωγούς έμμεσου ενεργειακού διακένου απαιτείται πάχος πολλών δεκάδων μm για αποτελεσματική απορρόφηση.

Κεφάλαιο 1



Σχήμα 1.4. Ενεργειακό διάγραμμα ημιαγωγού αμέσου (α) και εμμέσου (β) ενεργειακού διακένου συναρτήσει της ορμής του κρυστάλλου P.

Όπως αναφέρθηκε πριν, το Si είναι ημιαγωγός εμμέσου ενεργειακού διακένου, οπότε στα μεγάλα μήκη κύματος έχει χαμηλό συντελεστή απορρόφησης, συνεπώς για αποτελεσματική απορρόφηση απαιτούνται λίγες εκατοντάδες μm πάχος υλικού. Αναλυτικές μετρήσεις του συντελεστή απορρόφησης για το πυρίτιο έχουν γίνει από τους Keever και Green [17] το 1995 οι οποίοι έχουν λάβει υπόψιν τους διαδικασίες απορρόφησης μέχρι 4 φωνονίων δίνοντας τη δυνατότητα υπολογισμών ακριβείας για τα μεγάλα μήκη κύματος. Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων φαίνονται στο επόμενο σχήμα (σχ. 1.5)



Σχήμα 1.5. Συντελεστής απορρόφησης για το κρυσταλλικό πυρίτιο βάσει πειραματικών μετρήσεων των Keever και Green[17].

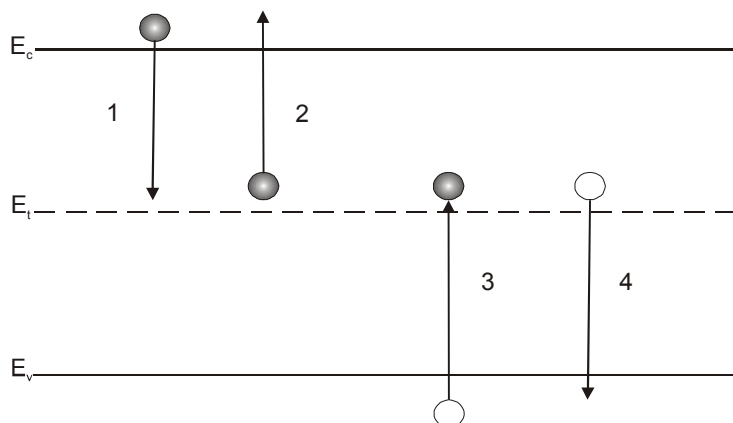
Να σημειωθεί ότι η εκτίμηση του συντελεστή απορρόφησης των Keevers και Green έγιναν με μεγάλη ακρίβεια στα μεγάλα μήκη κύματος με τη βοήθεια μετρήσεων του φωτορεύματος σε φ/β στοιχεία υψηλής απόδοσης.

1.4.2 Μηχανισμοί επανασύνδεσης

Όταν έχουμε δημιουργία φορέων σε ένα ημιαγωγό, με απορρόφηση φωτός ή οποιονδήποτε άλλο τρόπο, η θερμοδυναμική ισορροπία του ημιαγωγού διαταρράσσεται. Εφόσον η διέγερση σταματήσει, για να επιστρέψει ο κρύσταλλος στην ισορροπία, πρέπει οι φορείς αυτοί να επανέλθουν στη θεμελιώδη κατάσταση, όπου η ενέργειά του ελαχιστοποιείται. Αυτή η διαδικασία της επαναφοράς λέγεται επανασύνδεση. Οι βασικοί μηχανισμοί επανασύνδεσης είναι τρεις και θα αναλυθούν παρακάτω.

1.4.2.1 Επανασύνδεση μέσω παγίδων (Shockley-Read-Hall, SRH)

Είναι γνωστό ότι στους ημιαγωγούς υπάρχουν άτομα προσμίξεων σε μικρό ποσοστό το οποίο εξαρτάται από τις διαδικασίες επεξεργασίας του υλικού. Αυτά τα άτομα είναι δυνατό να δημιουργήσουν στάθμες με ενεργειακά επίπεδα μέσα στην απαγορευμένη ζώνη και ιδίως σε μεγάλη ενεργειακή απόσταση από τις ζώνες αγωγιμότητας και σθένους [18]. Αυτά τα επίπεδα που δημιουργούνται από τις προσμίξεις λέγονται «παγίδες» διότι δεσμεύουν τους ελεύθερους φορείς, οπότε καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την επανασύνδεση στο υλικό. Η θεωρία για το μηχανισμό αυτό διατυπώθηκε πρώτα από τους Shockley και Read [19] και από τον Hall [20] και συμπληρώθηκε λίγο αργότερα [21-22]. Το ακόλουθο σχήμα δείχνει τις μεταβάσεις των φορέων σε αυτή τη διαδικασία



Σχήμα 1.6. Επανασύνδεση μέσω ενδιάμεσων ενεργειακών σταθμών. Η γραμμές με ενεργειακές στάθμες E_c και E_v υποδηλώνουν τις ζώνες αγωγιμότητας και σθένους αντίστοιχα, ενώ ως E_t παριστάνεται η ενέργεια των «παγίδων».

Κεφάλαιο 1

Οι πιθανές διαδικασίες επανασύνδεσης για ένα ενεργειακό επίπεδο στο απαγορευμένο ενεργειακό διάκενο, όπως απεικονίζονται στο σχήμα 1.6 είναι οι ακόλουθες:

-Ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης αγωγιμότητας καταλήγει σε ένα μη κατηλειμμένο ενδιάμεσο ενεργειακό επίπεδο (1).

-Ένα ηλεκτρόνιο εκπέμπεται από ένα κατηλειμμένο ενδιάμεσο ενεργειακό επίπεδο στη ζώνη αγωγιμότητας (2).

-Μια οπή καταλαμβάνεται από ένα ελεύθερο ενδιάμεσο ενεργειακό επίπεδο (3)

-Μια οπή εκπέμπεται σε μια μη κατηλειμμένη θέση στη ζώνη σθένους (4).

Βάσει λοιπόν του μοντέλου αυτού, η σχέση που δίνει τον ρυθμό επανασύνδεσης U_{SRH} μέσω παγίδων είναι

$$U_{SRH} = \frac{N_t (pn - n_i^2)}{\frac{p + n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{KT}\right)}{C_n} + \frac{n + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{KT}\right)}{C_p}} \quad (1.2)$$

όπου N_t είναι η πυκνότητα των παγίδων, C_n ο συντελεστής παγίδευσης ηλεκτρονίων από μια μη κατηλειμμένη παγίδα, C_p ο συντελεστής παγίδευσης οπών από κατηλειμμένη παγίδα, E_i το ενδογενές επίπεδο Fermi (που σε θερμοκρασία δωματίου βρίσκεται περίπου στο μέσο του ενεργειακού διακένου), E_t το ενεργειακό επίπεδο των παγίδων και n_i η ενδογενής συγκέντρωση του ημιαγωγού. Η έκφραση (1.2) απλοποιείται σημαντικά όταν $p \gg n$ ή $n \gg p$. Έτσι για $n \gg p$, $n \gg n_i \exp[(E_t - E_i)/KT]$ και $n \gg n_i \exp[(E_t - E_i)/KT]$ ισχύει

$$U_{SRH} = N_t C_p p = \frac{p}{\tau_{pSRH}}, \quad \frac{1}{N_t C_p} = \tau_{pSRH} \quad (1.3)$$

Αντίστοιχα όταν $p \gg n$ ισχύει

$$U_{SRH} = N_t C_n n = \frac{p}{\tau_{nSRH}}, \quad \frac{1}{N_t C_n} = \tau_{nSRH} \quad (1.4)$$

Τα μεγέθη τ_{pSRH} και τ_{nSRH} είναι οι χρόνοι ζωής (lifetime) των φορέων μειονότητας λόγω της επανασύνδεσης μέσω παγίδων και ουσιαστικά παριστάνουν τις σταθερές χρόνου για θεωρούμενη εκθετική μείωση των φορέων μειονότητας στον ημιαγωγό (τύπου n ή p αντίστοιχα) όταν παύσει η εξωτερική διέγερση. Ο χρόνος ζωής των φορέων μειονότητας σε ένα υλικό ουσιαστικά καθορίζει την επανασύνδεση σε αυτό και μπορεί να μετρηθεί πειραματικά. Ο μηχανισμός επανασύνδεσης SRH είναι σημαντικός και για υλικά εμμέσου ενεργειακού διακένου όπως το Si.

1.4.2.2 Επανασύνδεση μέσω ακτινοβολίας

Η επανασύνδεση μέσω ακτινοβολίας συμβαίνει όταν ηλεκτρόνια μεταπίπτουν από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους καταλαμβάνοντας τις αντίστοιχες θέσεις των οπών. Αυτός ο μηχανισμός είναι ο ακριβώς αντίστροφος από την απορρόφηση που αναφέρθηκε πριν και ουσιαστικά είναι αποτέλεσμα της θερμοδυναμικής ισορροπίας, όπου ο ρυθμός γέννησης φορέων πρέπει να είναι ίσος με το ρυθμό επανασύνδεσής τους. Ο ρυθμός επανασύνδεσης U_R εξαρτάται ανάλογα από τον διαθέσιμο αριθμό ηλεκτρονίων και οπών στις ζώνες αγωγιμότητας και σθένους αντίστοιχα και δίνεται από τη σχέση [23]

$$U_R = C_R(np - n_i^2) \quad (1.5)$$

από όπου αντίστοιχα με την ενότητα 4.1.1 προκύπτουν οι χρόνοι ζωής των φορέων μειονότητας λόγω του μηχανισμού επανασύνδεσης από ακτινοβολία

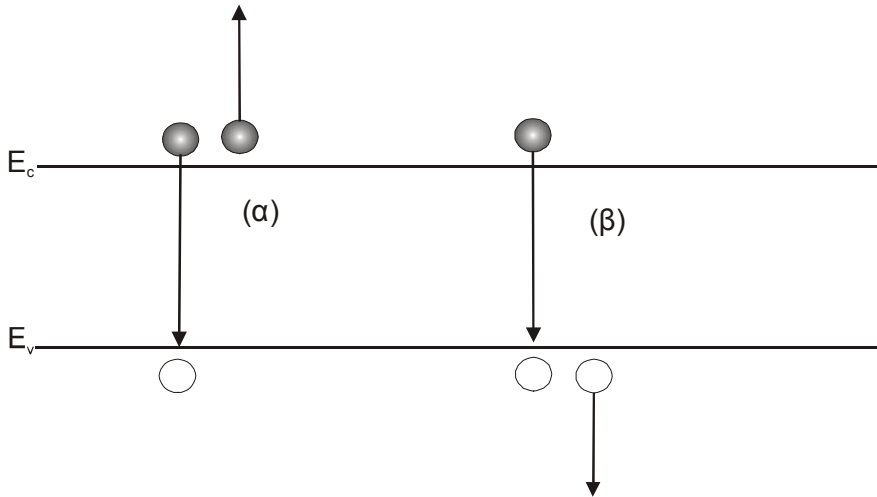
$$\tau_{nr} = \frac{1}{C_R p}, \quad \tau_{pr} = \frac{1}{C_R n} \quad (1.6)$$

όπου C_R σταθερά η οποία στο Si παίρνει την τιμή $5 \times 10^{15} \text{ cm}^3/\text{s}$ υπολογισμένη θεωρητικά [24], ενώ πειραματικά έχει βρεθεί λίγο μεγαλύτερη, $9.5 \times 10^{15} \text{ cm}^3/\text{s}$ [25]. Επειδή το πυρίτιο είναι ημιαγωγός εμμέσου ενεργειακού διακένου, ο μηχανισμός αυτός έχει μικρή πιθανότητα να συμβεί, διότι η μετάβαση ηλεκτρονίων από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους απαιτεί μεταβολή και της ορμής του σωματιδίου, ενώ έχει μεγάλη πιθανότητα να συμβεί στους ημιαγωγούς αμέσου ενεργειακού διακένου.

1.4.2.3 Επανασύνδεση Auger

Το φαινόμενο της επανασύνδεσης Auger παρατηρείται όταν ένα ηλεκτρόνιο μεταβιβάζει την πλεονάζουσα ενέργειά του σε ένα άλλο ηλεκτρόνιο της ζώνης αγωγιμότητας ή σθένους κατά τη διάρκεια της επανασύνδεσης, μεταφέροντας το έτσι σε ένα μεγαλύτερο ενεργειακό επίπεδο. Το διεγερμένο ηλεκτρόνιο απελευθερώνει την πλεονάζουσα ενέργειά του διαδοχικά με εκπομπή φωνονίων μετά από σειρά συγκρούσεων με το κρυσταλλικό πλέγμα, επιστρέφοντας στην αρχική του κατάσταση ισορροπίας. Η επόμενη εικόνα παριστάνει αυτές τις διαδικασίες.

Κεφάλαιο 1



Σχήμα 1.7. Επανασύνδεση Auger ζώνη με ζώνη όπου η πλεονάζουσα ενέργεια του φορέα δίνεται (α) σε ένα ηλεκτρόνιο της ζώνης αγωγιμότητας και (β) σε μια οπή της ζώνης σθένους.

Η διαδικασία επανασύνδεσης Auger είναι περισσότερο έντονη όταν υπάρχει υψηλή συγκέντρωση φορέων στη μια ή στις δυο ζώνες, δηλαδή στις περιπτώσεις υψηλά νοθευμένου ημιαγωγού ή υψηλής έγχυσης φορέων. Ο ρυθμός επανασύνδεσης εξαρτάται από το άθροισμα των αντίστοιχων ρυθμών για τις διαδικασίες του σχήματος 1.7. Σε υψηλά νοθευμένο ημιαγωγό θα υπερισχύει ένας από τους δυο, ενώ σε υψηλή έγχυση και οι δυο είναι έντονοι. Αναλυτικά, ο ρυθμός επανασύνδεσης Auger εκφράζεται από την παρακάτω σχέση

$$U_{Auger} = (C_{p0}p + C_{n0}n)(np - n_i^2) \quad (1.7)$$

όπου οι σταθερές C_{n0} και C_{p0} παίρνουν τις τιμές $2.8 \times 10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}$ και $9.9 \times 10^{-32} \text{ cm}^6/\text{s}$ [26]. Ο πρώτος όρος της (1.7) θα υπερισχύει για υλικό τύπου p και ο δεύτερος για υλικό τύπου n. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε τους χρόνους ζωής των φορέων μειονότητας για υλικό τύπου p

$$U_A = C_{p0}p^2n = \frac{n}{C_{p0}p^2} = \frac{n}{\tau_{nA}}, \quad \tau_{nA} = (C_{p0}p^2)^{-1} \quad (1.8)$$

και για υλικό τύπου n

$$U_A = C_{n0}n^2p = \frac{p}{C_{n0}n^2} = \frac{p}{\tau_{pA}}, \quad \tau_{pA} = (C_{n0}n^2)^{-1} \quad (1.9)$$

Κεφάλαιο 1

Οι τιμές των συντελεστών C_{p0} και C_{n0} ισχύουν με καλή ακρίβεια για υψηλή συγκέντρωση εγγεόμενων φορέων όπου δεν χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων οπών [27]. Έτσι για έγχυση φορέων της τάξης 10^{15} - 10^{16} cm^{-3} το άθροισμα των συντελεστών C_{p0} και C_{n0} παίρνει την τιμή 1.6×10^{-30} cm^6/s [28-29].

1.4.2.4 Επανασύνδεση εξαρτώμενη από το επίπεδο νόθευσης

Σύμφωνα με τους τρεις μηχανισμούς επανασύνδεσης που αναφέρθηκαν πριν, μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό χρόνο ζωής των φορέων βάσει της ακόλουθης σχέσης

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_A} \quad (1.10)$$

Ο χρόνος ζωής των φορέων εξαρτάται από τη νόθευση [18]. Γενικά για επίπεδα νόθευσης μικρότερα από 10^{17} cm^{-3} , ο επικρατέστερος μηχανισμός για το Si είναι ο SRH και μόνο όταν αυτά ξεπερνούν τα 10^{18} cm^{-3} η επανασύνδεση Auger παίζει το σημαντικότερο ρόλο. Αντίθετα, η επανασύνδεση μέσω ακτινοβολίας είναι αμελητέα. Για την περιοχή νόθευσης 10^{16} - 10^{18} cm^{-3} διαπιστώθηκε ότι η ακόλουθη εμπειρική σχέση του Kendall [30] προσεγγίζει με ικανοποιητικό ρυθμό το χρόνο ζωής

$$\tau = \frac{\tau_0}{1 + \frac{N_D}{7 \times 10^{15}}} \quad (1.11)$$

όπου τ_0 ο χρόνος ζωής στο καθαρό, ανόθευτο πυρίτιο και N_D το επίπεδο νόθευσης.

1.4.3 Μεταφορά φορέων

1.4.3.1 Εξισώσεις Μεταφοράς

Η κίνηση ηλεκτρονίων και οπών σε ένα ημιαγωγό, και συγκεκριμένα στο πυρίτιο, θεωρείται ότι είναι αποτέλεσμα δυο μηχανισμών, της ολίσθησης και της διάχυσης, οπότε το συνολικό ρεύμα ηλεκτρονίων και οπών, εκφράζεται με καλή προσέγγιση από τις σχέσεις [31]

Κεφάλαιο 1

$$J_n = e\mu_n nE + eD_n \nabla n \quad (1.12)$$

$$J_p = e\mu_p pE - eD_p \nabla p \quad (1.13)$$

όπου E είναι το ηλεκτρικό πεδίο, μ_n και μ_p είναι οι κινητικότητες των ηλεκτρονίων και οπών αντίστοιχα και e το στοιχειώδες φορτίο του ηλεκτρονίου. Τα μεγέθη D_n και D_p είναι οι συντελεστές διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών αντίστοιχα και υπολογίζονται από τις κινητικότητες με την εξίσωση του Einstein:

$$D_{n,p} = \mu_{n,p} \frac{KT}{e} \quad (1.14)$$

όπου K η σταθερά του Boltzmann και T η θερμοκρασία. Οι εξισώσεις (1.12)-(1.14) χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των φ/β στοιχείων στις περισσότερες καταστάσεις λειτουργίας τους. Εκεί που χρειάζεται περισσότερη ανάλυση είναι στις περιπτώσεις όπου οι κινητικότητες και σταθερές διάχυσης εξαρτώνται χωρικά στον ημιαγωγό, στα φαινόμενα υψηλής νόθευσης τα οποία επηρεάζουν άλλες παραμέτρους του υλικού και στον εκφυλισμό των φορέων. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτούνται πιο αναλυτικές σχέσεις.

1.4.3.2 Κινητικότητες φορέων μειονότητας και πλειονότητας

Οι πιο σημαντικές παράμετροι των εξισώσεων μεταφοράς που αναφέρθηκαν πριν είναι οι κινητικότητες των ηλεκτρονίων και των οπών. Βάσει πειραματικών μετρήσεων, οι κινητικότητες των φορέων εξαρτώνται από τη νόθευση του υλικού, το ηλεκτρικό πεδίο και τη θερμοκρασία. Επίσης υπάρχει μια ασθενής εξάρτηση από τον τύπο της νόθευσης (n ή p), όπως και από το είδος της πρόσμιξης (το στοιχείο που χρησιμοποιείται ως ιόν νόθευσης). Σχετικά πρόσφατα αποδείχθηκε επίσης ότι υπάρχει εξάρτηση από το αν ο εξεταζόμενος φορέας είναι μειονότητας ή πλειονότητας.

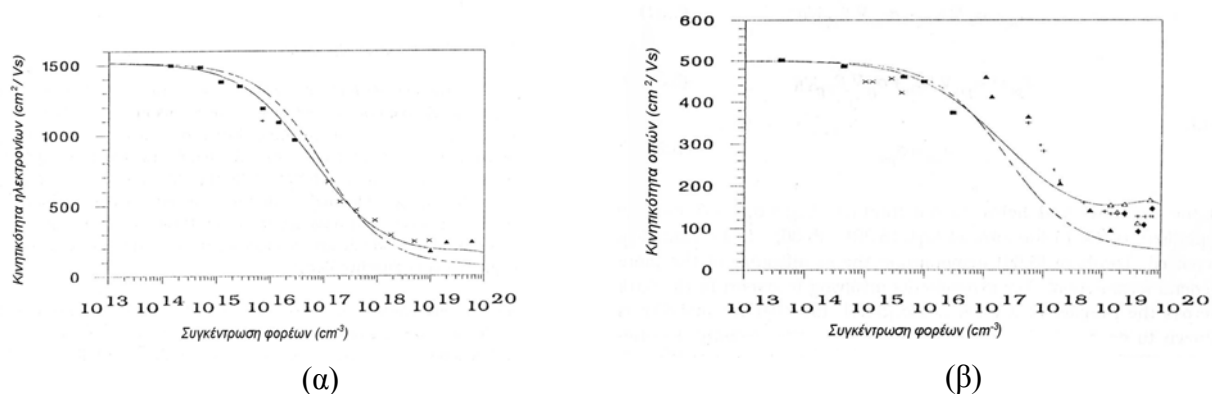
Από υπολογισμούς [32-33], προκύπτει ότι η κινητικότητα των φορέων πλειονότητας παραμένει ουσιαστικά σταθερή για επίπεδα νόθευσης μέχρι 10^{16} cm^{-3} , και για μεγαλύτερες νοθεύσεις πέφτει απότομα, κυρίως λόγω της σκέδασης από τους ιονισμένους φορείς. Επίσης, υπάρχει εξάρτηση αυτής από τη θερμοκρασία [34-35], αλλά αυτό δεν επηρεάζει την ανάλυση των φ/β στοιχείων αφού συνήθως λειτουργούν σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος.

Κεφάλαιο 1

Η κινητικότητα των φορέων πλειονότητας δίνει την δυνατότητα υπολογισμού της νόθευσης N ενός ημιαγωγού δεδομένης της ειδικής αντίστασής του ρ η οποία εκτιμάται πειραματικά μέσω της ακόλουθης απλής σχέσης

$$\rho = \frac{1}{e\mu N} \quad (1.15)$$

Στην μελέτη και κατασκευή ενός φ/β στοιχείου δίνεται περισσότερο βάρος στην κινητικότητα των φορέων μειονότητας δεδομένου ότι αυτοί συνεισφέρουν στο παραγόμενο ρεύμα. Αν και παλαιότερα είχε θεωρηθεί ότι ένας φορέας έχει την ίδια κινητικότητα για συγκεκριμένη νόθευση είτε είναι φορέας μειονότητας είτε πλειονότητας, αυτό στην πραγματικότητα δεν ισχύει και πρέπει να ληφθούν διάφορα φαινόμενα υπόψιν στον υπολογισμό τους. Το μοντέλο του Klaassen [36-37] δίνει λεπτομερείς υπολογισμούς για τις κινητικότητες φορέων μειονότητας και πλειονότητας και παραθέτει σύγκριση με πειραματικά στοιχεία. Το ακόλουθο σχήμα (σχ. 1.8) δείχνει τις κινητικότητες ηλεκτρονίων και οπών ως φορείς μειονότητας και πλειονότητας.

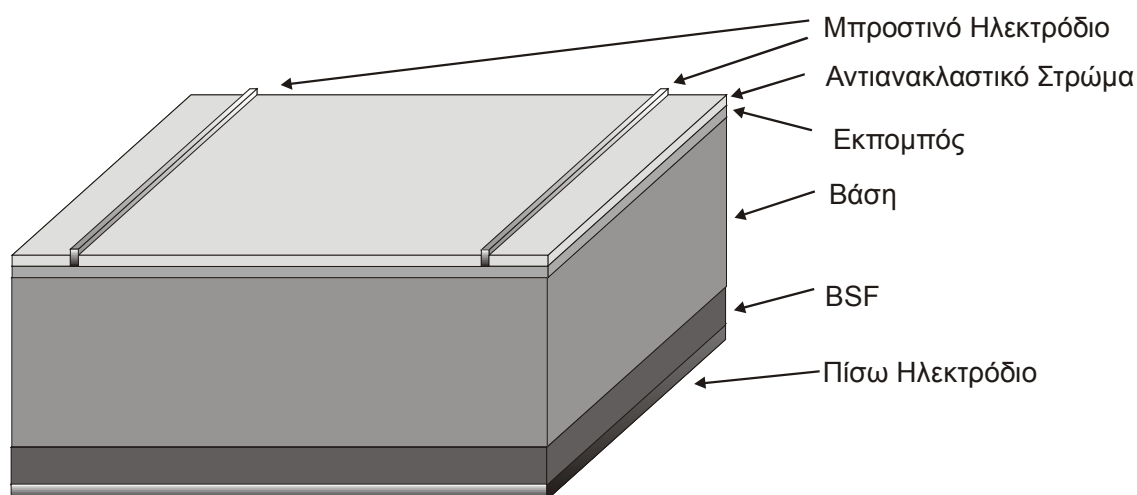


Σχήμα 1.8. Κινητικότητες ηλεκτρονίων και οπών ως φορείς μειονότητας και πλειονότητας (συνεχείς και διακεκομμένες γραμμές αντίστοιχα) βάσει του μοντέλου του Klaassen [36-37]. Τα σημεία που παρατίθενται αφορούν τις κινητικότητες των φορέων μειονότητας από τους Sproul (■) [38], Dzewior και Silber (X) [39] και Swirhun (▲) [40]. Επίσης απεικονίζεται και μια τιμή για CZ Si(+) [41].

Όπως παρατηρούμε, το μοντέλο αυτό είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα όσον αφορά τους υπολογισμούς για την κινητικότητα των ηλεκτρονίων, ενώ για την κινητικότητα των οπών υπάρχουν κάποιες σημαντικές αποκλίσεις όταν οι συγκεντρώσεις των φορέων είναι σχετικά υψηλές.

1.5 Δομή – Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το βασικό χαρακτηριστικό ενός τυπικού φ/β στοιχείου είναι μια δίοδος από ημιαγωγό τύπου pn όπου εκεί δημιουργούνται οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος λόγω της ακτινοβολίας. Μια τυπική δομή τέτοιου στοιχείου φαίνεται στο σχ. 1.9. Αποτελείται από μια λεπτή επιφάνεια στον ημιαγωγό έντονα νοθευμένη (τύπου n) που λέγεται εκπομπός, όπου εισέρχεται η ακτινοβολία και συνεχίζει σε ένα άλλο στρώμα τύπου p, τη βάση ικανού πάχους ώστε να απορροφά όσο δυνατόν περισσότερη ακτινοβολία του φάσματος. Υπάρχει επίσης ένα στρώμα τύπου p⁺ που βοηθά στη μείωση της επανασύνδεσης των φορέων στην πίσω επιφάνεια (BSF, Back Surface Field), ενώ ηλεκτρόδια στην μπροστινή και πίσω επιφάνεια συλλέγουν το ρεύμα. Επίσης μια αντιανακλαστική επίστρωση βοηθά στην καλύτερη απορρόφηση του ηλιακού φάσματος.



Σχήμα 1.9. Βασική δομή τυπικού φ/β στοιχείου.

Η συγκεκριμένη δομή φ/β στοιχείων είναι τυπική και παρακάτω θα αναλυθεί ως προς τα ηλεκτρικά της χαρακτηριστικά.

1.5.1 Ηλεκτρικό ισοδύναμο

Ένα φ/β στοιχείο, όπως αναφέρθηκε και πριν είναι ουσιαστικά μια επαφή pn, οπότε στην ιδανική περίπτωση και όταν δεν φωτίζεται, η χαρακτηριστική τάσεως ρεύματος αυτής είναι της μορφής $I \sim \exp(eV/KT) - 1$. Στην περίπτωση πρόσπτωσης

Κεφάλαιο 1

ακτινοβολίας, προστίθεται μια συνιστώσα ρεύματος που οφείλεται στους παραγόμενους φορείς, η οποία όταν το φ/β στοιχείο βραχυκυκλωθεί παίρνει την τιμή I_{sc} . Έτσι, η ιδανική χαρακτηριστική εκφράζεται από τη σχέση

$$I = I_{sc} - I_{01} [\exp(eV / KT) - 1] \quad (1.23)$$

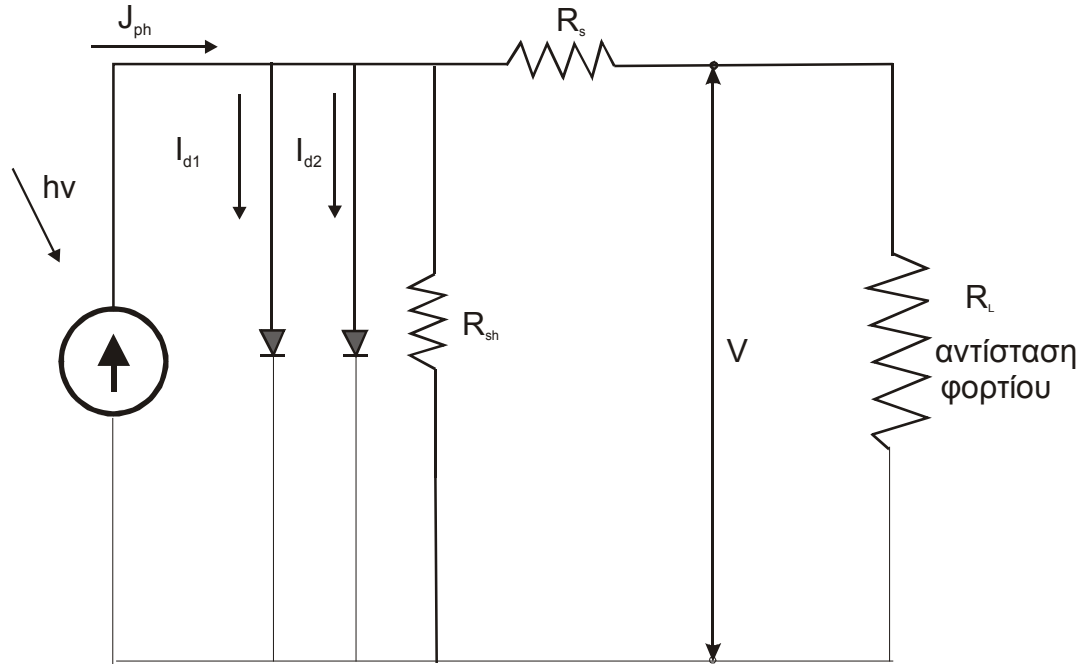
όπου I_{01} είναι το ρεύμα σκότους κορεσμού της διόδου p-n και η τιμή του δίνεται από τη σχέση [42]

$$I_0 = \frac{eD_n n_i^2}{L_n N_A} + \frac{eD_p n_i^2}{L_p N_D} \quad (1.24)$$

όπου L_n, L_p είναι τα μήκη διάχυσης των φορέων μειονότητας και N_A, N_D τα επίπεδα νόθευσης των αντίστοιχων περιοχών. Μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση, προκύπτει αν λάβουμε υπόψιν την αντίσταση σειράς (R_s) του στοιχείου που οφείλεται στις ωμικές απώλειες στον ημιαγωγό και στις ηλεκτρικές επαφές του στοιχείου και την παράλληλη αντίσταση (R_p) που οφείλεται κυρίως σε ρεύματα διαρροής κατά μήκος της ένωσης λόγω κρυσταλλικών ατελειών. Επίσης, η απλή εκθετική σχέση όπως εκφράζεται από την (1.23) δεν εξηγεί επαρκώς τη χαρακτηριστική IV ενός πραγματικού φ/β στοιχείου κυρίως για μικρές τιμές της τάσης V (στην περιοχή 0.1-0.5V περίπου). Δεδομένου ότι αυτή η περιοχή είναι χρήσιμη στην ανάλυση αυτών των διατάξεων, μπορεί να θεωρηθεί με καλή προσέγγιση ότι το ηλεκτρικό μοντέλο ενός φ/β στοιχείου αποτελείται από 2 διόδους (σχ. 1.10). Συνεπώς η χαρακτηριστική που προκύπτει, λαμβάνοντας όλες αυτές τις παραμέτρους δίδεται από την έκφραση

$$I(V) = I_{01} \left[\exp\left(\frac{V - IR_s}{n_1 V_T}\right) - 1 \right] + I_{02} \left[\exp\left(\frac{V - IR_s}{n_2 V_T}\right) - 1 \right] + \frac{V - IR_s}{R_p} \quad (1.25)$$

όπου $V_T = KT/q$ και n_1, n_2 οι συντελεστές ιδανικότητας των διόδων.



Σχήμα 1.10. Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός μη ιδανικού φ/β στοιχείου.

Ουσιαστικά, ο δεύτερος εκθετικός όρος στην σχέση (1.24) οφείλεται στην ανασύνδεση SRH που παρατηρείται στην περιοχή φορτίου χώρου, δηλαδή στην περιοχή της ένωσης. Ο όρος I_{02} είναι η συνεισφορά στο ρεύμα ανασύνδεσης που οφείλεται στην περιοχή φορτίου χώρου και μπορεί να εκφραστεί μέσω της σχέσης

$$I_{02} = \frac{KT\pi n_i}{\tau_0 E_{max}} \quad (1.26)$$

όπου E_{max} είναι το μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο στην ένωση p-n και τ_0 ο χρόνος ζωής των φορέων μειονότητας θεωρώντας 1 ενδιάμεση στάθμη στην περιοχή φορτίου χώρου. Γενικά ισχύει ότι $n_2=2$ και $n_1=1$ βάσει θεωρητικών υπολογισμών, αν και στην πράξη αυτές οι τιμές μπορεί να διαφέρουν. Η μελέτη της χαρακτηριστικής I-V χωρίς φωτισμό μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για την επανασύνδεση στην περιοχή φορτίων χώρου.

1.5.2 Η χαρακτηριστική τάσεως – ρεύματος (I-V) ενός φ/β στοιχείου

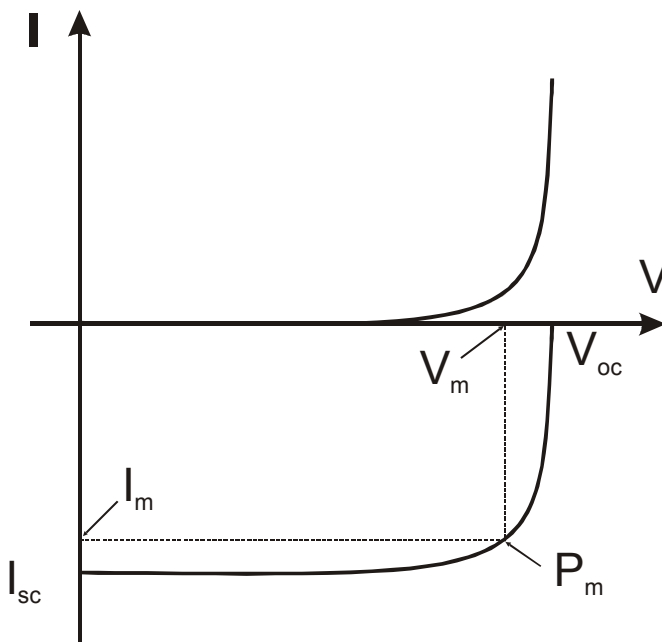
Είναι γνωστό ότι ένα φ/β στοιχείο είναι μια δίοδος ημιαγωγού η οποία λειτουργεί με οπτική διέγερση από το ηλιακό φως και δημιουργούνται ζεύγη

Κεφάλαιο 1

ηλεκτρονίων οπών, οπότε η διάταξη παράγει κάποιο ρεύμα που τροφοδοτεί το αντίστοιχο φορτίο. Όταν το στοιχείο δεν φωτίζεται, η χαρακτηριστική του (σκότους), έχει τη μορφή της αντίστοιχης μιας ιδανικής διόδου p-n, όπως εκφράζεται από τη σχέση (1.23) ή (1.25) στην μη ιδανική περίπτωση. Αντιθέτως, όταν φωτίζεται, οι δημιουργούμενοι φορείς λόγω της διέγερσης, παράγουν ένα ρεύμα, αντίθετο σε πρόσημο σε σχέση με τη μη φωτισμένη περίπτωση. Στο σχήμα 1.11 φαίνονται οι τυπικές χαρακτηριστικές ενός ιδανικού φ/β στοιχείου. Αν συνδέσουμε μηδενικό φορτίο, δηλαδή βραχυκυκλώσουμε το στοιχείο, το ρεύμα που λαμβάνουμε είναι το ρεύμα βραχυκυκλώματος J_{sc} το οποίο εξαρτάται από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, που για συνθήκες φωτισμού AM1.5, θεωρώντας αμελητέες απώλειες μετατροπής είναι περίπου 44 mA/cm^2 (για διαδικασία απορρόφησης με συμμετοχή ενός φωνονίου) [43]. Αντίθετα, όταν το το φορτίο είναι αποσυνδεδεμένο, η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα της διάταξης λέγεται τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}), η οποία υπολογίζεται από την (1.23) θέτοντας $J=0$ και εκφράζεται ακολούθως

$$V_{oc} = \frac{KT}{e} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_{01}} + 1\right) \quad (1.27)$$

Επειδή ο όρος J_{01} είναι πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερος από το ρεύμα βραχυκλώματος J_{sc} η μονάδα στο όρισμα του λογαρίθμου μπορεί να παραλειφθεί. Προφανώς όσο πιο μικρό είναι το ρεύμα σκότους κορεσμού (J_{01}), τόσο μεγαλύτερη τάση ανοιχτού κυκλώματος επιτυγχάνεται και γι' αυτό τα φ/β στοιχεία υψηλής απόδοσης σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε αυτό να είναι ελάχιστο.



Σχήμα 1.11. Χαρακτηριστικές I-V τυπικού φ/β στοιχείου.

Κεφάλαιο 1

Επειδή ένα φ/β στοιχείο λειτουργεί ως γεννήτρια παραγωγής ρεύματος, αυτό που απαιτείται από τις εφαρμογές είναι η αξιοποίησή του στο σημείο παραγωγής της μέγιστης ισχύος του. Έτσι, αν V_m και I_m είναι η τάση και το ρεύμα του στοιχείου στο σημείο όπου αποδίδεται η μέγιστη ισχύς P_m , τότε μπορούμε να ορίσουμε τον παράγοντα πλήρωσης (Fill Factor, FF) ως το λόγο της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (που δίδεται από το γινόμενο $V_m I_m$) προς το μέγεθος $V_{oc} I_{sc}$, δηλαδή με την ακόλουθη σχέση

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1.28)$$

Το μέγεθος αυτό ονομάζεται έτσι επειδή απεικονιζόμενο γραφικά (σχ. 1.11) δείχνει πόση επιφάνεια κάτω από την χαρακτηριστική I-V γεμίζεται από το ορθογώνιο εμβαδού $V_m I_m$ σε σχέση με το αντίστοιχο εμβαδού $V_{oc} I_{sc}$. Η τιμή του παράγοντα πλήρωσης συνήθως κυμαίνεται στην περιοχή τιμών από 0,75-0,85 και εξαρτάται σημαντικά από την αντίσταση σειράς του στοιχείου.

Τέλος, το μέγεθος που ενδιαφέρει περισσότερο σε ένα φ/β στοιχείο από τα χαρακτηριστικά του είναι η απόδοσή του η οποία ορίζεται ως το λόγο της μέγιστης παραγόμενης ισχύος ως προς την προσπίπτουσα:

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{in}} = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \quad (1.29)$$

Η καλύτερη τιμή που έχει επιτευχθεί μέχρι σήμερα για φ/β (μονοκρυσταλλικού) πυριτίου είναι 24.7% για συνθήκες ακτινοβολίας AM1.5 και κατασκευάστηκε στα εργαστήρια του UNSW στην Αυστραλία [44].

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Sopori B., *10th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cell Materials and Processes*, Αύγουστος 2000, σελ. 1.
- [2] Becquerel A. E., *Compt. Rendus de L' Academie des Sciences*, τόμος 9, 1839, σελ. 561.
- [3] Adams W. και Day R., *Proc. Roy. Soc.*, Τόμος A 25, 1877, σελ. 113.
- [4] Shockley W., *Bell Syst. Tech. Journ.*, Τόμος 28, 1949, σελ. 435.
- [5] Bardeen J και Brattain W.H., *Phys. Rev.*, Τόμος 74, 1948, σελ. 230.
- [6] Chapin D. M., Fuller C. S. και Pearson G. L., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 25, 1954, σελ. 676.
- [7] Hamakawa Y., *Proc. Of Material Research Soc.*, Τόμος 49, 1985, σελ. 23.
- [8] Stafford B. L. et al., *21st IEEE PV Spec. Conf.*, Kissimmee, Florida, USA, 1990, σελ. 1409.
- [9] Hedström J. et al. *23rd IEEE PV Spec. Conf., Louisville, Kentucky, USA, 1993*, σελ. 372.
- [10] Mitchel K. W. et al., *Solar Cells*, Τόμος 23, 1988, σελ. 49.
- [11] Skorp J. et al., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 37, 1990, σελ. 434.
- [12] Tobin S. P. et al., *21st IEEE PV Spec. Conf.*, Kissimmee, Florida, USA, 1990, σελ. 158.
- [13] Strobl G. et al., *3rd WCPEC*, Osaka, Japan, 2003.
- [14] Grätzel M., *Proc. Indian Acad. Sci.*, Τόμος 107(6), 1995, σελ. 607.
- [15] Hagfeldt A. και Grätzel M., *Chem. Rev.*, Τόμος 95, 1995, σελ. 49.
- [16] Koltun M., *Sol. Energy Mat. & Sol. Cells*, Τόμος 36, 1994, σελ. 51.
- [17] Keevers M. J., Green M. A., *Sol. Energy Mat. & Sol. Cells*, Τόμοι 41/42, 1996, σελ. 195.
- [18] Goetzberger A., Knobloch J., Voss B., *Crystalline Silicon Solar Cells*, John Wiley and Sons, 1998, κεφ. 3.
- [19] Shockley W. και Read W. T., *Phys. Rev.*, Τόμος 87, 1952, σελ. 835.
- [20] Hall R. N., *Phys. Rev.*, Τόμος 83, 1951, σελ. 228.
- [21] Sah C. T. και Shockley W., *Phys. Rev.*, Τόμος 109, 1957, σελ. 109.
- [22] Sah C. T. et al., *Solid State Electron.*, Τόμος 13, 1970, σελ. 759.
- [23] Green M. A., *Silicon Solar Cells*, κεφ. 5.

- [24] Wasserab, T., *Zeitschrift für Metallkunde*, Τόμος 33a, 1978, σελ. 1097.
- [25] Schlagenotto, H., Maeder H. και Gerlach W., *Physica Status Solidi*, Τόμος 21a, 1974, σελ. 357.
- [26] Dziewior J. και Schmid W., *Appl. Phys. Lett.*, Τόμος 31, 1977, σελ. 346.
- [27] Häcker R., και Hangleiter A., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 75, 1994, σελ. 7570.
- [28] Sinton R. A., Kwart Y., και Swanson R. M., *14th Project Integration Meeting, Photovoltaic Concentrator Technology Project*, 1986, σελ. 117.
- [29] Yablonovitch E., Alara D. L., Chang C. C, Gmitter T. και Bright T. B., *Phys. Rev. Lett.*, Τόμος 57, 1986, σελ. 249.
- [30] Rohatgi A. *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 31, 1984, σελ. 597.
- [31] Shockley W., *Electrons and Holes in Semiconductors*, Van Nostrand, New York, 1950.
- [32] Thurber W. R., Mattis R. L., Liu Y. M., και Filliben J. J., *J. of the Electrochemical Society*, Τόμος 31, 1984, σελ. 597.
- [33] Thurber W. R., Mattis R. L., Liu Y. M., και Filliben J. J., *J. of the Electrochemical Society*, Τόμος 31, 1984, σελ. 2291.
- [34] Green M. A., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 67, 1990, σελ. 2944.
- [35] Misiakos K., και Tsamakidis D., *Appl. Phys. Lett.*, Τόμος 64, 1994, σελ. 2007.
- [36] Klaassen D.B.M., *Solid-State Electron.*, Τόμος 35, 1992, σελ. 953.
- [37] Klaassen D.B.M., *Solid-State Electron.*, Τόμος 35, 1992, σελ. 961.
- [38] Sproul A. B., Green M. A. και Stephens A. W., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 72, 1992, σελ. 4161.
- [39] Dziewior J. και Silber D., *Appl. Phys. Lett.*, Τόμος 35, 1979, σελ. 170.
- [40] Swirhun S.E., Kwart H. και Swanson R. M., *IEDM Tech. Dig.*, 1986, σελ. 24.
- [41] Stephens W. A., και Green M.A., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 74, 1993, σελ. 6212.
- [42] Goetzberger A., Knobloch J., Voss B. *Crystalline Silicon Solar Cells*, John Wiley and Sons, 1998, κεφ. 4.
- [43] Green M. A., *Silicon Solar Cells*, κεφ. 7.
- [44] Zhao J., Wang A. και Green M. A., *Progr. In Photovoltaics*, Τόμος 7, 1999, σελ. 471.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

2.1 Βασικές παράμετροι της έρευνας των φ/β στοιχείων πυριτίου

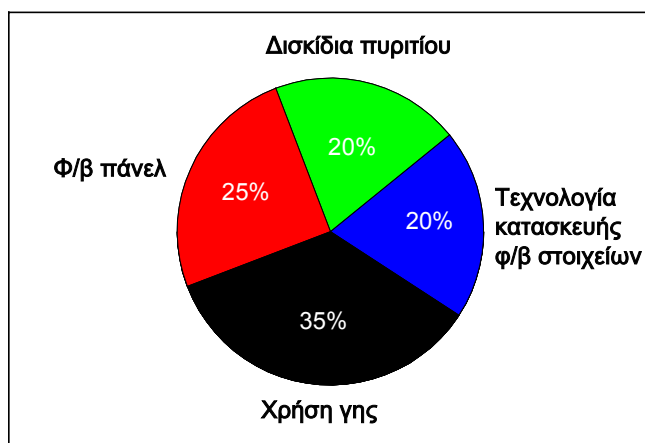
Προκειμένου η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών στοιχείων να είναι ανταγωνιστική, ένας βασικός στόχος που πρέπει να επιτευχθεί είναι το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας να παραμείνει όσο γίνεται πιο χαμηλό. Για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός έχουν αναπτυχθεί οι ακόλουθες 3 βασικές μέθοδοι προσέγγισης:

- Ανάπτυξη νέων τύπων φ/β στοιχείων που έχουν σημαντικά χαμηλότερο κόστος παραγωγής. Τέτοιες περιπτώσεις είναι οι διατάξεις μικροκρυσταλλικού πυριτίου και λεπτών φιλμ.
- Μείωση του κόστους επεξεργασίας όπως και της ποσότητας του χρησιμοποιούμενου υλικού. Αυτό το στάδιο αφορά κυρίως τη βιομηχανία.
- Ανάπτυξη φ/β διατάξεων υψηλότερης απόδοσης.

Το τρίτο σημείο είναι αυτό που θα αναπτύξουμε περισσότερο, καθώς προς αυτή την κατεύθυνση κινείται η παρούσα διατριβή. Όπως είναι επόμενο, για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση χρειάζεται υλικό πολύ καλής ποιότητας και αντίστοιχα η επεξεργασία του απαιτεί εξοπλισμό ακριβής τεχνολογίας. Η εξέλιξη όμως των διεργασιών της μικροηλεκτρονικής, έχει μειώσει σημαντικά το κόστος παραγωγής των δισκιδίων πυριτίου και ήδη η εταιρία Topsil διαθέτει ειδικά για φ/β διατάξεις τέτοια δισκίδια υψηλής καθαρότητας σε λογικό κόστος με την εμπορική ονομασία PV-FZ [1], με τα οποία είναι δυνατό να κατασκευαστούν δομές με υψηλή απόδοση (πάνω από 20%). Επιπλέον, οικονομικές μελέτες έχουν δείξει ότι αύξηση της απόδοσης των φ/β διατάξεων μιας μεγάλης συστοιχίας κατά 40% (σχετική) οδηγεί σε συνολική μείωση του κόστους κατά 20% [2] παρά το γεγονός ότι οι δαπάνες κατασκευής των φ/β στοιχείων είναι μεγαλύτερες. Ένας λόγος που συμβάλλει σε αυτό και αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που διαμορφώνουν το συνολικό κόστος

Κεφάλαιο 2

εγκατάστασης μιας φ/β συστοιχίας, είναι η χρήση γης, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα [3].



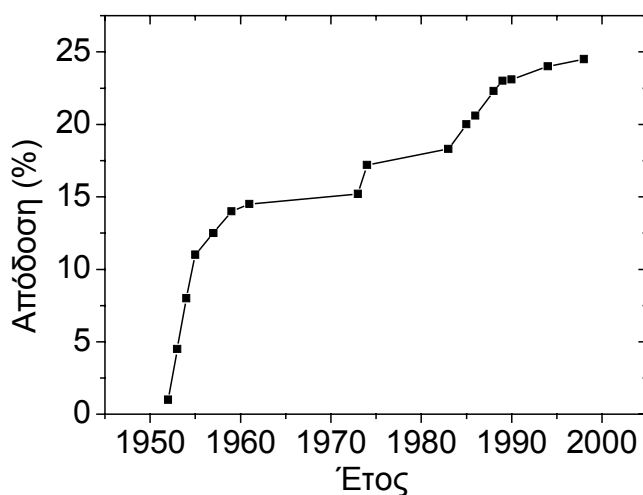
Σχήμα 2.1. Βασικοί παράμετροι που καθορίζουν το κόστος κατασκευής μιας φ/β συστοιχίας..

Συνεπώς, ένα πολύ μεγάλο μέρος της έρευνας πάνω στις φ/β διατάξεις επικεντρώνεται πάνω στην αύξηση της απόδοσης και αυτό φαίνεται από το ακόλουθο διάγραμμα (σχ. 2.2). [4]. Η μορφή του διαγράμματος 2.2 δείχνει ότι σε ορισμένες χρονικές περιόδους υπήρξαν απότομες μεταβολές στην απόδοση. Κάθε μια από αυτές τις μεταβολές οφείλεται στην ανακάλυψη νέων σχεδιαστικών καινοτομιών ή βελτίωση της τεχνολογίας κατασκευής, η οποία βελτιώνεται σταδιακά μέχρι την ανακάλυψη νέας. Ήδη από το 1980 και ύστερα, η έρευνα επικεντρώθηκε στην επίτευξη υψηλών αποδόσεων δεδομένης της εξέλιξης της μικροηλεκτρονικής, που οδήγησαν σε αποδόσεις μετατροπής κοντά στο θεωρητικό μέγιστο.

Ένας σημαντικός τομέας αξιοποίησης των φ/β διατάξεων πολύ υψηλής απόδοσης είναι τα συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας, τα οποία διαθέτουν ειδικούς φακούς και κάτοπτρα προκειμένου να εστιάζουν το φως του ήλιου. Σε αυτή την περίπτωση, οι φ/β διατάξεις καταλαμβάνουν πολύ μικρή επιφάνεια σε σχέση με τη συνολική του συστήματος, οπότε το κόστος κατασκευής τους επηρεάζει ελάχιστα το συνολικό. Συνεπώς για τέτοιες εφαρμογές είναι συμφέρουσα η χρησιμοποίηση φ/β διατάξεων με τη μέγιστη δυνατή απόδοση. Έτσι, προκειμένου να αξιοποιηθεί καλύτερα

Κεφάλαιο 2

η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, είναι σημαντικό τα φ/β στοιχεία να αποδίδουν τα βέλτιστα.



Σχήμα 2.2. Εξέλιξη της μέγιστης εργαστηριακής απόδοσης φ/β διατάξεων πυριτίου [4].

Συγκεκριμένα, μια τεχνικοοικονομική μελέτη από τον Swanson [5] που συνέκρινε διαφορετικά συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας και συμβατικά, δείχνει ότι ένα τέτοιο σύστημα με εγκατεστημένη ισχύ στην περιοχή των 100kW-10MW σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία (έρημος στο Albuquerque, Μεξικό), μπορεί στο κοντινό μέλλον να παράγει ηλεκτρική ενέργεια με τελικό κόστος 7-9 cents/kwh, αρκετά χαμηλότερα από οποιαδήποτε άλλη λύση τυπικής φ/β εγκατάστασης. Για την περίπτωση αυτή, το χαμηλότερο κόστος της παραγόμενης κιλοβατώρας (6 cents) προέρχεται από σύστημα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας με φ/β στοιχεία από GaAs, απόδοσης 33,2%, παρόλο που το κόστος κατασκευής τέτοιων διατάξεων είναι το υψηλότερο (μέχρι 100.000 \$/m²) και αυτά προορίζονταν μόνο για διαστημικές εφαρμογές. Αντίστοιχα συστήματα με διατάξεις πυριτίου απόδοσης 26% και κόστους (μέχρι 20.000 \$/m²) είχαν επίσης χαμηλό κόστος παραγόμενης ενέργειας (9 cents/kwh). Από την άλλη πλευρά, για τα συμβατικά συστήματα στοιχείων λεπτών φιλμ (thin-film) με πολύ μικρό κόστος κατασκευής (μέχρι 30 \$/m²) η τιμή της παραγόμενης κιλοβατώρας εκτιμήθηκε μεγαλύτερη συγκριτικά με τα προαναφερθέντα συστήματα

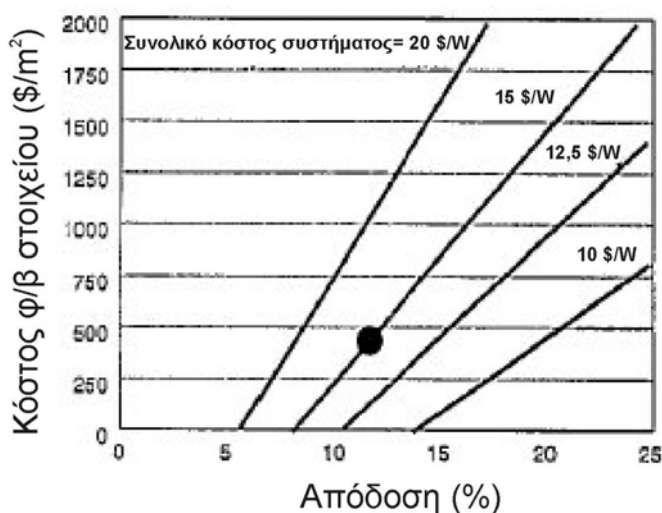
Κεφάλαιο 2

(περίπου 10 cents/kwh). Αντίθετα, όπως θα ήταν αναμενόμενο, σε μικρές εγκαταστάσεις (2-100kW) τα συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας έχουν μεγαλύτερο κόστος παραγόμενης ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά λεπτόν φιλμ.

Μια τυπική απλουστευμένη οικονομική ανάλυση από τον Wettling [6] υπολογίζει το συνολικό κόστος μιας φ/β εγκατάστασης λαμβάνοντας υπόψη τις βασικές παραμέτρους που συνεισφέρουν σε αυτό. Έτσι, βάσει της θεωρήσης αυτής, το ολικό κόστος ενός φ/β συστήματος απαρτίζεται από το κόστος του στοιχείου, C_{cell} , το κόστος που σχετίζεται με την συνολική ισχύ του συστήματος και αφορά τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις και τον αντίστοιχο εξοπλισμό, C_{syspow} , (ασφάλειες, σύνδεσμοι κλπ.) και τέλος το κόστος που αναλογεί στη χρήση γης του συστήματος, $C_{sysarea}$, (π.χ οικόπεδο εγκατάστασης και προετοιμασία αυτού προς χρήση, γυαλί και πλαίσια για την εγκατάσταση των στοιχείων, συντήρηση και τεχνικός έλεγχος κλπ.). Όλα αυτά εκφράζονται (σε $\$/W$) συνοπτικά με την ακόλουθη σχέση

$$C_{total} [\$/W] = C_{cell} [\$/W] + C_{syspow} [\$/W] + C_{sysarea} [\$/m^2] \quad (2.1)$$

ο τελευταίος όρος στο δεξί μέλος της (1) μπορεί να αναχθεί στις μονάδες των $\$/W$, μετά από διαίρεση με την ηλιακή σταθερά $C_{sol}=1000 \text{ W/m}^2$ (που αντιστοιχεί στην ισχύ του φάσματος AM1.5G) και την απόδοση του στοιχείου (η). Η υλοποίηση της (2.1) φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα



Σχήμα 2.3. Συσχέτιση του κόστους των φ/β στοιχείων με την απόδοσή τους με παράμετρο το συνολικό κόστος του συστήματος [6].

Κεφάλαιο 2

Ως παράδειγμα εφαρμογής της ανωτέρω σχέσης, προκύπτει ότι για φ/β σύστημα με απόδοση μετατροπής 12%, το συνολικό κόστος του συστήματος είναι 15\$/W αν υποθεθεί ότι η αξία των φ/β διατάξεων είναι 4\$/W και της χρήσης γης $C_{sysarea}=960\$/m^2$ ή 8\$/W. Τα δεδομένα αυτά απεικονίζονται με τη μεγάλη κουκκίδα του σχήματος 2.3. Από το σχήμα αυτό επιπλέον προκύπτει ότι αν η απόδοση των φ/β στοιχείων είναι αρκετά μικρή (κοντά στο 5%) ακόμη και αν αυτά είχαν μηδενική τιμή αγοράς, το κόστος του συστήματος δεν θα έπεφτε κάτω από τα 20\$/W. Αντιθέτως, είναι προφανές ότι αν αυξηθεί η απόδοση των φ/β στοιχείων χωρίς αντίστοιχη άνοδο του κόστους τους, η συνολική παραγόμενη ενέργεια από το σύστημα θα είναι περισσότερο οικονομικά συμφέρουσα.

Μια άλλη πρόσφατη ανάλυση από τους Vedde et al. [1] συγκρίνει το συνολικό κόστος (σε \$/W) 2 διαφορετικών συστημάτων, εκ των οποίων το ένα αποτελείται από τυπικά φ/β στοιχεία απόδοσης 15% κατασκευασμένα από δισκία μονοκρυσταλλικού πυριτίου παρασκευασμένα με τη μέθοδο Czochralski και το άλλο από διατάξεις υψηλής απόδοσης τα οποία κατασκευάστηκαν σε δισκία κρυσταλλικού πυριτίου υψηλότερης ποιότητας, τα PV-FZ της Topsisil που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς τους, το σύστημα με τα φ/β στοιχεία υψηλής απόδοσης είχε χαμηλότερο κόστος (υπολογιζόμενο σε \$/W) σε σχέση με το άλλο. Στην ανάλυσή τους είχαν υποθέσει ότι οι φ/β διατάξεις υψηλής απόδοσης κόστιζαν συγκριτικά 1,5 φορά περισσότερο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτει ότι η βελτιστοποίηση των φ/β στοιχείων ως προς την απόδοση, μπορεί να είναι οικονομικά συμφέρουσα παρά το υψηλότερο κόστος κατασκευής τους. Από την άλλη πλευρά η συνεχής εξέλιξη των διεργασιών μικροηλεκτρονικής βοηθά στην συρρίκνωση του κόστους των φ/β διατάξεων καλής απόδοσης.

2.2 Μηχανισμοί απωλειών σε ένα φ/β στοιχείο

Η βασική ιδέα για την επίτευξη υψηλής απόδοσης σε ένα φ/β στοιχείο είναι η ελαχιστοποίηση των συνολικών απωλειών που υφίστανται σε αυτό. Στο σχήμα 2.4 φαίνονται παραστατικά οι διαδικασίες μετατροπής που πραγματοποιούνται σε ένα φ/β στοιχείο πυριτίου [6]. Το προσπίπτον φως ανακλάται μερικώς από την επιφάνεια του

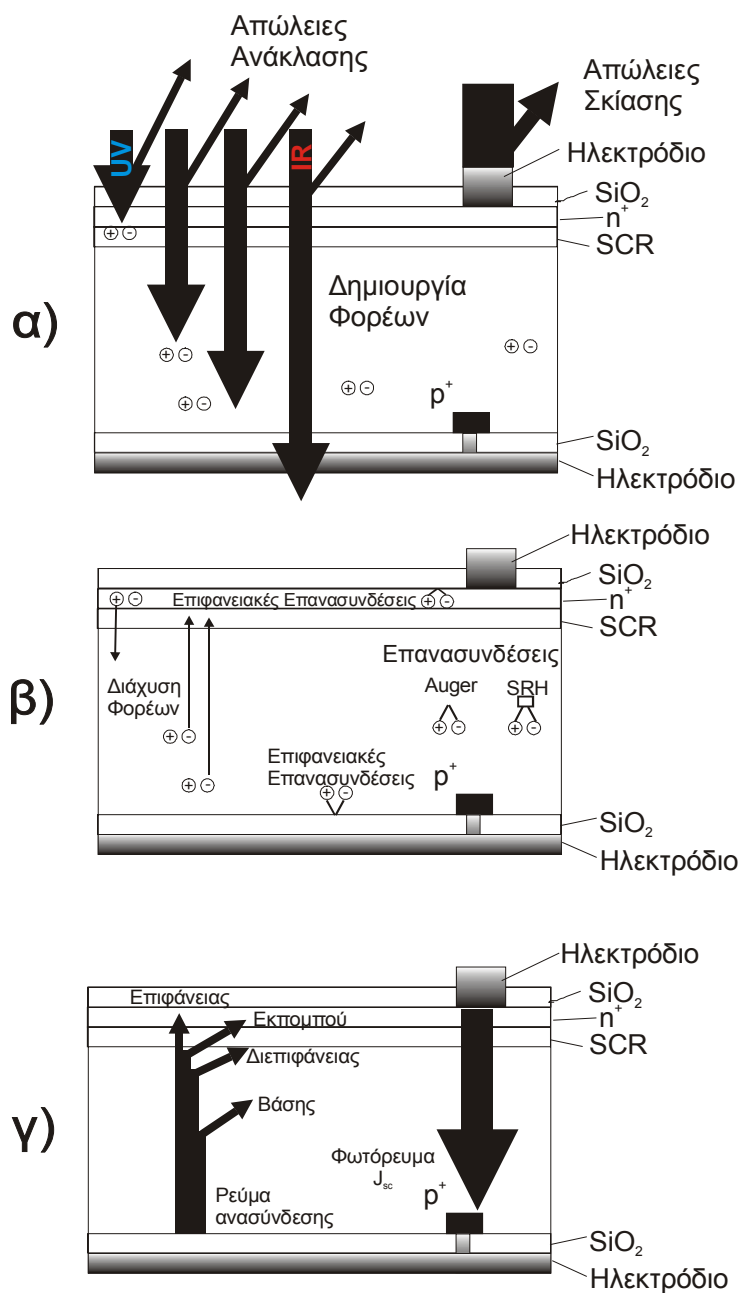
Κεφάλαιο 2

φ/β στοιχείου ενώ η επιφάνεια που καλύπτεται από τα ηλεκτρόδια εμποδίζει πλήρως τη διέλευση του φωτός (σχ. 2.4α). Το περισσότερο φως εισέρχεται στο Si και απορροφάται σύμφωνα με το φάσμα απορρόφησης του υλικού (κεφάλαιο 1), οπότε δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων οπών, ενώ ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος δεν απορροφάται ή απορροφάται κοντά στην πίσω επιφάνεια. Ένα ποσοστό των παραγόμενων φορέων μειονότητας (σχ. 2.4β) θα επανασυνδεθεί με μηχανισμούς SRH, Auger ή επιφάνειας (κεφάλαιο 1). Οι υπόλοιποι διαχέονται μέσω της περιοχής φορτίου χώρου δημιουργώντας το φωτόρευμα (σχ. 2.4γ) και αναπτύσσεται μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των μπροστινών και πίσω ηλεκτροδίων. Επίσης υπάρχει το ρεύμα που οφείλεται στους φορείς πλειονότητας που διαχέονται στην αντίθετα νοθευμένη περιοχή και επανασυνδέονται.

Γενικά μπορούμε να διαχωρίσουμε τις απώλειες σε ένα φ/β στοιχείο σε δύο κατηγορίες, οπτικές και ηλεκτρικές. Οπτικές απώλειες θεωρούνται οι ανακλάσεις στην επιφάνεια του υλικού, η ακτινοβολία που δεν απορροφάται και η σκίαση από τα ηλεκτρόδια της μπροστινής επιφάνειας. Οι ηλεκτρικές μπορούν γενικά να χωριστούν σε 2 υποκατηγορίες, ωμικές και επανασύνδεσης. Οι ωμικές απώλειες χαρακτηρίζουν τόσο το ημιαγωγικό υλικό (εκπομπός, βάση), όσο και τα υλικά επαφών (ηλεκτρόδια, επαφές μετάλλου-ημιαγωγού) και την ένωση p-n. Οι απώλειες επανασύνδεσης αφορούν τον ημιαγωγό (επιφανειακές ή στο εσωτερικό του) και συγκεκριμένα τις περιοχές του εκπομπού, βάσης και φορτίου χώρου. Σε γενικές γραμμές οι ηλεκτρικές απώλειες έχουν επίδραση στο φωτόρευμα και στην παραγόμενη τάση, ενώ οι οπτικές αφορούν τη μη ιδανική απορρόφηση του φωτός.

Προκειμένου να επιτευχθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός μιας φ/β διάταξης πρέπει να ληφθούν υπόψη τα είδη των απωλειών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στη βελτιστοποίηση αντιμετωπίζεται πολλές φορές το πρόβλημα ότι η μείωση μιας κατηγορίας απωλειών αυξάνει κάποια άλλη, για παράδειγμα η ελάττωση των ωμικών απωλειών μπορεί να αυξήσει τις επανασυνδέσεις και αντίστροφα, όπως θα φανεί και στα επόμενα κεφάλαια.

Κεφάλαιο 2



Σχήμα 2.4. Σχεδιάγραμμα του φ/β φαινομένου και των απωλειών μετατροπής του ηλιακού φωτός: α) Απορρόφηση φωτός και γένεση φορέων, β) Διάχυση φορέων και επανασυνδέσεις, γ) ρεύμα σκότους (ανασύνδεσης) και φωτόρευμα.

Παρακάτω θα περιγραφεί η επίδραση των ηλεκτρικών καθώς και των οπτικών απωλειών που προαναφέρθηκαν στα φ/β στοιχεία πυριτίου.

2.3 Ηλεκτρικές απώλειες

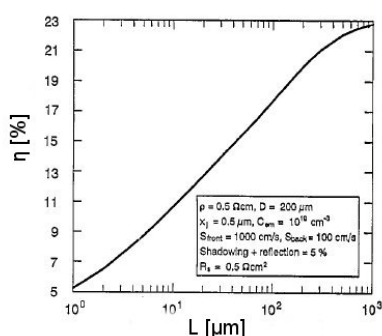
Κεφάλαιο 2

2.3.1 Απώλειες επανασύνδεσης

Σε αυτό το τμήμα θα εξετάσουμε γενικά πώς επηρεάζουν την απόδοση ενός τυπικού φ/β στοιχείου οι επανασυνδέσεις στη βάση, στον εκπομπό και εν μέρει στην περιοχή φορτίου χώρου. Σε γενικές γραμμές θα εξεταστεί η επίδραση της μεταβολής του μήκους διάχυσης των φορέων μειονότητας, της ταχύτητας επανασύνδεσης στις επιφάνειες και του επιπέδου νόθευσης κυρίως στην περιοχή του εκπομπού.

2.3.1.2 Εξάρτηση από το μήκος διάχυσης της βάσης

Το επόμενο σχήμα παρουσιάζει την μεταβολή της απόδοσης συναρτήσει του μήκους διάχυσης στη βάση ενός φ/β στοιχείου με δεδομένες τις υπόλοιπες παραμέτρους [6]. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι απαιτείται αύξηση του μήκους διάχυσης κατά 1 τάξη μεγέθους προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση κατά 5%. Η απόδοση αρχίζει να σταθεροποιείται όταν η τιμή του μήκους διάχυσης ξεπεράσει το πάχος της βάσης, άρα για να επιτευχθούν υψηλές αποδόσεις αυτό απαιτείται να παίρνει τιμές διπλάσιες και λίγο μεγαλύτερες από το πάχος της βάσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν επιλεγεί αρχικό υλικό πολύ υψηλής καθαρότητας, συνήθως FZ (Float Zone) το οποίο όμως έχει υψηλό κόστος. Γενικά για φ/β στοιχεία επιλέγεται υλικό που έχει αναπτυχθεί με τη μέθοδο Cz (Czochralski) το οποίο δεν έχει κρυσταλλικές ατέλειες, αλλά περιέχει ανεπιθύμητες προσμίξεις, όπως οξυγόνο, άνθρακα και μεταλλικά ιόντα.



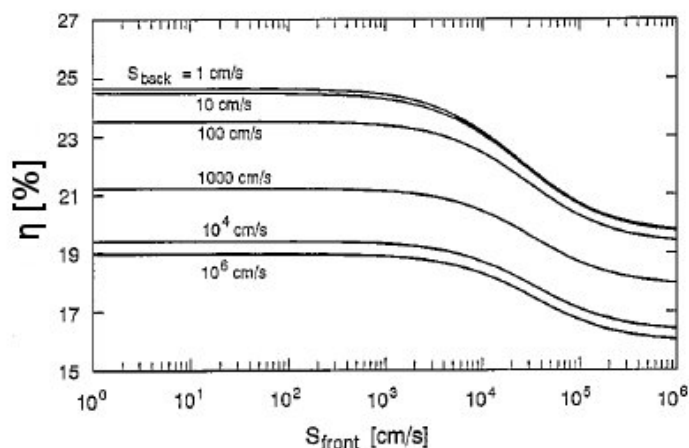
Σχήμα 2.5. Απόδοση φ/β στοιχείου υπολογισμένη συναρτήσει του μήκους διάχυσης στη βάση L [6]. Οι παράμετροι των υπολογισμών (ειδική αντίσταση ρ , πάχος βάσης D , βάθος εκπομπού x_j , επιφανειακή νόθευση εκπομπού C_{em} , επιφανειακές ταχύτητες ανασύνδεσης S_{front} και S_{back} , αντίσταση σειράς R_s και ποσοστά σκίασης και ανάκλασης στη μπροστινή επιφάνεια δίδονται στο ένθετο πλαίσιο.

Κεφάλαιο 2

Συνοπτικά το μήκος διάχυσης στη βάση είναι ένας βασικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην κατασκευή φ/β υψηλής απόδοσης. Γι' αυτό το λόγο πρέπει και τα στάδια επεξεργασίας του φ/β στοιχείου να γίνονται σε καθαρό χώρο προκειμένου να αποφευχθούν μολύνσεις από διάφορες προσμίξεις.

2.3.1.3 Ταχύτητες επανασύνδεσης στη μπροστινή και πίσω επιφάνεια

Η επιφανειακή ταχύτητα ανασύνδεσης σε ένα ημιαγωγό εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους: την πυκνότητα των επιφανειακών καταστάσεων ατελειών (density of surface interface states), την ενεργό διατομή σύλληψης ηλεκτρονίων και οπών σε αυτές τις καταστάσεις και την κάμψη των ζωνών αγωγιμότητας και σθένους στις αντίστοιχες επιφάνειες [7]. Χαμηλές ταχύτητες επανασύνδεσης έχουν επιτευχθεί με την ανάπτυξη εξαιρετικής ποιότητας οξειδίου στην επιφάνεια του πυριτίου με θερμική κατεργασία. Αυτή η τεχνική έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα με την παραγωγή διατάξεων MOS οπότε η δεδομένη εμπειρία μεταφέρεται στα φ/β στοιχεία. Το επόμενο διάγραμμα (σχ. 2.6) απεικονίζει τη μεταβολή της απόδοσης ενός φ/β στοιχείου συναρτήσει της επιφανειακής ταχύτητας ανασύνδεσης στον εκπομπό, με παράμετρο την ταχύτητα ανασύνδεσης στην πίσω επιφάνεια (βάση).



Σχήμα 2.6. Υπολογισθείσα απόδοση (η) φ/β στοιχείου συναρτήσει της επιφανειακής ταχύτητας ανασύνδεσης στον εκπομπό (S_{front}) με παράμετρο την ταχύτητα ανασύνδεσης στην πίσω επιφάνεια (S_{back}) [6]. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι ίδιες με το σχ. 2.3.

Αυτοί οι υπολογισμοί δείχνουν ότι για να επιτευχθούν οι μέγιστες δυνατές αποδόσεις απαιτούνται ταχύτητες ανασύνδεσης στην πίσω επιφάνεια μικρότερες από 10 cm/sec.

Κεφάλαιο 2

Αντίθετα, οι απαιτήσεις για την ταχύτητα επανασύνδεσης στην μπροστινή επιφάνεια είναι λιγότερο αυστηρές, αφού αρκεί να είναι μικρότερη από 10^3 cm/sec. Γι' αυτό το λόγο για τα φ/β υψηλής απόδοσης, έχει δοθεί σημαντικό βάρος στην διαμόρφωση της πίσω επιφάνειας με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ταχύτητα επανασύνδεσης, κυρίως με ανάπτυξη καλού θερμικού οξειδίου σε συνθήκες καθαρού χώρου, όπου τότε μπορούμε να επιτύχουμε πολύ χαμηλές επανασυνδέσεις. Τέτοιες διατάξεις θα αναλυθούν παρακάτω.

2.3.1.4 Πεδίο πίσω επιφάνειας (*Back Surface Field, BSF*)

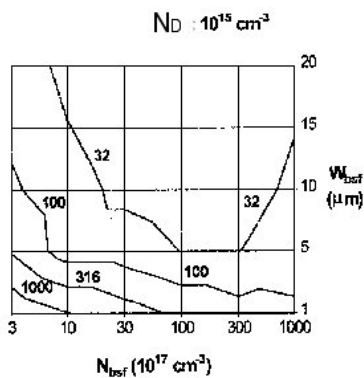
Όπως διαπιστώθηκε ήδη, η απόδοση ενός φ/β στοιχείου βελτιώνεται σημαντικά για μικρές ταχύτητες επανασύνδεσης στην πίσω επιφάνεια. Παρόλα αυτά, έχοντας υπόψη ότι η πίσω επιφάνεια ενός τυπικού φ/β στοιχείου είναι καλυμμένη ολοκληρωτικά από μέταλλο (πίσω ηλεκτρόδιο), είναι αναμενόμενο ότι η ταχύτητα ανασύνδεσης στη διεπιφάνεια του μετάλλου-ημιαγωγού, θα λαμβάνει υψηλές τιμές.

Μια τεχνική για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, είναι η δημιουργία μιας περιοχής p^+ , στην πίσω επιφάνεια της βάσης οπότε δημιουργείται μια απότομη ένωση (high-low junction) που ονομάζεται πεδίο πίσω επιφάνειας (*Back Surface Field, BSF*). Εξαιτίας αυτής της ένωσης, αποφεύγεται κατά ένα σημαντικό ποσοστό η επανασύνδεση των φορέων μειονότητας στην πίσω επιφάνεια και έχει θεωρηθεί ότι το BSF λειτουργεί κατά κάποιο τρόπο σαν «ηλεκτρικός καθρέπτης» απωθώντας τους φορείς προς τα πίσω, στο εσωτερικό του φ/β στοιχείου. Το βασικό όμως αποτέλεσμα της ύπαρξης του BSF είναι η σημαντική μείωση της ταχύτητας ανασύνδεσης στην πίσω επιφάνεια. Η συμπεριφορά του εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους [3]:

- την επιφανειακή συγκέντρωση φορέων στην περιοχή αυτή (p^+), το προφίλ αυτών και το βάθος διείσδυσης
- την επανασύνδεση στην περιοχή p^+
- την σχέση μεταξύ μήκους διάχυσης και πάχους του φ/β στοιχείου

Το επόμενο διάγραμμα (σχ. 2.7) παριστάνει την υπολογισθείσα ταχύτητα ανασύνδεσης S_{eff} στην διεπιφάνεια pp^+ για BSF ομοιόμορφα νοθευμένο, συναρτήσεως του πάχους του, τη νόθευση αυτού και της βάσης [8]. Οι υπολογισμοί έχουν προκύψει από προσομοιώσεις.

Κεφάλαιο 2



Σχήμα 2.7. Υπολογισθείσα ταχύτητα ανασύνδεσης S_{eff} στη διεπιφάνεια pp^+ συναρτήσει του πάχους του BSF w_{bsf} και της νόθευσής του για νόθευση στη βάση $N_D 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Οι τιμές πάνω στις καμπύλες είναι σε cm/sec [8].

Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι η ταχύτητα ανασύνδεσης S_{eff} μειώνεται όσο το πάχος του w_{bsf} και η νόθευσή του αυξάνει. Συνοπτικά οι καλύτερες παράμετροι είναι σχετικά παχύ BSF ($>10 \mu\text{m}$) και υψηλά νοθευμένο (περίπου 10^{19} cm^{-3}). Στους υπολογισμούς έχει υποτεθεί ότι η πίσω επιφάνεια του BSF είναι καλυμμένη από ωμική επαφή. Γενικά, για να δημιουργηθεί ένα καλό BSF απαιτείται νόθευση Βορίου, αλλά έχουν επιτευχθεί επίσης πολύ καλά αποτελέσματα και με κράματα Αλουμινίου [9] (Aluminum alloyed BSF) τα οποία κατασκευάζονται πιο εύκολα.

2.3.1.5. Επανασυνδέσεις στην περιοχή του εκπομπού.

Ο εκπομπός είναι η περιοχή ενός φ/β στοιχείου πολύ λεπτή σε βάθος (μικρότερη συνήθως από $1 \mu\text{m}$), υψηλά νοθευμένη (της τάξης των 10^{19} cm^{-3} και μεγαλύτερη). Σε αυτή την περίπτωση, το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας (οπές για εκπομπό τύπου n^+) που δημιουργούνται εκεί είναι πολύ μεγαλύτερο από το πάχος του εκπομπού. Έτσι οι φορείς δεν επανασυνδέονται στον εκπομπό (μόνο στην επιφάνειά του), αλλά διαπερνούν την ένωση pn υποβοηθούμενοι από το πεδίο. Αυτός ο τύπος εκπομπού ονομάζεται διαφανής (transparent).

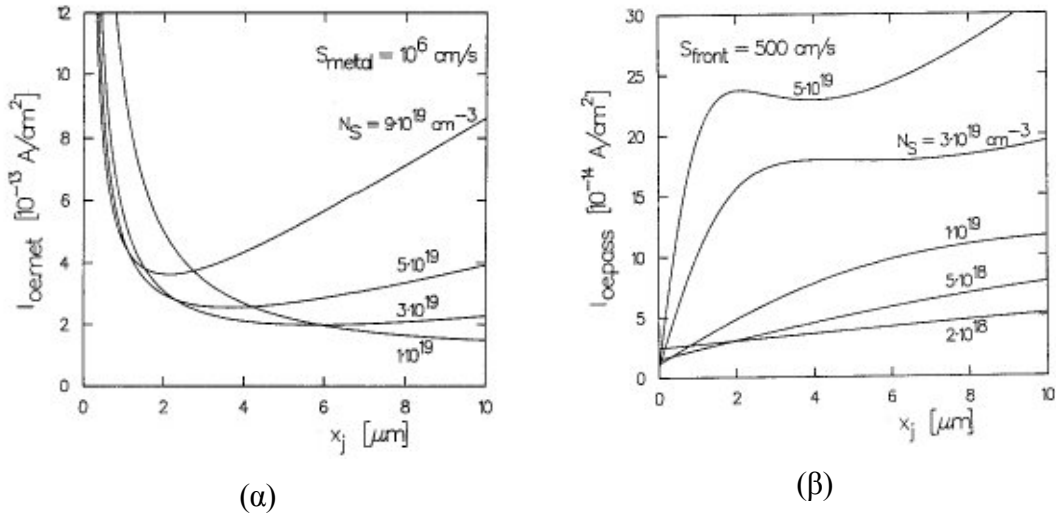
Μια άλλη παράμετρος που εξετάζεται είναι το ρεύμα ανασύνδεσης στον εκπομπό το οποίο εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους όπως [3]:

- το προφίλ της νόθευσης στον εκπομπό
- η επιφανειακή νόθευση
- το πάχος του εκπομπού

Κεφάλαιο 2

- η ταχύτητα ανασύνδεσης στην επιφάνειά του

Τα επόμενα διαγράμματα (σχ. 2.8) παριστάνουν το ρεύμα ανασύνδεσης στον εκπομπό (I_{0e}) συναρτήσει του βάθους του με παράμετρο την νόθευση στην επιφάνειά του [10].



Σχήμα 2.8. Υπολογισμένο ρεύμα ανασύνδεσης εκπομπού ($I_{0e\text{met}}$ και $I_{0e\text{pass}}$ αντίστοιχα) συναρτήσει του βάθους του x_j με παράμετρο την επιφανειακή νόθευση. Στο (α) οι υπολογισμοί είναι για επιφάνεια καλυμμένη με μέταλλο ($S_{\text{metal}}=10^6$ cm/sec) ενώ στο (β) είναι για επιφάνεια καλυμμένη από οξείδιο ($S_{\text{front}}=500$ cm/sec).

Οι υπολογισμοί βασίζονται στο μοντέλο των Park, Neugroschel και Lindholm [11] το οποίο λαμβάνει υπόψιν του τα φαινόμενα υψηλής νόθευσης. Ανάλογοι υπολογισμοί έχουν γίνει στην βιβλιογραφία και από άλλους [12-13]. Στο σχ. 2.7α υποθέτουμε υψηλή ταχύτητα ανασύνδεσης ($S_{\text{metal}}=10^6$ cm/sec) που αντιστοιχεί σε επιφάνεια καλυμμένη από μέταλλο (μπροστινό ηλεκτρόδιο), ενώ στο σχ. 2.8β η ταχύτητα ανασύνδεσης θεωρείται χαμηλή και αντιστοιχεί σε επιφάνεια καλυμμένη από καλής ποιότητας οξείδιο ($S_{\text{front}}=500$ cm/sec).

Συγκρίνοντας τα δυο διαγράμματα παρατηρούμε ότι για την επίτευξη χαμηλού I_{0e} στην περιοχή κάτω από το μέταλλο απαιτείται μεγάλο βάθος εκπομπού και σχετικά υψηλή νόθευση, ενώ στην περιοχή που είναι καλυμμένη από οξείδιο είναι επιθυμητό πολύ χαμηλό βάθος και σχετικά χαμηλή νόθευση. Αυτές οι αντικρουόμενες τάσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η ελαχιστοποίηση του I_{0e} στα φ/β υψηλής απόδοσης απαιτεί την κατασκευή εκπομπών 2 σταδίων, όπου κάτω από το μέταλλο ο εκπομπός είναι υψηλής νόθευσης (περίπου 10^{20} cm⁻³) και εισχωρεί σε μεγάλο βάθος (περίπου 2 μm), ενώ στην καλυμμένη από οξείδιο περιοχή, για επιθυμητή επιφανειακή

Κεφάλαιο 2

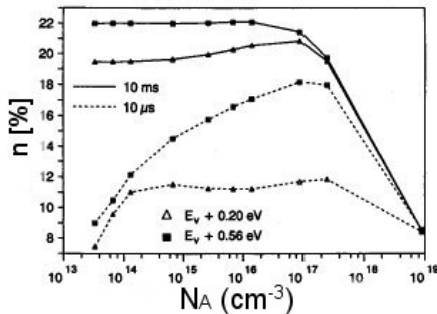
συγκέντρωση περίπου 10^{19} cm^{-3} (για να μην αναπτυχθούν μεγάλες ωμικές απώλειες μεταξύ των γειτονικών ηλεκτροδίων), το βάθος του εκπομπού πρέπει να είναι της τάξεως μερικών δεκάτων του μικρού.

2.3.1.6 Επανασυνδέσεις στην περιοχή της βάσης

Η βάση ενός φ/β στοιχείου είναι ουσιαστικά η περιοχή στην οποία δημιουργείται το μεγαλύτερο ποσοστό των φορέων μειονότητας λόγω του φωτισμού. Έτσι, είναι σημαντικό οι επανασυνδέσεις στην περιοχή αυτή να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Το ρεύμα επανασύνδεσης στη βάση υπολογίζεται λύνοντας τις εξισώσεις διάχυσης σε ορθή πόλωση (χωρίς φως) και δίνεται από τη σχέση [3]:

$$I_0 = \frac{en_i D_n \cosh(W/L_n) + (D_n/L_n S_n) \sinh(W/L_n)}{N_A L_n (D_n/L_n S_n) \cosh(W/L_n) + \sinh(W/L_n)} \quad (2.2)$$

όπου W είναι το πάχος της βάσης, L_n το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας, D_n ο συντελεστής διάχυσης αυτών και S_n η ταχύτητα ανασύνδεσης στην πίσω επιφάνεια. Όπως παρατηρούμε, η (2.2) εξαρτάται αντιστρόφως ανάλογα από τη νόθευση N_A της βάσης. Θεωρητικά λοιπόν, αυξάνοντας το επίπεδο νόθευσης, ελαττώνουμε το ρεύμα επανασύνδεσης, αλλά από την άλλη πλευρά μειώνουμε το χρόνο ζωής άρα και το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας στο υλικό. Στην περίπτωση που έχουμε και ενδιάμεσες καταστάσεις στο ενεργειακό χάσμα στο υλικό λόγω ανεπιθύμητων προσμείξεων η εξάρτηση της απόδοσης από το επίπεδο νόθευσης ρυθμίζεται και από τη θέση των καταστάσεων στο χάσμα [14], όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.9.



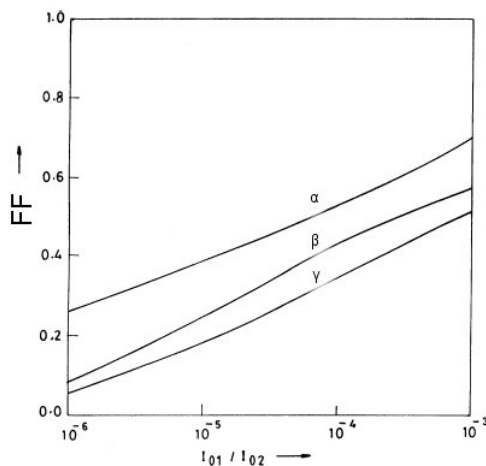
Σχήμα 2.9. Μεταβολή της απόδοσης σε φ/β στοιχείο, συναρτήσει της νόθευσης της βάσης N_A με παράμετρο την ποιότητα του υλικού (χρόνος ζωής τ) για 2 διαφορετικές καταστάσεις στο ενεργειακό χάσμα (0,20 και 0,56 eV από τη ζώνη σθένους) [14].

Κεφάλαιο 2

Οι υπολογισμοί στο σχήμα έχουν γίνει με χρήση του προγράμματος προσομοίωσης PC1D [15] για ένα τυπικό φ/β στοιχείο με πάχος βάσης 254 μm , νόθευση εκπομπού $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ και βάθους 0,2 μm , αντίσταση σειράς 0,2 $\Omega \cdot \text{cm}^2$, 5% απώλειες ανακλάσεων – σκίασης και μηδενικές ταχύτητες ανασύνδεσης στην μπροστά και πίσω επιφάνεια. Από τα διαγράμματα παρατηρούμε ότι για υλικό καλής ποιότητας ($\tau=10\text{ms}$) προτιμάται χαμηλή νόθευση στη βάση αν η ενδιάμεση στάθμη βρίσκεται χαμηλά (0,20 eV από τη ζώνη σθένους), ενώ αν η στάθμη βρίσκεται κοντά στο μέσο του ενεργειακού διακένου (0,56 eV) νόθευση της τάξης των 10^{17} cm^{-3} είναι η βέλτιστη. Αντιθέτως, για υλικό χαμηλής ποιότητας ($\tau=10\mu\text{s}$) η βέλτιστη νόθευση παραμένει κοντά στα 10^{17} cm^{-3} ανεξαρτήτως θέσης της ενδιάμεσης κατάστασης. Σε γενικές γραμμές η επιλογή του αρχικού υλικού είναι πολύ σημαντική για την απόδοση του φ/β στοιχείου.

2.3.1.7. Επανασυνδέσεις στην περιοχή φορτίων χώρου (SCR)

Στο προηγούμενο κεφάλαιο είδαμε ότι η έκφραση που περιγράφει την χαρακτηριστική I-V ενός φ/β στοιχείου (σχέση 1.25) αποτελείται από 2 εκθετικούς όρους. Ο δεύτερος όρος αφορά την επανασύνδεση στην περιοχή φορτίων χώρου. Ο παράγοντας I_{02} μπροστά από τον δεύτερο εκθετικό όρο της (1.25) εκφράζει το ρεύμα διαρροής που οφείλεται στην περιοχή αυτή. Το επόμενο διάγραμμα δείχνει τη μεταβολή του παράγοντα πλήρωσης (FF) συναρτήσει του λόγου των ρευμάτων ανασύνδεσης I_{01}/I_{02} με παράμετρο την αντίσταση σειράς του στοιχείου [16], θεωρώντας $I_{01}=5 \times 10^{-10} \text{ A}$.



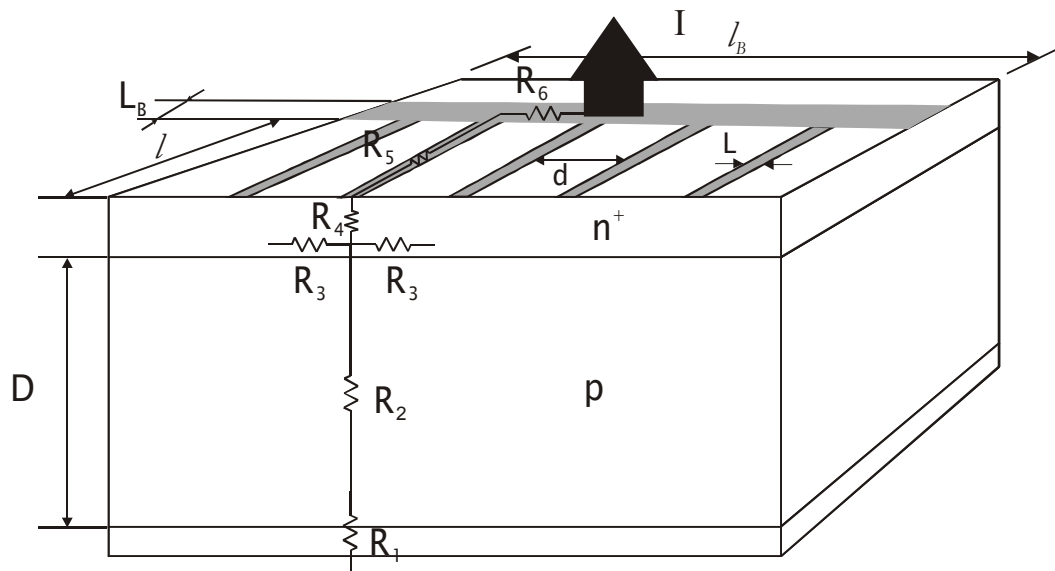
Σχήμα 2.10. Εξάρτηση του παράγοντα πλήρωσης (FF) συναρτήσει του λόγου I_{01}/I_{02} για $n_1=1$, $n_2=2$ και παράμετρο την αντίσταση σειράς, όπου α) $R_s=0.1\Omega$, β) 0.5Ω , γ) 1Ω [16].

Κεφάλαιο 2

Από το σχήμα 2.9 παρατηρούμε σημαντική εξάρτηση του παράγοντα πλήρωσης από το ρεύμα I_{02} , οπότε για να επιτευχθούν υψηλές τιμές πρέπει να ισχύει $I_{02} < 10^{-7}$ A/cm².

2.3.2. Ωμικές απώλειες

Είναι προφανές, ότι οι ωμικές απώλειες και κυρίως η αντίσταση R_s ενός φ/β στοιχείου μειώνει σημαντικά τη δυνατότητά του για παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Παρά το γεγονός ότι δεν μπορεί να μηδενιστεί, η γνώση των παραμέτρων από τις οποίες εξαρτάται, δίνει τη δυνατότητα περιορισμού της μέσω κατάλληλης σχεδίασης της διάταξης. Η αντίσταση σειράς σε ένα τυπικό φ/β στοιχείο μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα διαφόρων συνιστωσών, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11. Αντιστάσεις σειράς σε τυπικό φ/β στοιχείο.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11, η αντίσταση σειράς R_1 είναι η αντίσταση επαφής της πίσω επιφάνειας με το μέταλλο, R_2 η αντίσταση σειράς της βάσης που καθορίζεται από τη νόθευσή της, R_3 η αντίσταση του εκπομπού μεταξύ 2 ηλεκτροδίων, R_4 η αντίσταση μετάλλου ημιαγωγού κάτω από το ηλεκτρόδιο, R_5 η αντίσταση του ηλεκτροδίου και R_6 η αντίσταση του μετάλλου συλλογής του ρεύματος. Κάθε παράγοντας θα αναλυθεί ξεχωριστά και πρέπει να τονιστεί ότι ορισμένοι από αυτούς συνεισφέρουν πολύ περισσότερο σε σχέση με τους υπόλοιπους.

Κεφάλαιο 2

2.3.2.1. Επαφή μετάλλου – ημιαγωγού (Schottky)

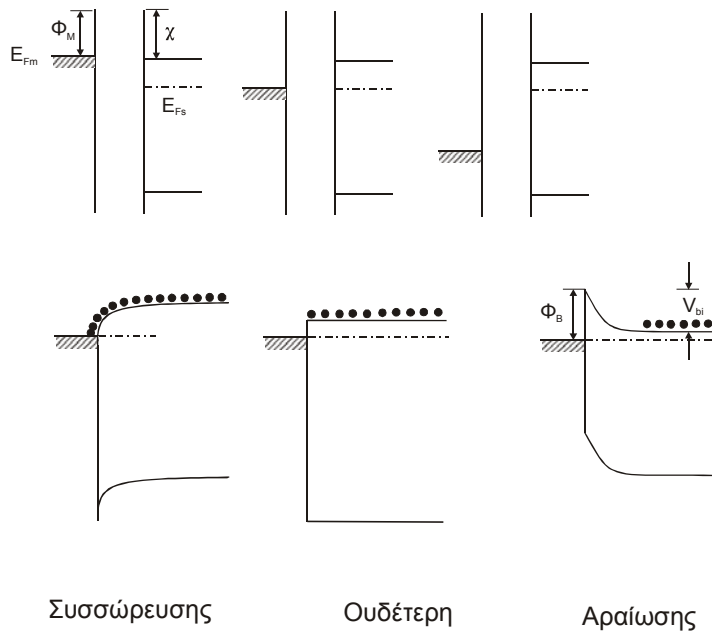
Η επαφή μετάλλου – ημιαγωγού (R_I και R_A στο σχήμα 2.11) είναι μια από τις πιο παλιές διατάξεις που κατασκευάστηκαν, αρχικά ανακαλύφθηκε από τον Braun το 1874 [17], αλλά αναπτύχθηκε συστηματικά από τον Schottky στη δεκαετία του 1930 [18] ο οποίος θεμελίωσε τη θεωρία τους, και αυτές χρησιμοποιήθηκαν ως ανορθωτικές διατάξεις, οπότε ονομάστηκαν δίοδοι Schottky προς τιμήν του. Μετά την ανακάλυψη του τρανζίστορ [19], δόθηκε σημαντικό βάρος στην τεχνολογία των επαφών, λόγω των ιδιοτήτων που πρέπει να έχουν, δηλαδή πολύ χαμηλή αντίσταση επαφής με γραμμική χαρακτηριστική, και πολύ καλή αντοχή σε θερμικές καταπονήσεις ώστε να επηρεάζουν όσο γίνεται λιγότερο τη συμπεριφορά του στοιχείου. Σύμφωνα με το μοντέλο Schottky, το ύψος φράγματος της επαφής ϕ_B δίνεται από τη σχέση

$$\phi_B = \phi_M - \chi \quad (2.3)$$

όπου ϕ_M είναι το έργο εξαγωγής του μετάλλου (η ενεργειακή διαφορά από το επίπεδο Fermi μέχρι τη στάθμη κενού) και χ η ηλεκτροσυγγένεια του ημιαγωγού (η ενεργειακή διαφορά από το ελάχιστο της ζώνης αγωγιμότητας μέχρι τη στάθμη κενού). Η ροή του ρεύματος οφείλεται σε εκπομπή ηλεκτρονίων από το φράγμα, με κατεύθυνση από τον ημιαγωγό προς το μέταλλο για ορθή πόλωση και από το μέταλλο προς τον ημιαγωγό για ανάστροφη πόλωση. Το μοντέλο προβλέπει βάσει του έργου εξόδου του μετάλλου επαφές 3 διαφορετικών καταστάσεων (σχ. 2.12): συσσώρευσης (accumulation), ουδέτερες (neutral) και απογύμνωσης (depletion). Ένας καλός ανορθωτής απαιτεί ένα υψηλό φράγμα, δηλαδή επαφή σε κατάσταση απογύμνωσης, ενώ στην ωμική επαφή το αντίθετο, πολύ χαμηλό φράγμα που να επιτρέπει την ελεύθερη ροή φορέων που ορίζεται από την κατάσταση συσσώρευσης.

Η θεωρία του Schottky προβλέπει γραμμική εξάρτηση του ϕ_B με το ϕ_M και μάλιστα σύμφωνα με την (2.3) η κλίση της χαρακτηριστικής ισούται με τη μονάδα. Στην πράξη έχει διαπιστωθεί ότι το ύψος του φράγματος έχει ασθενή εξάρτηση από το έργο εξόδου του μετάλλου για τους συνήθεις ημιαγωγούς όπως το Ge, Si, GaAs και διάφορα άλλα συμπλέγματα III-V [18].

Κεφάλαιο 2



Σχήμα 2.12. Μοντέλο Schottky για τις επαφές μέταλλου - ημιαγωγού.

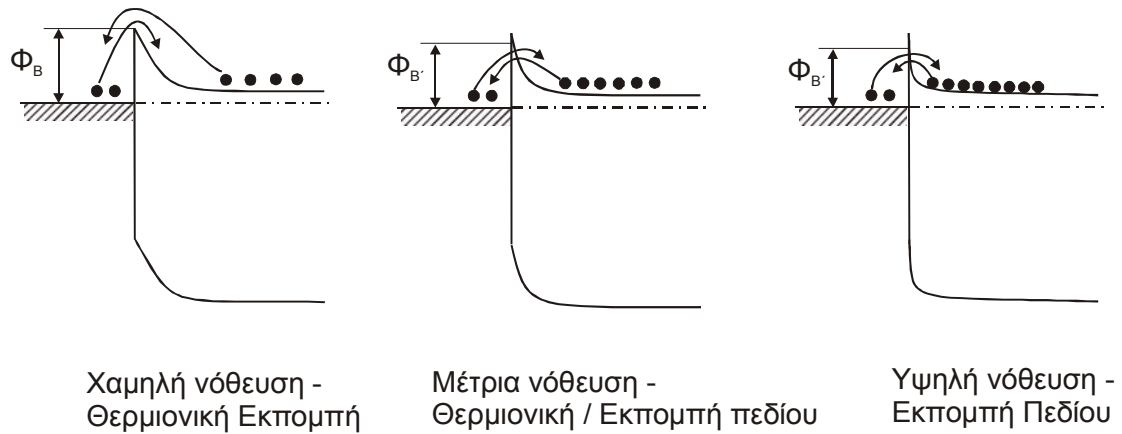
Συγκεκριμένα για την επαφή μέταλλου – Si τύπου n ισχύει προσεγγιστικά η σχέση [3]

$$\phi_{Bn} \cong 0.2\phi_M - 0.1 \quad (2.4)$$

2.3.2.2. Ωμική Επαφή Μετάλλου – Ημιαγωγού

Στην πράξη η κατασκευή μιας επαφής μέταλλου – ημιαγωγού δεν κατασκευάζεται με ρύθμιση του ύψους του φράγματος ϕ_B αλλά με εναπόθεση του μετάλλου πάνω σε υψηλά νοθευμένο ημιαγωγό [21]. Παρόλο που σε αυτή την περίπτωση το ύψος του φράγματος μπορεί να είναι σημαντικό, η στενή περιοχή φορτίου χώρου του υψηλά νοθευμένου ημιαγωγού δημιουργεί φαινόμενο σήραγγος μεταξύ των φορέων στην περιοχή του μετάλλου και του ημιαγωγού (ζώνη αγωγιμότητας ή σθένους, ανάλογα αν ο ημιαγωγός είναι τύπου n ή p), όπου οι φορείς περνούν ανάμεσα από το φράγμα δυναμικού, δηλαδή δεν απαιτείται να το υπερπηδήσουν όπως στην περίπτωση της θερμοϊονικής εκπομπής. Οι μηχανισμοί αγωγιμότητας για μια τέτοια επαφή μέταλλου – ημιαγωγού για διαφορετικές περιπτώσεις νόθευσης του ημιαγωγού φαίνονται στο σχήμα 2.13.

Κεφάλαιο 2



Σχήμα 2.13. Ύψος-πλάτος φράγματος και μηχανισμοί αγωγιμότητας για επαφή μέταλλου – ημιαγωγού τύπου n για διαφορετικές νοθεύσεις του ημιαγωγού. Το ύψος του φράγματος δυναμικού μειώνεται για μεγαλύτερες νοθεύσεις (image force barrier height lowering).

Όταν η νόθευση του ημιαγωγού είναι αρκετά χαμηλή, ($N_D < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) το ρεύμα οφείλεται στη θερμιοτική εκπομπή φορέων (TE, thermionic emission) πάνω από το φράγμα. Για ενδιάμεσες νοθεύσεις ($10^{17} < N_D < 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) επικρατεί θερμιοτική και εκπομπή πεδίου (TFE, thermionic field emission), δηλαδή οι φορείς διεγείρονται θερμικά και αποκτούν τέτοια ενέργεια όπου το φράγμα είναι τόσο λεπτό ώστε να δημιουργηθεί φαινόμενο σήραγγος. Τέλος για υψηλές νοθεύσεις ($N_D > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) το φράγμα είναι πλέον τόσο λεπτό ώστε ακόμη και οι φορείς που βρίσκονται στον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας, διαπερνούν το φράγμα μέσω φαινομένου σήραγγος. Στο σχήμα φαίνεται και η μείωση του ύψους του φράγματος λόγω του συνδυασμού της ηλεκτροστατικής αλληλεπίδρασης των φορέων μεταξύ μετάλλου και ημιαγωγού και του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια [22] (image force lowering). Η αντίσταση επαφής που τη συμβολίζουμε ρ_c ορίζεται από την ακόλουθη σχέση [20]

$$\rho_c = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)_{V=0}^{-1} \quad (2.5)$$

Οι μονάδες της είναι σε $\Omega \cdot \text{cm}^2$ και χαρακτηρίζει την αντίσταση επαφής ανεξαρτήτως επιφανείας. Η αντίσταση επαφής για θερμιοτική εκπομπή (TE) όπως προκύπτει από τη θεωρία Schottky δίνεται από τη σχέση

Κεφάλαιο 2

$$\rho_c(TE) = \frac{k}{eA^*T} \exp\left(\frac{e\phi_{B'}}{KT}\right) \quad (2.6)$$

όπου $A^* = 4\pi k^2 m^* / h^3 = 120(m^*/m) A/cm^2K^2$ είναι η σταθερά Richardson και T η θερμοκρασία ενώ m^* , m είναι η ενεργός μάζα και η μάζα του ηλεκτρονίου αντίστοιχα. Στην περίπτωση θερμοϊονικής – εκπομπής πεδίου (TFE) η αντίσταση επαφής δίδεται από τη σχέση [23]

$$\rho_c(TFE) = \frac{k}{eA^*T} C_1 \exp\left(\frac{e\phi_{B'}}{E_0}\right) \quad (2.7)$$

ενώ στην περίπτωση εκπομπής πεδίου ισχύει η έκφραση

$$\rho_c(FE) = \frac{k}{eA^*T} C_2 \exp\left(\frac{e\phi_{B'}}{E_{00}}\right) \quad (2.8)$$

όπου οι C_1, C_2 εξαρτώνται από τα μεγέθη N_D, T και $\phi_{B'}$ ενώ [24]

$$E_{00} = \frac{eh}{4\pi} \left(\frac{N_D}{K_s \epsilon_0 m^*} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

είναι η ενέργεια που χαρακτηρίζει τη διαδικασία που οφείλεται στο φαινόμενο σήραγγος (σχήμα 2.13). Αντίστοιχα η ενέργεια E_0 σχετίζεται με την E_{00} μέσω της παράστασης

$$E_0 = E_{00} \coth(E_{00}/kT) \quad (2.10)$$

όπου το μέγεθος K_s είναι η διηλεκτρική σταθερά του ημιαγωγού. Το μέγεθος kT/E_{00} χαρακτηρίζει το λόγο του ρεύματος θερμοϊονικής εκπομπής προς το αντίστοιχο που οφείλεται στο φαινόμενο σήραγγος. Συνεπώς όταν $kT/E_0 \gg 1$ επικρατεί η θερμοϊονική εκπομπή (χαμηλά νοθευμένος ημιαγωγός), ενώ όταν $kT/E_0 \ll 1$ επικρατεί το φαινόμενο σήραγγος (υψηλή νόθευση). Προφανώς όταν $kT/E_0 \approx 1$ υπάρχει θερμοϊονική και εκπομπή πεδίου. Γενικά η (2.6) δεν εξαρτάται από τη νόθευση αλλά κυρίως από τη θερμοκρασία ενώ αντίθετα η (2.8) έχει πολύ μικρή εξάρτηση από τη θερμοκρασία (μέσω της C_2) και ισχυρή από τη νόθευση. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψιν η μείωση του ύψους του

Κεφάλαιο 2

φράγματος δυναμικού (image force barrier lowering) για το σωστό υπολογισμό των αντιστάσεων επαφής, που προκύπτει από την

$$\Delta\phi = (eE/4\pi K_s \epsilon_0)^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

όπου E είναι το ηλεκτρικό πεδίο στη διεπιφάνεια μετάλλου ημιαγωγού, το οποίο για μηδενική πόλωση σύμφωνα με τον ορισμό (2.5) είναι

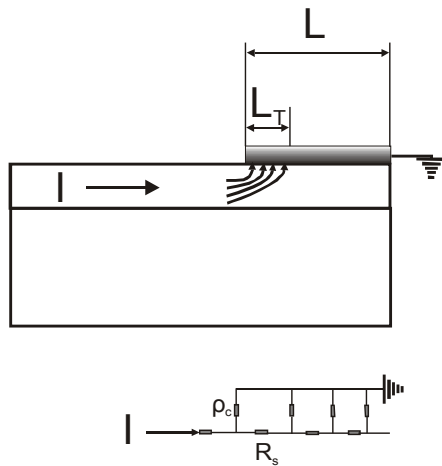
$$E = (2eN_D(V_{bi} - KT/e)/K_s \epsilon_0)^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

όπου V_{bi} είναι το δυναμικό της ένωσης (built in potential). Γενικά, το ύψος του φράγματος δεν μπορεί να ρυθμιστεί, οπότε αυτό που ελέγχεται στο σχεδιασμό των ωμικών επαφών είναι η νόθευση. Έτσι για να επιτευχθούν χαμηλές αντιστάσεις επιλέγεται υψηλή νόθευση, για παράδειγμα για $\rho_c \approx 10^{-6} \Omega\text{cm}^2$ σε ημιαγωγό τύπου n απαιτείται $N_D > 10^{20} \text{cm}^{-3}$, ενώ σε τύπου p $N_A > 10^{19} \text{cm}^{-3}$ [20].

2.3.2.3. Αντίσταση επαφής μετάλλου ημιαγωγού

Η αντίσταση επαφής μεταξύ του ηλεκτροδίου και του ημιαγωγού η οποία θεωρείται ωμική επαφή, χαρακτηρίζεται από την επιφανειακή αντίσταση επαφής ρ_c σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση. Για τον σωστό υπολογισμό της αντίστασης επαφής, πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι η ροή του ρεύματος από τον ημιαγωγό στο μέταλλο λαμβάνει χώρα σε απόσταση μικρότερη από το μήκος του μετάλλου επαφής, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.14. Στην περίπτωση που η αντίσταση του μετάλλου είναι πολύ μικρή, όπως συνήθως συμβαίνει, η μεταφορά του ρεύματος θα γίνει σε ένα μήκος L_T το οποίο είναι πολύ μικρό σε σχέση με το πλάτος L του ηλεκτροδίου. Στην περίπτωση όπου το μέταλλο έχει μεγάλη αντίσταση ρ_c ή η αντίσταση του ημιαγωγού R_s είναι μικρή τότε το μήκος L_T μεγαλώνει σημαντικά χωρίς βέβαια να υπερβαίνει το συνολικό πλάτος L του μετάλλου.

Κεφάλαιο 2



Σχήμα 2.14. Ροή ρεύματος κάτω από την επαφή μετάλλου ημιαγωγού και δίκτυο καταναμημένων αντιστάσεων.

Η μεταβολή της τάσης κάτω από την επαφή ακολουθεί την σχέση [25]

$$V(x) = V_0 \frac{\cosh\left[\frac{(L-x)}{L_T}\right]}{\sinh(L/L_T)} \quad (2.13)$$

όπου θεωρούμε ότι V_0 είναι η τάση στο άκρο της επαφής ενώ το μήκος L_T δίνεται από την έκφραση

$$L_T = (\rho_c / R_s)^{1/2} \quad (2.14)$$

Αν θεωρήσουμε ως Z το μήκος του κάθε ηλεκτροδίου, τότε η αντίσταση επαφής όταν το ρεύμα ρέει πλευρικά στην άκρη του μετάλλου, δίδεται από τη σχέση

$$R_c = (L_T / Z) R_s \coth(L / L_T) \quad (2.15)$$

Μπορούμε να θεωρήσουμε 2 περιπτώσεις της (2.15) που έχουν πρακτικό ενδιαφέρον. Για $L \geq 1.5L_T$ ισχύει

$$R_c \cong L_T R_s / Z = \rho_c / L_T Z \quad (2.16)$$

που σημαίνει ότι η αντίσταση επαφής δεν εξαρτάται από το πλάτος L του ηλεκτροδίου γιατί σχεδόν όλο το ρεύμα μεταφέρεται από τον ημιαγωγό στο μέταλλο κοντά στην

Κεφάλαιο 2

άκρη του ηλεκτροδίου και κατόπιν διαδίδεται σε όλη του την επιφάνεια. Στην περίπτωση που $L < 0.5L_T$ παρομοίως ισχύει

$$R_c \cong \rho_c / LZ \quad (2.17)$$

όπου σε αυτή την περίπτωση η μεταφορά του ρεύματος από τον ημιαγωγό στο μέταλλο γίνεται σε όλο το πλάτος του ηλεκτροδίου.

2.3.2.4 Αντίσταση της Βάσης

Η αντίσταση στη βάση η οποία συμβολίζεται ως R_2 στο σχήμα 2.11 εξαρτάται κυρίως από τη νόθευση και υπολογίζεται από την ακόλουθη απλή σχέση

$$R_2 = \rho_B D / A \quad (2.18)$$

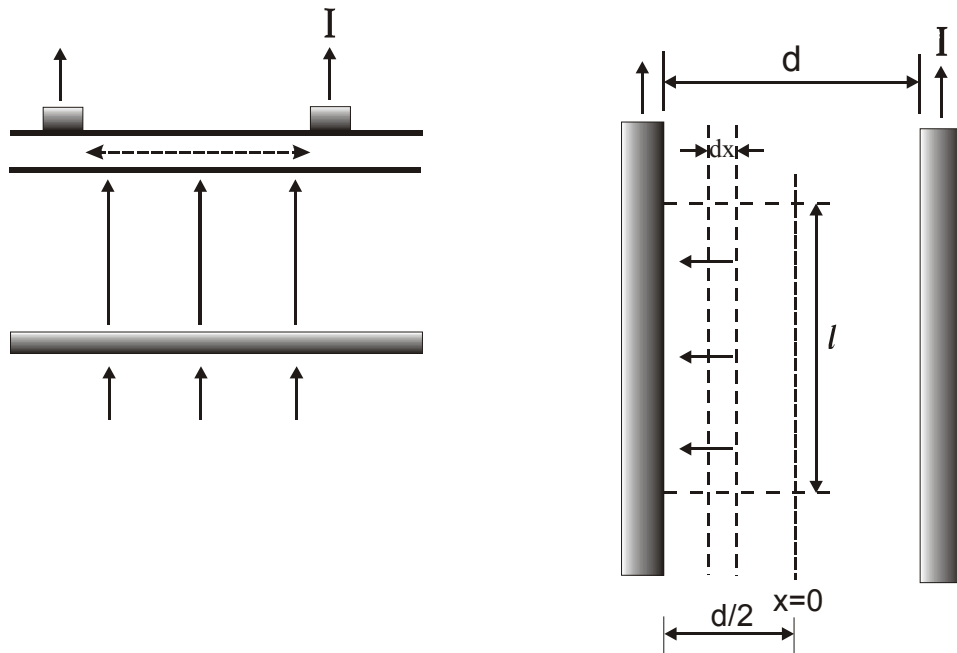
όπου A είναι η επιφάνεια του στοιχείου, D το πάχος της βάσης και ρ_B η αντίσταση φύλλου. Σαν παράδειγμα, αν θεωρήσουμε $\rho_B = 1 \Omega \cdot \text{cm}$, $D = 400 \mu\text{m}$ και επιφάνεια $A = 1 \text{cm}^2$ τότε $R_2 = 0.04 \Omega$, τιμή η οποία μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν αμελητέα στις περισσότερες περιπτώσεις.

2.3.2.5 Αντίσταση του εκπομπού

Ο υπολογισμός της αντίστασης σειράς του εκπομπού (R_3 στο σχήμα 2.11) μπορεί να γίνει θεωρώντας ότι το ρεύμα που προέρχεται από τη βάση ρέει εγκάρσια και όταν εισέρχεται στον εκπομπό κατευθύνεται οριζόντια και συλλέγεται από τα μπροστινά ηλεκτρόδια, όπως απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.

Ο υπολογισμός της αντίστασης μπορεί να γίνει μέσω των απωλειών ισχύος P_E στον εκπομπό και διαιρώντας με το τετράγωνο του ρεύματος (αφού $P_E = I_E^2 R_3$), όπου I_E θεωρούμε το ρεύμα που ρέει πλευρικά στον εκπομπό και κατανέμεται ομοιόμορφα στη βάση. Έτσι, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.15 στο κέντρο της περιοχής ανάμεσα στα ηλεκτρόδια ($x=0$) η ροή του ρεύματος θα είναι μηδενική, οπότε οι υπολογισμοί μπορούν να περιοριστούν στο μισό της περιοχής αυτής [3].

Κεφάλαιο 2



Σχήμα 2.15. Ροή ρεύματος στον εκπομπού σε τομή (αριστερά) και κάτοψη (δεξιά).

Συνεπώς, το μέγιστο ρεύμα το οποίο φτάνει στο ηλεκτρόδιο ισούται με το φωτόρευμα j πολλαπλασιασμένο με την επιφάνεια συλλογής, δηλαδή

$$I_{\max} = j l \frac{d}{2} \quad (2.19)$$

Το ρεύμα σε απόσταση x είναι $I(x) = jlx$ και η στοιχειώδης αντίσταση του εκπομπού αντίστασης ρ και βάθους x_j σε μια λεπτή λωρίδα πλάτους dx μπορεί να εκφραστεί ως

$$dR = \frac{\rho}{x_j l} dx = \frac{R_{\square}}{l} dx \quad (2.20)$$

όπου R_{\square} είναι η αντίσταση φύλλου του ημιαγωγού. Άρα, η απώλεια ισχύος dP στο στοιχειώδες φύλλο dx είναι

$$dP = I^2 dR = (jlx)^2 dR = (jlx)^2 \frac{R_{\square}}{l} dx \quad (2.21)$$

Η συνολική απώλεια ισχύος προκύπτει με ολοκλήρωση της (2.21) ως προς x

$$P = \int_0^{d/2} (jlx)^2 \frac{R_{\square}}{l} dx = j^2 l R_{\square} \frac{d^3}{24} \quad (2.22)$$

Η αντίσταση R_3 του εκπομπού μπορεί να εξαχθεί από την (2.22) έχοντας γνωστό από την (2.19) το ρεύμα που φτάνει στο ηλεκτρόδιο

Κεφάλαιο 2

$$P = I_{\max}^2 R_3 = j^2 l R_{\square} \frac{d^3}{24} = \left(j^2 l^2 \frac{d^2}{4} \right) \left(R_{\square} \frac{d}{6l} \right) \Leftrightarrow R_3 = \frac{R_{\square} d}{l 6} \quad (2.23)$$

Από την (2.23) προκύπτει ότι η ισοδύναμη αντίσταση R_3 είναι 3 φορές μικρότερη από την ηλεκτρική αντίσταση του εκπομπού στην περιοχή $x=0$ ως $d/2$.

2.3.2.6 Ωμικές απώλειες στα ηλεκτρόδια

Με αντίστοιχο σκεπτικό όπως στην προηγούμενη ενότητα, μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση σειράς των ηλεκτροδίων. Αν θεωρήσουμε το μήκος κάθε ηλεκτροδίου l , το πλάτος του L , και το πάχος του a με αντίσταση μετάλλου ρ_{met} , η αντίσταση R_5 όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11 είναι [3]

$$R_5 = \frac{1}{3} \rho_{met} \frac{l}{aL} \quad (2.24)$$

δηλαδή η τιμή της ισοδύναμης αντίστασης R_5 ισούται με το 1/3 της ηλεκτρικής αντίστασης του ηλεκτροδίου.

2.3.2.7 Αντίσταση ηλεκτροδίου ανόδου

Ο υπολογισμός της αντίστασης R_6 όπως φαίνεται στο σχήμα 2.11 γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως στις προηγούμενες ενότητες. Σε αυτή όμως την περίπτωση παίζει ρόλο το σημείο από το οποίο θα συλλεχθεί το ρεύμα και προφανώς η καλύτερη περίπτωση είναι να βρίσκεται στο κέντρο του ηλεκτροδίου. Έτσι αν a είναι το πάχος, L_B το πλάτος και l_B το συνολικό μήκος του ηλεκτροδίου, η αντίσταση του μισού ηλεκτροδίου είναι [3]

$$R_6 = \frac{1}{3 \times 2} \rho_{met} \frac{l_B}{aL_B} \quad (2.25)$$

Στην περίπτωση που η συλλογή του ρεύματος γινόταν στο άκρο του ηλεκτροδίου η αντίσταση που θα προέκυπτε θα ήταν τετραπλάσια

2.3.3 Διαδικασίες βελτίωσης της απορρόφησης και μείωσης της ανάκλασης

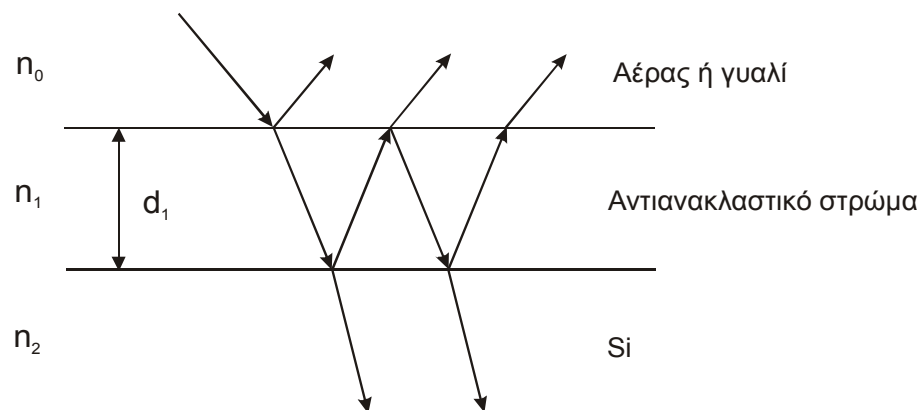
Όπως αναφέρθηκε στο τμήμα 1.4.1 το πυρίτιο που είναι το βασικότερο υλικό κατασκευής φ/β στοιχείων, έχει πολύ χαμηλό συντελεστή απορρόφησης αφού είναι

Κεφάλαιο 2

ημιαγωγός εμμέσου ενεργειακού διακένου, που έχει σαν αποτέλεσμα να απαιτείται μεγάλο πάχος υλικού για αποτελεσματική απορρόφηση. Από την άλλη πλευρά η επιφάνειά του ανακλά ένα μεγάλο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας (35-50%, ανάλογα το μήκος κύματος), οπότε ένα μεγάλο μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας χάνεται λόγω αυτών των διαδικασιών. Έτσι, έχουν βρεθεί τρόποι βελτίωσης της απορρόφησης παγιδεύοντας με κατάλληλο τρόπο το φως στο υλικό και αναγκάζοντάς το να διανύσει μεγαλύτερη διαδρομή, όσο και της ανάκλασης εφαρμόζοντας κατάλληλες αντιανακλαστικές επιστρώσεις.

2.3.3.1 Αντιανακλαστικές επιστρώσεις

Βάσει της οπτικής, μπορούμε να επιτύχουμε μείωση της ανάκλασης, χρησιμοποιώντας ένα αντιανακλαστικό στρώμα ορισμένου πάχους το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ του αέρα και του πυριτίου όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (σχ.2.16)



Σχήμα 2.16. Επίδραση αντιανακλαστικής επίστρωσης πάνω σε φιλμ πυριτίου.

Σύμφωνα με τους νόμους της οπτικής, όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα εισέρχεται σε ένα μέσο πυκνότερο, η φάση του μετατοπίζεται κατά $\pi/2$. Αν λοιπόν το πάχος του αντιανακλαστικού στρώματος έχει επιλεγθεί έτσι ώστε η διαδρομή του φωτός, δηλαδή το γινόμενο του δείκτη διάθλασης και του πάχους του φιλμ είναι ίσο με το ένα τέταρτο του μήκους κύματος, τότε η φωτεινή ακτινοβολία αυτού του μήκους κύματος που προσπίπτει κάθετα εκμηδενίζεται. Μαθηματικά, η συνθήκη αυτή εκφράζεται ως εξής:

$$n \cdot d = \frac{\lambda}{4} \quad (2.26)$$

Κεφάλαιο 2

Κάνοντας χρήση των συντελεστών Fresnel [26] ο συντελεστής ανάκλασης για ένα προσπίπτον κύμα φωτός δίνεται από τη σχέση

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\theta}{1 + r_1^2r_2^2 + 2r_1r_2 \cos 2\theta} \quad (2.27)$$

όπου r_1 και r_2 οι συντελεστές Fresnel και θ η αλλαγή στη φάση του φωτός που διανύει το φιλμ, που στην περίπτωση κάθετης πρόσπτωσης εκφράζονται ως εξής:

$$r_1 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \quad (2.28)$$

$$r_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (2.29)$$

$$\theta = \frac{2\pi n_1 d_1}{\lambda} \quad (2.30)$$

όπου ο n_0 είναι ο συντελεστής διάθλασης του ανώτερου στρώματος (αέρας ή γυαλί), n_1 ο συντελεστής διάθλασης της αντανακλαστικής επίστρωσης και n_2 ο συντελεστής διάθλασης του πυριτίου. Η σχέση (2.27) ελαχιστοποιείται όταν $n_1 d_1 = \lambda/4$ και παίρνει την ακόλουθη τιμή

$$R_{min} = \left(\frac{n_1^2 - n_0 n_2}{n_1^2 + n_0 n_2} \right)^2 \quad (2.31)$$

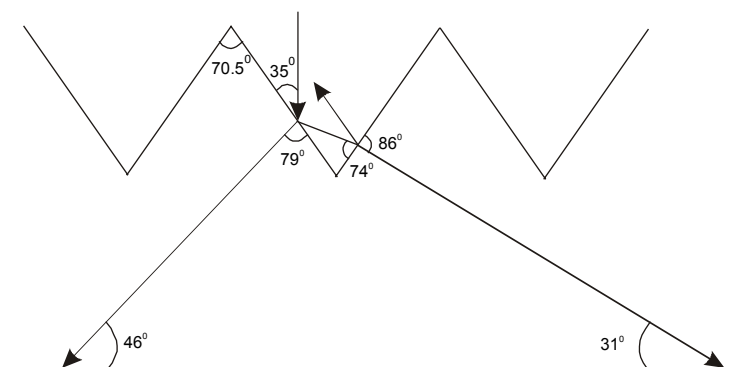
Η (2.31) μηδενίζεται όταν $n_1^2 = n_0 n_2$ οπότε μπορούμε να επιλέξουμε κατάλληλα το πάχος του αντανακλαστικού στρώματος έτσι ώστε να πετύχουμε τη βέλτιστη απορρόφηση για την κατανομή του ηλιακού φάσματος. Έχοντας υπόψη τη μεταβολή του συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει του μήκους κύματος, διαπιστώθηκε ότι για μήκος κύματος 0.6 μm έχουμε την ελάχιστη δυνατή ολική ανάκλαση για το φάσμα AM1.5.

Στην περίπτωση που έχουμε 2 αντανακλαστικές επιστρώσεις, ο συνολικός συντελεστής ανάκλασης μειώνεται ακόμα περισσότερο αν επιλέξουμε κατάλληλα τις παραμέτρους των στρωμάτων αυτών, δεδομένου ότι τώρα πλέον επιτυγχάνονται 2 τοπικά ελάχιστα στην ανάκλαση.

2.3.3.2 Διαμόρφωση επιφάνειας

Κεφάλαιο 2

Ένας τρόπος βελτίωσης της απορρόφησης του φωτός σε ένα φ/β στοιχείο, είναι με κατάλληλη διαμόρφωση της επιφάνειάς του. Με τη διαδικασία ανισοτροπικής εγχάραξης σε πυρίτιο κρυσταλλογραφικού προσανατολισμού $\langle 100 \rangle$ σχηματίζονται πυραμίδες που παρουσιάζουν γωνία $70,5^\circ$ στην κορυφή τους [27] (σχ. 2.17). Έτσι, το φως όταν προσπίπτει κάθετα, συναντά την επιφάνεια του πυριτίου με γωνία $35,25^\circ$. Επιπρόσθετα, η ανακλώμενη ακτίνα, προσπίπτει πάλι στην επιφάνεια του πυριτίου, όπως απεικονίζεται στο ίδιο σχήμα, οπότε εισέρχεται στο υλικό, μειώνοντας σημαντικά την ανάκλαση. Έχει υπολογιστεί ότι με τη συγκεκριμένη τεχνική η ανάκλαση του φωτός μειώνεται στο 10%. Αυτή η δομή όμως έχει το πρόβλημα ότι το φως που ανακλάται από την πίσω επιφάνεια και επανέρχεται στη μπροστινή σε πλευρά πυραμίδας αντίθετη από αυτήν στην οποία εισήλθε, θα διαφύγει (σχ.2.18α). Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση θα επανέλθει στο στοιχείο. Για να βελτιωθεί η απορρόφηση, προτάθηκε [28] η διάταξη με 2 διαφορετικά μεγέθη πυραμίδων όπως φαίνεται στο σχήμα 2.18β τοποθετημένες μη συμμετρικά με τέτοιο τρόπο, ώστε λιγότερο από 20% του φωτός να διαφεύγει μετά από την πρώτη ανάκλαση από την πίσω επιφάνεια. Για να επιτευχθεί αυτό χρειάζεται προσεκτική σχεδίαση μέσω λεπτομερών προσομοιώσεων.

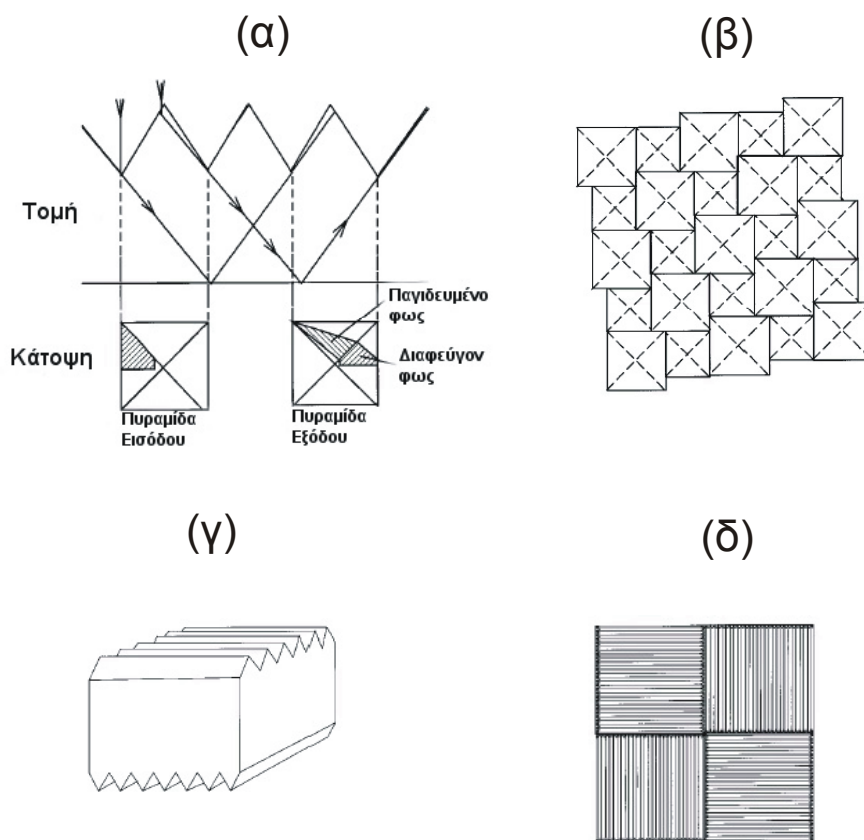


Σχήμα 2.17. Διαδρομή του φωτός (κάθετη πρόσπτωση) πάνω σε πυρίτιο με πυραμιδοειδή διαμορφωμένη επιφάνεια [27].

Μια άλλη δομή ακόμα πιο αποτελεσματική [29] είναι αυτή του σχήματος 2.18γ που βασίζεται σε κρυσταλλογραφικά επίπεδα που τέμνονται κατά την $\langle 111 \rangle$ κρυσταλλογραφική διεύθυνση στην μπροστινή και στην πίσω επιφάνεια η οποία είναι τελείως ανακλαστική και η δομή της είναι κάθετα προσανατολισμένη σε σχέση με την μπροστινή. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της διάταξης είναι οι πολλαπλές ανακλάσεις

Κεφάλαιο 2

στην πίσω επιφάνεια που μειώνουν την αποτελεσματικότητα του ανακλαστικού υλικού. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να διορθωθεί αφήνοντας την πίσω επιφάνεια επίπεδη και σχεδιάζοντας την μπροστινή με τμήματα που έχουν διαμόρφωση ανάλογης αυτής του σχήματος 2.18γ, αλλά κάθε περιοχή είναι προσανατολισμένη κάθετα σε σχέση με τη γειτονική της ('quiltwork' layout). Η βασική σχεδιαστική παράμετρος είναι ο λόγος του μήκους της κάθε περιοχής σε σχέση με το πάχος του φ/β στοιχείου. Αυτός θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε το φως που εισέρχεται σε τμήμα συγκεκριμένου προσανατολισμού να εξέρχεται από τμήμα αντίθετου προσανατολισμού έτσι ώστε όλο το φως να παραμείνει στη διάταξη.



Σχήμα 2.18. (α) Διαδρομή του φωτός σε φ/β στοιχείο όπου η μπροστινή επιφάνεια είναι διαμορφωμένη με πυραμίδες περιοδικά τοποθετημένες. (β) Τροποποιημένη διάταξη με πυραμίδες 2 διαφορετικών μεγεθών τοποθετημένων μη περιοδικά. (γ) Δομή με διαμορφωμένη μπροστινή και πίσω επιφάνεια. (δ) Διαμορφωμένη μπροστινή επιφάνεια όπου κάθε περιοχή είναι κάθετα προσανατολισμένη σε σχέση με τη γειτονική της. Η πίσω επιφάνεια είναι επίπεδη και έντονα ανακλαστική[29].

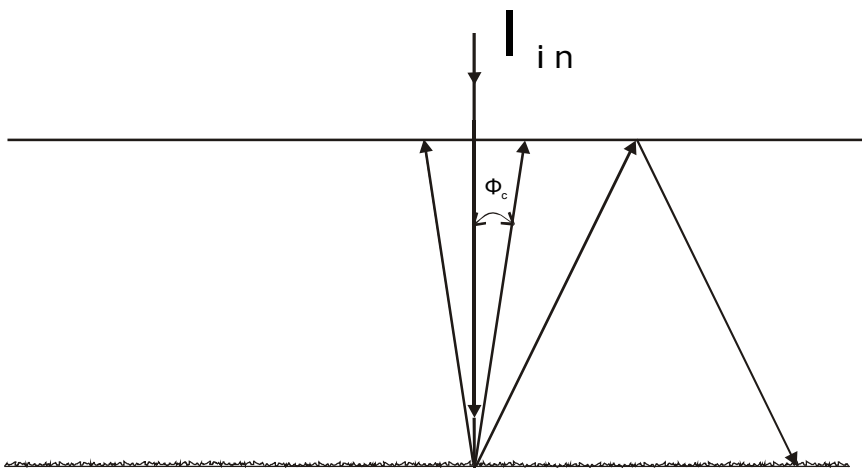
Μια άλλη ιδιαίτερα αποδοτική τεχνική μείωσης της ανάκλασης σε ένα φ/β στοιχείο, είναι η διαμόρφωση της πίσω επιφάνειάς του με τέτοιο τρόπο ώστε το φως

Κεφάλαιο 2

που προσπίπτει σε αυτή να ανακλάται με τυχαίο τρόπο προς όλες τις διευθύνσεις ανεξαρτήτως γωνίας πρόσπτωσης (ανάκλαση Lambert). Δεδομένου ότι το πυρίτιο έχει σχετικά υψηλό συντελεστή διάθλασης, ένα μεγάλο μέρος του φωτός παγιδεύεται μέσα στον κρύσταλλο, και διαφεύγει μόνο αυτό που ανακλάται στην κατεύθυνση κοντά στην κάθετο της επιφάνειας πρόσπτωσης (σχ. 2.19). Το φως που παγιδεύεται θα ανακλαστεί πάλι στην πίσω επιφάνεια, σε τυχαία διεύθυνση. Γενικά, η προσπίπτουσα ακτινοβολία μπορεί να διαφύγει μόνο μέσα από ένα λεπτό κώνο διαφυγής με γωνία που δίδεται από την ακόλουθη σχέση

$$\Phi_c = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right) \quad (2.32)$$

Για το Si όπου $n=3.5$ βρίσκουμε ότι $\Phi_c=17^\circ$.



Σχήμα 2.19. Ανάκλαση σε υλικό με διαμορφωμένη την πίσω επιφάνεια ώστε να ανακλά το φως με τυχαίο τρόπο (ανάκλαση Lambert). Φ_c είναι η γωνία διαφυγής του φωτός και I_{in} η προσπίπτουσα ακτινοβολία.

Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα, η συνολική ποσότητα ακτινοβολίας που διαφεύγει από το υλικό ισούται περίπου με 8.5% της εισερχόμενης [30]. Είναι επίσης δυνατόν να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο η απορρόφηση διαμορφώνοντας και την μπροστινή επιφάνεια με τον ίδιο τρόπο ή γεωμετρικά όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Προφανώς όσο πιο λεπτό είναι το υλικό τόσο πιο πολύ βάρος δίνεται στις τεχνικές διαμόρφωσης της επιφάνειας διότι πέρα από τη βελτίωση στην ανάκλαση, αυξάνεται σημαντικά η διαδρομή του φωτός στο υλικό, οπότε επιτυγχάνεται σημαντική απορρόφηση στα μεγάλα μήκη κύματος ενώ η ανάκλαση στην επιφάνεια του ϕ/β

Κεφάλαιο 2

στοιχείου μειώνεται περαιτέρω με κατάλληλες αντιανακλαστικές επιστρώσεις, σύμφωνα με την ανάλυση της προηγούμενης ενότητας.

2.4 Θεωρητικά όρια της απόδοσης των φ/β στοιχείων πυριτίου.

Δεδομένου ότι το πυρίτιο είναι το κύριο υλικό στο οποίο βασίζεται η κατασκευή φ/β στοιχείων, έχουν γίνει διάφορες θεωρητικές μελέτες για τα όρια της απόδοσης που μπορούν να επιτευχθούν με αυτό. Η πρώτη γενική και λεπτομερειακή ανάλυση που αφορά το πυρίτιο ως ημιαγωγό για φ/β μετατροπή έγινε από τους Schockley και Queisser [31] όπου σαν μοναδικός μηχανισμός απωλειών θεωρήθηκε η επανασύνδεση λόγω ακτινοβολίας (κεφ. 1) και η απορρόφηση του φωτός θεωρείται ιδανική για φωτόνια ενέργειας μεγαλύτερης ή ίσης από το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου. Παρόμοιες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με αυτό το σκεπτικό [32-33]. Αργότερα ακολούθησαν άλλες [34,35] όπου αναλύθηκε η απόδοση συγκεκριμένων διατάξεων φ/β στοιχείων με ενώσεις τύπου n ή p. Οι πιο σύγχρονες αναλύσεις και πιο λεπτομερείς έγιναν από τον Green [36] και σχεδόν ταυτόχρονα από τους Tiedje et al. [37] από τις οποίες θα αναφέρουμε τα βασικά αποτελέσματα.

2.4.1 Μέγιστο όριο της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc})

Μια από τις βασικές παραμέτρους που συνιστούν στην μεγιστοποίηση της απόδοσης ενός φ/β στοιχείου είναι η βελτίωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}). Οι κυριότεροι μηχανισμοί που την περιορίζουν στις πραγματικές διατάξεις, είναι διαδικασίες επανασυνδέσεων μέσω ατελειών στο υλικό, στην επιφάνεια του στοιχείου, όπως και στις μεταλλικές επαφές. Στην ανάλυση του Green [36] που δίδεται παρακάτω οι μηχανισμοί επανασύνδεσης που περιορίζουν την V_{oc} είναι η διαδικασία Auger και η ανασύνδεση μέσω ακτινοβολίας. Θεωρώντας ένα φ/β στοιχείο τύπου n⁺p του οποίου οι επιφάνειες θεωρούνται ιδανικές, δηλαδή έχουν μηδενική ταχύτητα επανασύνδεσης, τότε το ρεύμα σκότους κόρου J_0 θα δίνεται από τη σχέση

$$J_0 = \frac{en_i^2}{N_B} \sqrt{\frac{D_B}{\tau_B}} \tanh \frac{W_B}{L_B} \quad (2.33)$$

Κεφάλαιο 2

όπου N_B είναι η νόθευση στη βάση τύπου p , D_B , L_B και τ_B η σταθερά διάχυσης, το μήκος διάχυσης και ο χρόνος ζωής των φορέων μειονότητας αντίστοιχα και W_B είναι το πάχος της βάσης του στοιχείου. Για διαδικασία επανασύνδεσης Auger υπό συνθήκες χαμηλής έγχυσης προκύπτει

$$\tau_B = 1/(C_B N_B^2) \quad (2.34)$$

όπου C_B είναι ο αντίστοιχος συντελεστής Auger. Αντικαθιστώντας στην (2.33) και με τη βοήθεια της σχέσης που συνδέει το φωτόρευμα J_{ph} με τη V_{oc} καταλήγουμε στην ακόλουθη σχέση

$$V_{oc} = \frac{KT}{e} \ln \left(\frac{J_{ph}}{en_i^2 \sqrt{D_B C_B} \tanh(W_B/L_B)} + 1 \right) \quad (2.35)$$

Στην ιδανική περίπτωση όπου θεωρείται ότι κάθε φωτόνιο ενέργειας μεγαλύτερης ή ίσης με το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού συνεισφέρει στη δημιουργία φωτορεύματος, τότε για το φάσμα AM0 το προκύπτον όριο είναι 54 mA/cm^2 , ενώ για το AM1.5 (100 mW/cm^2) είναι 44 mA/cm^2 . Έτσι, με αντικατάσταση αριθμητικών τιμών στην (2.35) για το φάσμα AM0 προκύπτει

$$V_{oc} (mV) = 716 - \frac{KT}{e} \ln(\tanh(W_B/L_B)) + \frac{KT}{e} \ln \left(\frac{J_{ph}}{J_{ph0}} \sqrt{\frac{D_{B0} C_{B0}}{D_B C_B}} \right) - \Delta V_G \quad (2.36)$$

όπου ο όρος ΔV_G εισάγει διορθώσεις που οφείλονται σε φαινόμενα έντονης νόθευσης και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν είναι $C_{n0}=2.8 \times 10^{-31} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$, $C_{p0}=9.9 \times 10^{-32} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ [38], $D_{n0}=30 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, $D_{p0}=10.6 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ και $J_{ph0}=54 \text{ mA/cm}^2$. Η (2.36) έχει δοθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να φανεί η επίδραση των παραμέτρων με τιμές διαφορετικές από αυτές που αναφέρθηκαν. Το συμπέρασμα που προκύπτει για ένα ϕ/β στοιχείο με βάση μεγάλου πάχους εξετάζοντας την (2.36) είναι ότι η τάση ανοιχτού κυκλώματος δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 720 mV περίπου εξαιτίας των διαδικασιών επανασύνδεσης Auger. Στην περίπτωση όμως που το πάχος της βάσης είναι πολύ μικρότερο από το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας, τότε η (2.36) απλοποιείται στην σχέση

Κεφάλαιο 2

$$V_{oc} (mV) = 716 + \frac{KT}{e} \ln\left(\frac{L_B}{W_B}\right) \quad (2.37)$$

Σε αυτή την περίπτωση, δηλαδή για φ/β στοιχεία λεπτού πάχους το όριο των περίπου 720 mV μπορεί να ξεπεραστεί.

Σε συνθήκες υψηλής έγχυσης φορέων που παρατηρείται όταν η βάση είναι ελαφρά νοθευμένη ή το φ/β στοιχείο λειτουργεί υπό συγκεντρωμένη ακτινοβολία, τότε ο ρυθμός ανασύνδεσης Auger θα είναι

$$U = C_n n^2 p + C_p p^2 n \quad (2.38)$$

Η (2.38) μπορεί να εκφραστεί επίσης ως

$$\frac{J_{ph}}{eW_B} = C_n n^2 (N_B + n) + C_p n (N_B + n)^2 \quad (2.39)$$

Παράλληλα ισχύει η γνωστή σχέση

$$(n + N_B)n = n_i^2 e^{eV_{oc}/KT} \quad (2.40)$$

Από τις (2.39) και (2.40) είναι δυνατός ο υπολογισμός της τάσης ανοιχτού κυκλώματος. Μπορεί όμως να εξεταστεί η περίπτωση πολύ υψηλής έγχυσης όπου οι συγκεντρώσεις των παραγόμενων φορέων είναι πολύ μεγαλύτερες από τη νόθευση της βάσης. Τότε οι (2.39) και (2.40) απλοποιούνται:

$$\frac{J_{ph}}{eW_B} = (C_n + C_p)n^3 \quad (2.41)$$

$$n^2 = n_i^2 e^{eV_{oc}/KT} \quad (2.42)$$

Συνεπώς η V_{oc} μπορεί να υπολογιστεί εύκολα

$$V_{oc} = \frac{2}{3} \frac{KT}{e} \ln\left(\frac{J_{ph}}{en_i^3 (C_n + C_p)W_B}\right) \quad (2.43)$$

Παρατηρούμε ότι σε κατάσταση πολύ υψηλής έγχυσης η τάση ανοιχτού κυκλώματος λαμβάνει μια σταθερή τιμή ανεξάρτητη από τη νόθευση του ημιαγωγού.

Αν θεωρήσουμε σαν μοναδικό μηχανισμό επανασύνδεσης αυτό της ακτινοβολίας, τότε τα όρια που προκύπτουν από αυτή είναι αρκετά μεγαλύτερα. Η σχέση με την οποία μπορούμε να υπολογίσουμε την τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι η ακόλουθη

Κεφάλαιο 2

$$U = B'np \Leftrightarrow \frac{J_{ph}}{eW} = B' n_i^2 \exp(eV_{oc}/KT) \quad (2.44)$$

όπου το γινόμενο $B' n_i^2$ δίνει το ρυθμό επανασύνδεσης λόγω ακτινοβολίας ανά μονάδα όγκου στο πυρίτιο. Η τιμή της σταθεράς αυτής κυμαίνεται στην περιοχή από 0.6-1.0 X $10^6 \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ [39]. Οι Schockley και Quiesser [31] υπολόγισαν το όριο για τη V_{oc} στα 837 mV για ηλιακό φάσμα που θεωρείται ως μέλαν σώμα. Αυτό το όριο μπορεί να ξεπεραστεί [36] αν το φ/β στοιχείο έχει πάχος μικρότερο από 33μm, όπως προκύπτει από τη σχέση (2.37).

2.4.1.1 Προϋποθέσεις που πρέπει να διαθέτει το υλικό για επίτευξη βέλτιστης V_{oc}

Στην πραγματικότητα, η απόδοση ενός φ/β στοιχείου περιορίζεται σημαντικά λόγω επανασυνδέσεων που οφείλονται σε ατέλειες στο εσωτερικό του υλικού και στην επιφάνειά του. Στην περίπτωση ύπαρξης ατελειών στο υλικό, ο ρυθμός επανασύνδεσης είναι τύπου SRH και δίνεται από την ακόλουθη σχέση (κεφάλαιο 1)

$$U = \frac{np}{\tau_{n0}(p + p_1) + \tau_{p0}(n + n_1)} \quad (2.45)$$

όπου τ_{n0} και τ_{p0} είναι οι χρόνοι ζωής ηλεκτρονίων και οπών αντίστοιχα ως φορείς μειονότητας και n_1 και p_1 είναι συγκεντρώσεις που αφορούν την ενέργεια της στάθμης ατελειών. Σε συνθήκες χαμηλής έγχυσης και για υλικό τύπου p η σχέση (2.45) απλοποιείται και προκύπτουν οι ακόλουθες εκφράσεις

$$U = n/\tau_{n0} \Leftrightarrow \frac{J_{ph}}{eW} = \frac{n_i^2 \exp(eV_{oc}/KT)}{N_B \tau_{n0}} \quad (2.46)$$

$$V_{oc} = \frac{KT}{e} \ln \left(\frac{J_{ph} N_B \tau_{n0}}{e n_i^2 W_B} \right) \quad (2.47)$$

Αντίστοιχα σε συνθήκες υψηλής έγχυσης θα ισχύει

$$U = n/(\tau_{n0} + \tau_{p0}) \Leftrightarrow \frac{J_{ph}}{eW_B} = \frac{n_i \exp(eV_{oc}/2KT)}{\tau_{n0} + \tau_{p0}} \quad (2.48)$$

Κεφάλαιο 2

$$V_{oc} = \frac{2KT}{e} \ln \left(\frac{J_{ph}(\tau_{n0} + \tau_{p0})}{en_i W_B} \right) \quad (2.49)$$

Από τις (2.46) και (2.48) μπορούν να υπολογιστούν τα απαιτούμενα όρια για τις παραμέτρους των φορέων μειονότητας συγκρίνοντάς τις απευθείας με τις εκφράσεις της προηγούμενης ενότητας. Έτσι, σε συνθήκες χαμηλής έγχυσης για υλικό τύπου p αρκεί ο χρόνος ζωής των φορέων μειονότητας τ_{n0} να είναι σημαντικά μεγαλύτερος από το χρόνο ζωής που οφείλεται σε διαδικασία Auger και δίδεται από την έκφραση $1/C_p N_B^2$. Σε συνθήκες υψηλής έγχυσης το όριο αυτό δεν είναι τόσο αυστηρό και δίδεται από

$$(\tau_{n0} + \tau_{p0}) \gg \left(\frac{e^2 W_B^2}{J_{ph}^2 (C_n + C_p)} \right)^{1/3} \quad (2.50)$$

Από την (2.50) προκύπτει ότι για στοιχεία 20, 300, και 1000μm πάχους το άθροισμα των χρόνων ζωής απαιτείται να είναι πολύ μεγαλύτερο από 450μs, 2.7ms και 6.1 ms αντίστοιχα, τιμές που είναι κατασκευαστικά εφικτές, όπως για παράδειγμα σε δείγματα Si κατασκευασμένα από την Wacker [40], ενώ πρόσφατα έχουν αναφερθεί τιμές αρκετά μεγαλύτερες από αυτό το όριο (32ms) [41].

Αντίστοιχα με πριν, η έκφραση για το ρυθμό της επιφανειακής επανασύνδεσης ανά μονάδα επιφανείας και για 1 στάθμη ατελειών δίνεται από τη σχέση

$$U = \frac{np}{(p + p_1)/S_{n0} + (n + n_1)/S_{p0}} \quad (2.51)$$

όπου S_{n0} και S_{p0} είναι παράμετροι που δίνουν τις επιφανειακές ταχύτητες επανασυνδέσεων. Από την (2.51) προκύπτει ότι για συνθήκες χαμηλής έγχυσης, το όριο για την επιφανειακή ταχύτητα ανασύνδεσης θα δίνεται από τη σχέση

$$S_{n0} \ll W_B C_p N_B^2 \quad (2.52)$$

Από την (2.52) διαπιστώνεται ότι για ένα φ/β στοιχείο πάχους 300 μm με νόθευση 10^{17}cm^{-3} η S_{n0} πρέπει να είναι πολύ μικρότερη από 30 cm/sec. Σε υψηλή έγχυση η αντίστοιχη συνθήκη είναι

$$\min(S_{n0}, S_{p0}) \ll (J_{ph}^2 (C_n + C_p) W_B / e^2)^{1/3} \quad (2.53)$$

Κεφάλαιο 2

Συνεπώς για ένα στοιχείο ίδιου πάχους 300μm, το όριο που προκύπτει είναι 11 cm/sec. Αν θεωρήσουμε ότι στην πίσω επιφάνεια υπάρχει μια απότομη ένωση τύπου p/p⁺ η οποία δίνει ένα πεδίο πίσω επιφάνειας (BSF) νόθευσης N_s^+ , τότε για συνθήκες χαμηλής έγχυσης η αντίστοιχη της (2.52) συνθήκης θα είναι

$$S_{n0} \ll W_B C_p N_B N_s^+ \quad (2.54)$$

Προφανώς η έκφραση (2.54) μπορεί να ικανοποιηθεί πολύ πιο εύκολα από την (2.52) δεδομένου ότι $N_s^+ \gg N_B$. Στην περίπτωση υψηλής έγχυσης στη βάση, η πίσω επιφάνεια λόγω της έντονης νόθευσης θα παραμένει σε χαμηλή έγχυση, και η συνθήκη που θα πρέπει να ικανοποιηθεί είναι

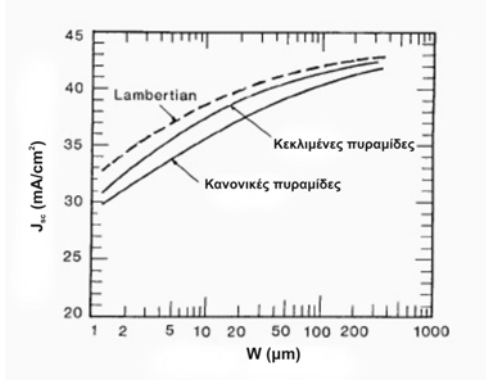
$$S_{n0} \ll (J_{ph} (C_n + C_p)^2 W_B^2 / e)^{1/3} \quad (2.55)$$

Με την ίδια λογική, η (2.55) ικανοποιείται πολύ πιο εύκολα σε σχέση με την (2.53) γεγονός που σημαίνει ότι η ύπαρξη ενός BSF βοηθά στην επίτευξη καλύτερης απόδοσης.

2.4.2 Μέγιστο φωτόρευμα

Το μέγιστο φωτόρευμα που μπορεί να παράγει ένα φ/β στοιχείο εξαρτάται από την ανάκλαση στην επιφάνεια του και τις τεχνικές παγίδευσης του φωτός ώστε να βελτιωθεί η απορρόφηση στα μεγάλα μήκη κύματος. Τέτοιες τεχνικές μείωσης της ανάκλασης και βελτίωσης της απορρόφησης αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.3.3. Στην ιδανική περίπτωση η ανάκλαση στην μπροστινή επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί μηδενική, ενώ η πίσω επιφάνεια να έχει τέλεια ανακλαστικότητα. Στο επόμενο σχήμα [42] απεικονίζεται το μέγιστο φωτόρευμα J_{sc} συναρτήσει του πάχους W για φ/β στοιχεία όπου η μπροστινή επιφάνεια έχει διαμορφωθεί με κανονικές πυραμίδες, και με πυραμίδες, στις οποίες οι έδρες έχουν κάποια κλίση σε σχέση με την κανονική (24° θεωρείται η βέλτιστη κλίση). Επίσης παρουσιάζεται και η ιδανική περίπτωση όπου το φως διασκορπίζεται με τυχαίο τρόπο στην επιφάνεια του στοιχείου (Lambertian).

Κεφάλαιο 2



Σχήμα 2.20. Θεωρητικό μέγιστο όριο του παραγόμενου φωτορεύματος σε φ/β στοιχείο για 3 διαφορετικούς τρόπους παγίδευσης του φωτός [Campbell] για συνθήκες ακτινοβολίας AM1.5 (97 mW/cm^2) [42].

Προφανώς, η καλύτερη απορρόφηση επιτυγχάνεται με την Lambertian επιφάνεια όπου στην ιδανική περίπτωση [37], το μέσο μήκος που διανύει το φως μέσα στο υλικό αυξάνει από $2W$ σε $4n^2 W$, όπου n ο συντελεστής διάθλασης του ημιαγωγού.

2.4.3 Μέγιστη Απόδοση επηρεαζόμενη από επιφανειακές ανασυνδέσεις

Στις προηγούμενες ενότητες αναλύθηκαν τα μέγιστα όρια που μπορούν να επιτευχθούν για την τάση ανοιχτού κυκλώματος και το φωτόρευμα σε ένα φ/β στοιχείο. Στην περίπτωση της V_{oc} τα όρια υπολογίστηκαν θεωρώντας βασικό μηχανισμό απωλειών την επανασύνδεση Auger και ορίστηκαν οι μέγιστες τιμές των επιφανειακών ταχυτήτων επανασύνδεσης ώστε να επιτευχθούν αυτά. Στην πραγματικότητα οι επιφανειακές επανασυνδέσεις επηρεάζουν πολύ την απόδοση των φ/β στοιχείων στις περισσότερες εφαρμογές. Η ακόλουθη έκφραση λαμβάνει υπόψιν τις επιφανειακές ανασυνδέσεις υποθέτοντας συντελεστή ποιότητας διόδου 1 για τον όρο αυτό [29]:

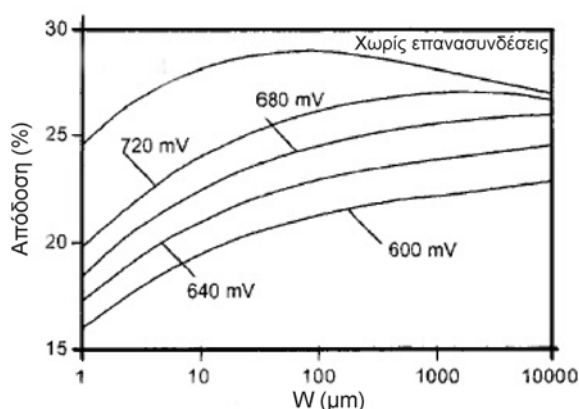
$$J = J_{ph} - eW_B(C_n + C_p)n_i^3 \left[\exp\left(\frac{3eV}{2KT}\right) - 1 \right] - J_{0s} \left[\exp\left(\frac{eV}{KT}\right) - 1 \right] \quad (2.56)$$

όπου J_{0s} είναι το ρεύμα που οφείλεται στις επιφανειακές επανασυνδέσεις. Συνεπώς, η τάση ανοιχτού κυκλώματος η οποία επηρεάζεται από τις επιφανειακές απώλειες θεωρώντας αμελητέους τους υπόλοιπους μηχανισμούς θα δίνεται από τη σχέση :

Κεφάλαιο 2

$$V_{oc} = \frac{KT}{e} \ln \left(\frac{J_{ph}}{J_{0s}} + 1 \right) \quad (2.57)$$

Το φωτόρευμα J_{ph} έχει υπολογιστεί θεωρώντας ιδανική Lambertian επιφάνεια παγίδευσης φωτός, οπότε για συνθήκες ακτινοβολίας AM1.5 ($100\text{mW}/\text{cm}^2$) η μέγιστη απόδοση μιας φ/β διάταξης συναρτήσει του πάχους W με παράμετρο τη V_{oc} καθοριζόμενη από επιφανειακές επανασυνδέσεις απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα



Σχήμα 2.21. Θεωρητική μέγιστη απόδοση φ/β στοιχείων πυριτίου συναρτήσει του πάχους τους με παράμετρο τη μέγιστη V_{oc} που καθορίζεται από τις επιφανειακές επανασυνδέσεις θεωρώντας αμελητέους τους υπόλοιπους μηχανισμούς. Η πάνω καμπύλη καθορίζει το μέγιστη απόδοση που επιβάλλεται από τον μηχανισμό Auger για μηδενικές επιφανειακές ανασυνδέσεις [29].

Η μέγιστη απόδοση επιτυγχάνεται για μηδενικές επιφανειακές επανασυνδέσεις, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 2.4.1. Από αυτή προκύπτει ότι η βέλτιστη απόδοση είναι 28.8% για φ/β στοιχείο πάχους 80 μm , ενώ ακόμη και για πάχος 1 μm η απόδοση είναι πάνω από 24%. Η εικόνα αλλάζει στις υπόλοιπες καμπύλες όπου λαμβάνονται υπόψη οι επιφανειακές επανασυνδέσεις. Έτσι, για $V_{oc}=720\text{mV}$, τιμή που αποτελεί το καλύτερο δυνατό πειραματικό αποτέλεσμα, η απόδοση αυξάνει μονότονα μέχρι το πάχος του 1mm, αν και για σχετικά μεγάλα πάχη η απόδοση δεν επηρεάζεται πολύ. Έτσι για ένα στοιχείο πάχους 400 μm αυτή πέφτει από το 28.5% στο 26.8% για την ίδια καμπύλη, ενώ όταν το πάχος είναι 1 μm η αντίστοιχη μεταβολή είναι από το 24.7% στο 19.8%. Προφανώς ένα τυπικό φ/β στοιχείο έχει επιπλέον απώλειες όπως αναλύθηκε στις προηγούμενες ενότητες, οπότε η απόδοση πέφτει σημαντικά. Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν από την ανάλυση των Tiedje et al. [37] όπου θεωρούν ένα φ/β στοιχείο

Κεφάλαιο 2

που λειτουργεί σε υψηλή έγχυση (είναι ελαφρά νοθευμένο) με βασικό μηχανισμό απωλειών την επανασύνδεση Auger. Στους υπολογισμούς τους θεωρούν ότι το στοιχείο έχει ιδανική αντανακλαστική επίστρωση στην μπροστινή επιφάνεια και είναι τύπου Lambertian ώστε να επιτυγχάνει τη βέλτιστη απορρόφηση ενώ η πίσω επιφάνεια ανακλά τέλεια το φως. Από αυτή τη θεώρηση προέκυψε ότι για το φάσμα AM1.5 (97 mW/cm^2) το μέγιστο της απόδοσης επιτυγχάνεται για φ/β στοιχείο πάχους $100 \mu\text{m}$ η οποία είναι 29.8%. Οι άλλοι παράμετροι λειτουργίας του στοιχείου είναι $V_{oc}=769\text{mV}$, $J_{sc}=42.2\text{mA/cm}^2$ και $FF=0.89$.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Vedde J., Jensen L., Larsen T. και Klausen T., *Proc. 19th EC PV Solar Energy Conf.*, Paris, France, 2004, σελ. 1075.
- [2] Knobloch J., Aberle A. και Voss B., *Proc. 9th EC PV Solar Energy Conf.*, Freiburg, Germany, 1989, σελ. 777.
- [3] Goetzberger A., Knobloch J., Voss B. *Crystalline Silicon Solar Cells*, John Wiley and Sons, 1998, κεφ. 6.
- [4] Green M. A., Zhao J., Wang A., και Wenham S. R., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 46, 1999, σελ. 1940.
- [5] Swanson R. M., *Progr. In Photovoltaics: Res. Appl.*, Τόμος 8, 2000, σελ. 93.
- [6] Wettling W., *Sol. Energy Mat. & Sol. Cells*, Τόμος 38, 1995, σελ. 487.
- [7] Aberle A., Glunz S., και Warta W., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 71, 1992, σελ. 4422.
- [8] Gee J. M., Bode M. D., Silva B. I., *26th IEEE PV Spec. Conf.*, Anaheim, California, USA, 1997, σελ. 275.
- [9] Lölgén P. et al., *23rd IEEE PV Spec. Conf.*, USA, 1993, σελ. 236.
- [10] Aberle A., Warta W., Knobloch J. και Voss B. *21st IEEE PV Spec. Conf.*, Kissimmee, Florida, USA, 1990, σελ. 233.
- [11] Park J. Neugroschel A., και Lindholm F., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 33, 1986, σελ. 240.
- [12] King R. R., Sinton R. A. και Swanson R. M., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 37, 1990, σελ. 365.
- [13] Cuevas A., Merchán R., Ramos J. C., και King R. R., *23rd IEEE PV Spec. Conf.*, USA, 1993, σελ. 309.
- [14] Pang S. K., Smith A. W. και Rohatgi A., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 42, 1995, σελ. 662.
- [15] Clugston D., και Basore P., *26th IEEE PV Spec. Conf.*, Anaheim, California, USA, 1997, σελ. 207.
- [16] Dadu M., Kapoor A., Tripathi K. N., *Sol. Energy Mat. & Sol. Cells*, Τόμος 71, 2002, σελ. 213.
- [17] Rhoderick E. H., *Metal-Semiconductor Contacts*, Oxford, Clarendon, 1978.

Κεφάλαιο 2

- [18] Schottky W., *Z. Phys*, Τόμος 113, 1939, σελ. 367.
- [19] Schockley W., *Bell System Techn.*, Τόμος 28, 1949, σελ. 435.
- [20] Schroder D. K., και Meier D. L., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 31, 1984, σελ. 637.
- [21] Kroger F. A., Diemer G., Klasens H. A., *Phys. Rev.*, Τόμος 103, 1956, σελ. 279.
- [22] Sze S. M., *Physics of Semiconductor Devices*, 2^η Έκδοση, John Wiley & Sons, 1981.
- [23] Yu, A.Y.C., *Solid-State Electron.*, Τόμος 13, 1970, σελ. 239.
- [24] Padovani F. A. και Stratton R., *Solid-State Electron.*, Τόμος 9, 1966, σελ. 695.
- [25] Murmann H., και Widmann D., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 16, 1969, σελ. 1022.
- [26] O.S Heavens, *The Optical Properties of Thin Solid Films*, Dover, 1991.
- [27] Fahrenbuch A. και Bube R., *Fundamentals of Solar Cells*, Academic Press, New York, 1983.
- [28] Campbell P. και Green M. A., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 62, 1987, σελ. 243.
- [29] Green M. A., *Progr. In Photovoltaics: Res. Appl.*, Τόμος 7, 1999, σελ. 317.
- [30] Goetzberger A., *15th IEEE PV Spec. Conf.*, Orlando, USA, 1981, σελ. 867.
- [31] Schockley W. και Queisser H. J., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 32, 1961, σελ. 510.
- [32] Rose A., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 31, 1960, σελ. 1640.
- [33] Henry C. H., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 51, 1980, σελ. 449.
- [34] Wolf M., *16th IEEE PV Spec. Conf.*, Orlando, USA, 1982, σελ. 355.
- [35] Redfield D., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 27, 1980, σελ. 766.
- [36] Green M. A., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 31, 1984, σελ. 671.
- [37] Tiedje T., Yablonovitch E., Cody G. D., και Brooks B. G., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 31, 1984, σελ. 711.
- [38] Dziwior και Schmid W., *Appl. Phys. Lett.*, Τόμος 31, 1977, σελ. 346.
- [39] Ross R. T., και Collins J. M., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 51, 1980, σελ. 4504.
- [40] Wacker Chemitronic, Product Literature 102 1080, Oct. 1980.
- [41] Kerr M. J. και Cuevas A., *Semicond. Sci. Tech.*, Τόμος 17, 2002, σελ. 35.
- [42] Campbell P., Wenham S. R. και Green M. A., *20th IEEE PV Spec. Conf.*, Las Vegas, USA, 1988, σελ. 714.

ΤΥΠΟΙ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Έχουν περάσει πάνω από 60 χρόνια από τότε που κατασκευάστηκαν τα πρώτα λειτουργικά φ/β στοιχεία στα εργαστήρια Bell [1], ενώ μερικά χρόνια αργότερα οι βελτιωμένες τεχνικές επεξεργασίας του Si οδήγησαν τους Pearson et al. του ίδιου ερευνητικού εργαστηρίου στην παρασκευή των πρώτων σύγχρονων φ/β στοιχείων με απόδοση 6% [2]. Παρόλα αυτά όπως φαίνεται και στο κεφάλαιο 1, τα τελευταία 15 χρόνια η απόδοσή τους βελτιώθηκε πιο έντονα, γεγονός που οφείλεται τόσο στην εξέλιξη της μικροηλεκτρονικής, όσο και στην κατανόηση της λειτουργίας των ημιαγωγικών διατάξεων και ειδικά της ένωσης p-n αλλά και του διπολικού τρανζίστορ.

Οι πρώτες χρήσεις των φ/β στοιχείων ήταν σε διαστημικές εφαρμογές, όπου εκεί το ζητούμενο ήταν η παραγωγή ενέργειας ανεξάρτητα από το κόστος, όπου εκεί τυποποιήθηκε η δομή τους με σκοπό την επίτευξη σημαντικών αποδόσεων. Μετά το 1970, προέκυψαν σημαντικά τεχνολογικά επιτεύγματα στο χώρο της μικροηλεκτρονικής, όπως για παράδειγμα η τεχνική της φωτολιθογραφίας, ενώ παράλληλα έγιναν σημαντικές βελτιώσεις στη σχεδίαση των φ/β στοιχείων με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών που αναλύθηκαν λεπτομερώς στο κεφάλαιο 2.

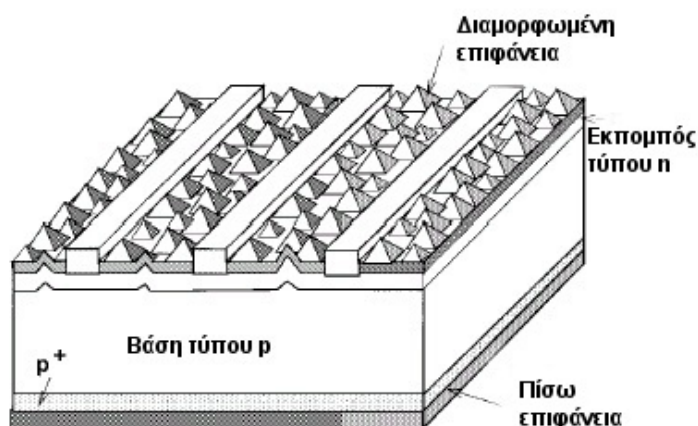
Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι βασικές δομές φ/β στοιχείων πυριτίου και κυρίως οι διατάξεις που επιτυγχάνουν καλές αποδόσεις, ενώ θα δοθεί έμφαση στα φ/β στοιχεία σημειακών επαφών του τύπου PERL (Passivated Emitter and Rear Locally Diffused) τα οποία έχουν επιτύχει τη μέγιστη απόδοση μέχρι στιγμής [3].

3.2 Το φ/β στοιχείο COMSAT

Το φ/β στοιχείο που αναπτύχθηκε από τα εργαστήρια της COMSAT [4] απεικονίζεται στο σχήμα 1, αναπτύχθηκε το 1974 και ουσιαστικά αποτελεί εξέλιξη της φ/β διάταξης ρηχής ένωσης, που αποκαλείται «αώδες» φ/β στοιχείο (violet cell) [5]. Βασικό χαρακτηριστικό της διάταξης του σχήματος ήταν η διαμορφωμένη μπροστινή επιφάνειά του. Αυτή προέκυψε με ανισοτροπική εγχάραξη δισκίου κρυσταλλικού Si

Κεφάλαιο 3

κρυσταλλογραφικής διεύθυνσης (100) με σκοπό την εμφάνιση επιπέδων προσανατολισμού {111} τα οποία εγχαράσσονται με αργό ρυθμό. Έτσι δημιουργούνται πυραμίδες και η επιφάνεια γίνεται μη ανακλαστική (κεφάλαιο 2). Σαν συνέπεια της χαμηλής ανάκλασης της μπροστινής του επιφάνειας το φ/β στοιχείο ονομαζόταν μη ανακλαστικό ή μαύρο (black cell).



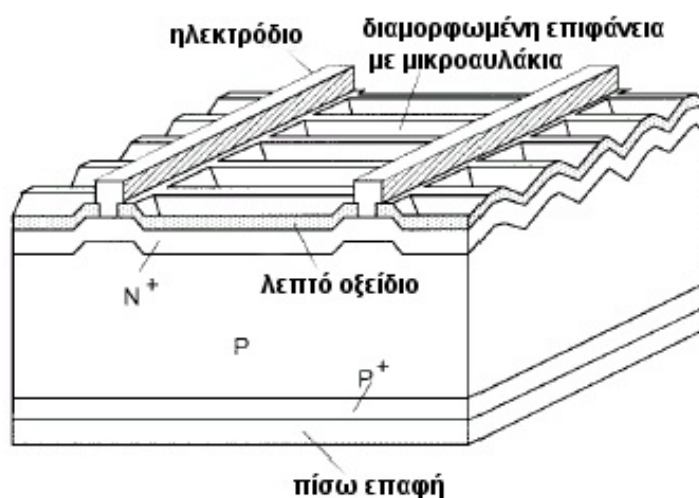
Σχήμα 3.1. Το φ/β στοιχείο που αναπτύχθηκε στα εργαστήρια COMSAT (black cell) [12].

Ο εκπομπός αυτής της διάταξης είναι τύπου n και σχηματιζόταν με διάχυση Φωσφόρου όσο γίνεται πιο επιφανειακή με βάθος ένωσης περίπου 0.25μm, όπως και στο «ιώδες» φ/β στοιχείο. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγεται η δημιουργία ενός στρώματος με πολύ φτωχά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (“dead layer”), χάρις στο οποίο οφειλόταν η ιδιαίτερα χαμηλή απόκριση των τυπικών φ/β στοιχείων που χρησιμοποιούνταν για διαστημικές εφαρμογές [6] σε μήκη κύματος χαμηλότερα από 0,5μm. Η πίσω επιφάνεια ήταν καλυμμένη πλήρως με Αλουμίνιο εφαρμόζοντας τεχνική εξάχνωσης, η ύπαρξη της οποίας δημιουργούσε μια περιοχή έντονα νοθευμένη στην πίσω επιφάνεια (τύπου p⁺) που λειτουργούσε ως BSF (κεφάλαιο 1). Η επιμετάλλωση γινόταν με χρήση φωτολιθογραφίας στην μπροστινή επιφάνεια ενώ χρησιμοποιούσαν 3 στρώματα μετάλλου (Τιτάνιο/Παλλάδιο/Αργυρος) τόσο στην μπροστινή όσο και στην πίσω επιφάνεια. Ως αντιανακλαστική επίστρωση χρησιμοποιούσαν οξείδια του Τιτανίου ή του Τανταλίου.

Αυτές οι διατάξεις επιτύχαναν αποδόσεις της τάξης του 15-15.5% για ακτινοβολία AM0 (αφού μια από τις βασικές χρήσεις του ήταν σε δορυφόρους) και 16.7-17.2% για το φάσμα AM1.5.

3.3 Το φ/β στοιχείο PESC (Passivated Emitter Solar Cell)

Το επόμενο στάδιο που οδήγησε σε βελτίωση της απόδοσης των φ/β στοιχείων έγινε στις αρχές του 1980. Η χαρακτηριστική καινοτομία ήταν η δημιουργία ενός λεπτού στρώματος οξειδίου στην μπροστινή επιφάνεια του στοιχείου με σκοπό την μείωση των επιφανειακών επανασυνδέσεων, οι οποίες όπως φάνηκε στο κεφάλαιο 2 περιορίζουν σημαντικά τη μέγιστη απόδοση. Έτσι προέκυψε η διάταξη PESC (Passivated Emitter Solar Cell), η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 3.2. Σημαντική ερευνητική δουλειά προς αυτή την κατεύθυνση έγινε από το UNSW (University of New South Wales) στην Αυστραλία [7] και από τα εργαστήρια Sandia στις ΗΠΑ [8]. Στην περίπτωση του UNSW η βελτίωση συνδυάστηκε με μειωμένη επανασύνδεση στην περιοχή κάτω από τις επαφές με χρήση επαφών μετάλλου-μονωτή-ημιαγωγού MIS (Metal-Insulator-Semiconductor). Συγκεκριμένα, κάτω από τα μεταλλικά ηλεκτρόδια το οξείδιο είναι πολύ λεπτό, οπότε υπάρχει αγωγιμότητα μέσω φαινομένου σήραγγος.

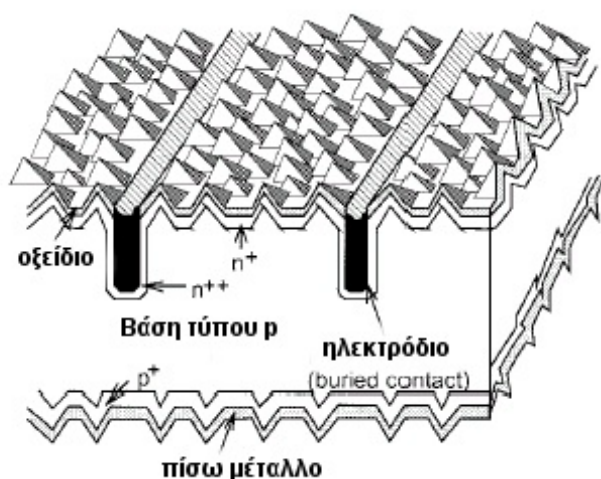


Σχήμα 3.2. Το φ/β στοιχείο PESC (Passivated Emitter Solar Cell) απόδοσης 20% [12].

Η ερευνητική δραστηριότητα από το UNSW [9] έδειξε ότι μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη απόδοση χρησιμοποιώντας υποστρώματα μεγαλύτερης νόθευσης και ειδικά στην περίπτωση όπου υπήρχε περιορισμένη δυνατότητα να μειωθούν οι επανασυνδέσεις στην πίσω επιφάνεια. Έτσι η απόδοση αυτών των διατάξεων έφτασε λίγο πάνω από 20%, τιμή εντυπωσιακή για την περίοδο αυτή [10].

3.4 Το φ/β στοιχείο των θαμμένων επαφών (Buried Contact)

Μια άλλη διάταξη που παρουσιάζει πλεονεκτήματα όσον αφορά την απόδοση είναι το φ/β στοιχείο των θαμμένων επαφών (buried contact) η οποία αναπτύχθηκε στο UNSW [11-12] και απεικονίζεται στο σχήμα 3.3. Αυτή η δομή περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά της βελτιστοποιημένης ως προς τις επιφανειακές ανασυνδέσεις μπροστινής επιφάνειας του στοιχείου PESC. Συγκεκριμένα, το αρχικό δισκίο διαμορφώνεται επιφανειακά με πυραμίδες μέσω ανισοτροπικής εγχάραξης, γίνεται διάχυση προς σχηματισμό της ένωσης και ύστερα οξείδωση για να μειωθούν οι επιφανειακές ανασυνδέσεις. Επιπρόσθετα, με τη βοήθεια τεχνικής laser, ανοίγονται στενά αυλάκια σε βάθος στο πυρίτιο κάτω από το οξείδιο και ακολουθεί μια δεύτερη διάχυση προκειμένου να σχηματιστεί μια έντονα νοθευμένη περιοχή κάτω από τα αυλάκια, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3 (οι υπόλοιπες περιοχές καλύπτονται από το οξείδιο, οπότε δεν επηρεάζονται από τη διάχυση). Η επόμενη διαδικασία είναι η κάλυψη της πίσω επιφάνειας από Αλουμίνιο και η δημιουργία BSF και ύστερα ακολουθεί η εναπόθεση 3 διαδοχικών μετάλλων (Νικέλιο/Χαλκός/Αργυρος) στα αυλάκια της μπροστινής και στην πίσω επιφάνεια.



Σχήμα 3.3. Το φ/β στοιχείο θαμμένων επαφών (buried contact) [12].

Αυτή η διάταξη σε σχέση με τις τυπικές (παρόμοιες με αυτή της ενότητας 3.2) που αναφέρθηκαν πριν πλεονεκτεί ως προς το παραγόμενο φωτόρρευμα αλλά και την τάση [12], ενώ παράλληλα έχει μειωμένη αντίσταση σειράς. Η βελτίωση στο ρεύμα οφείλεται στη μειωμένη σκίαση των ηλεκτροδίων, όπως και στην καλύτερη φασματική απόκριση στα μικρά μήκη κύματος (μπλε) λόγω μειωμένων απωλειών στην επιφάνεια

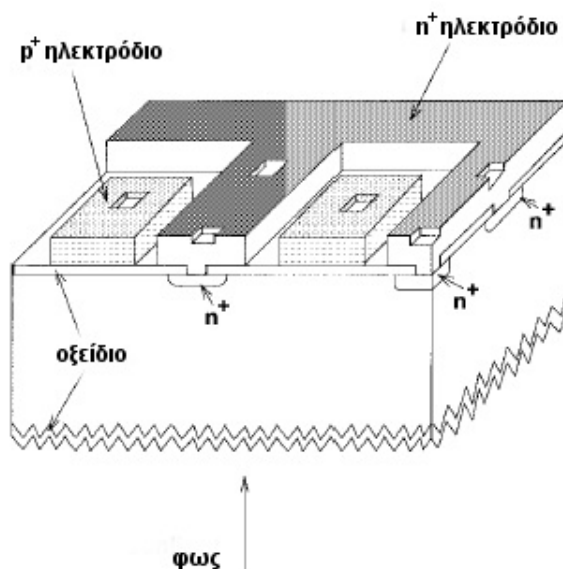
Κεφάλαιο 3

του στοιχείου. Η αυξημένη τάση οφείλεται στις μειωμένες επανασυνδέσεις στην επιφάνεια όπως και στα μπροστινά ηλεκτρόδια. Τέλος, υπερτερεί και στον παράγοντα πλήρωσης (FF) λόγω βελτιωμένης τάσης ανοιχτού κυκλώματος και μειωμένης αντίστασης σειράς οφειλόμενη στην υψηλή αγωγιμότητα των ηλεκτροδίων μεγάλης διατομής.

Η απόδοση αυτών των στοιχείων στο εργαστήριο έχει φτάσει το 20.6% [11], ενώ έχει περάσει σε μαζική παραγωγή από την BP Solar [13] με αποδόσεις της τάξης του 17-18%.

3.5 Το φ/β στοιχείο Σημειακών Πίσω Επαφών (rear point contact)

Το φ/β στοιχείο σημειακών πίσω επαφών (rear point contact) έδωσε σημαντική ώθηση στην αύξηση της απόδοσης των φ/β στοιχείων. Η σχεδιάσή του οφείλεται στους Sinton et al. [14] και Swanson [15] και βασίστηκε στη διάταξη που προτάθηκε από τους Lammert et al. [16] το IBC (Interdigitated Back Contact) η οποία έχει τις επαφές στην πίσω επιφάνεια. Η δομή του έχει περιοχές που είναι έντονα νοθευμένες τύπου n^+ και p^+ στην πίσω επιφάνεια, οπότε όλα τα ηλεκτρόδια βρίσκονται στην πίσω επιφάνεια όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4. Το φ/β στοιχείο σημειακών πίσω επαφών (rear point contact) [12].

Ένα βασικό πλεονέκτημα αυτής της δομής είναι ότι οι επαφές γίνονται στην πίσω επιφάνεια, συνεπώς δεν υπάρχουν απώλειες λόγω σκίασης, ενώ υπάρχει η δυνατότητα να καλύψουν σχεδόν ολόκληρη την πίσω επιφάνεια οπότε οι απώλειες

λόγω αντιστάσεων σειράς είναι μικρές. Το άλλο είναι το μικρό ποσοστό επιφάνειας που καταλαμβάνουν οι τοπικές διαχύσεις τύπου n^+ και p^+ στην πίσω επιφάνεια (η υπόλοιπη καλύπτεται από οξείδιο υψηλής ποιότητας). Η μπροστινή επιφάνεια καλύπτεται επίσης από οξείδιο, γεγονός που σημαίνει ότι οι ανασυνδέσεις στις δύο επιφάνειες είναι πολύ χαμηλές.

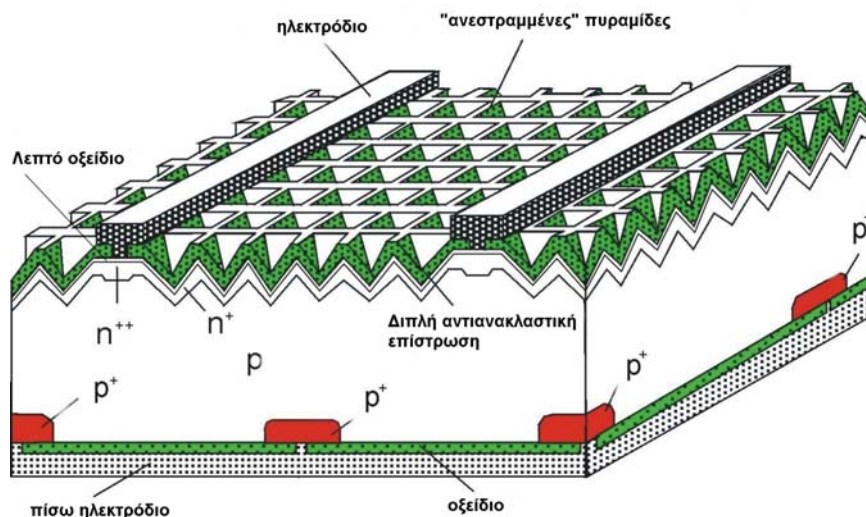
Το βασικό σημείο στην κατασκευή αυτών των στοιχείων είναι η χρήση δισκιδίων πολύ καλής ποιότητας με πολύ μεγάλους χρόνους ζωής φορέων μειονότητας (της τάξης μερικών ms), διότι οι φορείς πρέπει να φτάσουν στην πίσω επιφάνεια για να συλληχθούν, οπότε οι επανασυνδέσεις μέσα στο υλικό είναι απαραίτητο να είναι ελάχιστες. Για αυτό το λόγο προτιμάται υλικό χαμηλής νόθευσης.

Η χρήση υποστρωμάτων πυριτίου χαμηλής νόθευσης σημαίνει ότι το στοιχείο λειτουργεί υπό συνθήκες υψηλής έγχυσης όπου βασικός μηχανισμός απωλειών είναι η επανασύνδεση Auger και η διάταξη μπορεί να φτάσει σε αποδόσεις κοντά στο θεωρητικό μέγιστο όπως φάνηκε στο κεφάλαιο 2. Έτσι, αυτές οι δομές πέτυχαν μέγιστη απόδοση 22.3% το 1988 [17] σε συνθήκες μη συγκεντρωμένης ακτινοβολίας. Η απόδοσή τους αυξάνει υπό συγκεντρωμένη ακτινοβολία, γεγονός που υποβοηθάται και από τη χαμηλή αντίσταση σειράς του στοιχείου, και έχει μετρηθεί μέγιστη απόδοση 26% για φωτισμό ισοδύναμο με 100 ήλιους [18]. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν και σε αγώνες ηλιακών αυτοκινήτων το 1993 στην Αυστραλία στο αυτοκίνητο της Honda το οποίο τους κέρδισε [19]. Τέτοια στοιχεία, με λίγο τροποποιημένη σχεδίαση έχουν προχωρήσει σε παραγωγή από την εταιρεία Sunpower Corp. με χαμηλό κόστος και απόδοση 18.2% για φωτεινή ισχύ $100\text{mW}/\text{cm}^2$ [20].

3.6 Το φ/β στοιχείο PERL (Passivated Emitter, Rear Locally Diffused)

Το φ/β στοιχείο PERL (Passivated Emitter, Rear Locally Diffused) προέκυψε από τη δομή PESC που αναλύθηκε στην ενότητα 3.3, με επιπλέον χαρακτηριστικά την ελαχιστοποίηση των επανασυνδέσεων στην πίσω επιφάνεια, η οποία καλύπτεται στο μεγαλύτερο ποσοστό της από οξείδιο καλής ποιότητας και οι επαφές με το μέταλλο γίνονται μέσω μικρών ανοιγμάτων σε αυτό, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.5. Αυτή η δομή αναπτύχθηκε από το UNSW [21], ενώ παρόμοιες διατάξεις, είναι το LBSF (Local Back Surface Field) που έχει κατασκευαστεί στο ISE, Freiburg [22] και μια αντίστοιχη από την Hitachi [23] η οποία διαφέρει σε σχέση με τη διάταξη του UNSW στις επαφές του εκπομπού με τα ηλεκτρόδια.

Κεφάλαιο 3



Σχήμα 3.5. Το φ/β στοιχείο PERL (Passivated Emitter, Rear Locally Diffused) [21].

Το τυπικό χαρακτηριστικό αυτής της διάταξης, όπως αναφέρθηκε και πριν είναι η σχεδόν ολοκληρωτική κάλυψη του στοιχείου από ένα στρώμα οξειδίου πολύ καλής ποιότητας, αφού είναι γνωστό ότι στη διεπιφάνεια $\text{SiO}_2\text{-Si}$ οι απώλειες λόγω επανασυνδέσεων είναι πολύ χαμηλές [24]. Οι επαφές με το μέταλλο στην πίσω επιφάνεια του στοιχείου γίνονται μέσω μικρών ανοιγμάτων στο οξείδιο ($10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$) με απόσταση μεταξύ τους $250\mu\text{m}$ προκειμένου η επιφάνεια επαφής να είναι όσο γίνεται μικρότερη, δεδομένων των υψηλών επανασυνδέσεων σε αυτή την περιοχή. Επιπλέον, η περιοχή των ανοιγμάτων αυτών νοθεύεται έντονα με Βόριο προκειμένου να μειωθούν ακόμα περισσότερο οι απώλειες (δημιουργία τοπικού BSF). Στην μπροστινή επιφάνεια οι επαφές με τα ηλεκτρόδια γίνονται μέσω ανοίγματος λεπτών λωρίδων πλάτους $2\mu\text{m}$ στο οξείδιο για να μειωθούν οι απώλειες επανασυνδέσεων.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό ήδη γνωστό από τις άλλες διατάξεις είναι η ύπαρξη μιας αποτελεσματικής ανακλαστικής πίσω επιφάνειας η οποία οφείλεται στο στρώμα Αλουμινίου το οποίο βρίσκεται κάτω από το οξείδιο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5. Από την άλλη πλευρά, η δημιουργία ανεστραμμένων πυραμίδων στην μπροστινή επιφάνεια μέσω ανισοτροπικής εγχάραξης της επιφάνειας του πυριτίου κρυσταλλογραφικής διεύθυνσης (100) μειώνει την ανάκλαση στην μπροστινή επιφάνεια, ενώ σε συνδυασμό με την ανακλαστική πίσω επιφάνεια αυξάνεται η απορρόφηση των φωτονίων μεγάλου μήκους κύματος (κεφάλαιο 1). Συγκεκριμένα για φ/β στοιχεία αυτού του τύπου έχει μετρηθεί υψηλή απόδοση μετατροπής 46.3% για ακτινοβολία μήκους κύματος $1.04\mu\text{m}$ και εντάσεως 51.8mW/cm^2 [25].

Η ανάκλαση στην μπροστινή επιφάνεια μειώθηκε ακόμα περισσότερο με την δημιουργία αντιανακλαστικής επίστρωσης αποτελούμενη από δύο φιλμ MgF_2/ZnS (DLAR, Double Layer Antireflection Coating). Αυτό που πρέπει όμως να σημειωθεί είναι ότι προκειμένου αυτή η επίστρωση να είναι αποτελεσματική πρέπει το οξειδίο κάτω από αυτή να είναι πιο λεπτό από 25nm. Οξειδίο όμως τόσο λεπτό δεν είναι τόσο αποτελεσματικό στη μείωση των επιφανειακών επανασυνδέσεων [26]. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με την εισαγωγή μιας διαδικασίας θερμικής ανόπτυσης Αλουμινίου (Al anneal, “alneal”) [24] στο σύνολο των βημάτων δημιουργίας του μπροστινού οξειδίου. Συγκεκριμένα, Αλουμίνιο δημιουργείται με εξάχνωση στην μπροστινή επιφάνεια πάνω από το οξειδίο. Ύστερα ακολουθεί η ανόπτυση Αλουμινίου στους 370 °C για 30 λεπτά, το οποίο μετά απομακρύνεται με φωσφορικό οξύ. Με τη διαδικασία αυτή της ανόπτυσης πιστεύεται ότι το Αλουμίνιο αντιδρά με ιόντα υδροξυλίου μέσα στο οξειδίο για να δημιουργήσει ατομικό υδρογόνο το οποίο εισχωρεί στην διεπιφάνεια Si/SiO₂ και εξαλείφει τις ατέλειες, π.χ ατελείς δεσμούς. Έτσι διαπιστώθηκε ότι διατάξεις επεξεργασμένες με αυτή τη διαδικασία έχουν τάσεις ανοιχτού κυκλώματος κοντά στα 709 mV ανεξαρτήτως πάχος οξειδίου. Το στάδιο της ανόπτυσης Αλουμινίου εφαρμόστηκε και στις διεργασίες της πίσω επιφάνειας αφού αυτό χρησιμοποιείται ως πίσω μέταλλο προκειμένου να μειωθούν οι επανασυνδέσεις σε μεγάλο βαθμό.

Ένα μειονέκτημα αυτών των δομών είναι ο σχετικά χαμηλός παράγοντας πλήρωσης (FF) που κυμαινόταν περίπου στο 81% [27-28]. Αυτό οφείλεται κυρίως σε ωμικές απώλειες λόγω αντιστάσεων σειράς, η οποία μετρήθηκε ότι είναι 0.5Ω.cm², με συνεισφορά σε αυτή από το μπροστινό μεταλλικό πλέγμα 0.3 Ω.cm². Η υπόλοιπη συνιστώσα της αντίστασης σειράς οφείλεται σε φαινόμενα μεταφοράς φορέων στη βάση του στοιχείου και εξαρτάται από το μέγεθος και την απόσταση των πίσω σημειακών επαφών. Αυτή η εξάρτηση θα αναλυθεί λεπτομερώς σε επόμενα κεφάλαια της διατριβής καθώς είναι από τις πιο σημαντικές παραμέτρους απωλειών στα φ/β στοιχεία αυτού του τύπου. Προκειμένου να μειωθεί η συνεισφορά του μπροστινού μετάλλου στην αντίσταση σειράς χρησιμοποιήθηκε διαδικασία επιμετάλλωσης δύο σταδίων για να ενισχυθεί το μέταλλο και να μειωθεί η πτώση τάσης στο μεταλλικό πλέγμα. Έτσι η συνολική αντίσταση σειράς μειώθηκε στα 0.3 Ω.cm² και ο παράγοντας πλήρωσης αυξήθηκε στο 83% περίπου.

Εφαρμόζοντας όλες αυτές τις παραμέτρους, μετρήθηκε μέγιστη απόδοση 24.7% σε ένα τέτοιο στοιχείο επιφάνειας 4 cm² [3] με παραμέτρους $V_{oc}=706mV$, $J_{sc}=42.2mA/cm^2$ και

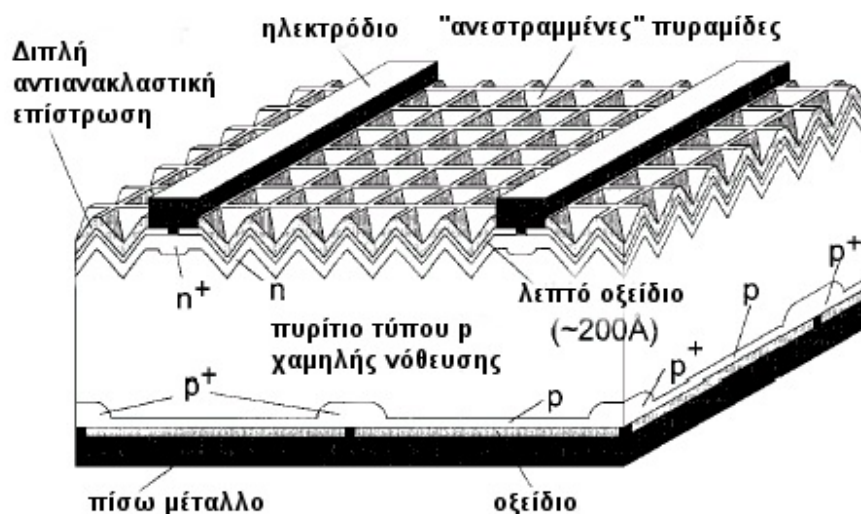
$FF=82.8\%$. Αυτή η απόδοση είναι η μεγαλύτερη δυνατή που έχει επιτευχθεί σε φ/β στοιχείο πυριτίου μέχρι σήμερα. Υψηλές αποδόσεις έχουν επιτευχθεί και στις αντίστοιχες δομές από το Fraunhofer ISE [22] (μεγαλύτερη από 23% για στοιχείο επιφάνειας 4 cm^2) και την Hitachi [23] (22.6% για στοιχείο επιφάνειας 1 cm^2), γεγονός που δείχνει τις υψηλές δυνατότητες αυτής της σχεδίασης.

3.7 Παραλλαγές του φ/β στοιχείου PERL

Στην προηγούμενη ενότητα αναλύθηκε η διάταξη PERL και διαπιστώθηκε ότι η απόδοσή της είναι ιδιαίτερα υψηλή. Παρακάτω θα αναλυθούν παραλλαγές αυτής της δομής όπου άλλες έχουν σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης και άλλες τη μείωση του κόστους, δεδομένου ότι είναι πολύπλοκη δομή και οι διαδικασίες κατασκευής της είναι πολύπλοκες και δαπανηρές.

3.7.1 Το φ/β στοιχείο PERT (Passivated Emitter, Rear Totally Diffused)

Στην ενότητα 3.6 αναφέρθηκε ότι ένας σημαντικός παράγοντας που περιορίζει την απόδοση των φ/β στοιχείων PERL είναι οι ωμικές απώλειες λόγω αντίστασης σειράς που οφείλεται σε φαινόμενα μεταφοράς στις πίσω επαφές και περιορίζει σημαντικά τον παράγοντα πλήρωσης (FF) αυτής της διάταξης. Αυτές οι απώλειες αυξάνονται σημαντικά όσο ελαττώνεται η νόθευση της βάσης, οπότε συνήθως χρησιμοποιούνται δισκία πυριτίου σχετικά υψηλής νόθευσης, περίπου 10^{16} cm^{-3} και έτσι επιτυγχάνονται αρκετά υψηλοί παράγοντες πλήρωσης που κυμαίνονται στην περιοχή του 83%.



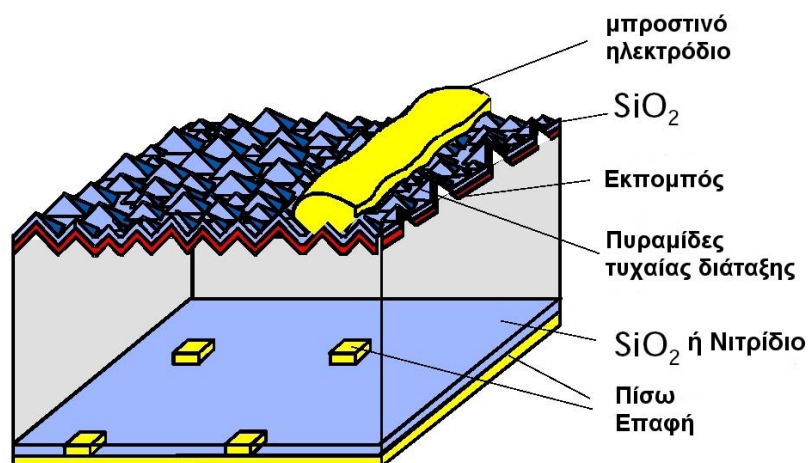
Σχήμα 3.6. Το φ/β στοιχείο PERT (Passivated Emitter, Rear Totally Diffused) [29].

Η δομή PERT (Passivated Emitter, Rear Totally Diffused) [29-30] η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 3.6 σχεδιάστηκε για να αντιμετωπίσει αυτό το πρόβλημα. Σε αυτή τη διάταξη προστίθεται μια ακόμη διαδικασία η οποία είναι η διάχυση Βορίου χαμηλής συγκέντρωσης στην πίσω επιφάνεια έτσι ώστε να σχηματιστεί ένα στρώμα τύπου p ελαφρά νοθευμένο. Αυτή η περιοχή, λόγω της επιλέον νόθευσης έχει σημαντικά χαμηλότερη αντίσταση σε σχέση με το υπόλοιπο υπόστρωμα, ιδιαίτερα αν αυτό είναι χαμηλά νοθευμένο. Έτσι η διευκολύνεται η ροή των φορέων, οπότε μειώνεται η αντίσταση σειράς και συνεπώς βελτιώνεται ο παράγοντας πλήρωσης της διάταξης. Η νόθευση του στρώματος αυτού είναι ένα σημείο διερεύνησης δεδομένου ότι επηρεάζει τις επανασυνδέσεις στην πίσω επιφάνεια.

Η δομή PERT είχε αρχικά προταθεί το 1991 [31] όπου παρατηρήθηκε ιδιαίτερα υψηλός παράγοντας πλήρωσης (78.6%) σε στοιχείο πολύ ελαφριάς νόθευσης (100 Ω.cm). Ιδιαίτερα καλά αποτελέσματα είχαν επίσης επιτευχθεί και για υποστρώματα τύπου n επίσης χαμηλής νόθευσης [32]. Το καλύτερο αποτέλεσμα που έχει επιτευχθεί μέχρι στιγμής για τη δομή PERT είναι απόδοση 24.5% για δισκίο που έχει παραχθεί με τη μέθοδο MCz (Magnetically Confined Czochraski) η οποία δίνει υποστρώματα με χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο το οποίο θεωρείται [33] ότι αντιδρά με το Βόριο και μειώνει το χρόνο ζωής φορέων μειονότητας. Το συγκεκριμένο στοιχείο έχει ιδιαίτερα υψηλό FF (83.5%) παρόλο που είναι ελαφρά νοθευμένο (4.8 Ω.cm). Συγκριτικά, σε στοιχείο PERL αντίστοιχης νόθευσης (5.2 Ω.cm) ο αντίστοιχος FF είναι 81.1% με απόδοση 23.5%.

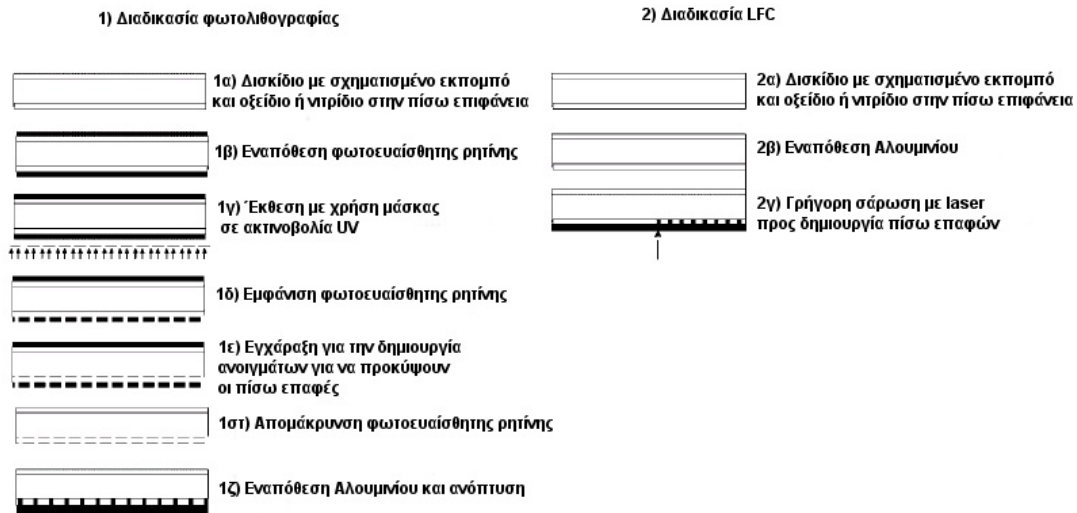
3.7.2 Το φ/β στοιχείο RP-PERC (Random Pyramid – Passivated Emitter and Rear Cell)

Η δομή RP-PERC (Random Pyramid – Passivated Emitter and Rear Cell) [34] αναπτύχθηκε στο ινστιτούτο Fraunhofer ISE και απεικονίζεται στο σχήμα 3.7. Η διάταξη PERC είχε προηγηθεί του PERL, προτάθηκε από τους Blakers et al. το 1988 [35] και η διαφορά του με αυτό είναι ότι οι επαφές με το πίσω μέταλλο γίνονται κατευθείαν στο υπόστρωμα χωρίς να έχει προηγηθεί η διάχυση Βορίου για να σχηματιστεί BSF.



Σχήμα 3.7. Το φ/β στοιχείο RP-PERC (Random Pyramid Passivated Emitter and Rear Cell) [34].

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.6 το φ/β στοιχείο PERL έχει επιτύχει τη μεγαλύτερη απόδοση μέχρι στιγμής που αφορά διατάξεις πυριτίου. Η κατασκευή του όμως είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και απαιτεί πολλά διαδοχικά στάδια διαδικασιών μικροηλεκτρονικής, γεγονός που καθιστά το κόστος παραγωγής του απαγορευτικό. Ειδικά η κατασκευή των πίσω επαφών απαιτεί ξεχωριστό στάδιο φωτολιθογραφίας ακολουθούμενη από υγρή εγχάραξη και εξάχνωση για σχηματισμό του πίσω μετάλλου. Στο Fraunhofer ISE αναπτύχθηκε μια τεχνική η οποία χρησιμοποιεί laser μεγάλης ισχύος Nd-YAG στα 1064 nm [36] το οποίο εστιάζεται πάνω στο δείγμα στην πίσω επιφάνεια που είναι καλυμμένη με Αλουμίνιο. Η ισχύς της ακτινοβολίας είναι αρκετή για να λιώσει το Αλουμίνιο τοπικά και να αφαιρέσει το οξείδιο ή το νιτρίδιο που βρίσκεται κάτω από αυτό ώστε να σχηματιστούν οι πίσω επαφές. Επιπλέον υπάρχει το πλεονέκτημα της δημιουργίας κράματος Al-Si στο σημείο εστίασης του laser δηλαδή ο σχηματισμός περιοχής p^+ (BSF). Η σάρωση του δείγματος ολοκληρώνεται μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα που δίνει τη δυνατότητα επεξεργασίας περίπου 1000 δισκιδίων την ώρα. Η διαδικασία αυτή καλείται τεχνολογία LFC [37]. Με αυτό τον τρόπο δεν απαιτούνται φωτολιθογραφικές διαδικασίες και εξοικονομούνται πολλά στάδια επεξεργασίας στο σχηματισμό των πίσω επαφών, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8, όπου συγκρίνονται η κλασική μέθοδος της φωτολιθογραφίας και της προαναφερθείσας. Τα καλύτερα φ/β στοιχεία που κατασκευάστηκαν με την τεχνική LFC έχουν επιτύχει απόδοση 21.6% [38] για επιφάνεια 4 cm² και πίσω επιφάνεια καλυμμένη με οξείδιο κάτω από το Αλουμίνιο.



Σχήμα 3.8. Σύγκριση της συμβατικής διαδικασίας φωτολιθογραφίας και της τεχνολογίας LFC (laser fired contacts) για το σχηματισμό των πίσω επαφών στο φ/β στοιχείο RP-PERC [36].

Στην περίπτωση που έχει εναποτεθεί νιτρίδιο περίπου 60 nm με τεχνική PECVD (Plasma Enhanced CVD) στην πίσω επιφάνεια, η μέγιστη απόδοση είναι μικρότερη (19.5%) [36], που σημαίνει ότι υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης. Οι αποδόσεις πάντως που έχουν επιτευχθεί είναι πολύ καλές και δεδομένου ότι η διαδικασία κατασκευής των δομών RP-PERC με την τεχνική LFC είναι σημαντικά απλούστερη από τη συμβατική, δίνει τη δυνατότητα χρήσης της στη βιομηχανία στο άμεσο μέλλον.

3.8 Διατάξεις με ενώσεις (εκπομπούς) στην μπροστινή και πίσω επιφάνεια

Οι διατάξεις που αναλύθηκαν πριν είχαν ως χαρακτηριστικό ότι οι ενώσεις n^+p βρίσκονταν σε μια επιφάνεια, συνήθως την μπροστινή (εκτός από το φ/β στοιχείο σημειακών επαφών που αναλύθηκε στην παράγραφο 3.5). Οι δομές που θα αναλυθούν παρακάτω έχουν ενώσεις και στις δύο επιφάνειες έτσι ώστε να συλλέγουν περισσότερο φωτόρευμα ενώ παράλληλα δίνεται η δυνατότητα σε κάποιες από τις σχεδιάσεις αυτές να έχουν όλα τα ηλεκτρόδια στην πίσω επιφάνεια με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης και της μείωσης του κόστους.

3.8.1 Το φ/β στοιχείο EWT (Emitter Wrap Through)

Οι περισσότεροι τύποι των φ/β στοιχείων που υπάρχουν στο εμπόριο έχουν τις ηλεκτρικές επαφές στην μπροστινή (του εκπομπού) και στην πίσω επιφάνεια (της

βάσης). Η διάταξη EWT (Emitter Wrap Through) που προτάθηκε αρχικά από τους Gee et al. [39] έχει όλες τις επαφές στην πίσω επιφάνεια όπως στο φ/β στοιχείο σημειακών επαφών που αναλύθηκε στην ενότητα 3.5. Η διαφορά του είναι ότι στο EWT διατηρείται ο εκπομπός στην μπροστινή επιφάνεια και οι επαφές του γίνονται ανοίγοντας τρύπες στο υπόστρωμα και μέσω αυτών γίνεται η ηλεκτρική επικοινωνία του εκπομπού με το αντίστοιχο ηλεκτρόδιο το οποίο βρίσκεται στην πίσω επιφάνεια, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9 [40]. Η συγκεκριμένη διάταξη έχει επιπλέον και ένα δεύτερο εκπομπό στην πίσω επιφάνεια για να υπάρχει μεγαλύτερη συλλογή φορέων.



Σχήμα 3.9. Σχηματική δομή του φ/β στοιχείου EWT (Emitter Wrap Through). Το αριστερό σχήμα δείχνει την μπροστινή όψη του στοιχείου όπου φαίνονται οι τρύπες που ενώνουν ηλεκτρικά τον μπροστινό με τον πίσω εκπομπό. Το δεξί σχήμα δείχνει τα ηλεκτρόδια της βάσης και των εκπομπών. Οι τρύπες ανοίγονται με laser [40].

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.9, η μπροστινή επιφάνεια έχει μόνο τον εκπομπό και την αντιανακλαστική επίστρωση (μπορεί επίσης να υπάρχει και διαμόρφωση της επιφάνειας για παγίδευση του φωτός). Οι επαφές του εκπομπού και της βάσης βρίσκονται στην πίσω επιφάνεια, όπως φαίνεται στο δεξί τμήμα του σχήματος, γεγονός που διευκολύνει σημαντικά τις ηλεκτρικές συνδέσεις πολλών τέτοιων στοιχείων και μειώνει σημαντικά το κόστος. Οι εκπομποί ενώνονται ηλεκτρικά μεταξύ τους μέσω τρυπών που έχουν ανοιχτεί στο δισκίο μέσω laser ή μηχανικό τρόπο [41]. Η διαδικασία αυτή είναι συνήθως από τις πρωταρχικές την οποία ακολουθεί εγχάραξη σε διάλυμα KOH προς αφαίρεση των ατελειών που έγιναν από το laser.

Ένα βασικό μειονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ο μικρός παράγοντας πλήρωσης που παρουσιάζει σε σχέση με τα συμβατικά φ/β στοιχεία [41]. Αυτό μπορεί να αποδοθεί σε διάφορους παράγοντες, όπως στις ατέλειες που προκαλούνται στο υλικό λόγω της διάνοιξης των τρυπών, επιφανειακές ανασυνδέσεις στην περιοχή του ηλεκτροδίου τύπου p και απώλειες λόγω αγωγίμων καναλιών (ή λόγω διαδικασιών επεξεργασίας) μεταξύ γειτονικών ηλεκτροδίων διαφορετικής πολικότητας. Συνεπώς

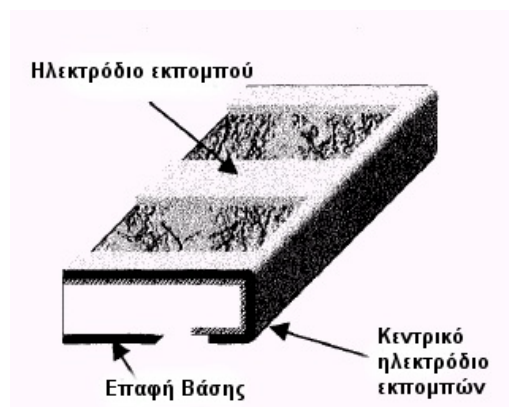
χρειάζεται προσεκτική σχεδίαση της δομής μέσω θεωρητικών μοντέλων και βελτιστοποίηση των διαδικασιών κατασκευής.

Οι Smith et al. [42] χρησιμοποίησαν ένα θεωρητικό μοντέλο για να βελτιστοποιήσουν τη δομή και να εκτιμήσουν τις απώλειες, και κατασκεύασαν κάποιες πρότυπες διατάξεις με αυτά τα χαρακτηριστικά χρησιμοποιώντας διαδικασίες φωτολιθογραφίας. Η απόδοση που επιτεύχθηκε σε τέτοιο στοιχείο είναι 18.2% με παράγοντα πλήρωσης 77.6% ο οποίος είναι ιδιαίτερα υψηλός για αυτή τη δομή. Οι Kress et al. [41] χρησιμοποίησαν απλοποιημένες διαδικασίες, όπως η τεχνική screen printing που είναι ευρέως διαδεδομένη στη βιομηχανία και επιτεύχθηκε μέγιστη απόδοση 13.6% για φ/β στοιχείο υποστρώματος Cz. Συγκεκριμένα, αυτά τα στοιχεία έχουν αυξημένο ρεύμα βραχυκυκλώματος 15% σε σχέση με τα συμβατικά, αλλά υστερούν στην τάση ανοιχτού κυκλώματος και στον FF , που σημαίνει ότι υπάρχει περιθώριο βελτίωσης και στη σχεδίαση και στις διαδικασίες παραγωγής του, όπως αναφέρθηκε πριν.

3.8.2 Το φ/β στοιχείο MWA (Metallisation Wrap Around)

Το φ/β στοιχείο MWA (Metallisation Wrap Around) [43] σε αντίθεση με τη δομή EWT διαθέτει ηλεκτρόδια στην μπροστινή επιφάνεια όπου το κεντρικό ηλεκτρόδιο που τα ενώνει τυλίγεται γύρω από τις άκρες του στοιχείου και φτάνει στην πίσω πλευρά όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.10. Έτσι αποφεύγεται το άνοιγμα τρυπών στο δισκίδιο. Η τεχνική αυτή είναι ιδιαίτερα συμβατή με την τεχνολογία των θαμμένων επαφών που αναφέρθηκε στην ενότητα 3.4 και έχει ήδη χρησιμοποιηθεί [44]. Το μειονέκτημα αυτής της δομής σε σχέση με τις συμβατικές είναι η μεγάλη αντίσταση σειράς που οφείλεται στο αυξημένο μήκος του μετάλλου που αντιστοιχεί σε μειωμένο παράγοντα πλήρωσης. Από την άλλη πλευρά, λόγω της ύπαρξης του πίσω εκπομπού συλλέγεται περισσότερο ρεύμα, όπως και στην περίπτωση των στοιχείων EWT.

Η μέγιστη απόδοση αυτών των στοιχείων που κατασκευάστηκαν στο IMEC [43] για στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου επιφάνειας $10 \times 10 \text{ cm}^2$ είναι 15.9% τα οποία έχουν παράγοντα πλήρωσης 74.3%, ενώ στο μονοκρυσταλλικό πυρίτιο η απόδοση είναι αντίστοιχα 17% και ο FF 73.6%.

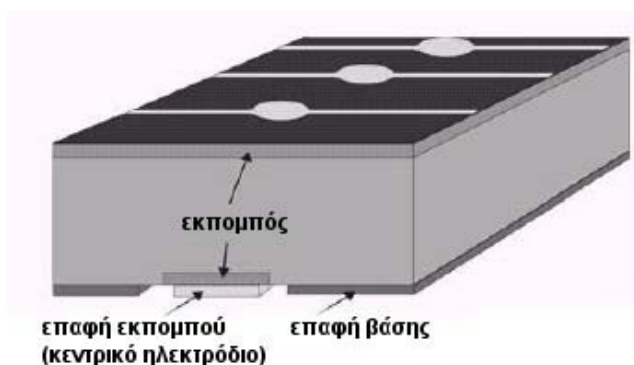


Σχήμα 3.10. Σχηματική δομή του φ/β στοιχείου MWA (Metallisation Wrap Around) [43].

Τα αποτελέσματα αυτά είναι αρκετά ενθαρρυντικά και σε συνδυασμό με κατάλληλη βελτιστοποίηση ώστε να μειωθεί η αντίσταση σειράς η απόδοση μπορεί να αυξηθεί σημαντικά.

3.8.3 Το φ/β στοιχείο MWT (Metallisation Wrap Through)

Η διάταξη MWT (Metallisation Wrap Through) είναι ουσιαστικά μια παραλλαγή της δομής EWT όπου για να περιοριστεί ο αριθμός των τρυπών στο στοιχείο, το κεντρικό ηλεκτρόδιο του εκπομπού έχει μεταφερθεί στην πίσω επιφάνεια και οι επαφές του μπροστινού πλέγματος με αυτό γίνονται μέσω τρυπών σε κάθε ηλεκτρόδιο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11 [45].



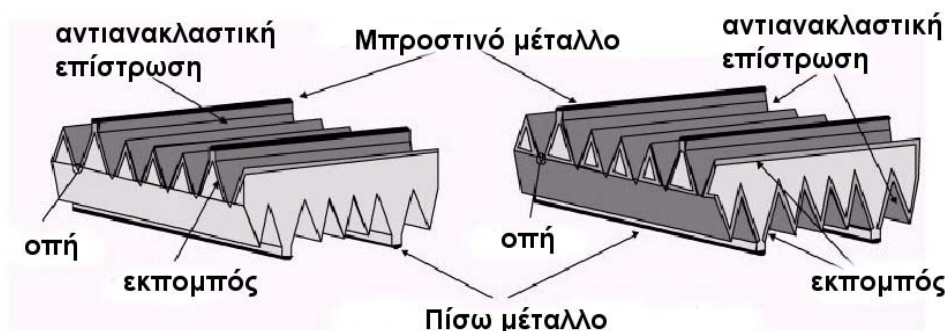
Σχήμα 3.11. Σχηματικό διάγραμμα του φ/β στοιχείου MWT (Metallisation Wrap Through) [45].

Η δομή MWT επιτρέπει την δημιουργία πολλών κεντρικών ηλεκτροδίων για τον εκπομπό αφού τοποθετούνται στην πίσω επιφάνεια. Συνεπώς για σχεδίαση 2 κεντρικών ηλεκτροδίων πρέπει να ανοιχτούν 2 τρύπες με laser σε καθένα από τα μπροστινά.

Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στο άνοιγμα των τρυπών και στις ηλεκτρικές επαφές που γίνονται μέσω αυτών. Η μέγιστη απόδοση που έχει επιτευχθεί σε στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου επιφάνειας $10 \times 10 \text{ cm}^2$ [43] είναι 14.1%. Στο ερευνητικό ίδρυμα IMEC έχουν βελτιστοποιήσει τις διαδικασίες παραγωγής τέτοιων στοιχείων, οι οποίες εφαρμόζονται στην εταιρεία Photovoltaic για την κατασκευή τους, ενώ έχουν μελετήσει μέσω μοντελοποίησης και τις ωμικές απώλειες σε αυτό [46].

3.8.4 Το φ/β στοιχείο POWER (Polycrystalline Silicon Wafer Result)

Το φ/β στοιχείο POWER (POLycrystalline Silicon Wafer Result) αποτελεί μια δομή η οποία είναι ημιδιαφανής στο φως γεγονός που οφείλεται σε συνδυασμό πολλών τρυπών που γίνονται με μηχανικό τρόπο στο δισκίδιο και η διαπερατότητά της μπορεί να ρυθμιστεί να είναι της τάξης από 0-30%, ανάλογα το εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση του στοιχείου και την απόσταση που έχει το κάθε αυλάκι σχήματος V. Μια τέτοια δομή φαίνεται στο επόμενο σχήμα, όπου διακρίνονται παραλλαγές με ένα και δύο εκπομπούς (μπροστινή και πίσω επιφάνεια).



Σχήμα 3.12. Σχηματική διάταξη του φ/β στοιχείου POWER (POLycrystalline Silicon Wafer Result) με ένα (αριστερό σχήμα) και 2 εκπομπούς (δεξιό σχήμα) [47].

Στην περίπτωση που υπάρχει εκπομπός και στην πίσω επιφάνεια, οι τρύπες χρησιμοποιούνται για την ηλεκτρική ένωση των εκπομπών. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η σχεδίαση αυτών των στοιχείων έχει σημαντικά αυξημένη απορρόφηση λόγω της αποτελεσματικής παγίδευσης του φωτός παρά το γεγονός ότι είναι ημιδιαφανές. Έτσι, για φωτεινή διαπερατότητα 18.2%, το στοιχείο POWER μιας ένωσης παρουσιάζει μείωση του φωτορεύματος κατά 8.1% μόνο σε σχέση με συμβατικά φ/β στοιχεία [47]. Μειονεκτήματα της δομής αυτής είναι χαμηλή τάση ανοιχτού κυκλώματος και παράγοντα πλήρωσης λόγω υψηλών επιφανειακών ανασυνδέσεων αφού οι ενώσεις

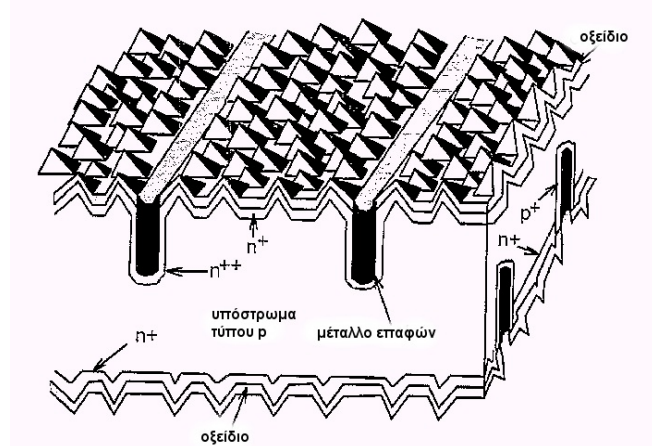
Κεφάλαιο 3

καταλαμβάνουν μεγάλη επιφάνεια, ενώ εξαιτίας αυτού του γεγονότος το ρεύμα επανασύνδεσης είναι μεγάλο.

Σε στοιχείο επιφάνειας 25 cm^2 η μέγιστη απόδοση που έχει επιτευχθεί είναι 11.2% για στοιχείο ενός εκπομπού μονοκρυσταλλικού πυριτίου τύπου Cz $0.4\Omega\cdot\text{cm}$. Το αντίστοιχο αποτέλεσμα για πολυκρυσταλλικό πυρίτιο είναι 10%. Στην περίπτωση της δομής που έχει εκπομπό και στην πίσω επιφάνεια, η απόδοση φτάνει στο 12.9% για μονοκρυσταλλικό πυρίτιο και στο 11.1% για πολυκρυσταλλικό. Η εταιρεία Sunways AG ξεκίνησε από το έτος 2000 τη μαζική παραγωγή τέτοιων στοιχείων με αποδόσεις της τάξης του 8-10%.

3.8.5 Το φ/β στοιχείο θαμμένων επαφών διπλής όψης (Double Sided Buried Contact, DSBC)

Το φ/β στοιχείο θαμμένων επαφών διπλής όψης DSBC (Double Sided Buried Contact) είναι βελτιωμένη παραλλαγή της διάταξης που περιγράφηκε στην ενότητα 3.4. Η βασική διαφορά του βρίσκεται στην πίσω επιφάνεια, όπου το DSBC καλύπτεται σε πολύ μικρότερο ποσοστό από μέταλλο (λιγότερο από το 10% συγκριτικά) και η υπόλοιπη επιφάνεια αποτελείται από ένα στρώμα τύπου n ελαφρά νοθευμένο με φώσφορο, ενώ πάνω από αυτό υπάρχει θερμικό οξείδιο υψηλής ποιότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13. Το φ/β στοιχείο DSBC (Double Sided Buried Contact) [48].

Η νοθευμένη με φώσφορο πίσω περιοχή λειτουργεί σαν επιπλέον εκπομπός ο οποίος είναι σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος (floating junction) και έχει σαν βασικό σκοπό τη μείωση των επανασυνδέσεων στην πίσω επιφάνεια, οι οποίες είναι ιδιαίτερα

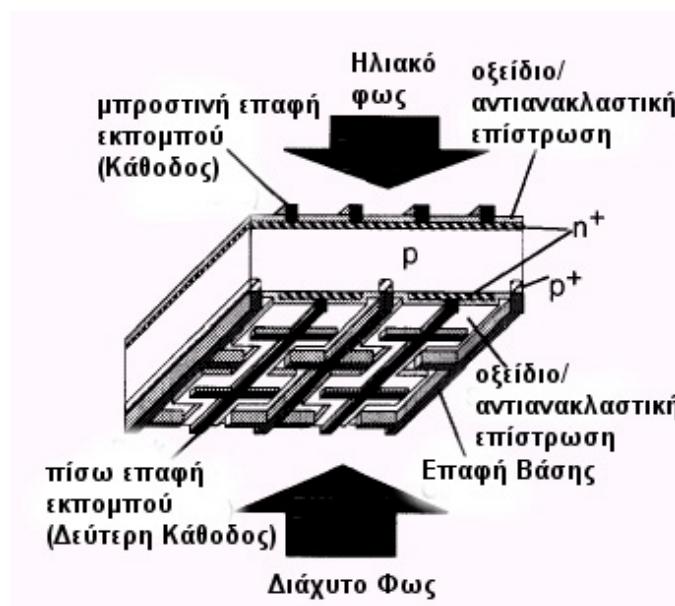
υψηλές στην περίπτωση της απλής δομής των κρυμμένων επαφών. Συγκεκριμένα η απλή δομή έχει σαν καλύτερη τιμή για την τάση ανοιχτού κυκλώματος τα 645 mV [49] ενώ στη δομή DSBC η αντίστοιχη τάση είναι 685 mV [50]. Επιπλέον από μελέτες έχει δείχτει [50-52] ότι η ύπαρξη της πίσω ένωσης λειτουργεί πιο αποτελεσματικά από τις άλλες τεχνικές μείωσης των επανασυνδέσεων, δηλαδή το πεδίο πίσω επιφάνειας (BSF) και την καλυμμένη με οξείδιο περιοχή, όπως στο στοιχείο PERL.

Παρά τα πλεονεκτήματα της πίσω ένωσης η παρασιτική αντίσταση που δημιουργείται μεταξύ αυτής και των πίσω επαφών περιορίζει τη μέγιστη τάση ανοιχτού κυκλώματος αλλά και τον παράγοντα πλήρωσης [53]. Για να περιοριστεί αυτό το φαινόμενο, χρειάζεται κατάλληλη επιλογή της νόθευσης του πίσω στρώματος τύπου n. Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται για χαμηλές νοθεύσεις (περίπου 2000 Ω/\square). Επίσης τα αυλάκια που ανοίγονται με laser για να γίνουν οι επαφές είναι περιοχές υψηλών επανασυνδέσεων. Σε γενικές γραμμές, η διάταξη αυτή μπορεί να επιτύχει αποδόσεις της τάξης του 20% για υλικό τύπου Cz πάχους 200 μm .

3.8.6 Το φ/β στοιχείο τριών ακροδεκτών τύπου n^+pn^+ (δύο ενώσεων)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι φ/β διατάξεις που έχουν εκπομπούς και στις 2 επιφάνειες έχουν το πλεονέκτημα ότι συλλέγουν περισσότερο ρεύμα λόγω της ύπαρξης της επιπλέον ένωσης, ενώ με κατάλληλη σχεδίαση μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν διατάξεις 2 όψεων, δηλαδή να φωτίζονται και από τις 2 πλευρές. Μια τέτοια διάταξη προτάθηκε από τους Warabisako et al. [54] η οποία είναι τύπου n^+pn^+ και έχει 3 ακροδέκτες (μπροστινός και πίσω εκπομπός, πίσω επαφή) όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.14, δηλαδή θυμίζει στη δομή διπολικό τρανζίστορ. Η μπροστινή του επιφάνεια δεν διαφέρει από αυτή ενός τυπικού φ/β στοιχείου, αλλά η πίσω διαθέτει ένα στρώμα τύπου n^+ που είναι η πίσω ένωση, και ηλεκτρόδια για τις επαφές του εκπομπού και της βάσης. Επιπλέον διαθέτει αντανακλαστική επίστρωση για καλύτερη απορρόφηση του φωτός.

Η συγκεκριμένη δομή έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να επιτύχει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τις συμβατικές για υποστρώματα πολυκρυσταλλικού πυριτίου, όπου το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας είναι μικρότερο από το πάχος του στοιχείου, διότι φορείς που παράγονται στην πίσω επιφάνεια συλλέγονται από τον δεύτερο εκπομπό. Επιπρόσθετα, είναι πιο αποτελεσματικό στην περίπτωση που το στοιχείο φωτίζεται και από τις 2 επιφάνειες.



Σχήμα 3.14. Το φ/β στοιχείων τριών ακροδεκτών (δύο ενώσεων) [54].

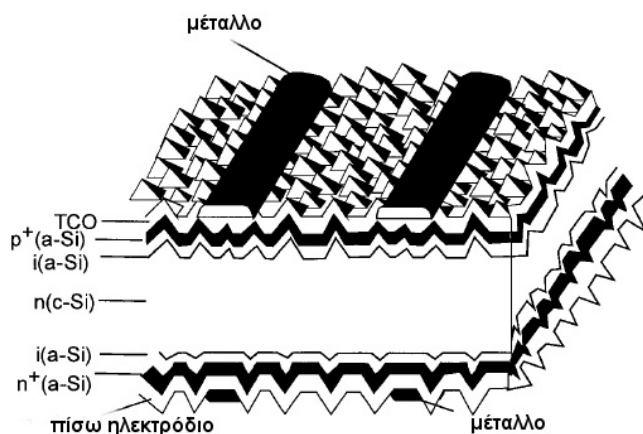
Ένα σημείο που χρειάζεται προσοχή στην σχεδίαση αυτών των στοιχείων είναι η κατασκευή των πίσω ηλεκτροδίων, όπου υπάρχουν αντικρουόμενες απαιτήσεις. Αφενός είναι επιθυμητό να καταλαμβάνουν μικρή επιφάνεια για να μην υπάρχουν σημαντικές απώλειες σκίασης, αφετέρου πρέπει να είναι αρκετά φαρδιά (ιδίως η επαφή της βάσης) για να μην αυξηθεί πολύ η αντίσταση σειράς.

Βασίζόμενοι στη δομή του σχήματος 3.14 οι Warabisako et al [54] κατασκεύασαν πρότυπα φ/β στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου τύπου p 0.5-1.5Ω.cm επιφάνειας 10 cm² και πάχους 200 μm. Η αντιανακλαστική επίστρωση και στις 2 επιφάνειες ήταν TiO₂ πάχους 55 nm, ενώ τα ηλεκτρόδια στη μπροστινή και πίσω επιφάνεια σχηματίστηκαν με τη μέθοδο screen printing. Η μέγιστη απόδοση που επιτεύχθηκε για βελτιστοποιημένη πίσω γεωμετρία ως προς το πλάτος των περιοχών n⁺ και p⁺ και των ηλεκτροδίων της βάσης ήταν 15.5% όταν το στοιχείο φωτιζόταν από μπροστά και 12% για φωτισμό από πίσω σε AM1.5 συνθήκες ακτινοβολίας. Αν υποθεθεί ότι η διάταξη λειτουργεί φωτιζόμενη από τις 2 όψεις με διάχυτη ακτινοβολία 30% από πίσω τότε η ισοδύναμη συνολική απόδοση του στοιχείου μπορεί να φτάσει το 19.1%. Αυτή η δομή είναι επίσης πιο αποδοτική για φωτισμό 2 όψεων σε σχέση με συμβατικές διατάξεις σχεδιασμένες για τέτοια λειτουργία, όπως και για συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας [55-56]. Επίσης τέτοιες διατάξεις είναι κατάλληλες και για διαστημικές εφαρμογές [57] διότι δεν επηρεάζονται πολύ από την υποβάθμιση του υλικού που οφείλεται στην κοσμική ακτινοβολία, γεγονός που οφείλεται στην αποτελεσματική συλλογή φορέων από τους 2 εκπομπούς. Επιπρόσθετα, ο τύπος αυτός

φ/β στοιχείου είναι λιγότερο ευαίσθητος σε σχέση με τις συμβατικές διατάξεις στην υποβάθμιση λόγω φωτισμού του υλικού τύπου Cz που είναι νοθευμένο με Βόριο [58]. Σε γενικές γραμμές, παρά την σχετικά πολύπλοκη κατασκευή του, το στοιχείο τριών ακροδεκτών παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα και θα μελετηθεί διεξοδικά στα παρακάτω κεφάλαια.

3.9 Το φ/β στοιχείο HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer)

Το φ/β στοιχείο HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer) [59] είναι επίσης μια διάταξη υψηλής απόδοσης της οποίας ο εκπομπός αποτελείται από ένα στρώμα αμόρφου πυριτίου (a-Si), ενώ επίσης a-Si χρησιμοποιείται στην πίσω επιφάνεια για να μειωθούν οι επανασυνδέσεις όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15. Το φ/β στοιχείο HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-Layer) [12].

Για την κατασκευή του χρησιμοποιείται σαν υπόστρωμα πυρίτιο τύπου n 1Ω.cm και πάχους περίπου 250 μm. Η επαφή p-n διαμορφώνεται με την εναπόθεση 2 στρωμάτων, μη νοθευμένου και νοθευμένου τύπου p a-Si με τη μέθοδο PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition). Στην πίσω πλευρά το πεδίο πίσω επιφάνειας διαμορφώνεται με 2 στρώματα ανόθευτου και νοθευμένου τύπου n a-Si. Επίσης, πάνω από τα νοθευμένα στρώματα της μπροστινής και πίσω επιφάνειας τοποθετείται ένα λεπτό αγωγίμο οξείδιο (TCO, Thin Conducting Oxide) και ακολουθεί η κατασκευή των ηλεκτροδίων. Το TCO χρησιμεύει και σαν αντιανακλαστική επίστρωση για την μπροστινή πλευρά. Τα ηλεκτρόδια της μπροστινής και της πίσω πλευράς έχουν παρόμοια δομή για να αποφευχθούν μηχανικές τάσεις στη διάταξη και από την άλλη

πλευρά δίνεται η δυνατότητα στο στοιχείο να εκμεταλλεύεται αποτελεσματικά την ακτινοβολία όταν φωτίζεται και από τις 2 επιφάνειες.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της δομής είναι οι πολύ χαμηλές επιφανειακές επανασυνδέσεις που οφείλονται στην ύπαρξη του ενδογενούς (intrinsic) στρώματος a-Si το οποίο μειώνει δραστικά τις επιφανειακές ατέλειες, οπότε επιτυγχάνονται υψηλές τάσεις ανοιχτού κυκλώματος. Επιπρόσθετα, η διαδικασία κατασκευής της διάταξης απαιτεί χαμηλές θερμοκρασίες (<200°C), που σημαίνει μείωση του κόστους αλλά και αμελητέα υποβάθμιση του χρόνου ζωής των φορέων μειονότητας στο υπόστρωμα του κρυσταλλικού πυριτίου. Από την άλλη πλευρά λόγω του αμόρφου πυριτίου η συμπεριφορά των διατάξεων σε υψηλές θερμοκρασίες είναι καλύτερη σε σχέση με τις συμβατικές κρυσταλλικού πυριτίου.

Η καλύτερη απόδοση που έχει επιτευχθεί μέχρι στιγμής εργαστηριακά σε διάταξη HIT επιφάνειας 101cm² είναι 20.1%, η οποία έχει τάση ανοιχτού κυκλώματος 702 mV, και σε βιομηχανικές διαδικασίες είναι 17.3%. Η Sanyo το κατασκευάζει σε μαζική παραγωγή από το 1997 με αποδόσεις που τότε έφταναν το 15.2%.

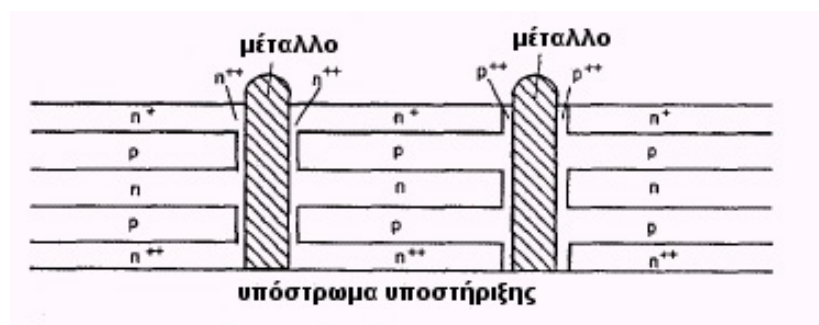
3.10 Το φ/β στοιχείο πολλών στρωμάτων

Το φ/β στοιχείο πολλών στρωμάτων (multilayer silicon solar cell) προτάθηκε από τους Green et al. [60] ως μια διάταξη η οποία μπορεί να έχει υψηλές αποδόσεις ακόμα και σε υλικό χαμηλής ποιότητας. Η δομή της όπως φαίνεται στο σχήμα 3.16 αποτελείται από διαδοχικές στρώσεις με νόθευση τύπου n ή τύπου p οι οποίες εναλλάσσονται μεταξύ τους. Η πίσω πλευρά που εφάπτεται στο υπόστρωμα (το οποίο χρησιμοποιείται ως υποστήριξη επειδή το στοιχείο είναι πολύ λεπτό) είναι υψηλά νοθευμένη (n⁺⁺) ενώ στην μπροστινή επιφάνεια που δέχεται το φως το στρώμα τύπου n είναι μέτριας νόθευσης (n⁺). Το πάχος των 2 αυτών στρωμάτων είναι πολύ μικρό (0.1μm) και το συνολικό πάχος του στοιχείου κυμαίνεται στην περιοχή των 10-20μm.

Για την κατασκευή αυτού του στοιχείου, απαιτείται ένα υπόστρωμα, το οποίο μπορεί για παράδειγμα να είναι γυαλί με κάποια μονωτική επίστρωση. Ύστερα ακολουθεί η εναπόθεση των διαφορετικών εναλλασσόμενων στρωμάτων τύπου n και p (συνήθως με CVD) των οποίων η νόθευση είναι της τάξης των 10¹⁸ cm⁻³, ενώ το πάνω στρώμα καλύπτεται από οξείδιο ή νιτρίδιο. Το επόμενο στάδιο είναι η κρυστάλλωση του υλικού ώστε να παραχθούν κόκκοι μέσου μεγέθους 3 μm και μετά με τη βοήθεια laser ανοίγονται αυλάκια με διαδικασία αντίστοιχη αυτής που ακολουθείται για την

Κεφάλαιο 3

κατασκευή του στοιχείου των θαμμένων επαφών. Στην επόμενη φάση ακολουθεί ένα στάδιο διάχυσης για να νοθευτούν τα αυλάκια ώστε να αποκτήσουν την απαιτούμενη πολικότητα, ενώ μια δεύτερη αντίστοιχη διαδικασία με laser χρησιμοποιείται για να αφαιρεθεί η νόθευση εκεί που δεν χρειάζεται. Έτσι, για να προκύψει η αντίθετη πολικότητα γίνεται μια δεύτερη διάχυση και τελικά γίνεται ο σχηματισμός του μετάλλου.



Σχήμα 3.16. Δομή του φ/β στοιχείου πολλών στρώματων (multilayer silicon solar cell) [61].

Όπως αναφέρθηκε πριν, επειδή τα επιμέρους στρώματα έχουν πολύ μικρό πάχος, η απόδοση της διάταξης μπορεί να παραμείνει υψηλή ακόμα και αν το υλικό έχει πολύ χαμηλό μήκος διάχυσης φορέων μειονότητας. Επίσης, η συγκεκριμένη δομή δεν επηρεάζεται πολύ από τις επιφανειακές επανασυνδέσεις [61] αφού το περισσότερο φως απορροφάται μακριά από την επιφάνεια, δεδομένου ότι το μπροστινό στρώμα είναι πολύ λεπτό, ενώ φαινόμενα έγχυσης μεταξύ των στρώματων μειώνουν τις ωμικές απώλειες, όπως προέκυψε από διδιάστατες προσομοιώσεις.

Σε πειραματικό επίπεδο, κατασκευάστηκε διάταξη από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο [62] πάχους 32 μm που αποτελείται από 5 στρώματα και επιτεύχθηκε απόδοση 17.6%. Το υπόστρωμα ήταν πυρίτιο υψηλά νοθευμένο το οποίο ήταν καλυμμένο με ένα μονωτικό στρώμα. Γενικά η κατασκευή τέτοιων διατάξεων έχει αρκετές τεχνολογικές δυσκολίες [63-64], αλλά αυτή η δομή έχει υψηλές δυνατότητες.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Kingsbury E. F. και Ohl R. S., *Bell System Tech. J.*, Τόμος 31, 1952, σελ. 8092.
- [2] Chapin D. M., Fuller C. S. και Pearson G. L., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 8, 1954, σελ. 676.
- [3] Zhao J., Wang A., και Green M. A., *Progr. In Photovoltaics: Res. Appl.*, Τόμος 7, 1999, σελ. 471.
- [4] Haynos J., Allison J., Arndt R. και Meulenber A., *Int. Conf. Photovoltaic Power Generation*, Hamburg, Germany, 1974, σελ. 487.
- [5] Lindmayer J. και Allison J., *COMSAT Tech. Rev.*, Τόμος 3, 1973 σελ. 1.
- [6] Mandelkorn J., McAfee C. και Kesperis J., *J. Electrochem. Soc.*, 1962, σελ. 313.
- [7] Godfrey R. B. και Green M. A., *Appl. Phys. Lett.*, Τόμος 34, 1979, σελ. 790.
- [8] Fossum J. G. και Burgess E. L., *Appl. Phys. Lett.*, Τόμος 33, 1978, σελ. 238.
- [9] Green M. A., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 23, 1976, σελ. 11.
- [10] Blakers A. W. και Green M. A., *Appl. Phys. Lett.*, Τόμος 48, 1986, σελ. 215.
- [11] Green M. A., Chong C. M., Zhang F., Sproul A., Zolper J. και Wenham S. R., *20th IEEE PV Spec. Conf.*, Las Vegas, USA, 1988, σελ. 411.
- [12] Green M. A., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 46, 1999, σελ. 1940.
- [13] Data Sheet, *BP Saturn Solar Cells*, 1991.
- [14] Sinton R. A., Kwark Y., Gan J. Y. και Swanson R. M., *IEEE Electron Device Lett.*, Τόμος 7, 1986, σελ. 567.
- [15] Swanson R. M., Beckwith S. K., Crane R. A., Eades W. D., Kwark Y. H., Sinton R. A. και Swirhun S. E., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 31, 1984, σελ. 661.
- [16] Lammert M. D. και Schwartz R. J., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 24, 1977, σελ. 337.
- [17] King R. R., Sinton R. A. και Swanson R. M., *20th IEEE PV Spec. Conf.*, Las Vegas, USA, 1988, σελ. 538.
- [18] Verlinden P. J., Swanson R. M., Sinton R. A., Crane R. A., Tilford C., Perkins J. και Garrison K., *23rd IEEE PV Spec. Conf.*, Louisville, USA, 1993, σελ. 58.
- [19] Verlinden P. J., Swanson R. M. και Crane R. A., *Progr. In Photovoltaics*, Τόμος 2, 1994, σελ. 153.

- [20] Mulligan W. P., Rose D. H., Cudzinovie M. J., De Ceuster D. M., K. R. McIntosh, Smith D. D. και Swanson R. M., *19th EPV Sol. Energy Conf.*, Paris, France, 2004, σελ. 387.
- [21] Zhao J., Wang A. και Green M. A., *21st IEEE PV Spec. Conf.*, Orlando, USA, 1990, σελ. 333.
- [22] Sterck S., Glunz S. W., Knobloch J. και Wettling W., *1st WCPEC Conf.*, Hawaii, USA, 1994, σελ. 1303.
- [23] Warabisako T., Uematsu T., Muramatsu S., Tsutsui K., Ohtsuka H., Nagata Y. και Sakamoto M., *Sol. Energy Mat. & Sol. Cells*, Τόμος 48, 1997, σελ. 137.
- [24] Balk P., *The Si-SiO₂ System*, Elsevier, Amsterdam, 1988, σελ. 234.
- [25] Zhao J., Wang A., Altermatt P., και Green M. A., *Appl. Phys. Lett.*, Τόμος 66, 1995, σελ. 3636.
- [26] Zhao J., Wang A. και Green M. A., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 41, 1994, σελ. 1592.
- [27] Wang A. Zhao J. και Green M. A., *Appl. Phys. Lett.*, Τόμος 57, 1990, σελ. 602.
- [28] Zhao J., Wang A. και Green M. A., *Progr. In Photovoltaics*, Τόμος 2, 1994, σελ. 227.
- [29] Zhao J., Wang A. και Green M. A., *Progr. In Photovoltaics*, Τόμος 8, 2000, σελ. 549.
- [30] Zhao J., Wang A. και Green M. A., *Sol. Energy Mat. & Sol. Cells*, Τόμος 66, 2001, σελ. 27.
- [31] Wang A., *Διδακτορική Διατριβή*, University of New South Wales, 1992.
- [32] Zhao J., Wang A., Dai X., Green M. A. και Wenham S. R., *22nd IEEE PV Spec. Conf.*, Las Vegas, USA, 1991, σελ. 399.
- [33] Schmidt J., Aberle A. G., Hezel R., *26th IEEE PV Spec. Conf.*, Anaheim, USA, 1997, σελ. 13.
- [34] Glunz S. W., Preu R., Schaefer S. Schneiderlöchner E., Pfleging W., Lüdemann R., Willeke G., *28th IEEE PV Spec. Conf.*, Anchorage, USA, 2000, σελ. 168.
- [35] Blakers A. W., Wang A., Milne A. M., Zhao J. και Green M. A., *Appl. Phys. Lett.*, Τόμος 55, 1989, σελ. 1363.
- [36] Schneiderlöchner E., Preu R., Lüdemann R., και Glunz S. W., *Progr. In Photovoltaics: Res. Appl.*, Τόμος 10, 2002, σελ. 29.
- [37] Preu R., *Διδακτορική Διατριβή*, Fernuniversität-Gesamthochschule, Hagen, 2000.

- [38] Glunz S. W., Schneiderlöchner E., Kray D., Grohe A., Hermle M., Kampwerth H. και Willeke G., *19th EPV Sol. Energy Conf.*, Paris, France, 2004 σελ. 408.
- [39] Gee J. M., Schubert W. K. και Basore P. A., *23rd IEEE PV Spec. Conf.*, Louisville, USA, 1993, σελ. 265.
- [40] Kress A., Breitenstein O., Glunz S. W., Fath P., Willeke G. και Bucher E., *Sol. Energy Mat. & Sol. Cells*, Τόμος 65, 2001, σελ. 555.
- [41] Kress A., Kühn R., Fath P., Willeke G. και Bucher E., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 46, 1999, σελ. 2000.
- [42] Smith D. D., Gee J. M., Bode M. D. και Jimeno J. C., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 46, 1999, σελ. 1993.
- [43] Van Kerschaver E., De Wolf S., Szlufcik J., *28th IEEE PV Spec. Conf.*, Anchorage, USA, 2000, σελ. 209.
- [44] Jooss W., Knauss H., Huster F., Fath P., Bucher E., Tölle R., Bruton T. M., *28th IEEE PV Spec. Conf.*, Anchorage, USA, 2000, σελ. 176.
- [45] Haverkamp H., Knauss H., Rueland H., Fath P., Jooss W., Klenk M., Marckmann C., Weber L., Nussbaumer H., Buckhardt H., *19th EPV Sol. Energy Conf.*, Paris, France, 2004, σελ. 967.
- [46] Van Kerschaver E., Allebé C. και Beaucarne G., *19th EPV Sol. Energy Conf.*, Paris, France, 2004, σελ. 915.
- [47] Boueke A., Kühn R., Fath P., Willeke G. και Bucher E., *Sol. Energy Mat. & Sol. Cells*, Τόμος 65, 2001, σελ. 549.
- [48] Ebong E. U., Lee S. H., Warta W., Honsberg C. B. και Wenham S. R., *Sol. Energy Mat. & Sol. Cells*, Τόμος 45, 1997, σελ. 283.
- [49] Honsberg C. B., Cotter J. E., McIntosh K. R., Pritchard S. C., Richards B. S. και Wenham S. R., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 46, 1999, σελ. 1984.
- [50] Honsberg C. B., McIntosh K. R., Boonprakaikaew G., Ghozati S. και Wenham S. R., *26th IEEE PV Spec. Conf.*, Anaheim, USA, 1997, σελ. 247.
- [51] Ghannam M. Y., *22nd IEEE PV Spec. Conf.*, Las Vegas, USA, 1991, σελ. 284.
- [52] Wenham S. R., Robinson S. J., Dai X., Zhao J., Wang A., Tang Y. H., Ebong E. U., Honsberg C. B. και Green M. A., *1st WCPEC Conf.*, Hawaii, USA, 1994, σελ. 1278.
- [53] Ghozati S. B., Ebong E. U., Honsberg C. B. και Wenham S. R., *Sol. Energy Mat. & Sol. Cells*, Τόμος 51, 1998, σελ. 121.
- [54] Warabisako T., Matsukuma K., Kokunai S., Kida Y., Uematsu T. και Yagi H., *23rd IEEE PV Spec. Conf.*, Louisville, USA, 1993, σελ. 248.

- [55] Ohtsuka H., Sakamoto M., Koyama M., Tsutsui K., Uematsu T. και Yazawa Y., *Progr. In Photovoltaics: Res. Appl.*, Τόμος 9, 2001, σελ. 1.
- [56] Luque A., Cuevas A., Ruiz J. M., *Solar Cells*, Τόμος 2, 1980, σελ. 151.
- [57] Tonomura Y., Hagino M., Washio H., Kaneiwa M., Saga T., Anzawa O., Aoyama K., Shinozaki K., Matsuda S., *Sol. Energy Mat. & Sol. Cells*, Τόμος 66, 2001, σελ. 551.
- [58] Ohtsuka H., Sakamoto M., Koyama M., Muramatsu S., Yazawa Y., Warabisako T., Abe T. και Saitoh T., *Sol. Energy Mat. & Sol. Cells*, Τόμος 66, 2001, σελ. 51.
- [59] Taguchi M., Tawamoto, K., Tsuge S., Baba T., Sakata H., Morizane M., Uchihashi K., Nakamura N., Kiyama S. και Osamu O., *Progr. In Photovoltaics: Res. Appl.*, Τόμος 8, 2000, σελ. 503.
- [60] Green M. A. και Wenham S. R., *Appl. Phys. Lett.*, Τόμος 65, 1994, σελ. 2907.
- [61] Honsberg C. B., Edmiston S., Koschier L. και Wenham S. R., *1st WCPEC Conf.*, Hawaii, USA, 1994, σελ. 1413.
- [62] Zheng G., Wenham S. R. και Green M. A., *Progr. In Photovoltaics*, Τόμος 4, 1996, σελ. 369.
- [63] Stocks M. J., Cuevas A. και Blakers A. W., *Progr. In Photovoltaics*, Τόμος 4, 1996, σελ. 35.
- [64] Brecl K., Smole F. και Furlan J., *Progr. In Photovoltaics: Res. Appl.*, Τόμος 7, 1999, σελ. 449.

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΒΑΣΗΣ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΕΠΑΦΗΣ

4.1 Εισαγωγή –Αναφορά βασικών αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης φ/β στοιχείων

Το γενικό πρόβλημα της μοντελοποίησης φ/β διατάξεων απαιτεί επίλυση των βασικών ημιαγωγικών διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες είναι μη γραμμικές στη γενική τους μορφή, οπότε στις περισσότερες περιπτώσεις πρέπει να λυθούν αριθμητικά. Στην αγορά υπάρχουν πολλά πακέτα προσομοίωσης ημιαγωγικών διατάξεων και για φ/β στοιχεία τα πιο διαδεδομένα είναι το DESSIS που αναπτύχθηκε από την εταιρία ISE (πρόσφατα εξαγοράστηκε από την SYNOPSIS) [1], το CADDETH της Hitachi [2-3], και σε λιγότερο βαθμό το ATLAS της SILVACO που σχεδιάστηκε από το Stanford [4]. Τα συγκεκριμένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ανάλυση προβλημάτων σε 3 διαστάσεις, αλλά σε αυτή την περίπτωση η δημιουργία τρισδιάστατου πλέγματος απαιτεί πολλή υπολογιστική μνήμη και ισχύ που δεν είναι πρακτικά διαθέσιμες στις περισσότερες περιπτώσεις. Ειδικά στις δομές που έχουν σημειακές επαφές στην πίσω επιφάνεια, όπως το PERL και το PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, το πεδίο προσομοίωσης είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με το μέγεθος των μικρότερων στοιχείων του [5]. Επιπλέον, οι ημιαγωγικές εξισώσεις επιλύονται δύσκολα μέσω επαναληπτικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται συνήθως για τη γραμμικοποίηση διαφορικών εξισώσεων [6]. Συνεπώς, στις περισσότερες εργασίες η προσομοίωση των δομών αυτών γίνεται στις 2 διαστάσεις. Το DESSIS προσφέρεται για τέτοιες προσομοιώσεις διότι παρέχει πολύ καλό έλεγχο στην πυκνότητα του πλέγματος, ενώ έχει σχεδιαστεί με βελτιωμένη συμπεριφορά στη σύγκλιση για προσομοιώσεις μεγάλης κλίμακας [7-8]. Επιπλέον, διαθέτει ένα ολοκληρωμένο διδιάστατο - τριδιάστατο περιβάλλον απεικόνισης, το PICASSO [9] που βοηθάει στην επίλυση των προβλημάτων προσομοίωσης. Έτσι, για μια τυπική προσομοίωση φ/β στοιχείων με βάση σημειακής επαφής, 64 MB υπολογιστικής μνήμης σε σταθμό εργασίας SUN Sparc-2 επαρκούν για αρκετά πυκνό πλέγμα [5]. Στην περίπτωση των τρισδιάστατων προβλημάτων όμως οι απαιτήσεις σε μνήμη είναι ιδιαίτερα υψηλές (περίπου 0,5GB για πλέγμα 120,000 σημείων) γεγονός που περιορίζει

την ακρίβεια των υπολογισμών, ενώ ο χρόνος επίλυσης είναι ιδιαίτερα υψηλός (μερικές μέρες για τον προαναφερθέν σύστημα και 4-6 ώρες σε υπερυπολογιστή Fujitsu VP 2200) [10]. Όσον αφορά τα απλούστερα μονοδιάστα προβλήματα, ο προσομοιωτής φ/β διατάξεων PC1D [11] είναι ο πιο δημοφιλής, λόγω της πληρότητας και της ευχρηστίας που διαθέτει.

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί το μοντέλο που αναπτύχθηκε κατά την εκπόνηση της διατριβής με σκοπό την προσομοίωση σε 3 διαστάσεις των φ/β στοιχείων με βάση σημειακής επαφής. Οι διατάξεις που προσομοιώθηκαν είναι παρόμοιες με τη δομή PERL, ενώ επιπλέον μελετήθηκε και μια παραλλαγή αυτής η οποία διαθέτει ένα επιπλέον εκπομπό στην πίσω επιφάνεια. Ο αλγόριθμος επίλυσης των εξισώσεων μεταφοράς βασίζεται σε αυτόν που ανέπτυξαν οι Misiakos, Tsoi και Neugroschel [12] που είχε χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση διόδων p-n σε 2 διαστάσεις και επεκτάθηκε στις 3 διαστάσεις από τους Kavadias et al [13-16] για την προσομοίωση ανιχνευτών ακτινοβολίας πυριτίου. Η επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς φορέων γίνεται με χρήση δισδιάστατου μετασχηματισμού Fourier, ενώ η τρίτη διάσταση εισάγεται αναλυτικά στους υπολογισμούς όπως θα φανεί αναλυτικά παρακάτω με αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση πράξεων αφού απαιτείται δισδιάστατη διαμέριση. Συνεπώς, η υλοποίηση του αλγορίθμου μπορεί να γίνει εύκολα ακόμα και σε προσωπικό υπολογιστή και η χαρακτηριστική τάσεως ρεύματος (IV) της διάταξης μπορεί να εξαχθεί σε εύλογο χρονικό διάστημα. Στις προσομοιώσεις των διατάξεων δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην αντίσταση σειράς που οφείλεται στην κίνηση των φορέων (spreading resistance) η οποία εξαρτάται από το μέγεθος και την απόσταση των πίσω επαφών.

4.2 Μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης- Υποθέσεις, εξισώσεις και οριακές συνθήκες

Σε αυτή την ενότητα θα αναλυθεί το μαθηματικό μοντέλο επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων μεταφοράς φορέων των προσομοιούμενων διατάξεων. Συγκεκριμένα, θα δοθούν πρώτα σε τελική μορφή οι βασικές διαφορικές εξισώσεις, θα ακολουθήσουν οι οριακές συνθήκες για τις 2 διαφορετικές δομές και τέλος θα παρουσιαστεί αναλυτικά η μέθοδος επίλυσης αυτών.

4.2.1 Βασικές Υποθέσεις

Η βασική προϋπόθεση ισχύος του μοντέλου είναι η χαμηλή έγχυση φορέων στο στοιχείο. Αυτό σημαίνει ότι η συγκέντρωση των δημιουργούμενων από το φως φορέων είναι πολύ μικρότερη από τη νόθευση του ημιαγωγού. Η συνθήκη αυτή ισχύει στις περισσότερες φ/β διατάξεις οι οποίες λειτουργούν κάτω από κανονικές συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας, που στην περίπτωση των υπό ανάλυση δομών είναι οι τυποποιημένες AM1.5G με προσπίπτουσα φωτεινή ισχύ 100 mW/cm^2 . Η υπόθεση αυτή παύει να ισχύει όταν το στοιχείο είναι πολύ ελαφρά νοθευμένο ή δουλεύει υπό συγκεντρωμένη ακτινοβολία.

Η επόμενη βασική υπόθεση είναι ότι οι ενώσεις πρέπει να είναι επιφανειακές, δηλαδή οι εκπομποί να έχουν αμελητέο βάθος. Σε διατάξεις υψηλής απόδοσης αυτό ισχύει με καλή προσέγγιση και είναι επιθυμητό, οπότε το πάχος του εκπομπού συνήθως δεν ξεπερνάει τα μερικά δέκατα του μικρόμετρου. Η ίδια προϋπόθεση θεωρείται ότι ισχύει και για τις τοπικές διαχύσεις κάτω από τις πίσω σημειακές επαφές.

Μια άλλη θεώρηση είναι ότι η βάση πρέπει να έχει ομοιογενή χαρακτηριστικά, δηλαδή η νόθευσή της, οι κινητικότητες, ο χρόνος ζωής των φορέων μειονότητας και τα υπόλοιπα φυσικά μεγέθη πρέπει να είναι σταθερά σε κάθε σημείο της. Η υπόθεση αυτή ισχύει σε μονοκρυσταλλικό υλικό καλής ποιότητας.

Τέλος, στο μοντέλο αυτό θεωρείται ότι ο εκπομπός και το μπροστινό μέταλλο έχουν αμελητέες ωμικές απώλειες ενώ όλοι οι παραγόμενοι από το φως φορείς δημιουργούνται στη βάση. Επιπλέον οι απώλειες λόγω ανάκλασης από την μπροστινή επιφάνεια και σκίασης του μπροστινού ηλεκτροδίου θεωρούνται μηδενικές. Στην πραγματικότητα ακόμη και στις καλύτερες πειραματικές διατάξεις οι απώλειες στον εκπομπό και στο μπροστινό ηλεκτρόδιο είναι αρκετά σημαντικές, όπου ένα σημαντικό ποσοστό αυτών είναι ωμικές. Επίσης η ανάκλαση στην μπροστινή επιφάνεια παρόλο που μπορεί να φτάσει σε πολύ χαμηλά επίπεδα, δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

Ουσιαστικά οι πρώτες τρεις θεώσεις είναι απαραίτητες για την εφαρμογή της μεθόδου, αφού επιτρέπουν την ξεχωριστή επίλυση των διαφορικών εξισώσεων διάχυσης και δυναμικού και την δυνατότητα ημιαναλυτικής λύσης του προβλήματος οπότε απαιτείται διαμέριση στις 2 διαστάσεις, όπως θα δούμε παρακάτω. Η τελευταία υπόθεση έχει γίνει προκειμένου να δοθεί έμφαση στις απώλειες της βάσης και ειδικά στις ωμικές που θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια.

4.2.2 Εξίσωση διάχυσης φορέων μειονότητας

Η διαφορική εξίσωση διάχυσης φορέων μειονότητας στη βάση τύπου p του στοιχείου, υπό συνθήκες ομοιόμορφου φωτισμού (ανεξάρτητου των διαστάσεων x,y) δίνεται από τη σχέση

$$D_n \nabla^2 n(x,y,z) + G(z) - \frac{n(x,y,z)}{\tau_n} = 0 \Rightarrow \nabla^2 n(x,y,z) = \frac{n(x,y,z)}{L_n^2} - \frac{G(z)}{D_n} \quad (4.1)$$

όπου $G(z)$ ο ρυθμός γέννησης φορέων στη διάταξη λόγω της ακτινοβολίας, $n(x,y,z)$ η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων (φορείς μειονότητας), D_n ο συντελεστής διάχυσης, L_n το μήκος διάχυσης και τ_n ο χρόνος ζωής αυτών. Οι διαστάσεις x, y θεωρείται ότι εκτείνονται παράλληλα στην επιφάνεια του στοιχείου, ενώ η z είναι κάθετη σε αυτήν.

4.2.3 Εξίσωση δυναμικού φορέων πλειονότητας

Η ανάλυση που ακολουθεί σε αυτή την ενότητα αφορά τον υπολογισμό του δυναμικού που οφείλεται στους φορείς πλειονότητας το οποίο ουσιαστικά είναι η πτώση τάσης λόγω της αντίστασης σειράς στη βάση της διάταξης. Ξεκινώντας από την εξίσωση συνέχειας στη μόνιμη κατάσταση για τα ηλεκτρόνια και τις οπές, προκύπτει

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - U_n + \frac{1}{e} \nabla J_n = 0 \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - U_p - \frac{1}{e} \nabla J_p = 0 \quad (4.3)$$

Επιπλέον, το ρεύμα φορέων πλειονότητας δίνεται από τη σχέση

$$J_p = e\mu_p pE - eD_p \nabla p \quad (4.4)$$

όπου μ_p , D_p η κινητικότητα και ο συντελεστής διάχυσης των οπών. Υποθέτοντας ουδετερότητα φορτίου στο σύνολο του ημιαγωγού, δηλαδή ίδιο αριθμό παραγόμενων και επανασυνδεόμενων ηλεκτρονίων και οπών, τότε για το ρυθμό παραγωγής φορέων ισχύει $G_n = G_p = G$, ενώ για τον αντίστοιχο ρυθμό επανασύνδεσης $U_n = U_p = U$. Επίσης, έχοντας υποθέσει χαμηλή έγχυση φορέων στον ημιαγωγό ισχύει $p \approx N_A$ όπου N_A είναι η

Κεφάλαιο 4

νόθευση στη βάση. Βάσει αυτών, με παραγωγή της (4.4) και χρήση της (4.1) προκύπτει

$$\nabla J_p = e\mu_p N_A \nabla E - eD_p \nabla^2 p \Rightarrow \nabla J_p = e\mu_p N_A \nabla E - eD_p \nabla^2 n$$

$$\nabla J_p = e\mu_p N_A \nabla E - eD_p \left(\frac{n}{L_n^2} - \frac{G}{D_n} \right) \Rightarrow$$

$$\frac{n}{\tau_n} - G = -\mu_p N_A \nabla E + \frac{D_p}{D_n} \left(\frac{n}{\tau_n} - G(z) \right) \Rightarrow$$

$$\nabla E = \frac{D_p - D_n}{\mu_p N_A} \left(\frac{n}{L_n^2} - \frac{G}{D_n} \right)$$

Από το αποτέλεσμα αυτής της έκφρασης, με τη βοήθεια της (4.1) και λαμβάνοντας υπόψιν ότι $E = -\nabla V$, εξάγεται η ακόλουθη διαφορική εξίσωση του δυναμικού φορέων πλειονότητας

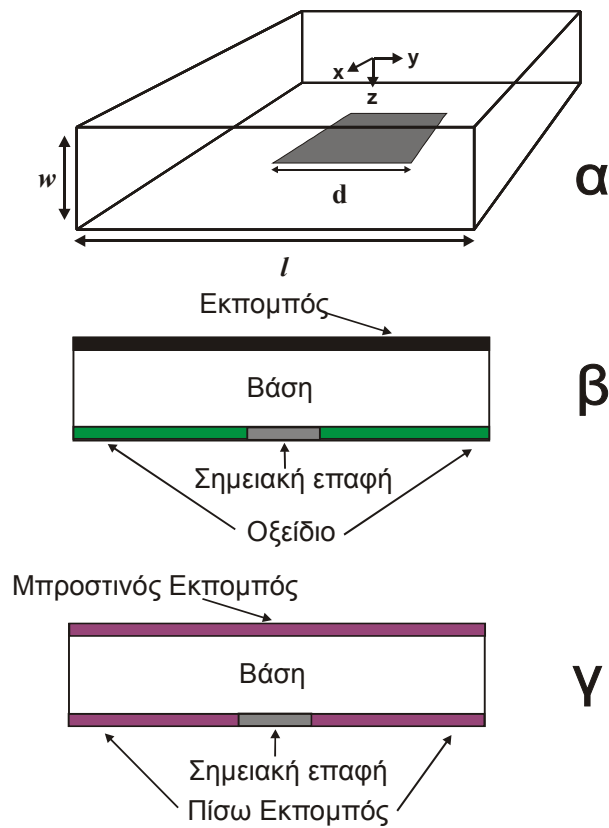
$$\nabla^2 V(x, y, z) = \frac{1}{\mu_p N_A} (D_n - D_p) \nabla^2 n(x, y, z) \quad (4.5)$$

Η (4.1) μαζί με την (4.5) αποτελούν τις βασικές εξισώσεις που θα λυθούν με τη βοήθεια της μεθόδου που αναπτύχθηκε και υπόκεινται στις οριακές συνθήκες που περιγράφονται στην αμέσως επόμενη ενότητα.

4.2.4 Οριακές Συνθήκες

Η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων μεταφοράς (4.1) και (4.5) υπόκειται σε μεικτές οριακές συνθήκες οι οποίες διαφέρουν για τις διατάξεις που προσομοιώνονται στη διατριβή και για αυτό το λόγο θα δοθούν χωριστά. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η στοιχειώδης τρισδιάστατη κυψελίδα του μοντέλου και σε τομή οι 2 διαφορετικές προσομοιούμενες δομές.

Όπως φαίνεται στο σχήμα (4.1α), με w συμβολίζεται το πάχος των δομών, οι πίσω σημειακές επαφές έχουν σχήμα τετραγώνου πλευράς d , ενώ η στοιχειώδης κυψελίδα επαναλαμβάνεται στις διαστάσεις x, y με περίοδο l , δεδομένου ότι το μέγεθος των πίσω σημειακών επαφών και η απόστασή τους παραμένουν σταθερά σε όλη τη διάταξη.



Σχήμα 4.1. (α) Στοιχειώδης τρισδιάστατη κυβελίδα του μοντέλου, η οποία επαναλαμβάνεται στις διαστάσεις x,y με περίοδο l . (β) Διάταξη μιας ένωσης. (γ) Διάταξη 2 ενώσεων.

Στο σχήμα (4.1β) φαίνεται η πρώτη από τις διατάξεις που θα μελετήσουμε, όπου η μπροστινή επιφάνεια καλύπτεται ολόκληρη από τον εκπομπό, ο οποίος έχει αμελητέο πάχος και η πίσω επιφάνεια καλύπτεται σχεδόν όλη από οξειδίο εκτός από την περιοχή της πίσω σημειακής επαφής. Στην περίπτωση της διάταξης διπλής ένωσης, αντί του οξειδίου η υπόλοιπη πίσω επιφάνεια καλύπτεται από μια δεύτερη ένωση (σχ. 4.1γ).

4.2.4.1 Διάταξη μιας ένωσης

Η διάταξη μιας ένωσης όπως απεικονίζεται στο σχήμα (4.1α) παρουσιάζει δομή αντίστοιχη όσον αφορά την πίσω επιφάνεια με τα φ/β στοιχεία PERC/PERL, η οποία έχει αναλυθεί αρκετά στη βιβλιογραφία όπως αναφέρθηκε νωρίτερα. Ακολούθως θα δοθούν ξεχωριστά οι οριακές συνθήκες για την εξίσωση διάχυσης φορέων μειονότητας και για το δυναμικό των φορέων πλειονότητας

Κεφάλαιο 4

A. Φορείς μειονότητας

Η οριακή συνθήκη στην μπροστινή επιφάνεια που αποτελείται από τον εκπομπό είναι

$$n(x, y, 0) = \frac{n_i^2}{N_A} \left(\exp \left(\frac{e(V_B + V_{drop}(x, y, 0))}{KT} \right) - 1 \right) \quad (4.6)$$

όπου n_i συμβολίζει την ενδογενή συγκέντρωση φορέων στον ημιαγωγό, V_B την τάση πόλωσης και V_{drop} την πτώση τάσης που οφείλεται στους φορείς πλειονότητας στη βάση του στοιχείου, η οποία στην αρχική επίλυση της (4.1) θεωρείται μηδενική.

Στην πίσω επιφάνεια, το ρεύμα διάχυσης φορέων μειονότητας J_n προσδιορίζεται από την ταχύτητα ανασύνδεσης $S(x, y)$ η οποία παίρνει διαφορετική τιμή στην περιοχή που καλύπτεται από την σημειακή επαφή και άλλη, πολύ χαμηλότερη στο οξειδίο, δηλαδή ισχύει

$$J_n(x, y, w) = eD_n \left. \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=w} = -eS(x, y)n(x, y, w) \quad (4.7)$$

Υποθέτουμε σταθερή ταχύτητα ανασύνδεσης S_I στο οξειδίο, ενώ στην περιοχή της πίσω επαφής, όπου είναι έντονα νοθευμένη για σχηματισμό τοπικού πεδίου πίσω επιφάνειας (BSF) η ταχύτητα επανασύνδεσης είναι επίσης σταθερή και δίνεται από την έκφραση

$$S_2 = \frac{J_{0C} N_A}{en_i^2} \quad (4.8)$$

όπου J_{0C} είναι το ρεύμα επανασύνδεσης στην πίσω σημειακή επαφή.

B. Φορείς πλειονότητας

Η επίλυση της εξίσωσης διάχυσης των φορέων μειονότητας δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού του δυναμικού των φορέων πλειονότητας. Το ρεύμα πλειονότητας J_p στην μπροστινή επιφάνεια στην περιοχή του εκπομπού είναι

$$J_p(x, y, 0) = -J_0 \left(\exp \left(\frac{q(V_B + V_{drop}(x, y, 0))}{KT} \right) - 1 \right) \quad (4.9)$$

Κεφάλαιο 4

όπου J_0 είναι το ρεύμα ανασύνδεσης του εκπομπού, ενώ θεωρούμε ότι δεν έχουμε γένεση φορέων σε αυτόν. Στην πίσω επιφάνεια η οριακή συνθήκη στην περιοχή του οξειδίου προκύπτει από την ακόλουθη σχέση

$$J_p(x, y, w) = eS_1 \delta p(x, y, w) = eS_1 n(x, y, w) \quad (4.10)$$

όπου $\delta p(x, y, w)$ οι παραγόμενες οπές λόγω της φωτεινής ακτινοβολίας, οι οποίες είναι ίσες σε αριθμό με τα ηλεκτρόνια. Οι πίσω επαφές θεωρούνται ως γείωση, οπότε το δυναμικό εκεί είναι μηδέν, άρα

$$V_{drop}(x, y, w) = 0 \quad (4.11)$$

Η χρήση των συνθηκών (4.9) και (4.10) στην επίλυση της εξίσωσης (4.5) απαιτεί το συσχετισμό τους με το ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω της (4.4) ως εξής

$$J_p = e\mu_p pE - eD_p \nabla p \Rightarrow J_p = e\mu_p N_A E - eD_p \nabla n \Rightarrow$$
$$J_p = e\mu_p N_A E - \frac{D_p}{D_n} J_n \Rightarrow E = \frac{J_p + \frac{D_p}{D_n} J_n}{e\mu_p N_A} \quad (4.12)$$

όπου το ρεύμα φορέων μειονότητας J_n μπορεί να προσδιορισθεί από την λύση της (4.1).

4.2.4.2 Διάταξη 2 ενώσεων

Η δομή της διάταξης 2 ενώσεων όπως φαίνεται στο σχήμα (4.1γ) έχει το βασικό χαρακτηριστικό της ύπαρξης ενός επιπλέον εκπομπού ο οποίος εκτείνεται σε όλη την πίσω επιφάνεια εκτός της περιοχής που καλύπτεται από τις σημειακές επαφές με σκοπό αποτελεσματικότερη συλλογή φορέων. Στις περισσότερες προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν, θεωρείται ότι οι 2 ενώσεις βρίσκονται στο ίδιο δυναμικό, δηλαδή είναι ενωμένες, αλλά για λόγους γενικότητας στις οριακές συνθήκες που θα δοθούν παρακάτω, ορίζονται ως διαφορετικές.

A. Φορείς μειονότητας

Η οριακή συνθήκη στην μπροστινή επιφάνεια του φ/β στοιχείου, είναι αντίστοιχης μορφής με την (4.1) οπότε γράφεται ως

Κεφάλαιο 4

$$n(x, y, 0) = \frac{n_i^2}{N_A} \left(\exp \left(\frac{e(V_{BF} + V_{drop}(x, y, 0))}{KT} \right) - 1 \right) \quad (4.13)$$

όπου V_{BF} παριστάνει την τάση στην μπροστινή ένωση. Στην πίσω επιφάνεια, η συνθήκη στην περιοχή της σημειακής επαφής είναι η ίδια με της δομής μιας ένωσης και ορίζεται από το ρεύμα διάχυσης φορέων μειονότητας που εξαρτάται από την ταχύτητα ανασύνδεσης στην επαφή

$$J_n(x, y, w) = eD_n \left. \frac{dn(x, y, z)}{dz} \right|_{z=w} = -eS_2 n(x, y, w) \quad (4.14)$$

όπου η τιμή της S_2 υπολογίζεται από την σχέση (4.8). Στην υπόλοιπη πίσω επιφάνεια, η οποία ορίζεται από την πίσω ένωση η οριακή συνθήκη είναι

$$n(x, y, w) = \frac{n_i^2}{N_A} \left(\exp \left(\frac{e(V_{BB} + V_{drop}(x, y, w))}{KT} \right) - 1 \right) \quad (4.15)$$

ενώ V_{BB} εκφράζει την τάση στην πίσω ένωση. Οι σχέσεις (4.14) και (4.15) εισάγουν μεικτές οριακές συνθήκες στην πίσω επιφάνεια.

B. Φορείς πλειονότητας

Η οριακή συνθήκη στην μπροστινή επιφάνεια που καταλαμβάνεται από την ένωση, εκφράζεται από το ρεύμα των φορέων πλειονότητας όπως στην (4.9) δηλαδή

$$J_p(x, y, 0) = -J_0 \left(\exp \left(\frac{q(V_{BF} + V_{drop}(x, y, 0))}{KT} \right) - 1 \right) \quad (4.16)$$

Στην πίσω σημειακή επαφή, όπως και στην περίπτωση της διάταξης μονής ένωσης, το δυναμικό σε αυτή θεωρείται μηδέν, άρα η οριακή συνθήκη δίνεται από τη σχέση (4.11), ενώ στην υπόλοιπη επιφάνεια που καθορίζεται από τον πίσω εκπομπό, η συνθήκη έχει αντίστοιχη μορφή με την (4.16) και είναι

$$J_p(x, y, w) = J_0 \left(\exp \left(\frac{q(V_{BB} + V_{drop}(x, y, w))}{KT} \right) - 1 \right) \quad (4.17)$$

Οι σχέσεις (4.16), (4.17) μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου μέσω της (4.12) με την διαδικασία που αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2.4.1B.

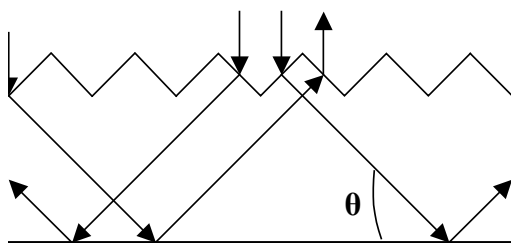
4.3 Μεθοδολογία επίλυσης των εξισώσεων μεταφοράς μέσω μετασχηματισμού

Fourier

Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφεί αναλυτικά η μαθηματική μέθοδος επίλυσης των δύο εξισώσεων μεταφοράς που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.2. Η βασική ιδέα πίσω από τη μεθοδολογία αυτή είναι η εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier στις διαστάσεις x, y έτσι ώστε οι εξισώσεις μεταφοράς να μετατραπούν σε συνήθεις διαφορικές εξισώσεις ως προς τη μεταβλητή z οπότε μπορούν να λυθούν αναλυτικά. Πριν την διαδικασία της επίλυσης θα δοθεί το μοντέλο απορρόφησης του φωτός στη διάταξη όπου θεωρείται ότι η μπροστινή επιφάνεια είναι διαμορφωμένη με πυραμίδες. Ύστερα θα ακολουθήσει η λύση της εξίσωσης διάχυσης φορέων μειονότητας και του δυναμικού φορέων πλειονότητας.

4.3.1 Μοντέλο απορρόφηση φωτός

Στις προσομοιούμενες διατάξεις υπάρχουν πυραμίδες στην μπροστινή επιφάνεια έτσι ώστε το φως να μπαίνει υπό γωνία στο φ/β στοιχείο και να αυξάνεται η διαδρομή του, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. Επιπλέον η πίσω επιφάνεια είναι ανακλαστική με συντελεστή ανάκλασης R_b . Έτσι το φως διανύει τουλάχιστον 2 διαδρομές μέχρι να διαφύγει. Για απλούστευση στους υπολογισμούς θεωρείται ότι μετά τη δεύτερη διαδρομή το φως φεύγει από τη διάταξη.



Σχήμα 4.2. Διαδρομή του φωτός στις προσομοιούμενες διατάξεις.

Κεφάλαιο 4

Αν θεωρήσουμε α_i το συντελεστή απορρόφησης του υλικού για το συγκεκριμένο μήκος κύματος i , τότε, σύμφωνα με το σχήμα 4.2, το φως εισέρχεται στη δομή με γωνία θ , οπότε η απορρόφηση αυξάνεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση

$$\alpha_{ieff} = \frac{\alpha_i}{\sin \theta} \quad (4.18)$$

όπου α_{ieff} ο ενισχυμένος συντελεστής απορρόφησης. Έτσι, για εκθετική απορρόφηση ακτινοβολίας στο υλικό, ο ρυθμός γέννησης φορέων στο στοιχείο για τη θεωρούμενη διπλή διαδρομή και τα μήκη κύματος του φάσματος είναι

$$G(z) = \sum_{i=1}^{N-1} (\alpha_{ieff} g_i e^{-\alpha_{ieff} z} + R_b e^{-\alpha_{ieff} w} \alpha_{ieff} g_i e^{-\alpha_{ieff} (w-z)}) \Delta\lambda_i = \sum_{i=1}^{N-1} G_i(z) \quad (4.19)$$

όπου g_i ο αριθμός των ηλεκτρονίων του φάσματος για το δεδομένο μήκος κύματος. Αντικαθιστώντας στην (4.19) προκύπτουν οι ρυθμοί γέννησης στη μπροστινή και πίσω επιφάνεια

$$G(0) = \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_{ieff} g_i (1 + R_b e^{-2\alpha_{ieff} w}) \Delta\lambda_i = \sum_{i=1}^{N-1} G_i(0) \quad (4.20)$$

$$G(w) = \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_{ieff} g_i (e^{-\alpha_{ieff} w} + R_b e^{-\alpha_{ieff} w}) \Delta\lambda_i = \sum_{i=1}^{N-1} G_i(w) \quad (4.21)$$

Η παραγωγή της (4.19) δίνει

$$\frac{dG(z)}{dz} = \sum_{i=1}^{N-1} -\alpha_{ieff}^2 g_i (e^{-\alpha_{ieff} z} - R_b e^{-\alpha_{ieff} w} e^{-\alpha_{ieff} (w-z)}) \Delta\lambda_i = \sum_{i=1}^{N-1} \Delta G_i(z) \quad (4.22)$$

ενώ οι αντίστοιχες εκφράσεις για τις επιφανειακές τιμές είναι

$$\left. \frac{dG(z)}{dz} \right|_{z=0} = \sum_{i=1}^{N-1} -\alpha_{ieff}^2 g_i (1 - R_b e^{-2\alpha_{ieff} w}) \Delta\lambda_i = \sum_{i=1}^{N-1} \Delta G_i(0) \quad (4.23)$$

$$\left. \frac{dG(z)}{dz} \right|_{z=w} = \sum_{i=1}^{N-1} -\alpha_{ieff}^2 g_i (e^{-\alpha_{ieff} w} - R_b e^{-\alpha_{ieff} w}) \Delta\lambda_i = \sum_{i=1}^{N-1} \Delta G_i(w) \quad (4.24)$$

Κεφάλαιο 4

Οι σχέσεις (4.19)-(4.24) είναι απαραίτητες για την επίλυση των εξισώσεων μεταφοράς που θα γίνει στις επόμενες ενότητες.

4.3.2 Διαδικασία επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης διάχυσης

Η εφαρμογή διδιάστατου μετασχηματισμού Fourier για τις μεταβλητές x, y στην εξίσωση (4.1) δίνει την ακόλουθη σχέση

$$\frac{d^2 \tilde{n}(k_x, k_y, z)}{dz^2} = (k_x^2 + k_y^2 + \frac{1}{L_n^2}) \tilde{n}(k_x, k_y, z) - \frac{\tilde{G}(z)}{D_n} \quad (4.25)$$

όπου $\tilde{n}(k_x, k_y, z)$, $\tilde{G}(z)$ είναι οι διδιάστατοι μετασχηματισμοί Fourier ως προς x, y των συναρτήσεων $n(x, y, z)$ και $G(z)$. Η (4.25) είναι μια συνήθης διαφορική εξίσωση ως προς z με την ακόλουθη γενική λύση

$$\tilde{n}(k_x, k_y, z) = A(k_x, k_y) e^{-R_1 z} + B(k_x, k_y) e^{R_1 z} + k_1 \frac{\tilde{G}(z)}{D_n} \quad (4.26)$$

όπου $R_1 = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + \frac{1}{L_n^2}}$, ενώ η σταθερά k_1 μπορεί να υπολογιστεί με διπλή παραγωγή ως προς z της (4.26) και εξισώνοντας το αποτέλεσμα με το δεξί μέρος της (4.25). Συνεπώς, ύστερα από πράξεις και χρήση της (4.19), η (4.26) διαμορφώνεται ως εξής:

$$\tilde{n}(k_x, k_y, z) = A(k_x, k_y) e^{-R_1 z} + B(k_x, k_y) e^{R_1 z} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\tilde{G}_i(z)}{D_n (R_1^2 - \alpha_{ieff}^2)} \quad (4.27)$$

Η γενική λύση που εκφράζεται από την (4.27) περιλαμβάνει τις σταθερές A και B οι οποίες πρέπει να καθοριστούν από τις οριακές συνθήκες του προβλήματος, όπως δόθηκαν στην ενότητα 4.2.4. Αυτές μπορούν να καθοριστούν μέσω των επιφανειακών συγκεντρώσεων $\tilde{n}(k_x, k_y, 0)$, $\tilde{n}(k_x, k_y, w)$ ως εξής

$$A(k_x, k_y) = \frac{\tilde{n}(k_x, k_y, 0) e^{R_1 w} - \tilde{n}(k_x, k_y, w) + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\tilde{G}_i(w) - \tilde{G}_i(0) e^{R_1 w}}{D_n (R_1^2 - \alpha_{ieff}^2)}}{e^{R_1 w} - e^{-R_1 w}} \quad (4.28)$$

Κεφάλαιο 4

$$B(k_x, k_y) = \frac{\tilde{n}(k_x, k_y, w) - \tilde{n}(k_x, k_y, 0)e^{-R_1 w} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\tilde{G}_i(0)e^{-R_1 w} - \tilde{G}_i(w)}{D_n(R_1^2 - \alpha_{ieff}^2)}}{e^{R_1 w} - e^{-R_1 w}} \quad (4.29)$$

όπου $\tilde{G}(0)$, $\tilde{G}(w)$ είναι οι ρυθμοί γένεσης φορέων στην μπροστινή και πίσω επιφάνεια και δίνονται από την (4.20) και (4.21). Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός του ρεύματος διάχυσης φορέων μειονότητας. Αυτό υπολογίζεται μέσω παραγώγισης της (4.27) ως προς z , δηλαδή

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{J}_n(k_x, k_y, z)}{eD_n} &= \frac{d\tilde{n}(k_x, k_y, z)}{dz} = R_1(B(k_x, k_y)e^{R_1 z} - A(k_x, k_y)e^{-R_1 z}) \\ &+ \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\Delta\tilde{G}_i(z)}{D_n(R_1^2 - \alpha_{ieff}^2)} \end{aligned} \quad (4.30)$$

όπου ο παράγοντας $\Delta\tilde{G}_i(z)$ ορίζεται μέσω της (4.22). Από την προηγούμενη σχέση και αντικαθιστώντας τις σταθερές A, B μέσω των σχέσεων (4.28), (4.29) λαμβάνεται το ρεύμα φορέων μειονότητας στη μπροστινή και πίσω επιφάνεια

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{J}_n(k_x, k_y, 0)}{eD_n} &= R_1 \frac{2\tilde{n}(k_x, k_y, w) - \tilde{n}(k_x, k_y, 0)(e^{R_1 w} + e^{-R_1 w}) + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\tilde{G}_i(0)(e^{R_1 w} + e^{-R_1 w}) - 2\tilde{G}_i(w)}{D_n(R_1^2 - \alpha_{ieff}^2)}}{e^{R_1 w} - e^{-R_1 w}} \\ &+ \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\Delta\tilde{G}_i(0)}{D_n(R_1^2 - \alpha_{ieff}^2)} \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{J}_n(k_x, k_y, w)}{eD_n} &= R_1 \frac{\tilde{n}(k_x, k_y, w)(e^{R_1 w} + e^{-R_1 w}) - 2\tilde{n}(k_x, k_y, 0) + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{2\tilde{G}_i(0) - (e^{R_1 w} + e^{-R_1 w})\tilde{G}_i(w)}{D_n(R_1^2 - \alpha_{ieff}^2)}}{e^{R_1 w} - e^{-R_1 w}} \\ &+ \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\Delta\tilde{G}_i(w)}{D_n(R_1^2 - \alpha_{ieff}^2)} \end{aligned} \quad (4.32)$$

$\Delta\tilde{G}_i(0)$, $\Delta\tilde{G}_i(w)$ ορίζονται μέσω των (4.23) και (4.24). Με τη βοήθεια των (4.31), (4.32) μπορούν να υπολογιστούν τα ρεύματα μειονότητας στις 2 επιφάνειες έχοντας γνωστές τις επιφανειακές κατανομές φορέων μειονότητας. Αντίστροφα, γνωρίζοντας τα ρεύματα μειονότητας, οι επιφανειακές κατανομές μπορούν να βρεθούν λύνοντας το αλγεβρικό σύστημα των (4.31), (4.32) ως προς αυτές, δηλαδή από τις ακόλουθες σχέσεις

$$\tilde{n}(k_x, k_y, 0) = \frac{-\tilde{J}_n(k_x, k_y, 0) + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\Delta \tilde{G}_i(0)}{D_n(R_1^2 - \alpha_{ieff}^2)}}{R_1} \coth(R_1 w) + \quad (4.33)$$

$$\frac{\tilde{J}_n(k_x, k_y, w) - \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\Delta \tilde{G}_i(w)}{D_n(R_1^2 - \alpha_{ieff}^2)}}{R_1} \frac{1}{\sinh(R_1 w)} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\tilde{G}_i(0)}{D_n(R_1^2 - \alpha_{ieff}^2)}$$

$$\tilde{n}(k_x, k_y, w) = \frac{-\tilde{J}_n(k_x, k_y, 0) + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\Delta \tilde{G}_i(0)}{D_n(R_1^2 - \alpha_{ieff}^2)}}{R_1} \frac{1}{\sinh(R_1 w)} + \quad (4.34)$$

$$\frac{\tilde{J}_n(k_x, k_y, w) - \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\Delta \tilde{G}_i(w)}{D_n(R_1^2 - \alpha_{ieff}^2)}}{R_1} \coth(R_1 w) + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\tilde{G}_i(w)}{D_n(R_1^2 - \alpha_{ieff}^2)}$$

Συνεπώς από τις (4.33), (4.34) μπορούν να βρεθούν οι νέες κατανομές φορέων μειονότητας. Η τελική λύση της εξίσωσης διάχυσης βασίζεται στην εφαρμογή των σχέσεων (4.31)-(4.34) και στις διαδοχικές μεταβάσεις από το πεδίο Fourier και αντίστροφα μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση, όπου η τελική λύση ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες. Η διαδικασία αυτή θα αναλυθεί λεπτομερώς παρακάτω.

4.3.3 Διαδικασία επίλυσης της εξίσωσης δυναμικού φορέων πλειονότητας

Με αντίστοιχο τρόπο όπως στην ενότητα 4.3.2, εφαρμόζουμε διδιάστατο μετασχηματισμό Fourier στη διαφορική εξίσωση (4.5) και χρησιμοποιώντας τη γενική λύση της εξίσωσης διάχυσης, δηλαδή την (4.27), προκύπτει

$$\frac{d^2 \tilde{V}(k_x, k_y, z)}{dz^2} = R^2 \tilde{V}(k_x, k_y, z) + \quad (4.35)$$

$$\frac{D_n - D_p}{\mu_p N_A} \left(\frac{A(k_x, k_y) e^{-R_1 z} + B(k_x, k_y) e^{R_1 z}}{L_n^2} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\tilde{G}_i(z)}{D_n} \left(\frac{1}{L_n^2 (R_1^2 - \alpha_{ieff}^2)} - 1 \right) \right)$$

όπου $R = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$. Αυτή η συνήθης διαφορική εξίσωση έχει την ακόλουθη γενική λύση για $R \neq 0$

$$\tilde{V}(k_x, k_y, z) = A_1(k_x, k_y) e^{-Rz} + B(k_x, k_y) e^{Rz} + \quad (4.36)$$

$$\frac{D_n - D_p}{\mu_p N_A} \left(\frac{c_1 A(k_x, k_y) e^{-R_1 z} + c_2 B(k_x, k_y) e^{R_1 z}}{L_n^2} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{c_3 \tilde{G}_i(z)}{D_n} \left(\frac{1}{L_n^2 (R_1^2 - \alpha_{ieff}^2)} - 1 \right) \right)$$

Κεφάλαιο 4

όπου οι σταθερές c_1, c_2, c_3 υπολογίζονται παραγωγίζοντας 2 φορές ως προς z την (4.36) και εξισώνοντας το αποτέλεσμα με το δεξί μέρος της (4.35). Ύστερα από πράξεις, λαμβάνεται η τελική μορφή της γενικής λύσης με τις σταθερές A_1 και B_1

$$\tilde{V}(k_x, k_y, z) = A_1(k_x, k_y)e^{-Rz} + B_1(k_x, k_y)e^{Rz} + \frac{D_p - D_n}{\mu_p N_A} \tilde{n}(k_x, k_y, z) \quad (4.37)$$

Στη συνέχεια, εκφράζουμε τις σταθερές A_1 και B_1 συναρτήσει των επιφανειακών δυναμικών, όπως στην προηγούμενη ενότητα

$$A_1(k_x, k_y) = \frac{\tilde{V}(k_x, k_y, 0)e^{Rw} - \tilde{V}(k_x, k_y, w) + k_1(\tilde{n}(k_x, k_y, 0)e^{Rw} - \tilde{n}(k_x, k_y, w))}{e^{Rw} - e^{-Rw}} \quad (4.38)$$

$$B_1(k_x, k_y) = \frac{\tilde{V}(k_x, k_y, w) - \tilde{V}(k_x, k_y, 0)e^{-Rw} + k_1(\tilde{n}(k_x, k_y, w) - \tilde{n}(k_x, k_y, 0)e^{-Rw})}{e^{Rw} - e^{-Rw}} \quad (4.39)$$

όπου $k_1 = \frac{D_n - D_p}{\mu_p N_A}$. Από την (4.37) μπορούμε να υπολογίσουμε το ηλεκτρικό πεδίο

παραγωγίζοντας ως προς z

$$\begin{aligned} \tilde{E}(k_x, k_y, z) &= -\frac{d\tilde{V}(k_x, k_y, z)}{dz} = R(A_1(k_x, k_y)e^{-Rz} - B_1(k_x, k_y)e^{Rz}) + k_1 \frac{d\tilde{n}(k_x, k_y, z)}{dz} \\ &= R(A_1(k_x, k_y)e^{-Rz} - B_1(k_x, k_y)e^{Rz}) + k_1 \frac{\tilde{J}_n(k_x, k_y, z)}{eD_n} \end{aligned} \quad (4.40)$$

Συνεπώς, αντικαθιστώντας στην (4.40) τις εκφράσεις (4.38), (4.39) προκύπτουν οι εκφράσεις για το πεδίο στις 2 επιφάνειες

$$\begin{aligned} \tilde{E}(k_x, k_y, 0) &= R \left((\tilde{V}(k_x, k_y, 0) + k_1 \tilde{n}(k_x, k_y, 0)) \coth(Rw) - \frac{\tilde{V}(k_x, k_y, w) + k_1 \tilde{n}(k_x, k_y, w)}{\sinh(Rw)} \right) + \\ & k_1 \frac{\tilde{J}_n(k_x, k_y, 0)}{eD_n} \end{aligned} \quad (4.41)$$

Κεφάλαιο 4

$$\tilde{E}(k_x, k_y, w) = R \left(\frac{\tilde{V}(k_x, k_y, 0) + k_1 \tilde{n}(k_x, k_y, 0)}{\sinh(Rw)} - (\tilde{V}(k_x, k_y, w) + k_1 \tilde{n}(k_x, k_y, w)) \coth(Rw) \right) + k_1 \frac{\tilde{J}_n(k_x, k_y, w)}{eD_n} \quad (4.42)$$

Από το αλγεβρικό σύστημα των (4.41), (4.42) μπορούμε να υπολογίσουμε το δυναμικό στις 2 επιφάνειες συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου μέσω των ακόλουθων σχέσεων

$$\begin{aligned} \tilde{V}(k_x, k_y, 0) &= \frac{\tilde{E}(k_x, k_y, 0) - k_1 \frac{\tilde{J}_n(k_x, k_y, 0)}{eD_n}}{R} \coth(Rw) - \\ &\frac{\tilde{E}(k_x, k_y, w) - k_1 \frac{\tilde{J}_n(k_x, k_y, w)}{eD_n}}{R} \frac{1}{\sinh(Rw)} - k_1 \tilde{n}(k_x, k_y, 0) \end{aligned} \quad (4.43)$$

$$\tilde{V}(k_x, k_y, w) = \frac{\tilde{E}(k_x, k_y, 0) - k_1 \frac{\tilde{J}_n(k_x, k_y, 0)}{eD_n}}{R} \frac{1}{\sinh(Rw)} - \quad (4.44)$$

$$\frac{\tilde{E}(k_x, k_y, w) - k_1 \frac{\tilde{J}_n(k_x, k_y, w)}{eD_n}}{R} \coth(Rw) - k_1 \tilde{n}(k_x, k_y, w)$$

Σε αντιστοιχία με πριν, η τελική λύση της εξίσωσης δυναμικού φορέων πλειονότητας βασίζεται στην εφαρμογή των σχέσεων (4.41)-(4.45) και στις διαδοχικές μεταβάσεις από το πεδίο Fourier και αντίστροφα μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση, όπου η τελική λύση ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες.

Στην περίπτωση όπου $R=0$, οι εκφράσεις (4.41)-(4.45), δεν ισχύουν. Τότε, η γενική λύση παίρνει την απλή μορφή

$$\tilde{V}(0,0,z) = A_1(0,0)z + B_1(0,0) - k_1 \tilde{n}(0,0,z) \quad (4.45)$$

Από την (4.46) προκύπτουν με όμοιο τρόπο οι σταθερές A_1 , B_1 συναρτήσει του δυναμικού στις 2 επιφάνειες, και το ηλεκτρικό πεδίο στις 2 επιφάνειες συναρτήσει του δυναμικού είναι

$$\tilde{E}(0,0,0) = \frac{\tilde{V}(0,0,0) - \tilde{V}(0,0,w) + k_1 (\tilde{n}(0,0,0) - \tilde{n}(0,0,w))}{w} + k_1 \frac{\tilde{J}_n(0,0,0)}{eD_n} \quad (4.46)$$

$$\tilde{E}(0,0,w) = \frac{\tilde{V}(0,0,0) - \tilde{V}(0,0,w) + k_l(\tilde{n}(0,0,0) - \tilde{n}(0,0,w))}{w} + k_l \frac{\tilde{J}_n(0,0,w)}{eD_n} \quad (4.47)$$

Με την βοήθεια των (4.47), (4.48) μπορούν να βρεθούν και τα επιφανειακά δυναμικά συναρτήσει των αντίστοιχων ηλεκτρικών πεδίων. Στην επόμενη ενότητα θα περιγραφεί αναλυτικά ο αλγόριθμος επίλυσης για το σύνολο των εξισώσεων μεταφοράς όπου θα φανεί η χρήση των σχέσεων που αναπτύχθηκαν σε αυτή και την προηγούμενη ενότητα.

4.4 Περιγραφή αλγορίθμου επίλυσης εξισώσεων μεταφοράς

Στις προηγούμενες ενότητες μελετήθηκε διεξοδικά το μαθηματικό πρόβλημα επίλυσης των εξισώσεων μεταφοράς. Σε αυτή την ενότητα θα δοθούν ξεχωριστά ο τρόπος επίλυσης της εξίσωσης διάχυσης και του δυναμικού φορέων πλειονότητας και στη συνέχεια θα περιγραφεί η λύση του συνολικού προβλήματος.

4.4.1 Αλγόριθμος επίλυσης της εξίσωσης διάχυσης φορέων μειονότητας

Η διαδικασία αριθμητικής επίλυσης της εξίσωσης διάχυσης φορέων μειονότητας υλοποιείται μέσω των ακόλουθων βημάτων

1. Εκκίνηση του προγράμματος με αρχική εκτίμηση των επιφανειακών κατανομών φορέων μειονότητας $n(x,y,0), n(x,y,w)$, στις οποίες ικανοποιείται η οριακή συνθήκη (4.6) για τη δομή μονής ένωσης ή οι (4.13), (4.15) για την διάταξη διπλής ένωσης αντίστοιχα. Επίσης θεωρούμε ότι το δυναμικό φορέων πλειονότητας είναι μηδενικό.
2. Εφαρμογή γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) στις επιφανειακές κατανομές $n(x,y,0), n(x,y,w)$, οπότε προκύπτουν οι αντίστοιχες μετασχηματισμένες στο πεδίο Fourier $\tilde{n}(k_x, k_y, 0), \tilde{n}(k_x, k_y, w)$.
3. Μέσω των (4.31), (4.32) προκύπτουν τα επιφανειακά ρεύματα φορέων μειονότητας μετ/να στο πεδίο Fourier βάσει των επιφανειακών κατανομών, δηλ. ισχύει $\tilde{J}_n(k_x, k_y, 0), \tilde{J}_n(k_x, k_y, w) = f(\tilde{n}(k_x, k_y, 0), \tilde{n}(k_x, k_y, w))$.

4. Εφαρμογή αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier (IFFT) στα μετασχηματισμένα ρεύματα φορέων μειονότητας για να προκύψουν τα αντίστοιχα στον πραγματικό χώρο $J_n(x, y, 0), J_n(x, y, w)$.
5. Χρήση της οριακής συνθήκης (4.7) για την διάταξη μονής ένωσης ή της (4.14) για την διάταξη διπλής ένωσης, οι οποίες αφορούν τα ρεύματα φορέων μειονότητας.
6. Εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier στα ρεύματα φορέων μειονότητας, οπότε προκύπτουν τα $\tilde{J}_n(k_x, k_y, 0), \tilde{J}_n(k_x, k_y, w)$.
7. Από τις (4.33), (4.34) υπολογίζουμε τις επιφανειακές συγκεντρώσεις συναρτήσεων των ρευμάτων στο χώρο Fourier.
8. Χρήση αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier στις $\tilde{n}(k_x, k_y, 0), \tilde{n}(k_x, k_y, w)$, οπότε προκύπτουν οι $n(x, y, 0), n(x, y, w)$.
9. Εφαρμογή οριακής συνθήκης (4.6) για τη δομή μονής ένωσης ή τις αντίστοιχες (4.13), (4.15) για την διάταξη διπλής ένωσης που αφορούν τις επιφανειακές συγκεντρώσεις.
10. Μείξη παλιάς και καινούργιας λύσης με καθορισμένο ποσοστό F, δηλαδή $n(x, y, 0) = Fn_{old}(x, y, 0) + (1 - F)n_{new}(x, y, 0)$ και $n(x, y, w) = Fn_{old}(x, y, w) + (1 - F)n_{new}(x, y, w)$. Αν η νέα λύση ικανοποιεί το κριτήριο σύγκλισης, η λύση είναι αποδεκτή, αλλιώς επιστρέφουμε στο βήμα 2.

Το ποσοστό μείξης της παλιάς και καινούργιας λύσης καθορίζει και την ταχύτητα σύγκλισης, δηλαδή όσο πιο μικρό είναι τόσο πιο γρήγορα επιτυγχάνεται η επιθυμητή λύση, αλλά αν ελαττωθεί πολύ, προφανώς το αριθμητικό αποτέλεσμα αποκλίνει.

4.4.2 Αλγόριθμος υπολογισμού του δυναμικού φορέων πλειονότητας

Η διαδικασία υπολογισμού του δυναμικού φορέων πλειονότητας είναι αντίστοιχη με την επίλυση της εξίσωσης διάχυσης και περιγράφεται αναλυτικά ως εξής:

1. Έναρξη του αλγορίθμου μέσω αρχικών υποθέσεων για το δυναμικό στις 2 επιφάνειες $(V_{drop}(x, y, 0), V_{drop}(x, y, w))$. Συγκεκριμένα, αυτό θεωρείται μηδενικό, διότι έτσι είχε θεωρηθεί στην αρχική επίλυση της εξίσωσης διάχυσης. Αυτή η θεώρηση ικανοποιεί και την οριακή συνθήκη (4.11) για το δυναμικό στην πίσω σημειακή επαφή.
2. Εφαρμογή FFT στα δυναμικά $V_{drop}(x, y, 0), V_{drop}(x, y, w)$, οπότε προκύπτουν τα αντίστοιχα μετασχηματισμένα στο πεδίο Fourier $\tilde{V}(k_x, k_y, 0), \tilde{V}(k_x, k_y, w)$.
3. Μέσω των (4.41), (4.42) και (4.47), (4.48) προκύπτει το ηλεκτρικό πεδίο στις 2 επιφάνειες στο πεδίο Fourier $\tilde{E}(k_x, k_y, 0), \tilde{E}(k_x, k_y, w)$ συναρτήσει των αντίστοιχων επιφανειακών δυναμικών. Οι εκφράσεις αυτές εξαρτώνται επίσης από τα ρεύματα και τις επιφανειακές συγκεντρώσεις φορέων μειονότητας που έχουν ήδη υπολογιστεί από την εξίσωση διάχυσης.
4. Εφαρμογή IFFT στα μετασχηματισμένα ηλεκτρικά πεδία στις 2 επιφάνειες για να εξαχθούν τα αντίστοιχα στον πραγματικό χώρο, δηλαδή τα $E(x, y, 0), E(x, y, w)$.
5. Χρήση των οριακών συνθηκών (4.9), (4.10) για την διάταξη μονής ένωσης ή των (4.16), (4.17) για την διάταξη διπλής ένωσης, οι οποίες με την βοήθεια της (4.12) ορίζουν τις συνθήκες για το πεδίο. Σε αυτή την περίπτωση απαιτούνται πάλι οι κατανομές των ήδη υπολογισμένων ρευμάτων μειονότητας.
6. Εφαρμογή FFT για το ηλεκτρικό πεδίο στις 2 επιφάνειες, για να προκύψουν οι μετασχηματισμένες κατανομές $\tilde{E}(k_x, k_y, 0), \tilde{E}(k_x, k_y, w)$.
7. Από τις (4.43), (4.44) υπολογίζουμε τα επιφανειακά δυναμικά στο χώρο Fourier $\tilde{V}(k_x, k_y, 0), \tilde{V}(k_x, k_y, w)$ συναρτήσει των αντίστοιχων ηλεκτρικών πεδίων. Στις εκφράσεις αυτές απαιτούνται οι κατανομές των ρευμάτων και των επιφανειακών συγκεντρώσεων φορέων μειονότητας όπως έχουν ήδη υπολογιστεί από την εξίσωση διάχυσης.

Κεφάλαιο 4

8. Χρήση IFFT στα $\tilde{V}(k_x, k_y, 0), \tilde{V}(k_x, k_y, w)$, για να προκύψουν τα δυναμικά στον πραγματικό χώρο.

9. Εφαρμογή οριακής συνθήκης (4.11) για το δυναμικό στην πίσω σημειακή επαφή, η οποία είναι κοινή για τις 2 διατάξεις.

10. Μείξη παλιάς και καινούργιας λύσης με καθορισμένο ποσοστό F_1 , δηλαδή

$$V_{drop}(x, y, 0) = F_1 V_{drop}^{old}(x, y, 0) + (1 - F_1) V_{drop}^{new}(x, y, 0)$$

$V_{drop}(x, y, w) = F_1 V_{drop}^{old}(x, y, w) + (1 - F_1) V_{drop}^{new}(x, y, w)$. Αν η νέα λύση ικανοποιεί το κριτήριο σύγκλισης, η λύση είναι αποδεκτή, αλλιώς επιστρέφουμε στο βήμα 2.

Με την ολοκλήρωση των βημάτων αυτών ολοκληρώνεται η επίλυση των 2 εξισώσεων. Στην επόμενη ενότητα θα δοθεί ο τρόπος επίλυσης του συνολικού συζευγμένου προβλήματος.

4.4.3 Επίλυση του συνολικού προβλήματος

Οι ξεχωριστές λύσεις των 2 εξισώσεων, όπως περιγράφηκαν στις ενότητες (4.4.2) και (4.4.3) δεν εξασφαλίζουν αναγκαστικά αυτοσυνέπεια για το συνολικό πρόβλημα, καθώς οι οριακές συνθήκες που αφορούν την εξίσωση διάχυσης εξαρτώνται από το δυναμικό και αντίστροφα, ενώ αυτή η εξάρτηση είναι **μη γραμμική**. Συνεπώς, πρέπει να εφαρμοστεί η ακόλουθη διαδικασία έτσι ώστε να επιτευχθεί η τελική λύση του συζευγμένου προβλήματος

A) Επίλυση της εξίσωσης συνέχειας φορέων μειονότητας μέσω των βημάτων της ενότητας (4.4.2) θεωρώντας αρχικά μηδενικό δυναμικό φορέων πλειονότητας.

B) Υπολογισμός του δυναμικού φορέων πλειονότητας κάνοντας χρήση των αποτελεσμάτων για τις επιφανειακές κατανομές ρευμάτων και φορέων μειονότητας από το βήμα A.

Γ) Νέα επίλυση της εξίσωσης διάχυσης λαμβάνοντας υπ' όψιν στις οριακές συνθήκες το δυναμικό φορέων πλειονότητας που υπολογίστηκε στο B).

Κεφάλαιο 4

Δ) Σύγκριση των διαφορετικών λύσεων για την εξίσωση διάχυσης βάσει κριτηρίου. Αν τα αποτελέσματα των δύο λύσεων δεν διαφέρουν (ικανοποιούν το κριτήριο), τότε η λύση είναι αυτοσυνεπής και σταματά ο αλγόριθμος. Στην αντίθετη περίπτωση, επιστρέφουμε στο βήμα Β) για νέο υπολογισμό του δυναμικού και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί αυτοσυνέπεια.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Switzeland ISE Integrated Systems Engineering AG, *ISE TCAD Dessis version 6*, Zurich, www.synopsys.com/products/tcad.
- [2] Toyabe T., Masuda H., Aoki Y., Shukuri H. και Hagiwara T., *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, Τόμος 4, 1985, σελ. 482.
- [3] Ohtsuka H., Uematsu T. και Warabisako T., *Sol. Energy Mat. & Sol. Cells*, Τόμος 44, 1996, σελ. 79.
- [4] SILVACO, *ATLAS Device Simulation Framework*, www.silvaco.com.
- [5] Aberle A. G., Wenham S. R., Green M. A. και Heiser G., *Progr. In Photovoltaics: Res. Appl.*, Τόμος 2, 1994, σελ. 3.
- [6] Pomerell C. και Fichtner W., *Siam. J. Sci. Stat Comput.*, 1994.
- [7] Heiser G., Pomerell C., Weis J. και Fichtner W., *IEEE Trans. Computer-Aided Design*, Τόμος 10, 1991, σελ. 1218.
- [8] Liegmann A. και Fichtner W., Technical Report 92/17, Integrated Systems Lab, Zurich, Switzerland, 1992.
- [9] Westermann M., *Picasso 2.1 User's Guide*, Integrated Systems Lab, Zurich, Switzerland, 1992.
- [10] Heiser G. και Aberle A. G., *5th IEEE Workshop on Numerical Modelling of Processes and Devices for Integrated Circuits (NUPAD V)*, Hawaii, USA, 1994, σελ. 177.
- [11] Clugston D. A. και Basore P. A., *26th IEEE PV Spec. Conf.*, Anaheim, USA, 1997, σελ. 207.
- [12] Misiakos K., Tsoi E. και Neugroschel A., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 72, 1992, σελ. 1894.
- [13] Kavadias S. και Misiakos K., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 40, 1993, σελ. 1875.
- [14] Kavadias S., Misiakos K. και Loukas D., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Τόμος 41, 1994, σελ. 397.
- [15] Kavadias S. και Misiakos K., *Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. A*, Τόμος 395, 1997, σελ. 355.
- [16] Καββαδίας Σ., *Διδακτορική Διατριβή*, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Φυσικής, Τομέας Φυσικής Στερεάς Κατάστασης, 1998.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΕΠΑΦΗΣ ΜΙΑΣ ΕΝΩΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή-Ανασκόπηση των υπάρχοντων μοντέλων

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφηκαν οι πιο διαδεδομένοι τύποι φ/β στοιχείων πυριτίου. Από τις δομές που παρουσιάστηκαν, εκείνη η οποία παρουσίασε την υψηλότερη απόδοση (24.7%) ήταν η διάταξη PERL (Passivated Emitter and Rear Locally Diffused) [1], αφού όπως αναλύθηκε, η σχεδιάσή της έχει ως βασικό κριτήριο την ελαχιστοποίηση των απωλειών, με αντιστάθμισμα την πολύπλοκη κατασκευή.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που παρουσιάστηκαν στη δομή PERL και κυρίως στις πρώτες σχεδιάσεις, ήταν ο σχετικά χαμηλός παράγοντας πλήρωσης (FF) που ήταν περίπου 81% για υπόστρωμα μονοκρυσταλλικού πυριτίου 1Ω.cm [2]. Αυτή η τιμή οφειλόταν εν μέρει σε ωμικές απώλειες στον εκπομπό και στο μπροστινό μέταλλο αλλά και κατά ένα μεγάλο μέρος στην αντίσταση σειράς της βάσης του στοιχείου που οφείλεται σε περίπλοκα φαινόμενα μεταφοράς φορέων λόγω της ύπαρξης των σημειακών πίσω επαφών. Συνεπώς, η απόδοση της διάταξης εξαρτάται από τη γεωμετρία της πίσω επιφάνειας, δηλαδή το μέγεθος και την απόσταση των πίσω επαφών. Σε αυτή την περίπτωση η ανάπτυξη θεωρητικών μοντέλων προσομοίωσης σε υπολογιστή της συγκεκριμένης διάταξης είναι ένα χρήσιμο εργαλείο που βοηθά στην κατανόηση των τρισδιάστατων φαινομένων μεταφοράς αλλά και στη βελτιστοποίηση της σχεδιάσής της.

Λεπτομερείς προσομοιώσεις των δομών PERC και PERL σε 2 διαστάσεις με χρήση του πακέτου προσομοίωσης DESSIS (πρώην SIMUL) [3] έχουν γίνει από τους Aberle et al. [4] με σκοπό τη βελτιστοποίηση των διατάξεων όσον αφορά την πίσω γεωμετρία (για δεδομένο ποσοστό κάλυψης της πίσω επιφάνειας από τις σημειακές επαφές) και ακολούθησε παρόμοια μελέτη για τη δομή PERL [5] με σκοπό τον προσδιορισμό και την επίδραση των επιμέρους παραγόντων που μειώνουν την απόδοση των διατάξεων PERL, δίνοντας σημαντική έμφαση στις απώλειες λόγω επανασυνδέσεων και τις ωμικές. Τα μοντέλα που χρησιμοποιήσαν επιλύουν το πλήρες σύστημα των διαφορικών εξισώσεων μεταφοράς και υπολογίζεται η καμπύλη τάσεως ρεύματος (IV) του στοιχείου. Οι παράμετροι των προσομοιώσεων σε αυτές τις εργασίες ήταν προσαρμοσμένες στα πειραματικά δεδομένα των διατάξεων PERL του UNSW.

Επιπλέον οι Aberle et al. [6] προχώρησαν και σε αντίστοιχες δισδιάστατες προσομοιώσεις των ωμικών απωλειών που οφείλονται στον εκπομπό και στο μπροστινό μέταλλο.

Αντίστοιχες προσομοιώσεις σε 3 διαστάσεις για δομή παρόμοια με το PERL, το φ/β LBSF (Local Back Surface Field) και για το PERC έγιναν από τους Sterk et al. [7] χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Στη συγκεκριμένη εργασία ο εκπομπός του στοιχείου θεωρήθηκε ιδανικός. Προκειμένου να απλοποιηθούν οι πράξεις, δεν έγινε υπολογισμός της καμπύλης IV του στοιχείου ενώ θεωρήθηκε μέγιστος παράγοντας πλήρωσης 80% για τις προσομοιούμενες διατάξεις λόγω της αντίστασης σειράς του εκπομπού και των μπροστινών ηλεκτροδίων και για μηδενικές ωμικές απώλειες στη βάση. Η αντίσταση σειράς της βάσης προέκυψε με υπολογισμό του ρεύματος των φορέων πλειονότητας γύρω από το σημείο όπου αποδίδεται η μέγιστη ισχύς. Οι Zhao et al. [8] υπολόγισαν την αντίσταση σειράς στη βάση του φ/β στοιχείου PERL με χρήση τρισδιάστατων προσομοιώσεων και μελέτησαν την μεταβολή της συναρτήσεως της απόστασης των πίσω επαφών για δεδομένο ποσοστό κάλυψης της πίσω επιφάνειας από αυτές (1%) και συνέκριναν τα αποτελέσματά τους με συγκεκριμένες αναλυτικές εκφράσεις για την αντίσταση σειράς. Επίσης, οι Heiser et al. [9] προχώρησαν σε τρισδιάστατες προσομοιώσεις της δομής PERL με χρήση των πακέτων προσομοίωσης της ISE με σκοπό την εύρεση της βέλτιστης απόστασης των πίσω επαφών για 1% ποσοστό κάλυψης της πίσω επιφάνειας από αυτές, και συνέκριναν τα αποτελέσματά τους με αντίστοιχες δισδιάστατες εξομοιώσεις. Οι Schöfthaler et al. [10] βελτιστοποίησαν την διάταξη PERC χρησιμοποιώντας ως βασικές παραμέτρους την απόσταση των πίσω επαφών και το ποσοστό κάλυψης της πίσω επιφάνειας από αυτές χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο ημιαναλυτικό μοντέλο βασιζόμενο στην επίλυση της εξίσωσης διάχυσης για τους φορείς μειονότητας με χρήση μετασχηματισμού Fourier, ενώ η αντίσταση σειράς στη βάση υπολογίστηκε με χρήση αναλυτικών εκφράσεων. Λίγο αργότερα, ο Rau [11] επέκτεινε το ίδιο μοντέλο υπολογίζοντας επιπλέον το δυναμικό των φορέων πλειονότητας για να βελτιστοποιήσει τις διατάξεις PERC και PERL, χρησιμοποιώντας μαθηματικό μοντέλο παρόμοιο με αυτό που ακολουθείται στη διατριβή και περιγράφηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ο βασικός στόχος των προσομοιώσεων στην εργασία του ήταν η μεγιστοποίηση της απόδοσης των δομών αυτών συναρτήσεως της απόστασης των πίσω επαφών για 1% ποσοστό κάλυψης της πίσω επιφάνειας από αυτές και για διαφορετικά πάχη της διάταξης. Τέλος, πρόσφατα οι Catchpole et al. [12-13] μοντελοποίησαν τη

δομή PERC σε 2 και σε 3 διαστάσεις (στο τρισδιάστατο μοντέλο υπέθεσαν κυλινδρική συμμετρία χρησιμοποιώντας εξαγωνικό πρίσμα ως στοιχειώδη κυψελίδα όπου οι πίσω επαφές έχουν μορφή εξαγώνου) και η επίλυση των εξισώσεων έγινε μέσω του λογισμικού πακέτου DESSIS [3]. Η βελτιστοποίηση των διατάξεων έγινε για υλικά διαφορετικής ποιότητας συμπεριλαμβανομένου και του πολυκρυσταλλικού πυριτίου που έχει χαμηλό κόστος. Επιπρόσθετα, υπολόγισαν την αντίσταση σειράς που οφείλεται στις πίσω επαφές για το τρισδιάστατο μοντέλο (θεωρώντας τη στοιχειώδη κυψελίδα ως κύλινδρο) για διαφορετικές αποστάσεις των επαφών και ποσοστά κάλυψης της πίσω επιφάνειας από αυτές με χρήση του πακέτου επίλυσης διαφορικών εξισώσεων Fastflo[14]. Επιπλέον, συνέκριναν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με αντίστοιχες αναλυτικές εκφράσεις όπως στην εργασία των Zhao et al. [8].

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν διεξοδικά αποτελέσματα προσομοιώσεων βασισμένα στο μοντέλο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4 με σκοπό την προσομοίωση και βελτιστοποίηση των φ/β στοιχείων μονής ένωσης με βάση σημειακής επαφής. Η δομή των στοιχείων της προσομοίωσης είναι παρόμοια με τη διάταξη PERL.

5.2 Παράμετροι προσομοίωσης της δομής μονής ένωσης

Η προσομοίωση της δομής 1 ένωσης βασίζεται στον αλγόριθμο που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο οποίος έχει υλοποιηθεί σε πρόγραμμα H/Y χρησιμοποιώντας κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, ενώ οι απαιτούμενοι δισδιάστατοι μετασχηματισμοί Fourier (FFT) και οι αντίστροφοί τους υπολογίζονται με τη βοήθεια των ρουτινών που αναλύονται στο βιβλίο των Press et al. [15]. Ο σκοπός του προγράμματος είναι ο υπολογισμός της χαρακτηριστικής τάσεως-ρεύματος (IV) του στοιχείου, μέσω της επίλυσης των εξισώσεων μεταφοράς φορέων μειονότητας και πλειονότητας. Μέσω αυτής μπορεί να ληφθεί η τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}), το ρεύμα βραχυκυκλώματος (J_{sc}) και η απόδοση του στοιχείου. Για περισσότερη ακρίβεια, στον υπολογισμό της χαρακτηριστικής λαμβάνονται περισσότερα σημεία στην περιοχή γύρω από το σημείο απόδοσης της μέγιστης ισχύος, όπως και στο αντίστοιχο που ορίζει την τάση ανοιχτού κυκλώματος. Επίσης, για τον ίδιο λόγο, το πλέγμα στις διαστάσεις x,y των προσομοιώσεων είναι 512×512 σημείων, εκτός των περιπτώσεων όπου αναφέρεται ξεχωριστά.

Η βασική γεωμετρία της στοιχειώδους κυψελίδας της διάταξης που περιγράφουμε φαίνεται στην εικόνα (4.1α) του προηγούμενου κεφαλαίου και σε τομή

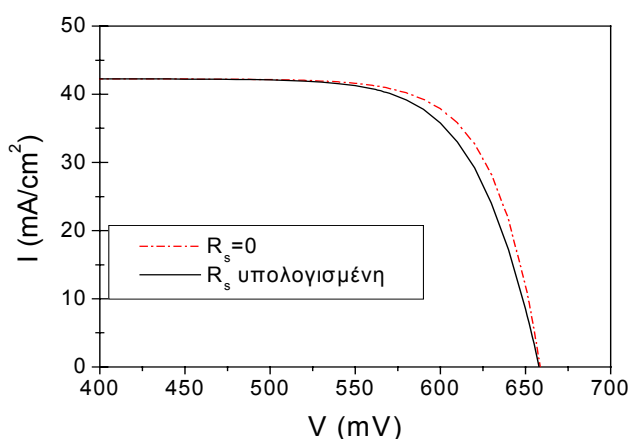
στο (4.1β). Η περίοδος (πεδίο) της επαναλαμβανόμενης κυψελίδας όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1α είναι l (που είναι η απόσταση των πίσω επαφών) και οι σημειακές πίσω επαφές θεωρούνται τετράγωνα με πλευρά μήκους d . Τα χαρακτηριστικά των διατάξεων που περιγράφονται παρακάτω είναι για την ενεργό περιοχή (βάση) πάχος $w=400\mu\text{m}$, μήκος διάχυσης $L_n=800\mu\text{m}$ και νόθευση $N_A=10^{16}\text{ cm}^{-3}$, ενώ εξετάζεται και η περίπτωση χαμηλής νόθευσης $N_A=10^{15}\text{ cm}^{-3}$. Η πίσω επιφάνεια θεωρείται αντανακλαστική με συντελεστή ανάκλασης 95%. Η ταχύτητα ανασύνδεσης στην πίσω επιφάνεια που καλύπτεται από οξείδιο (S_3) θεωρείται πολύ χαμηλή ή μηδενική, ενώ στις επαφές διάχυσης υπολογίζεται βάσει της σχέσης (4.8) που δόθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, όπου θεωρούμε ρεύμα ανασύνδεσης στην πίσω επαφή 10^{-12} A/cm^2 . Οι κινητικότητες των φορέων μειονότητας και πλειονότητας λαμβάνονται από το μοντέλο του Klaassen [16], ενώ η προσπίπτουσα ακτινοβολία θεωρείται ότι ακολουθεί το ηλιακό φάσμα AM1.5 [17] κανονικοποιημένο στην ισχύ των 100mW/cm^2 . Οι υπόλοιπες θεωρήσεις του μοντέλου έχουν ήδη περιγραφεί στην ενότητα 4.2 του προηγούμενου κεφαλαίου.

5.3 Γενική ανάλυση του δυναμικού φορέων πλειονότητας

Πριν προχωρήσουμε στις διεξοδικές προσομοιώσεις που αφορούν την επίδραση των χαρακτηριστικών της πίσω επιφάνειας στη διάταξη, θα δούμε ποιοτικά πως επηρεάζει το δυναμικό των φορέων πλειονότητας την χαρακτηριστική του στοιχείου, ενώ επιπρόσθετα θα εξετάσουμε την επιφανειακή κατανομή ρεύματος φορέων πλειονότητας και δυναμικού γύρω από την περιοχή της πίσω επαφής. Στη συγκεκριμένη διάταξη που θα μελετηθεί, θεωρούμε περίοδο κυψελίδας $400\mu\text{m}$ και πίσω σημειακή επαφή πλευράς $40\mu\text{m}$, δηλαδή το ποσοστό κάλυψης της πίσω επιφάνειας από την επαφή είναι 1%. Επίσης το ρεύμα ανασύνδεσης στον εκπομπό είναι 10^{-13} A/cm^2 , ενώ η ταχύτητα επανασύνδεσης στο οξείδιο της πίσω επιφάνειας θεωρείται μηδενική.

5.3.1 Χαρακτηριστική τάσεως ρεύματος (IV)

Οι καμπύλες του σχήματος (5.1) απεικονίζουν την χαρακτηριστική IV της διάταξης 1 ένωσης, όπως προκύπτουν από την προσομοίωση για τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν πριν.



Σχήμα 5.1. IV χαρακτηριστική (ιδανική και μη ιδανική) φ/β στοιχείου περιόδου $l=400\mu\text{m}$ και σημειακής επαφής με πλευρά μήκους $d=40\mu\text{m}$.

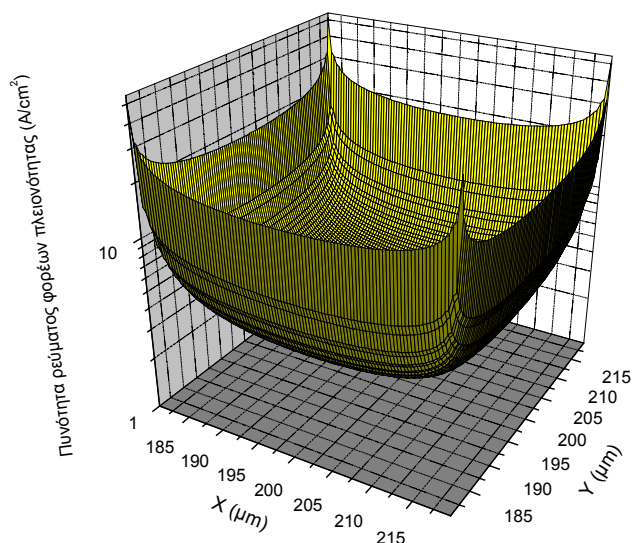
Παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις, η ιδανική, όπου το δυναμικό των φορέων πλειονότητας θεωρείται μηδενικό, και η μη ιδανική όπου λαμβάνεται υπόψιν.

Συγκρίνοντας τις χαρακτηριστικές του σχήματος (5.1), παρατηρούμε ότι η πτώση τάσης που οφείλεται στους φορείς πλειονότητας κοντά στο «γόνατο» της καμπύλης (σημείο όπου αποδίδεται η μέγιστη ισχύς) είναι σημαντική, περιορίζοντας την απόδοση της διάταξης. Αυτή η διαφορά δυναμικού αντιστοιχεί, σε μια αντίσταση σειράς η οποία είναι αρκετά μεγάλη, γεγονός που οφείλεται στο μικρό ποσοστό κάλυψης της πίσω επιφάνειας από την επαφή, όπως θα αναλυθεί στις επόμενες ενότητες.

5.3.2 Ρεύμα - δυναμικό φορέων πλειονότητας

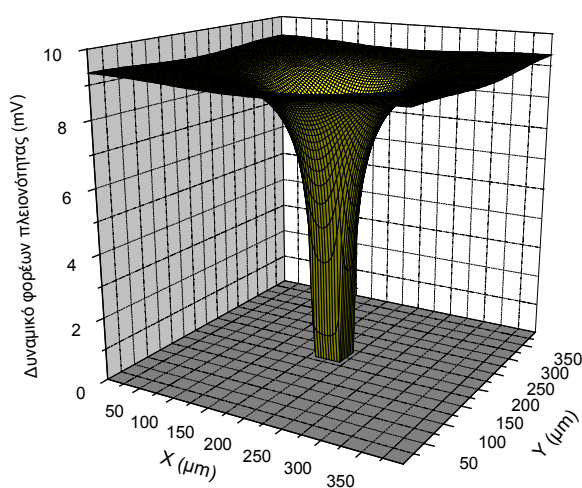
Συνεχίζοντας την ανάλυση της προηγούμενης ενότητας, στο σχήμα (5.2) παρουσιάζεται η κατανομή του ρεύματος φορέων πλειονότητας στην περιοχή της πίσω σημειακής επαφής στο σημείο όπου αποδίδεται η μέγιστη ισχύς του φ/β στοιχείου, ενώ στο σχήμα (5.3) απεικονίζεται αντίστοιχα το δυναμικό φορέων πλειονότητας στην πίσω επιφάνεια. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στην απεικόνιση, έχει ληφθεί πολύ πυκνή διαμέριση 1024×1024 σημείων στο επίπεδο x,y .

Κεφάλαιο 5



Σχήμα 5.2. Πυκνότητα ρεύματος φορέων πλειονότητας μέσα στην πίσω σημειακή επαφή και στο σημείο μέγιστης ισχύος ενός φ/β στοιχείου με περίοδο $d=400\mu\text{m}$ και πίσω επαφή πλευράς μήκους $l=40\mu\text{m}$ (1% της συνολικής επιφάνειας)

Παρατηρούμε ότι στα άκρα της επαφής η πυκνότητα ρεύματος των φορέων πλειονότητας είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από ότι στο κέντρο της. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια απότομη μεταβολή του δυναμικού στην περιοχή γύρω από την επαφή, το οποίο σταθεροποιείται μακριά από αυτήν όπως φαίνεται στο σχήμα (5.3) για να φτάσει στην τιμή των 9mV περίπου στα όρια της στοιχειώδους κυψελίδας.

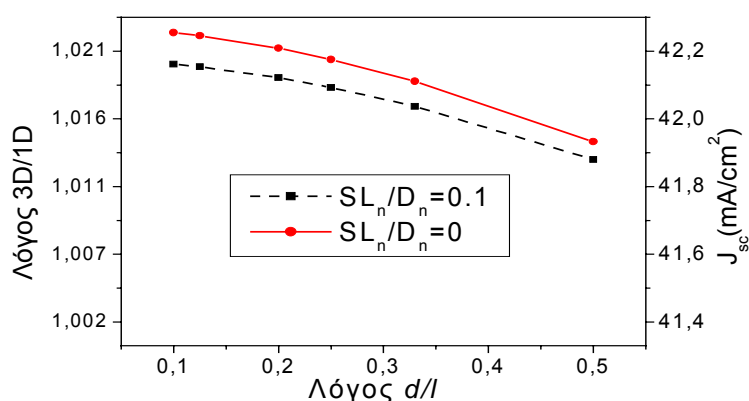


Σχήμα 5.3. Κατανομή δυναμικού φορέων πλειονότητας στην πίσω επιφάνεια της διάταξης με τα χαρακτηριστικά που περιγράφονται στο σχήμα 5.2. Οι υπολογισμοί γίνονται στο σημείο όπου αποδίδεται η μέγιστη ισχύς.

Συνεπώς, αφού η επιφάνεια της πίσω επαφής είναι πολύ μικρή συγκριτικά με την περίοδο της κυψελίδας, όλο το ρεύμα της διάταξης αναγκάζεται να περάσει από μια μικρή επιφάνεια (current crowding) οπότε το ρεύμα φορέων πλειονότητας είναι υψηλό στην περιοχή αυτή και μεταβάλλεται έντονα. Αυτό μεταφράζεται σε σημαντικές ωμικές απώλειες δεδομένου ότι η κινητικότητα των φορέων πλειονότητας είναι πεπερασμένη. Έτσι, αυτό το φαινόμενο που αναλύθηκε στα σχήματα (5.2) και (5.3) είναι ένας περιοριστικός παράγοντας για την απόδοση των φ/β στοιχείων αυτού του είδους.

5.4 Επίδραση των πίσω επαφών στο φωτόρευμα και την τάση ανοιχτού κυκλώματος

Σε αυτή την ενότητα, θα εξεταστεί η εξάρτηση του ρεύματος βραχυκυκλώματος (J_{sc}) και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) από το μέγεθος και την απόσταση των πίσω σημειακών επαφών. Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται το ρεύμα βραχυκυκλώματος συναρτήσει του λόγου του μήκους της πλευράς της πίσω επαφής d προς την περίοδο l της επαναλαμβανόμενης κυψελίδας με παράμετρο την ταχύτητα ανασύνδεσης στο οξείδιο της πίσω επιφάνειας και για ρεύμα ανασύνδεσης στον εκπομπό 10^{-12} A/cm².

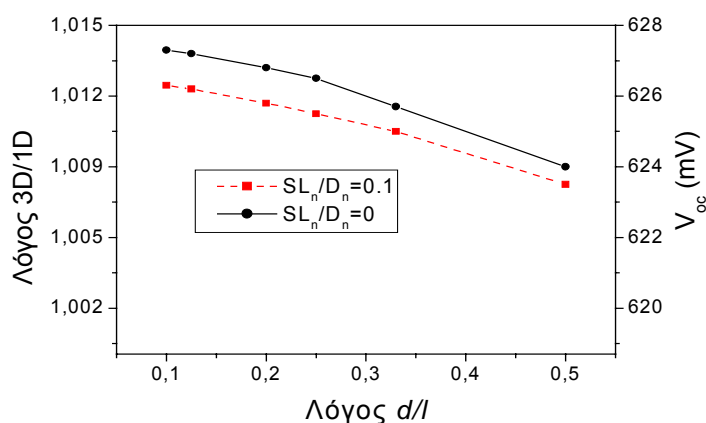


Σχήμα 5.4. Ρεύμα βραχυκυκλώματος (δεξιός άξονας) και αντίστοιχος λόγος ρευμάτων (αριστερός άξονας) του τριδιάστατου προς το μονοδιάστατο μοντέλο συναρτήσει του λόγου του μεγέθους προς την απόσταση των πίσω επαφών για μηδενική και πεπερασμένη ταχύτητα ανασύνδεσης στην πίσω επιφάνεια.

Ο αριστερός άξονας του σχήματος (5.4) παριστάνει το J_{sc} της διάταξης σημειακής επαφής κανονικοποιημένο ως προς το αντίστοιχο της δομής στην οποία ολόκληρη η πίσω επιφάνεια καταλαμβάνεται από την επαφή ($d=l$), που είναι τυπικό

χαρακτηριστικό των περισσότερων φ/β στοιχείων. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι το J_{sc} δεν εξαρτάται από την απόσταση l των επαφών, ούτε από το ρεύμα ανασύνδεσης στον εκπομπό όπως φάνηκε από τις προσομοιώσεις. Όπως ήταν αναμενόμενο, το ρεύμα βραχυκυκλώματος αυξάνεται μονότονα με τη μείωση του μεγέθους των πίσω επαφών αφού έτσι περιορίζονται οι ανασυνδέσεις στην πίσω επιφάνεια λόγω του μεγαλύτερου ποσοστού κάλυψης από οξείδιο. Ουσιαστικά για λόγους d/l μικρότερους από 0.2 το ρεύμα σχεδόν σταθεροποιείται αφού η επιφάνεια των επαφών που έχει τη μεγαλύτερη ταχύτητα ανασύνδεσης έχει ελαττωθεί πολύ. Επιπρόσθετα, όσο καλύτερη είναι η ποιότητα του οξειδίου της πίσω επιφάνειας, τόσο περισσότερο πλεονεκτεί η διάταξη των σημειακών επαφών σε σχέση με την αντίστοιχη συμβατική (μονοδιάστατη περίπτωση). Το κέρδος αυτό ξεπερνάει το 2% για λόγους d/l κοντά στο 0.1.

Σε αντιστοιχία με πριν, στο σχήμα (5.4) παρουσιάζεται η μεταβολή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος συναρτήσει του λόγου d/l για ρεύμα ανασύνδεσης στον εκπομπό 10^{-12} A/cm² και με παράμετρο την ταχύτητα ανασύνδεσης στο οξείδιο. Ο αριστερός άξονας εκφράζει την V_{oc} κανονικοποιημένη ως προς τη μονοδιάστατη περίπτωση. Επίσης και σε αυτή την περίπτωση, δεν υπάρχει εξάρτηση της τάσης από την περίοδο l της κυψελίδας.

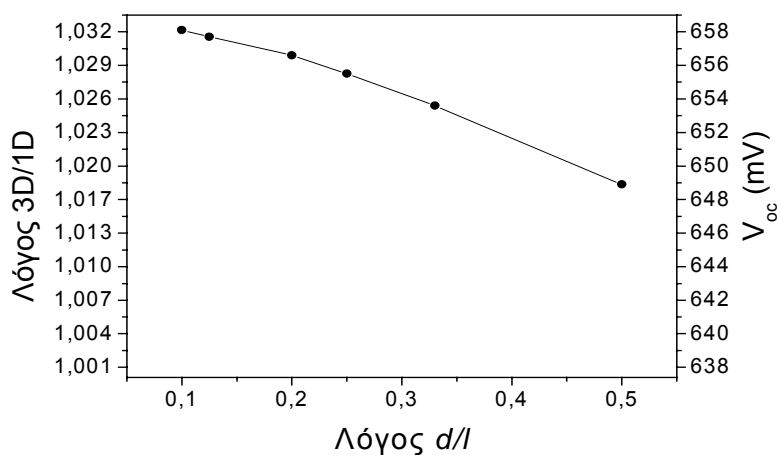


Σχήμα 5.5. Τάση ανοιχτού κυκλώματος (δεξιός άξονας) και αντίστοιχος λόγος (αριστερός άξονας) του τριδιάστατου προς το μονοδιάστατο μοντέλο συναρτήσει του λόγου του μεγέθους προς την απόσταση των πίσω επαφών για μηδενική και πεπερασμένη ταχύτητα ανασύνδεσης στην πίσω επιφάνεια και ρεύμα ανασύνδεσης εκπομπού 10^{-12} A/cm².

Παρατηρούμε ότι όπως και στην περίπτωση του ρεύματος βραχυκυκλώματος έτσι και η V_{oc} επωφελείται από την ελάττωση της επιφάνειας των πίσω επαφών, ενώ η μορφή των καμπυλών είναι παρόμοια με του σχήματος (5.4). Σε αντίθεση όμως με το J_{sc} το οποίο

Κεφάλαιο 5

είναι ανεξάρτητο από το ρεύμα ανασύνδεσης του εκπομπού, η τάση ανοιχτού κυκλώματος επηρεάζεται σημαντικά, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα όπου παρουσιάζεται η V_{oc} όταν αυτό έχει μειωθεί κατά μια τάξη μεγέθους (10^{-13} A/cm^2) και για μηδενικές επανασυνδέσεις στο οξείδιο της πίσω επιφάνειας.



Σχήμα 5.6. Τάση ανοιχτού κυκλώματος (δεξιός άξονας) και αντίστοιχος λόγος (αριστερός άξονας) του τριδιάστατου προς το μονοδιάστατο μοντέλο συναρτήσει του λόγου του μεγέθους προς την απόσταση των πίσω επαφών για μηδενική ταχύτητα ανασύνδεσης στην πίσω επιφάνεια και ρεύμα ανασύνδεσης εκπομπού 10^{-13} A/cm^2 .

Συγκρίνοντας τις αντίστοιχες καμπύλες των σχημάτων (5.5) και (5.6) προκύπτει ότι η V_{oc} επωφελείται σημαντικά από τη μείωση του J_0 όπου το κέρδος αυτό αυξάνει όσο ελαττώνεται το μέγεθος των πίσω επαφών και φτάνει περίπου τα 30mV για λόγους d/l κοντά στο 0.1. Συνεπώς σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μεγαλύτερη διαφορά σε σχέση με το μονοδιάστατο μοντέλο η οποία ξεπερνάει το 3%, ενώ αντίθετα στο σχήμα (5.5) είναι λιγότερη από 1.5%. Αυτό το γεγονός δείχνει ότι η ελαχιστοποίηση του ρεύματος επανασύνδεσης στον εκπομπό είναι απαραίτητη για τη σχεδίαση των φ/β στοιχείων σημειακής επαφής.

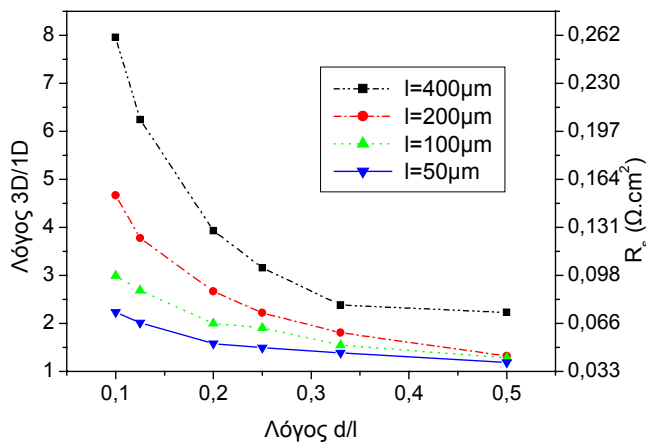
5.5 Επίδραση των πίσω επαφών στην αντίσταση σειράς

Στην ενότητα 5.3 αναλύθηκε η μεταβολή του δυναμικού και του ρεύματος φορέων πλειονότητας στην πίσω επιφάνεια και μέσω εκείνων των διαγραμμάτων εξηγήθηκε η δημιουργία ωμικών απωλειών (αντίσταση σειράς) λόγω της πίσω σημειακής επαφής. Σε αυτό το τμήμα θα εξεταστεί ποσοτικά η αντίσταση σειράς (R_s). Η εξαγωγή της

γίνεται μέσω της προσομοιούμενης χαρακτηριστικής IV για οποιοδήποτε σημείο αυτής με τη βοήθεια της ακόλουθης σχέσης

$$R_s = \frac{V_{oc} - V - \frac{KT}{e} \ln \frac{I_{sc}}{I_{sc} - I}}{I} \quad (5.1)$$

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η R_s συναρτήσει του λόγου d/l με παράμετρο την απόσταση l των σημειακών επαφών



Σχήμα 5.7. Αντίσταση σειράς (δεξιός άξονας) και αντίστοιχος λόγος (αριστερός άξονας) του τρισδιάστατου προς το μονοδιάστατο μοντέλο συναρτήσει του λόγου του μεγέθους προς την απόσταση των πίσω επαφών για μηδενική ταχύτητα ανασύνδεσης στην πίσω επιφάνεια και ρεύμα ανασύνδεσης εκπομπού 10^{-13} A/cm².

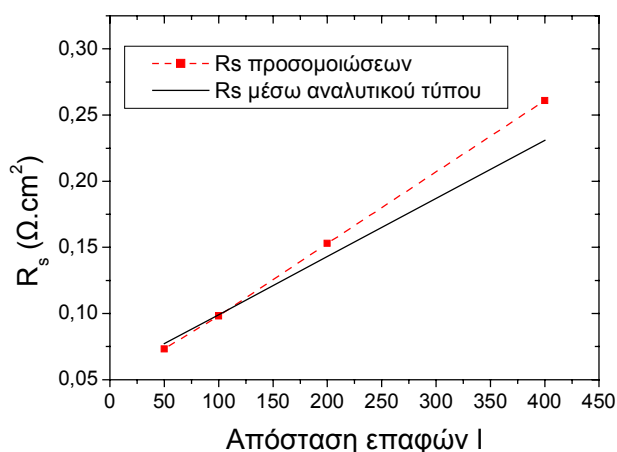
Από τα σχήμα (5.7) παρατηρούμε ότι η αντίσταση σειράς αυξάνεται έντονα όταν το μήκος πλευράς της σημειακής επαφής είναι μικρότερο ή ίσο από το 20% της αντίστοιχης περιόδου της κυψελίδας και φτάνει σε τιμές πολλαπλάσιες σε σχέση με τη μονοδιάστατη δομή. Αντιθέτως, όσο ελαττώνεται η περίοδος οι ωμικές απώλειες μειώνονται δραστικά. Συγκεκριμένα για λόγο $d/l=0.1$ που αντιστοιχεί σε ποσοστό κάλυψης 1% της πίσω επιφάνειας από τις επαφές και περίοδο 400μm, η αντίσταση σειράς της διάταξης σημειακών επαφών είναι περίπου 8 φορές μεγαλύτερη συγκριτικά με τη συμβατική (μονοδιάστατη δομή). Όταν όμως η απόσταση των επαφών ελαττωθεί στα 50μm, ο λόγος των αντιστάσεων πέφτει στο 2, δηλαδή πολύ χαμηλότερα. Προφανώς, για μεγάλες διαστάσεις των πίσω επαφών ή και μικρή περίοδο l η αντίσταση σειράς του στοιχείου τείνει προς αυτήν του μονοδιάστατου.

Κεφάλαιο 5

Στη βιβλιογραφία, υπάρχουν αναλυτικές εκφράσεις υπολογισμού της αντίστασης σειράς που οφείλεται σε σημειακές επαφές (spreading resistance). Οι Zhao et al. [8] έδειξαν μέσω τρισδιάστατων προσομοιώσεων ότι η αντίσταση σειράς ενός φ/β στοιχείου PERL προσεγγίζεται πολύ καλά από το άθροισμα της αντίστασης του υποστρώματος (R_b) και της αντίστασης σειράς που οφείλεται σε επαφή ημισφαιρικού σχήματος (R_{sp}) [18]. Συνολικά δηλαδή ισχύει [8]

$$R_s = R_b + R_{sp} = \rho_b W_b + S_c^2 \frac{\rho_b}{\pi d_c} \quad (5.2)$$

όπου ρ_b , W_b η αντίσταση φύλλου και το πάχος του υποστρώματος, S_c η απόσταση των επαφών και d_c το μήκος πλευράς κάθε επαφής. Αν θεωρήσουμε ότι $\rho_b=1.38 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ για τη δεδομένη νόθευση της βάσης και το πάχος της ($400\mu\text{m}$), μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με το αντίστοιχο της σχέσης (5.2). Αυτό γίνεται στο ακόλουθο σχήμα όπου απεικονίζεται η αντίσταση σειράς συναρτήσει της απόστασης των πίσω επαφών για ποσοστό κάλυψης της πίσω επιφάνειας από αυτές 1% ($d/l=0.1$) όπως προκύπτει από τις τρισδιάστατες προσομοιώσεις και τον τύπο (5.2) εφαρμοζόμενος για $S_c=1$ και $d_c=d$.



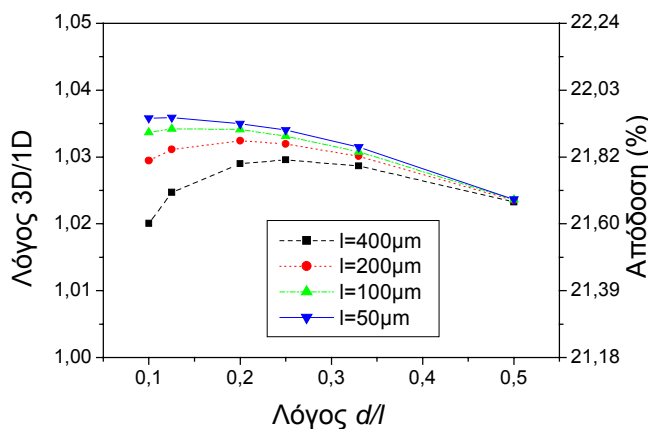
Σχήμα 5.8. Αντίσταση σειράς συναρτήσει της απόστασης των σημειακών επαφών υπολογιζόμενη μέσω των προσομοιώσεων και της αναλυτικής σχέσης (5.2) και ποσοστό κάλυψης της πίσω επιφάνειας από αυτές 1%.

Από τη μελέτη του σχήματος (5.8) παρατηρούμε ότι η προσεγγιστική σχέση (5.2) η οποία προβλέπει γραμμική εξάρτηση της αντίστασης σειράς από την απόσταση των πίσω επαφών, βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με τις προσομοιώσεις για μικρές αποστάσεις ($50\mu\text{m}$ και $100\mu\text{m}$), ενώ στις μεγαλύτερες αρχίζει να αποκλίνει και η

διαφορά αρχίζει να γίνεται σημαντική για $l=400\mu\text{m}$. Αυτή η συμπεριφορά συμφωνεί με τα αποτελέσματα των Zhao et al. [8]. Παρόμοια αναλυτική έκφραση για τον υπολογισμό της αντίστασης σειράς (R_{sp}) έχει χρησιμοποιηθεί από τους Catchpole et al. [12] για το φ/β στοιχείο PERC. Σε επόμενη εργασία τους [13] συγκρίνουν τα αποτελέσματα της αναλυτικής έκφρασης των Cox και Strak [19] για την R_{sp} με δικές τους τρισδιάστατες προσομοιώσεις όπου υπολογίζουν την μείωση στον παράγοντα πλήρωσης. Στη συγκεκριμένη εργασία εξετάζονται περισσότερο μεγάλες αποστάσεις για των πίσω επαφών, δεδομένου ότι η απόδοση της δομής PERC βελτιστοποιείται για τέτοιες τιμές. Σε γενικές γραμμές πάντως η σχέση (5.2) μπορεί να θεωρηθεί αρκετά καλή εκτίμηση της αντίστασης σειράς.

5.6 Επίδραση των πίσω επαφών στην απόδοση

Σε αντιστοιχία με τις προηγούμενες ενότητες, στο σχήμα (5.9) παρουσιάζεται η εξάρτηση της απόδοσης της διάταξης συναρτήσει του λόγου d/l με παράμετρο την περίοδο l της στοιχειώδους κυψελίδας για ρεύμα ανασύνδεσης στον εκπομπό 10^{-12} A/cm^2 . Στον αριστερό άξονα απεικονίζεται η απόδοση κανονικοποιημένη ως προς τη μονοδιάστατη δομή. Επιπλέον, η ταχύτητα ανασύνδεσης στην πίσω επιφάνεια που καλύπτεται από το οξείδιο θεωρείται μηδενική.

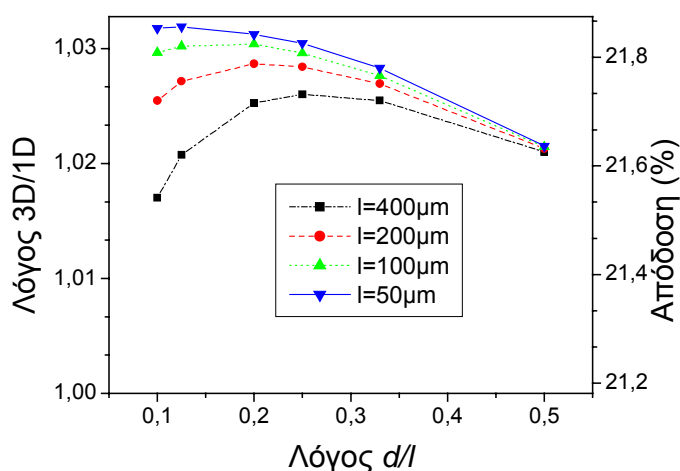


Σχήμα 5.9. Απόδοση (δεξιός άξονας) και αντίστοιχος λόγος (αριστερός άξονας) του τριδιάστατου προς το μονοδιάστατο μοντέλο συναρτήσει του λόγου του μεγέθους προς την απόσταση των πίσω επαφών για μηδενική ταχύτητα ανασύνδεσης στην πίσω επιφάνεια και ρεύμα ανασύνδεσης εκπομπού 10^{-12} A/cm^2 .

Κεφάλαιο 5

Οι καμπύλες του σχήματος δείχνουν ότι για δεδομένη περίοδο l η απόδοση της διάταξης αυξάνεται όσο μειώνεται το μέγεθος των πίσω επαφών αρκεί ο λόγος d/l να μην είναι μεγαλύτερος από 0.2. Για μικρότερους λόγους η απόδοση πέφτει ή αυξάνει οριακά για αποστάσεις των πίσω επαφών μικρότερες από 200 μm . Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη σημαντική αύξηση των απωλειών λόγω αντίστασης σειράς για μικρές διαστάσεις των πίσω επαφών, σύμφωνα με τα συμπεράσματα της προηγούμενης ενότητας. Αντίθετα, η απόδοση της διάταξης βελτιώνεται με τη μείωση της περιόδου l , γεγονός που αποδίδεται στην ελάττωση της αντίστασης σειράς, όπως φαίνεται και από το σχήμα (5.7).

Οι καμπύλες του επομένου σχήματος (5.10) δείχνουν την απόδοση της διάταξης σημειακών επαφών συναρτήσει του λόγου d/l όπως προηγουμένως για την περίπτωση όπου το οξειδίο της πίσω επιφάνειας είναι μη ιδανικό, δηλαδή θεωρούμε ότι υπάρχουν επανασυνδέσεις σε αυτό, οι οποίες είναι αρκετά χαμηλές ($S_2L_n/D_n=0.1$). Επιπλέον, το ρεύμα ανασύνδεσης στον εκπομπό είναι το ίδιο με το αντίστοιχο του σχήματος (5.9) δηλαδή 10^{-12} A/cm².

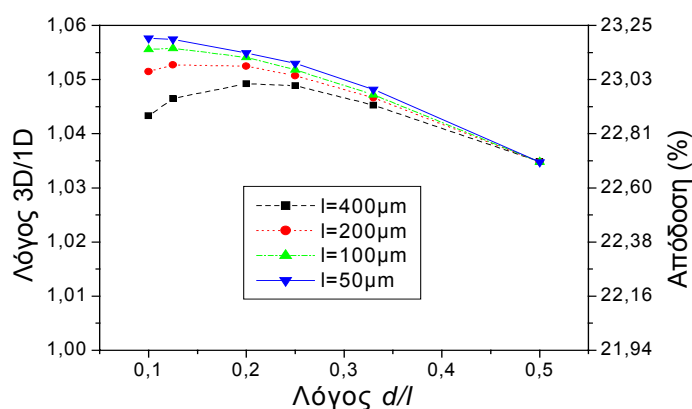


Σχήμα 5.10. Απόδοση (δεξιός άξονας) και αντίστοιχος λόγος (αριστερός άξονας) του τριδιάστατου προς το μονοδιάστατο μοντέλο συναρτήσει του λόγου του μεγέθους προς την απόσταση των πίσω επαφών για πεπερασμένη ταχύτητα ανασύνδεσης στην πίσω επιφάνεια ($S_2L_n/D_n=0.1$) και ρεύμα ανασύνδεσης εκπομπού 10^{-12} A/cm²

Όπως είναι αναμενόμενο, στην μη ιδανική περίπτωση όπου η επανασύνδεση στο οξειδίο της πίσω επιφάνειας που δεν καλύπτεται από την επαφή δεν είναι μηδενική, η απόδοση της διάταξης είναι μειωμένη συγκριτικά με αυτήν του σχήματος (5.9). Επίσης παρατηρείται μικρή πτώση της απόδοσης και σε σχέση με το μονοδιάστατο μοντέλο αφού οι απώλειες στην πίσω επιφάνεια είναι αυξημένες. Έτσι παρόλο που η

εμφανιζόμενη διαφορά δεν είναι μεγάλη διότι έχουμε θεωρήσει χαμηλή ταχύτητα επανασύνδεσης λόγω της καλής ποιότητας του οξειδίου που καλύπτει την επιφάνεια, είναι σημαντικό να περιορίζονται οι απώλειες της περιοχής αυτής σε χαμηλά επίπεδα, δεδομένου ότι η επιφάνεια αυτή είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή της πίσω επαφής.

Στο σχήμα (5.11) απεικονίζεται για άλλη μια φορά η απόδοση της διάταξης, για την περίπτωση όμως όπου το ρεύμα ανασύνδεσης στον εκπομπό (J_{0e}) είναι μειωμένο κατά μια τάξη μεγέθους (10^{-13} A/cm²), ενώ το οξείδιο στην πίσω επιφάνεια θεωρείται ιδανικό, όπως και στις καμπύλες του σχήματος (5.9). Η τιμή αυτή για το J_{0e} είναι τυπική για καλής ποιότητας φ/β στοιχεία, ενώ εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί και σημαντικά καλύτερες από αυτήν [20].



Σχήμα 5.11. Απόδοση (δεξιός άξονας) και αντίστοιχος λόγος (αριστερός άξονας) του τρισδιάστατου προς το μονοδιάστατο μοντέλο συναρτήσει του λόγου του μεγέθους προς την απόσταση των πίσω επαφών για μηδενική ταχύτητα ανασύνδεσης στην πίσω επιφάνεια και ρεύμα ανασύνδεσης εκπομπού 10^{-13} A/cm².

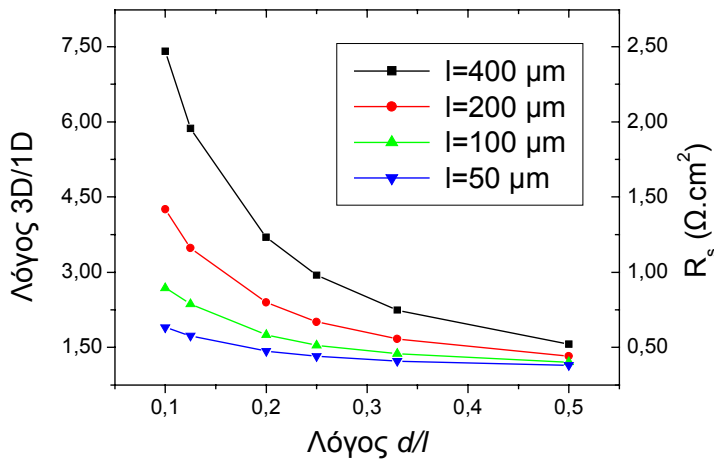
Από την σύγκριση του σχήματος αυτού με τα (5.9) και (5.10) διαπιστώνεται σημαντική βελτίωση της απόδοσης (αρκετά μεγαλύτερη από 1% σε απόλυτη τιμή) για μικρότερο ρεύμα επανασύνδεσης εκπομπού. Επίσης βελτιώνεται και η απόδοση της διάταξης σε σχέση με τη μονοδιάστατη περίπτωση. Τα αποτελέσματα αυτά είναι αναμενόμενα αφού όπως φάνηκε από το σχήμα (5.6) η τάση ανοιχτού κυκλώματος του στοιχείου αυξάνεται πολύ όταν μειώνεται δραστικά το J_{0e} . Για αυτό το λόγο, όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια προκειμένου να περιοριστεί το J_{0e} , ο εκπομπός των φ/β στοιχείων κατασκευάζεται σε 2 στάδια, δηλαδή είναι έντονα νοθευμένος στην περιοχή κάτω από τα ηλεκτρόδια και λιγότερο στην υπόλοιπη.

5.7 Προσομοίωση της διάταξης σημειακών επαφών υπό χαμηλότερη νόθευση βάσης

Σε αυτή την ενότητα θα αναλυθεί η επίδραση στην αντίσταση σειράς και στην απόδοση της διάταξης σημειακής επαφής για την περίπτωση όπου η νόθευση της βάσης είναι 10^{15} cm^{-3} , δηλαδή ελαττωμένη κατά μια τάξη μεγέθους σε σχέση με τις προσομοιώσεις των προηγούμενων ενότητων. Οι υπόλοιπες παράμετροι του στοιχείου παραμένουν ίδιες με της ενότητας 5.2, ενώ το οξείδιο της πίσω επιφάνειας θεωρείται ιδανικό και το ρεύμα ανασύνδεσης στον εκπομπό είναι 10^{-13} A/cm^2 . Να σημειωθεί ότι για λόγους άμεσης σύγκρισης το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας στη βάση λαμβάνεται το ίδιο και για τις 2 νοθεύσεις παράλλο που στην περίπτωση της μικρότερης νόθευσης στη βάση είναι στην πράξη μεγαλύτερο.

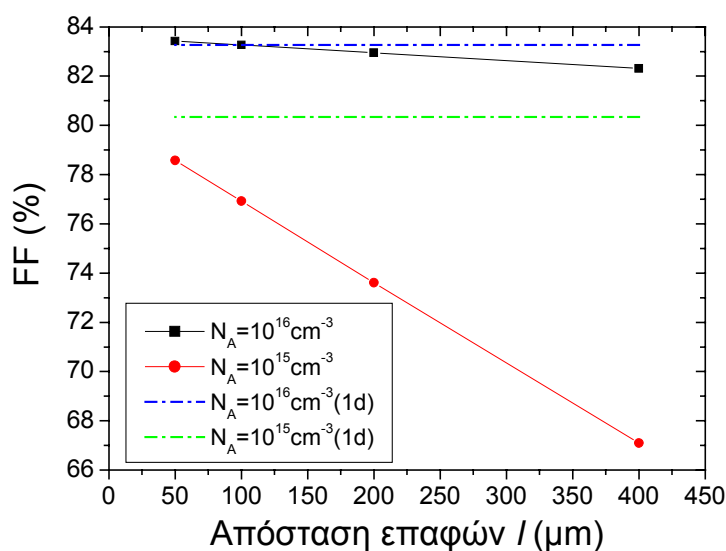
5.7.1 Μελέτη της αντίστασης σειράς και του παράγοντα πλήρωσης

Όπως είναι αναμενόμενο, η αντίσταση σειράς ενός φ/β στοιχείου εξαρτάται άμεσα από τη νόθευση του υποστρώματος. Στην περίπτωση που εξετάζουμε, όπου $N_A=10^{15} \text{ cm}^{-3}$, η αύξηση αυτή είναι σημαντική όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα, όπου απεικονίζεται η R_s συναρτήσει του λόγου d/l για διαφορετικές αποστάσεις των πίσω επαφών όπως και στην ενότητα 5.5.



Σχήμα 5.12. Αντίσταση σειράς (δεξιός άξονας) και αντίστοιχος λόγος (αριστερός άξονας) του τριδιάστατου προς το μονοδιάστατο μοντέλο συναρτήσει του λόγου του μεγέθους προς την απόσταση των πίσω επαφών για μηδενική ταχύτητα ανασύνδεσης στην πίσω επιφάνεια, ρεύμα ανασύνδεσης εκπομπού 10^{-13} A/cm^2 και νόθευση βάσης $N_A=10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

Από την ανάλυση του σχήματος (5.12) και συγκρίνοντάς το με το (5.7) προκύπτει ότι όταν η νόθευση στη βάση μειώνεται κατά μια τάξη μεγέθους, η αντίσταση σειράς της διάταξης μεταβάλλεται περίπου αντιστρόφως ανάλογα, δηλαδή σχεδόν δεκαπλασιάζεται. Αυτή η δραματική αύξηση αντιστοιχεί σε τιμές της R_s μεγαλύτερες από $1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ για απόσταση των επαφών μεγαλύτερη από $100 \mu\text{m}$ και λόγους d/l μικρότερους από 0.2. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, πολύ μεγάλες ωμικές απώλειες, όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα, όπου απεικονίζεται ο παράγοντας πλήρωσης του στοιχείου (FF) για τις 2 διαφορετικές νοθεύσεις βάσεως συναρτήσει της απόστασης των πίσω επαφών l και ποσοστό κάλυψης της πίσω επιφάνειας από αυτές 1%. Στο σχήμα παρατίθενται επίσης με διακεκομμένες οριζόντιες γραμμές οι αντίστοιχοι FF για τη μονοδιάστατη δομή, όπου όλη η πίσω επιφάνεια καλύπτεται από την επαφή.



Σχήμα 5.13. Μεταβολή του παράγοντα πλήρωσης (FF) συναρτήσει της απόστασης των πίσω επαφών για ποσοστό κάλυψης της πίσω επιφάνειας από αυτές 1% και 2 διαφορετικές νοθεύσεις στη βάση. Οι διακεκομμένες οριζόντιες γραμμές αντιστοιχούν στον FF της μονοδιάστατης δομής.

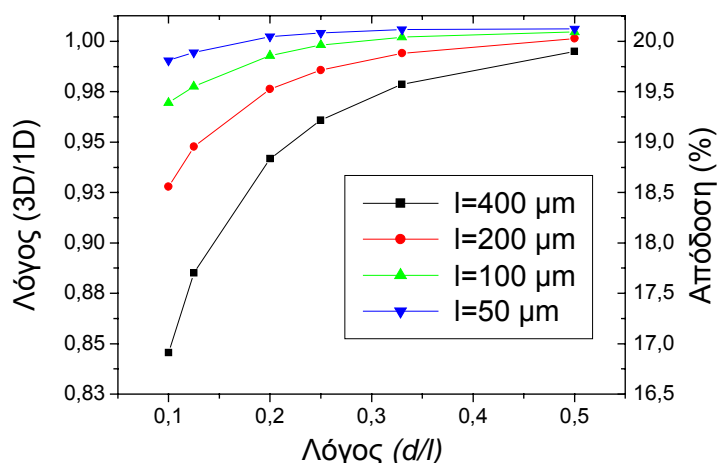
Όπως φαίνεται στο σχήμα (5.13) στην περίπτωση της χαμηλότερης νόθευσης, ο παράγοντας πλήρωσης πέφτει απότομα με γραμμικό τρόπο όσο αυξάνεται η απόσταση l των επαφών και στις μεγαλύτερες αποστάσεις παίρνει ιδιαίτερα χαμηλές τιμές λόγω της υψηλής αντίστασης σειράς. Αντίθετα, όταν $N_A = 10^{16} \text{cm}^{-3}$, η μείωση του FF για τις μεγαλύτερες περιόδους δεν είναι έντονη, ενώ σε κάθε περίπτωση η τιμή του δεν πέφτει κάτω από το 82% και μάλιστα στις μικρές αποστάσεις φτάνει και ξεπερνά (για $l=50 \mu\text{m}$)

Κεφάλαιο 5

τον αντίστοιχο της μονοδιάστατης δομής. Προφανώς, για $N_A=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ο παράγοντας πλήρωσης της μονοδιάστατης διάταξης είναι αισθητά υψηλότερος συγκριτικά με αυτόν της τρισδιάστατης ακόμα και στην περίπτωση της μικρότερης περιόδου l .

5.7.2 Μελέτη της απόδοσης

Η ανάλυση της ενότητας 5.7.1 έδειξε ότι η αντίσταση σειράς της διάταξης σημειακών επαφών είναι ιδιαίτερα υψηλή, γεγονός που είχε έντονη επίδραση και στον παράγοντα πλήρωσης του στοιχείου. Συνεπώς, είναι λογικό η R_s να επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση. Αυτό φαίνεται στις καμπύλες του σχήματος (5.14) όπου παριστάνεται η μεταβολή της απόδοσης της δομής συναρτήσει του λόγου d/l για διαφορετικές αποστάσεις των πίσω επαφών, όπως στην ενότητα 5.6.



Σχήμα 5.14. Απόδοση (δεξιός άξονας) και αντίστοιχος λόγος (αριστερός άξονας) του τρισδιάστατου προς το μονοδιάστατο μοντέλο συναρτήσει του λόγου του μεγέθους προς την απόσταση των πίσω επαφών για μηδενική ταχύτητα ανασύνδεσης της πίσω επιφάνειας, ρεύμα ανασύνδεσης εκπομπού 10^{-13} A/cm^2 και νόθευση βάσης $N_A=10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

Η μελέτη των καμπυλών του σχήματος (5.14) φανερώνει ότι η απόδοση του στοιχείου μειώνεται όσο ελαττώνονται οι διαστάσεις των πίσω επαφών, ενώ η πτώση αυτή είναι πιο έντονη στις μεγαλύτερες περιόδους l . Επιπρόσθετα, η μονοδιάστατη δομή υπερτερεί σε σχέση με την αντίστοιχη των σημειακών επαφών για τις δυο μεγαλύτερες περιόδους ($l=400\mu\text{m}$ και $l=200\mu\text{m}$), ενώ στις δύο μικρότερες και για λόγους d/l μεγαλύτερους από 0,2 (ή ίσους για $l=50\mu\text{m}$) η τρισδιάστατη έχει ένα μικρό

πλεονέκτημα στην απόδοση. Συνεπώς μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μείωση στις επανασυνδέσεις της πίσω επιφάνειας λόγω του μικρού ποσοστού κάλυψης της πίσω επιφάνειας από τις επαφές δεν μπορούν να αντισταθμίσουν τις απώλειες λόγω υψηλής R_s στις περισσότερες περιπτώσεις. Αντίθετα, για τη μεγαλύτερη νόθευση στη βάση ($N_A=10^{16} \text{ cm}^{-3}$) όπου η αντίσταση σειράς είναι πολύ μικρότερη, η απόδοση της διάταξης σημειακών επαφών είναι πάντα μεγαλύτερη από τη μονοδιάστατη περίπτωση, ενώ έχει διαφορετική εξάρτηση από το μέγεθος και την απόσταση αυτών, σύμφωνα με την ανάλυση της ενότητας 5.6.

5.8 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε ανάλυση του φ/β στοιχείου με βάση σημειακής επαφής μέσω τρισδιάστατων εξομοιώσεων που βασίζονται στο μοντέλο που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν έδειξαν ότι το ρεύμα βραχυκυκλώματος όπως και η τάση ανοιχτού κυκλώματος εξαρτώνται από τις διαστάσεις των πίσω επαφών και όχι από την απόσταση αυτών. Επίσης, όσο μικρότερο είναι το ρεύμα ανασύνδεσης στον εκπομπό, τόσο περισσότερο βελτιώνεται η τάση ανοιχτού κυκλώματος άρα και η συνολική απόδοση της διάταξης όπως και επίσης ο λόγος του τρισδιάστατου ως προς το μονοδιάστατο μοντέλο που αφορά τα 2 αυτά μεγέθη. Αντιθέτως, η αντίσταση σειράς στη βάση αυξάνει σημαντικά με την ελάττωση του μεγέθους των πίσω επαφών η οποία για μικρούς λόγους d/l μπορεί να είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της μονοδιάστατης δομής. Από την άλλη πλευρά, η R_s πέφτει σημαντικά με τη μείωση της περιόδου επανάληψης της στοιχειώδους κυψελίδας. Έτσι ο βέλτιστος λόγος d/l μεταβάλλεται από 0.2 σε 0.1 όταν ο λόγος της περιόδου προς το πάχος της διάταξης πέφτει από 1 σε 0.125. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η μείωση της νόθευσης στη βάση κατά μια τάξη μεγέθους συνοδεύεται από μια σχεδόν ισόποση αύξηση στην αντίσταση σειράς την οποία καθιστά κυρίαρχη αιτία στην πτώση της απόδοσης της διάταξης. Συγκεκριμένα, όταν $N_A=10^{15} \text{ cm}^{-3}$ η συμβατική δομή στην οποία η επαφή καταλαμβάνει ολόκληρη την πίσω επιφάνεια έχει καλύτερη απόδοση λόγω μικρότερη αντίστασης σειράς. Συνεπώς, προκειμένου να πετύχουμε τη μέγιστη δυνατή απόδοση πρέπει να επιδιώξουμε όσο το δυνατόν λιγότερες επανασυνδέσεις στον εκπομπό, τη μικρότερη κατασκευαστικά δυνατή απόσταση l των πίσω επαφών, κατάλληλο λόγο d/l που να μην δίνει υψηλές τιμές αντίστασης σειράς όπως και νόθευση βάσης μεγαλύτερη από 10^{15} cm^{-3} .

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Zhao J., Wang A., και Green M. A., *Progr. In Photovoltaics: Res. Appl.*, Τόμος 7, 1999, σελ. 471.
- [2] Zhao J., Wang A., και Green M. A., *21st IEEE PV Spec. Conf.*, Orlando, USA, 1990, σελ. 333.
- [3] ISE Integrated Systems Engineering AG, *ISE TCAD Dessis version 6*, Switzerland, Zurich.
- [4] Aberle A. G, Heiser G. και Green M.A., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 75, 1994, σελ. 5391.
- [5] Aberle A. G, Altermatt P., Heiser G., Robinson S. J., Wang A., Zhao J., Krumbein U. και Green M. A., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 77, 1995, σελ. 3491.
- [6] Aberle A. G., Wenham S. R., Green M. A. και Heiser G., *Progr. In Photovoltaics: Res. Appl.*, Τόμος 2, 1994, σελ. 3.
- [7] Sterck S., Knobloch J. και Wettling W., *Progr. In Photovoltaics: Res. Appl.*, Τόμος 2, 1994, σελ. 19.
- [8] Zhao J., Wang A., και Green M. A., *Sol. Energy Mat. & Sol. Cells*, Τόμος 32, 1994, σελ. 89.
- [9] Heiser G. και Aberle A. G., *5th IEEE Workshop on Numerical Modelling of Processes and Devices for Integrated Circuits (NUPAD V)*, Hawaii, USA, 1994, σελ. 177.
- [10] Schöfthaler M., Rau U., Füssel W., και Werner J. H., *23rd IEEE PV Spec. Conf.*, Louisville, USA, 1993, σελ. 315.
- [11] Rau U., *12th EPV Sol. Energy Conf.*, Amsterdam, The Netherlands, 1994, σελ. 1350.
- [12] Catchpole K. R. και Blakers A. W., *16th EPV Sol. EnergyConf.*, Glasgow, UK, 2000.
- [13] Catchpole K. R. και Blakers A. W., *Sol. Energy Mat. & Sol. Cells*, Τόμος 73, 2002, σελ. 189.
- [14] Fastflo Finite Elements PDE Package , www.nag.co.uk/simulation/fastflo.asp.
- [15] Press W. H., Flannery B. P., Teukolsky S. A., Vetterling W.T., *Numerical Recipes in Fortran: The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, 1992, κεφ. 12.
- [16] Klaassen D.B.M., *Solid-State Electronics*, Τόμος 35, 1992, σελ. 953.

Κεφάλαιο 5

- [17] Hulstrom R., Bird R. και Riordan C., *Solar Cells*, Τόμος 15, 1985, σελ. 365.
- [18] Sze S. M., *Physics of Semiconductor Devices*, 2^η Έκδοση, John Wiley & Sons, 1981.
- [19] Cox R. H. και Strack H., *Solid-State Electronics*, Τόμος 10, 1967, σελ. 1213.
- [20] Green M. A., *Silicon Solar Cells*.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΔΥΟ ΕΝΩΣΕΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΕΠΑΦΗΣ

6.1 Εισαγωγή- Γενική ανασκόπηση

Στην ανάλυση του κεφαλαίου 3 δόθηκε μια γενική περιγραφή των πιο διαδεδομένων τύπων φ/β στοιχείων πυριτίου, όπου στην ενότητα 3.8 παρουσιάστηκε μια ξεχωριστή κατηγορία δομών με κοινό χαρακτηριστικό την ύπαρξη εκπομπών και στις 2 επιφάνειες. Παρά το γεγονός ότι η διαδικασία σχηματισμού της επιπλέον ένωσης αυξάνει την πολυπλοκότητα κατασκευής της διάταξης, έχει το πλεονέκτημα της ευκολότερης διασύνδεσης των στοιχείων μεταξύ τους αφού όλες οι επαφές μπορούν να βρίσκονται στην πίσω επιφάνεια. Επιπλέον, συγκριτικά με τις συμβατικές δομές έχουν τη δυνατότητα αποτελεσματικότερης συλλογής ρεύματος λόγω του εκπομπού της πίσω επιφάνειας.

Το αντικείμενο αυτού του κεφαλαίου είναι η μελέτη μέσω τριδιάστατων προσομοιώσεων της διάταξης 2 ενώσεων με βάση σημειακής επαφής και η σύγκριση αυτής με την αντίστοιχη δομή μονής ένωσης που αναλύθηκε διεξοδικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Μια τέτοια θεωρητική σύγκριση με χρήση μονοδιάστατου μοντέλου βασιζόμενο σε στοιχεία κυκλωμάτων αλλά και δισδιάστατων προσομοιώσεων με χρήση του υπολογιστικού πακέτου DESSIS, πραγματοποιήθηκε από τους Van Kerschaver et al. [1]. Στη συγκεκριμένη εργασία δόθηκε έμφαση στη βελτίωση της απόδοσης της διάταξης 2 ενώσεων σε σχέση με την αντίστοιχη μιας ένωσης, ενώ παρουσιάστηκαν και συγκριτικές καμπύλες για το ρεύμα βραχυκυκλώματος και την τάση ανοιχτού κυκλώματος. Το στοιχείο αυτό που θα προσομοιώσουμε είναι παρόμοιο με τη διάταξη σημειακών επαφών των Swanson et al. [2], με τη βασική διαφορά ότι η δομή τους δεν έχει μπροστινό εκπομπό και παρόλο που αργότερα προστέθηκε μια ένωση τύπου n^+p στην μπροστινή επιφάνεια [3] και χρησιμοποιείται μέχρι τώρα [4], αυτή δεν διαθέτει ηλεκτρικές επαφές και έχει σκοπό την δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου (FSF, front surface field) το οποίο βοηθά στη μείωση των επανασυνδέσεων στην μπροστινή επιφάνεια.

6.2 Παράμετροι προσομοίωσης και διάρθρωση του κεφαλαίου

Η βασική δομή της της διάταξης 2 ενώσεων φαίνεται σε τομή στο κεφάλαιο 4 (σχ. 4.1γ), για τη δεδομένη στοιχειώδη κυψελίδα του σχήματος (4.1α), ενώ το μαθηματικό μοντέλο των προσομοιώσεων δίνεται στην ενότητα 4.2. Όλα τα φ/β στοιχεία που αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο έχουν νόθευση στη βάση $N_A=10^{16} \text{ cm}^{-3}$ και πάχος $w=400\mu\text{m}$. Οι ωμικές απώλειες στον εκπομπό θεωρούνται μηδενικές και το ρεύμα ανασύνδεσης σε αυτόν είναι $J_0=10^{-13} \text{ A/cm}^2$. Όσον αφορά το φ/β στοιχείο μονής ένωσης, θεωρούμε ότι η ανασύνδεση στην πίσω επιφάνεια που καλύπτεται από το οξείδιο είναι μηδενική. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι ίδιες με του προηγούμενου κεφαλαίου. Επίσης, στις περισσότερες προσομοιώσεις η μπροστινή και πίσω ένωση της δομής 2 ενώσεων είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένες, δηλαδή βρίσκονται στο ίδιο δυναμικό.

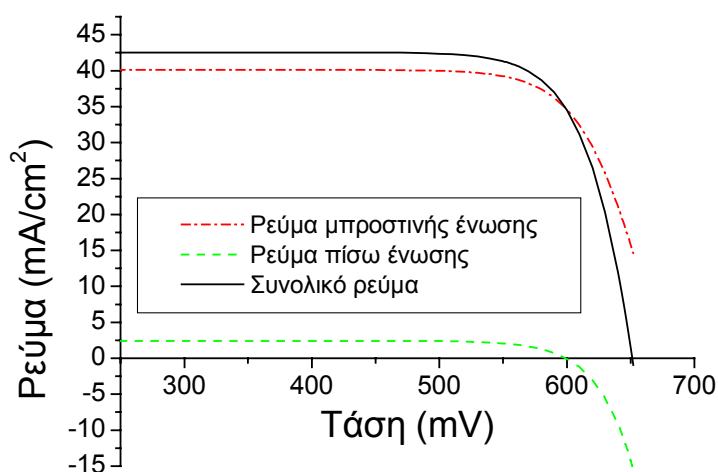
Στη συνέχεια του κεφαλαίου, θα δοθούν αποτελέσματα από τη σύγκριση των δύο διαφορετικών διατάξεων, όπου το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας στη βάση είναι $800\mu\text{m}$, όπως και στο κεφάλαιο 4. Σημαντική έμφαση δίνεται στη σύγκριση της αντίστασης σειράς των δομών, ενώ θα ακολουθήσει μια αντίστοιχη ανάλυση για την περίπτωση όπου το μήκος διάχυσης στη βάση είναι το μισό ($400\mu\text{m}$), καθώς και μια γενικότερη για διαφορετικές τιμές του. Επιπλέον μελετάται η περίπτωση όπου οι διατάξεις φωτίζονται στην πίσω επιφάνεια, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου αναλύεται η επίδραση στην απόδοση του στοιχείου όταν οι τάσεις των 2 ενώσεων διαφέρουν ελαφρά (μερικές δεκάδες mV), δηλαδή όταν αυτό λειτουργεί σαν διάταξη 3 ακροδεκτών.

6.3 Προσομοίωση διατάξεων για $L_n=800\mu\text{m}$

Σε αυτή την ενότητα θα μελετήσουμε και θα συγκρίνουμε τις 2 διατάξεις θεωρώντας μήκος διάχυσης στη βάση ίδιο με τις προσομοιώσεις του προηγούμενου κεφαλαίου ($800\mu\text{m}$), τιμή διπλάσια του πάχους της βάσεως που αντιστοιχεί σε υλικό καλής ποιότητας.

6.3.1 Χαρακτηριστική IV φ/β στοιχείου 2 ενώσεων και κατανομή ρευμάτων πλειονότητας

Η παρακάτω γραφική παράσταση εμφανίζει τα ρεύματα στις 2 ενώσεις και το συνολικό ρεύμα για διάταξη με απόσταση επαφών 400μm και μήκους πλευράς 40μm. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι μέχρι την τάση των 600 mV, η πίσω ένωση συμβάλλει στο συνολικό φωτόρευμα, αλλά από εκεί και πέρα αλλάζει πρόσημο, με αποτέλεσμα απότομη μείωση του συνολικού ρεύματος. Προφανώς για κάποια τιμή της τάσης, τα ρεύματα των ενώσεων είναι ίσα και αντίθετα, οπότε έχουμε συνθήκη ανοιχτού κυκλώματος.



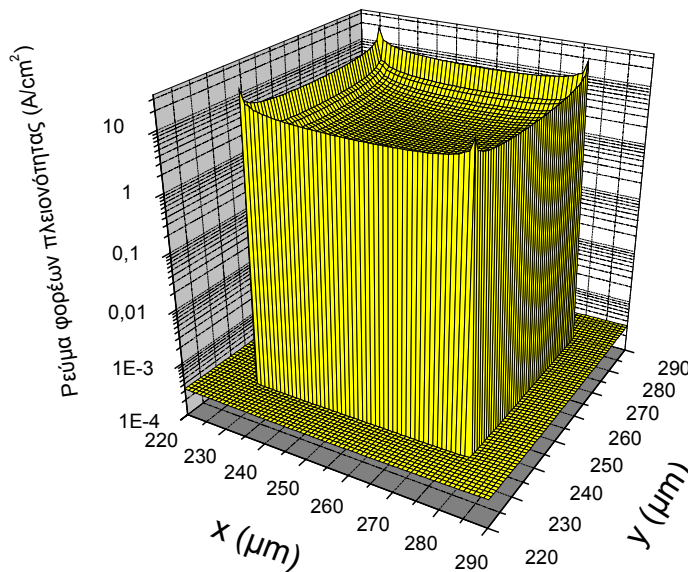
Σχήμα 6.1. Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης (IV) φ/β στοιχείου διπλής ένωσης με πίσω επαφή πλευράς μήκους $d=40\mu\text{m}$ και περίοδο $l=400\mu\text{m}$.

Ένα άλλο σημείο που πρέπει να τονιστεί είναι ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού ρεύματος συλλέγεται από τη μπροστινή ένωση ενώ από η πίσω συνεισφέρει σε λιγότερο από 10% του συνολικού. Αυτό συμβαίνει διότι οι περισσότεροι φορείς δημιουργούνται κοντά στην μπροστινή ένωση όπου η διάταξη φωτίζεται.

Η επόμενη γραφική παράσταση (σχ. 6.2) δείχνει σε απόλυτη τιμή την πυκνότητα ρεύματος των φορέων πλειονότητας στο εσωτερικό της πίσω επαφής και στην περιοχή γύρω της για τη διάταξη με τα ίδια χαρακτηριστικά του σχήματος 6.1 στο σημείο όπου αποδίδεται η μέγιστη ισχύς. Παρατηρούμε ότι η κατανομή του ρεύματος πλειονότητας μέσα στην επαφή έχει την ίδια μορφή με την αντίστοιχη της δομής 1 ένωσης που αναλύθηκε στην ενότητα 5.3.2 του προηγούμενου κεφαλαίου,

Κεφάλαιο 6

δηλαδή στις άκρες της επαφής παίρνει τιμές τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερες από ότι στο κέντρο της. Στην περιοχή γύρω από την επαφή, το ρεύμα αλλάζει πρόσημο και εκφράζεται από την εξίσωση (4.17) του κεφαλαίου 4, από την οποία προκύπτει ότι εξαρτάται από το ρεύμα ανασύνδεσης και το άθροισμα της τάσης και του δυναμικού φορέων πλειονότητας στον πίσω εκπομπό. Προφανώς επειδή η τάση στην πίσω ένωση είναι πολύ μεγαλύτερη από την πτώση δυναμικού των φορέων πλειονότητας, το ρεύμα γύρω από την επαφή είναι περίπου σταθερό.



Σχήμα 6.2. Πυκνότητα ρεύματος φορέων πλειονότητας σε απόλυτη τιμή στο εσωτερικό και γύρω από την πίσω επαφή για το φ/β στοιχείο 2 ενώσεων για μέγεθος και απόσταση των πίσω επαφών όπως στο σχήμα 6.1. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει στο σημείο μέγιστης ισχύος.

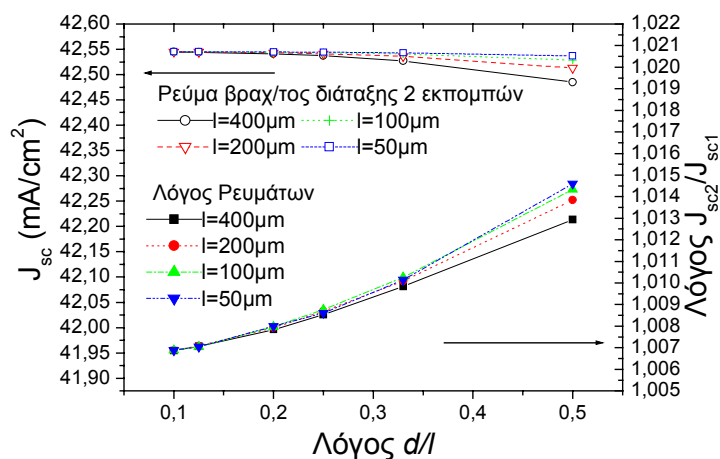
Σε γενικές γραμμές μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όπως και στη διάταξη 1 ένωσης, το ρεύμα φορέων πλειονότητας μέσα στην επαφή λαμβάνει υψηλές τιμές, γεγονός που οδηγεί σε αντίστοιχες απώλειες λόγω αντίστασης σειράς σε αυτή την περίπτωση.

6.3.2. Ρεύμα βραχυκυκλώματος (J_{sc}) και τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc})

Στην ακόλουθη γραφική παράσταση (σχήμα 6.3) οι καμπύλες με τα ανοιχτά σύμβολα απεικονίζουν στον αριστερό άξονα το ρεύμα βραχυκυκλώματος για τη διάταξη των 2 ενώσεων συναρτήσει του λόγου d/l , ενώ εκείνες με τα κλειστά παριστάνουν στο δεξί άξονα τον λόγο των αντίστοιχων ρευμάτων των 2 διατάξεων. Από την ανάλυση του σχήματος προκύπτει ότι το ρεύμα βραχυκυκλώματος του φ/β στοιχείου 2 ενώσεων

Κεφάλαιο 6

είναι ουσιαστικά ανεξάρτητο από το μέγεθος των πίσω επαφών όταν η απόστασής τους είναι μικρότερη από 200 μm , ενώ παρουσιάζει μια αμελητέα μείωση για τις υπόλοιπες όταν ο λόγος d/l είναι μεγαλύτερος από 0.25. Αντίθετα, όσον αφορά τη δομή 1 ένωσης, όπως φαίνεται από το σχήμα 5.4 του προηγούμενου κεφαλαίου, υπάρχει μια σημαντική αύξηση του J_{sc} όσο ελαττώνεται το μέγεθος των επαφών γιατί μειώνονται οι επανασυνδέσεις στην πίσω επιφάνεια, ενώ όπως έχει ήδη αναφερθεί δεν μεταβάλλεται καθόλου από την απόστασή τους. Συνεπώς παρατηρώντας το λόγο ρευμάτων των δύο διατάξεων στο σχήμα 6.3, παρατηρούμε ότι αυτός αυξάνει υπέρ της δομής 2 ενώσεων όταν μεγαλώνει ο λόγος d/l , ενώ για μικρά μεγέθη των πίσω επαφών ($d/l=0.1$) τα ρεύματα των 2 διατάξεων τείνουν να εξισωθούν επειδή οι ανασυνδέσεις στην πίσω επιφάνεια του στοιχείου μιας ένωσης έχουν περιοριστεί σημαντικά.

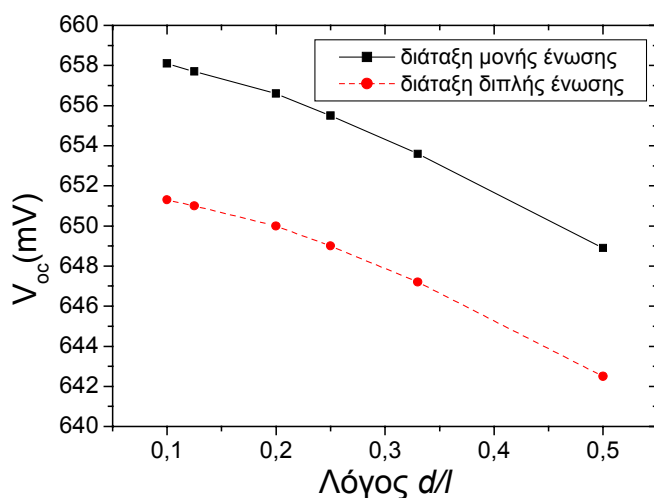


Σχήμα 6.3. Ρεύμα βραχυκυκλώματος διάταξης διπλής ένωσης (ανοιχτά σύμβολα) και λόγος ρευμάτων των 2 διατάξεων (κλειστά σύμβολα) συναρτήσει του λόγου d/l για διαφορετικές αποστάσεις των πίσω επαφών, όπου J_{sc1} αντιστοιχεί στο ϕ/β στοιχείο 1 ένωσης και J_{sc2} στο αντίστοιχο 2 ενώσεων.

Προφανώς, το ρεύμα βραχυκυκλώματος του ϕ/β στοιχείου διπλής ένωσης είναι πάντα μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της διάταξης μονής ένωσης, γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη του πίσω εκπομπού, που συμβάλλει στη συλλογή φορέων αυξάνοντας το συνολικό ρεύμα, όπως έχει ήδη αναφερθεί [1].

Οι καμπύλες του επόμενου σχήματος παριστάνουν την τάση ανοικτού κυκλώματος των 2 διατάξεων σαν συνάρτηση του λόγου d/l για δεδομένη απόσταση l των πίσω επαφών. Να σημειωθεί ότι όπως και στην περίπτωση του ϕ/β στοιχείου μιας

ένωσης που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έτσι και στο αντίστοιχο των 2 ενώσεων, η τάση ανοιχτού κυκλώματος δεν εξαρτάται από την περίοδο l της κυψελίδας. Όπως θα ήταν αναμενόμενο, σε αντίθεση με το ρεύμα βραχυκυκλώματος, η τάση ανοιχτού κυκλώματος του κυττάρου διπλής ένωσης είναι χαμηλότερη, γεγονός που οφείλεται στις επανασυνδέσεις στον πίσω εκπομπό. Από την άλλη πλευρά, η εξάρτησή της από το μέγεθος των πίσω επαφών έχει την ίδια μορφή και για τις δύο δομές.



Σχήμα 6.4. Τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) των 2 διαφορετικών διατάξεων συναρτήσει του λόγου d/l για δεδομένη απόσταση των πίσω επαφών και μήκος διάχυσης στη βάση 800 μm .

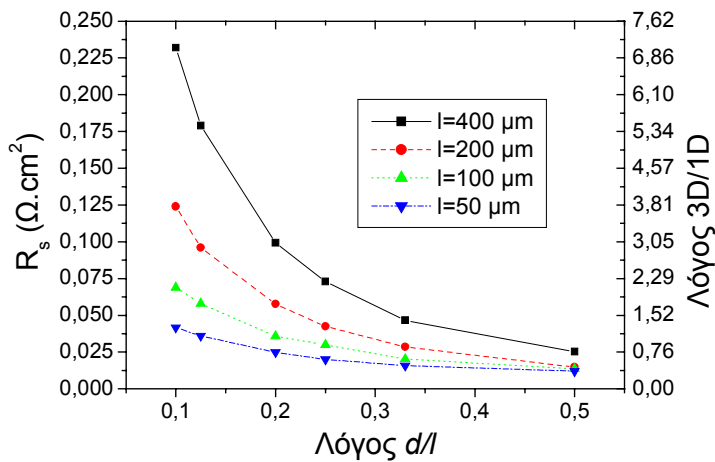
Συνεπώς, το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι ότι προκειμένου να βελτιστοποιήσουμε την τάση ανοιχτού κυκλώματος της διάταξης διπλής ένωσης πρέπει οι επανασυνδέσεις στους εκπομπούς να ελαχιστοποιηθούν, δεδομένου ότι είναι αυξημένες σε σχέση με το αντίστοιχο μιας ένωσης.

6.3.3 Αντίσταση σειράς (R_s)

Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η αντίσταση σειράς που οφείλεται στην κίνηση των φορέων στη βάση του ϕ/β στοιχείου είναι σημαντικός παράγοντας απωλειών ειδικά όταν το ποσοστό κάλυψης της πίσω επιφάνειας από τις επαφές είναι μικρό, ενώ επίσης αυξάνεται όσο μεγαλώνουν οι αποστάσεις τους. Με αντίστοιχο τρόπο υπολογίστηκε η R_s για τη διάταξη των 2 ενώσεων με τη βοήθεια των

Κεφάλαιο 6

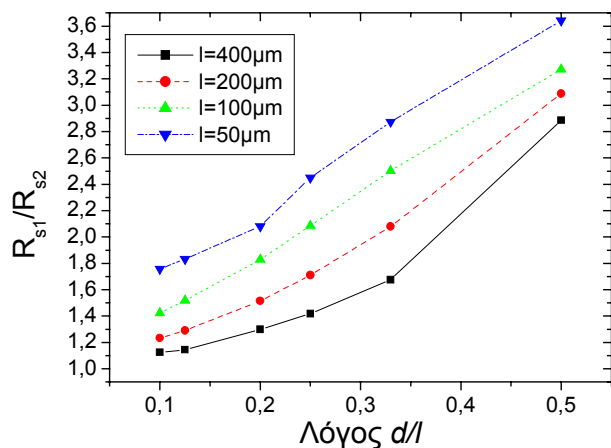
προσομοιούμενων χαρακτηριστικών IV και απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα ως συνάρτηση του λόγου d/l για διαφορετικές αποστάσεις l των πίσω επαφών, ενώ στον δεξί άξονα συγκρίνεται με την μονοδιάστατη συμβατική δομή όπου η επαφή καλύπτει όλη την πίσω επιφάνεια μέσω του λόγου των αντιστάσεων σειράς. Οι τιμές που παρουσιάζονται έχουν ληφθεί στο σημείο μέγιστης ισχύος, αν και όπως φάνηκε από τις προσομοιώσεις, η R_s παραμένει σχεδόν σταθερή για μια ευρεία περιοχή τάσεων, προφανώς μακριά από το σημείο ανοιχτού κυκλώματος ή βραχυκυκλώματος.



Σχήμα 6.5. Αντίσταση σειράς (R_s) διάταξης διπλής ένωσης και αντίστοιχος λόγος της τρισδιάστατης σε σχέση με τη μονοδιάστατη δομή συναρτήσει του λόγου d/l για διαφορετικές αποστάσεις l των πίσω επαφών. Οι τιμές έχουν ληφθεί στο σημείο μέγιστης ισχύος.

Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι η μείωση του μεγέθους των πίσω επαφών αυξάνει την αντίσταση σειράς. Η αύξηση αυτή είναι έντονη όταν ο λόγος d/l γίνει μικρότερος από 0,2, που αντιστοιχεί σε μικρές διαστάσεις των πίσω επαφών. Επίσης, η R_s πέφτει όσο ελαττώνεται η απόσταση των πίσω επαφών. Σε γενικές γραμμές παρατηρούμε ότι η εξάρτησή της από το μέγεθος και τις αποστάσεις των πίσω επαφών έχει παρόμοια συμπεριφορά με τη διάταξη μιας ένωσης, όπως προκύπτει από τη σύγκριση με το σχήμα (5.7) του προηγούμενου κεφαλαίου. Η σημαντική διαφορά όμως είναι ότι η R_s της δομής 2 ενώσεων είναι σημαντικά μικρότερη και αυτό μπορεί να φανεί καθαρά στο σχήμα 6.6, όπου απεικονίζεται ο λόγος των αντιστάσεων σειράς των διατάξεων συναρτήσει του μεγέθους και της απόστασης των πίσω επαφών. Επιπλέον, ένα άλλο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό που προκύπτει από την σύγκριση των αντιστάσεων σειράς όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5 είναι ότι η R_s της διάταξης των 2 ενώσεων πέφτει σε

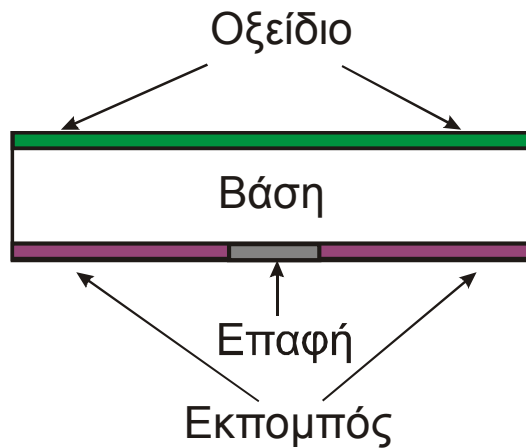
επίπεδα σημαντικά χαμηλότερα από αυτή της μονοδιάστατης συμβατικής δομής και κυρίως για τις μικρές αποστάσεις των πίσω επαφών ($l=50\mu\text{m}$ και $100\mu\text{m}$). Αντίθετα, όσον αφορά τη δομή 1 ένωσης, η αντίσταση σειράς της είναι πάντα μεγαλύτερη από αυτή της μονοδιάστατης.



Σχήμα 6.6. Λόγος αντιστάσεων σειράς του φ/β στοιχείου μιας ένωσης (R_{s1}) προς το αντίστοιχο των 2 ενώσεων (R_{s2}) ως συνάρτηση του λόγου d/l για διαφορετικές αποστάσεις των πίσω επαφών l .

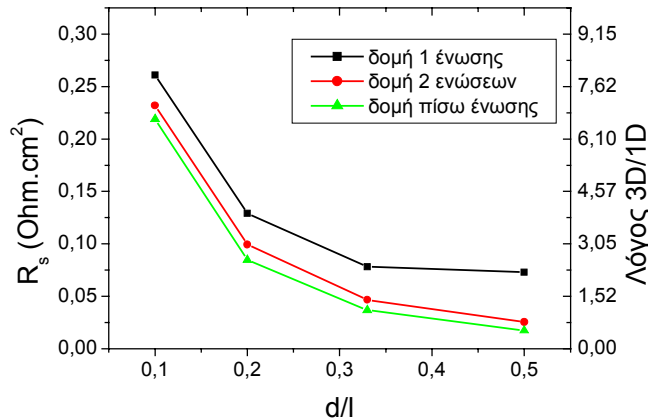
Από το σχήμα 6.6 παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις η αντίσταση σειράς του φ/β στοιχείου 2 ενώσεων είναι μικρότερη από αυτή του αντίστοιχου μιας ένωσης και η διαφορά αυτή αυξάνει με την ελάττωση των διαστάσεων ή της απόστασης l των πίσω επαφών. Από την άλλη πλευρά, για περιόδους μεγαλύτερες από $100\mu\text{m}$ και λόγο d/l μικρότερο από 0.2 ο λόγος των αντιστάσεων γίνεται μικρότερος από 1.2. Για αυτούς τους μικρούς λόγους d/l , η αντίσταση σειράς αυξάνει έντονα λόγω του υψηλού ρεύματος φορέων πλειονότητας στο εσωτερικό της επαφής.

Η σημαντικά χαμηλότερη αντίσταση σειράς της διάταξης δύο ενώσεων που παρατηρήθηκε, μπορεί να διερευνηθεί περαιτέρω εξετάζοντας μια παραλλαγή της δομής αυτής στην οποία η μπροστινή επιφάνεια καλύπτεται από οξείδιο με ιδανικά χαρακτηριστικά, ενώ υπάρχει μόνο μια ένωση στην πίσω επιφάνεια, όπως απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα ξεχωριστής μελέτης της επίδρασης του πίσω εκπομπού στην αντίσταση σειράς.



Σχήμα 6.7. Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης πίσω ένωσης. Η πίσω επιφάνεια του φ/β στοιχείου έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με τη δομή 2 ενώσεων. Στην μπροστινή επιφάνεια αντί του εκπομπού υπάρχει οξειδίο με ιδανικά χαρακτηριστικά.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την μεταβολή της αντίστασης σειράς της δομής αυτής συναρτήσει του λόγου d/l απεικονίζονται στα σχήματα 6.8-6.9 τα οποία αναφέρονται σε αποστάσεις των πίσω επαφών 400 μm και 50 μm αντίστοιχα ενώ συγκριτικά παρατίθενται οι αντιστάσεις σειράς των προηγούμενων διατάξεων.

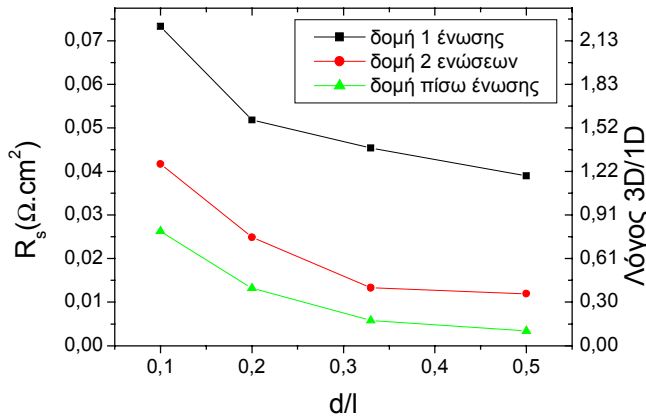


Σχήμα 6.8. Αντιστάσεις σειράς των 3 διαφορετικών δομών συναρτήσει του λόγου d/l για απόσταση των πίσω επαφών 400 μm .

Από το σχήμα 6.8 παρατηρούμε ότι η αντίσταση σειράς της δομής που διαθέτει την ένωση μόνο στην πίσω επιφάνεια είναι η χαμηλότερη, ενώ η R_s της διάταξης 2 ενώσεων παίρνει τιμές ελαφρά μεγαλύτερες. Αντίθετα, το φ/β στοιχείο της μιας (μπροστινής) ένωσης εμφανίζει την υψηλότερη αντίσταση σειράς, όπου η διαφορά

Κεφάλαιο 6

αυτή σε σχέση με τις υπόλοιπες διατάξεις μεγαλώνει όσο αυξάνεται το μέγεθος των πίσω επαφών.



Σχήμα 6.9. Αντιστάσεις σειράς των 3 διαφορετικών δομών συναρτήσει του λόγου d/l για απόσταση των πίσω επαφών 50μm.

Από τις καμπύλες του σχήματος 6.9 παρατηρούμε ότι για 50μm απόσταση των πίσω επαφών υπάρχει μεγαλύτερη διαφοροποίηση των αντιστάσεων σειράς των 3 δομών. Συγκεκριμένα, η R_s της διάταξης πίσω ένωσης είναι πλέον σημαντικά χαμηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη της δομής 2 ενώσεων, ενώ το φ/β στοιχείο που διαθέτει την ένωση στην μπροστινή επιφάνεια εμφανίζει αντίσταση σειράς τουλάχιστον διπλάσια σε σχέση με τις υπόλοιπες.

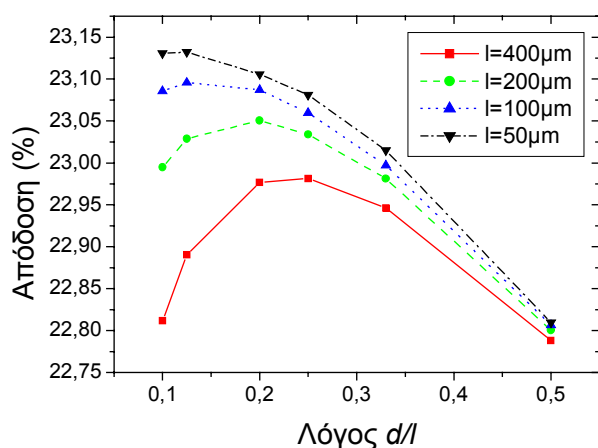
Το γενικό συμπέρασμα από όλη την προηγούμενη ανάλυση είναι ότι όταν ο εκπομπός και οι επαφές της βάσης βρίσκονται στην πίσω επιφάνεια, στην περίπτωση δηλαδή της διάταξης πίσω ένωσης, η αντίσταση σειράς είναι χαμηλότερη. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι φορείς μειονότητας και πλειονότητας κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση, δηλαδή προς την πίσω επιφάνεια. Το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση του φ/β στοιχείου όπου ο εκπομπός βρίσκεται στην μπροστινή επιφάνεια, όπου οι φορείς μειονότητας (ηλεκτρόνια) λόγω διάχυσης κινούνται προς τα πάνω ενώ οι οπές αντίστροφα, οπότε το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από την κίνηση των φορέων είναι υψηλότερο. Προφανώς η διάταξη των 2 ενώσεων αποτελεί συνδυασμό των προηγούμενων, οπότε η αντίσταση σειράς του παίρνει ενδιάμεσες τιμές. Συνεπώς, η ύπαρξη του πίσω εκπομπού βοηθά στη σημαντική μείωση της αντίστασης σειράς της διάταξης 2 ενώσεων συγκριτικά με την αντίστοιχη 1 (μπροστινής) ένωσης, γεγονός που καθιστά το φ/β στοιχείο 2 ενώσεων πιο κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτούνται

Κεφάλαιο 6

χαμηλές ωμικές απώλειες, δηλαδή κυρίως στα συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας.

6.3.4 Απόδοση

Οι καμπύλες του σχήματος 6.10 απεικονίζουν την απόδοση της διάταξης 2 ενώσεων σαν συνάρτηση του μεγέθους των πίσω επαφών με παράμετρο την απόστασή τους l . Παρατηρούμε ότι η απόδοση αυξάνει όσο μειώνεται το μέγεθος της πίσω επαφής για όλες τις τιμές των αποστάσεων που εξετάζονται, αρκεί ο λόγος d/l να είναι μεγαλύτερος από 0.2. Η περαιτέρω μείωση του λόγου d/l οδηγεί σε έντονη αύξηση της αντίστασης σειράς, όπως προέκυψε και από την ανάλυση του σχήματος 6.5. Όπως είναι αναμενόμενο, η απόδοση βελτιώνεται ενώ ο λόγος d/l όπου αυτή μεγιστοποιείται είναι λίγο χαμηλότερος για τις μικρότερες αποστάσεις l των επαφών.



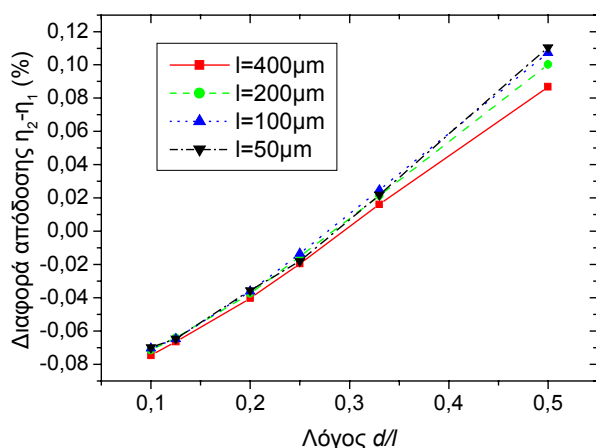
Σχήμα 6.10. Μέγιστη απόδοση ϕ/β στοιχείου 2 ενώσεων συναρτήσει του μεγέθους των πίσω επαφών και για διαφορετικές αποστάσεις l αυτών.

Το επόμενο διάγραμμα (σχήμα 6.11) εμφανίζει συγκριτικά την απόδοση των 2 διατάξεων (απόλυτη διαφορά απόδοσης του ϕ/β στοιχείου 2 ενώσεων σε σχέση με το αντίστοιχο μονής ένωσης) συναρτήσει του λόγου d/l με παράμετρο τις αποστάσεις l των πίσω επαφών.

Από το σχήμα 6.11, διαπιστώνεται ότι η διάταξη διπλής ένωσης εμφανίζει καλύτερη απόδοση όταν ο λόγος d/l λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από 0.25, δηλαδή αποδίδει καλύτερα όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της πίσω επαφής. Το αποτέλεσμα

Κεφάλαιο 6

αυτό μπορεί να εξηγηθεί μέσω της ανάλυσης των ενοτήτων 6.3.2 και 6.3.3. Συγκεκριμένα, για μικρούς λόγους d/l , το συγκριτικό πλεονέκτημα της διάταξης διπλής ένωσης που οφείλεται στη μικρότερη αντίσταση σειράς και το υψηλότερο ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι αμελητέο και αντισταθμίζεται από τις επανασυνδέσεις στον πίσω εκπομπό που οδηγούν σε μικρότερη τάση ανοιχτού κυκλώματος.



Σχήμα 6.11. Διαφορά απόδοσης (απόλυτη) της δομής 2 ενώσεων (η_2) σε σχέση με την αντίστοιχη μονής ένωσης (η_1) συναρτήσει του μεγέθους των πίσω επαφών και παράμετρο την απόστασή τους l .

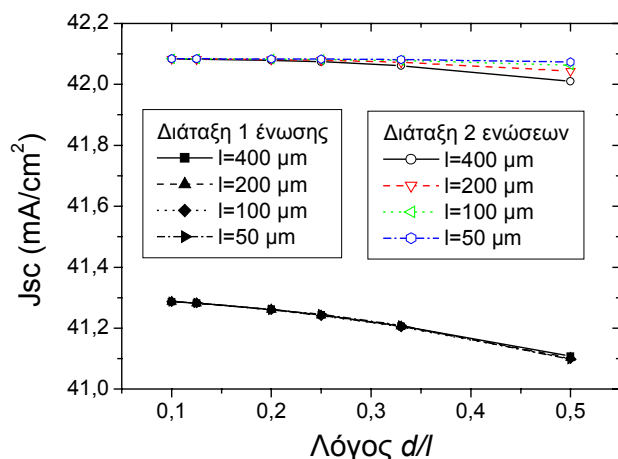
Να σημειωθεί πάντως ότι οι διαφορές στην απόδοση που παρουσιάζονται στο σχήμα 6.11 είναι πολύ μικρές που σημαίνει ότι όταν το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας στη βάση είναι μεγάλο σε σχέση με το πάχος της, οι δύο δομές είναι περίπου ισοδύναμες.

6.4 Προσομοίωση διατάξεων για $L_n=400\mu\text{m}$

Σε αντιστοιχία με την ενότητα 6.3, θα προχωρήσουμε συγκρίνουμε τις 2 διατάξεις για την περίπτωση όπου το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας στη βάση είναι το μισό σε σχέση με πριν και ίσο με το πάχος της, δηλαδή $400\mu\text{m}$, με σκοπό να διερευνηθεί σε μεγαλύτερο βαθμό ο ρόλος της πίσω ένωσης στη συλλογή φορέων. Έτσι παρουσιάζονται αποτελέσματα για το ρεύμα βραχυκυκλώματος, την τάση ανοιχτού κυκλώματος και την απόδοση, ενώ η αντίσταση σειράς δεν αναλύεται δεδομένου ότι παρατηρήθηκε από τις προσομοιώσεις ότι είναι ουσιαστικά ανεξάρτητη από το μήκος διάχυσης.

6.4.1 Ρεύμα βραχυκυκλώματος και τάση ανοιχτού κυκλώματος

Το ακόλουθο γράφημα (σχήμα 6.12) δείχνει το ρεύμα βραχυκυκλώματος των δύο διατάξεων συναρτήσει του λόγου d/l με παράμετρο την περίοδο l της κυψελίδας. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 6.3.2, για τη διάταξη των 2 ενώσεων παρατηρείται μικρή εξάρτηση του ρεύματος από το μέγεθος των πίσω επαφών κυρίως για μικρές περιόδους. Επίσης, η μείωση της τιμής του είναι μικρή παρόλο που η επανασύνδεση στη βάση είναι αισθητά αυξημένη λόγω του μικρότερου μήκους διάχυσης φορέων μειονότητας ενώ το αντίστοιχο ρεύμα της διάταξης μονής ένωσης έχει επηρεαστεί σε μεγαλύτερο βαθμό. Το συγκριτικό πλεονέκτημα στο ρεύμα βραχυκυκλώματος της διάταξης διπλής ένωσης οφείλεται στο γεγονός ότι φορείς που δημιουργούνται κοντά στην πίσω επιφάνεια έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να συλληχθούν λόγω της ύπαρξης του πίσω εκπομπού, ενώ στην περίπτωση της άλλης δομής επανασυνδέονται στη βάση σε μεγάλο ποσοστό λόγω του μικρού μήκους διάχυσης. Συνεπώς, ακόμη και για μικρούς λόγους d/l το ρεύμα βραχυκυκλώματος του φ/β στοιχείου μονής ένωσης δεν βελτιώνεται σημαντικά, αφού η αυξημένη επανασύνδεση στην περιοχή της βάσης μειώνει την πιθανότητα των φορέων να φτάσουν στην πίσω επιφάνεια.

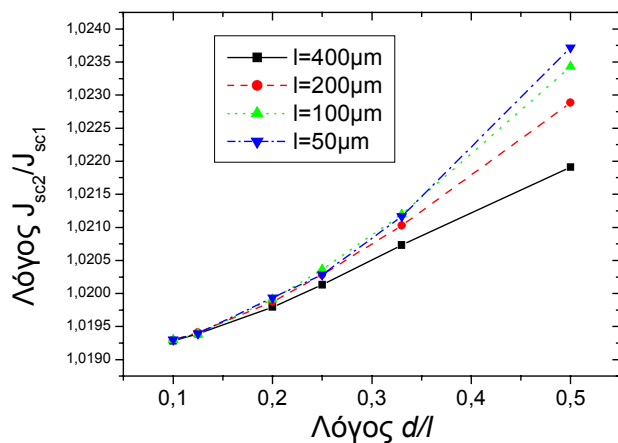


Σχήμα 6.12. Ρεύμα βραχυκυκλώματος συναρτήσει του λόγου d/l με παράμετρο την απόσταση των πίσω επαφών 1 για τη διάταξη μιας ένωσης (κλειστά σύμβολα) και 2 ενώσεων (ανοιχτά σύμβολα). Το μήκος διάχυσης φορέων μειονότητας στη βάση είναι $400 \mu\text{m}$.

Το επόμενο συγκριτικό διάγραμμα δείχνει το λόγο των ρευμάτων βραχυκυκλώματος του φ/β στοιχείου 2 ενώσεων προς το αντίστοιχο 1 ένωσης για τις ίδιες παραμέτρους της εικόνας 6.12. Όπως προκύπτει από τις καμπύλες του σχήματος 6.13, ο λόγος των ρευμάτων σε αυτή την περίπτωση είναι σημαντικά αυξημένος σε

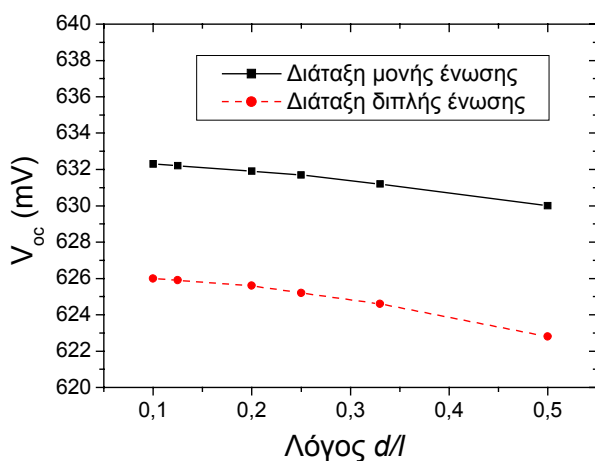
Κεφάλαιο 6

σχέση με τον αντίστοιχο του σχήματος 6.3, γεγονός που δικαιολογείται από την προηγούμενη ανάλυση. Για μικρούς λόγους d/l ο λόγος των 2 ρευμάτων πέφτει προς όφελος της διάταξης μονής ένωσης αλλά σε μικρότερο βαθμό από ότι στο σχήμα 6.3, λόγω της σημαντικά αυξημένης επανασύνδεσης στη βάση.



Σχήμα 6.13. Λόγος ρευμάτων βραχυκυκλώματος του ϕ/β στοιχείου διπλής ένωσης (J_{sc2}) προς το αντίστοιχο μονής ένωσης (J_{sc1}) συναρτήσει του λόγου d/l για διαφορετικές αποστάσεις των πίσω επαφών και μήκος διάχυσης στη βάση $400\mu\text{m}$.

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) των δύο διατάξεων εμφανίζεται στο σχήμα 6.14 συναρτήσει του λόγου d/l για δεδομένη απόσταση των πίσω επαφών l , αφού όπως αναφέρθηκε ήδη στην ενότητα 6.3.2 και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η V_{oc} είναι ουσιαστικά ανεξάρτητη από αυτή και για τις δύο διαφορετικές δομές.



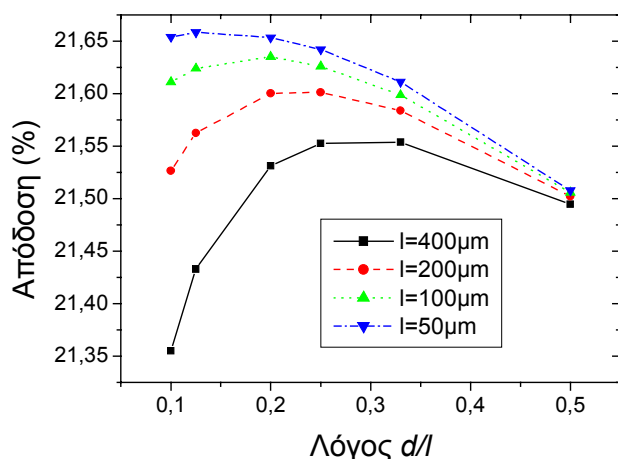
Σχήμα 6.14. Τάση ανοιχτού κυκλώματος των δύο διατάξεων συναρτήσει του λόγου d/l για δεδομένη απόσταση των πίσω επαφών και μήκος διάχυσης φορέων μειονότητας στη βάση $400\mu\text{m}$.

Κεφάλαιο 6

Παρατηρούμε ότι η τάση ανοιχτού κυκλώματος των 2 διατάξεων μειώνεται σημαντικά σε σχέση με τις αντίστοιχη περίπτωση όπου το μήκος διάχυσης είναι 800 μm . Επιπλέον και οι 2 καμπύλες παρουσιάζουν παρόμοια, μικρή εξάρτηση από το λόγο d/l , γεγονός αναμενόμενο αφού λόγω της αυξημένης επανασύνδεσης στη βάση οι απώλειες στην πίσω επιφάνεια δεν παίζουν τόσο σημαντικό ρόλο.

6.4.2 Μέγιστη απόδοση

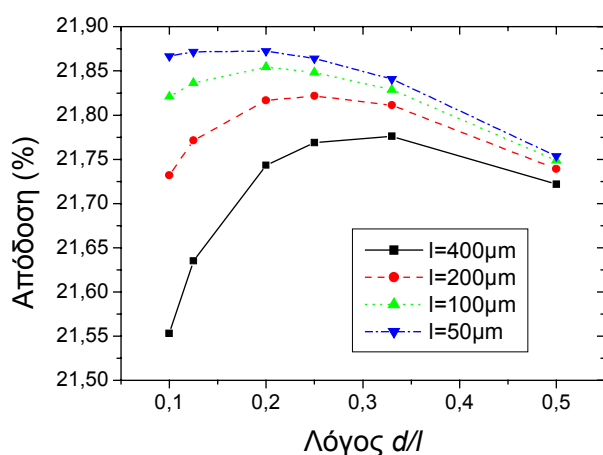
Τελειώνοντας αυτή την ενότητα, θα εξετάσουμε τη μέγιστη απόδοση των διατάξεων μονής και διπλής ένωσης που απεικονίζεται στα σχήματα 6.15 και 6.16 αντίστοιχα σαν συνάρτηση του λόγου d/l και για διαφορετικές αποστάσεις των πίσω επαφών.



Σχήμα 6.15. Μέγιστη απόδοση φ/β στοιχείου μονής ένωσης συναρτήσει του μεγέθους των πίσω επαφών για διαφορετικές αποστάσεις αυτών και μήκος διάχυσης στη βάση 400 μm .

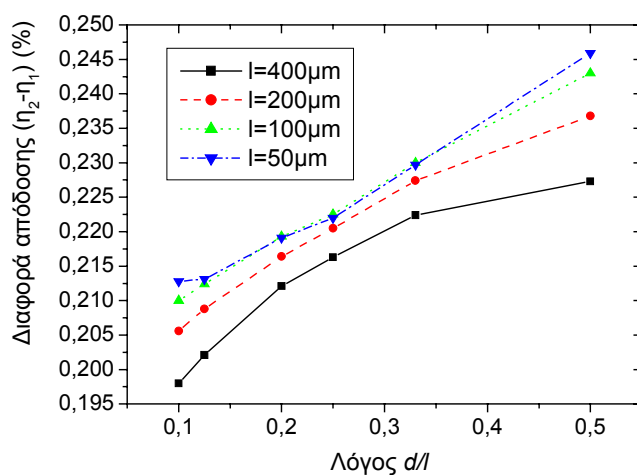
Από τις καμπύλες των σχημάτων προκύπτει ότι η μέγιστη απόδοση μεταβάλλεται περίπου με τον ίδιο τρόπο και για τις 2 δομές, ενώ ο βέλτιστος λόγος d/l είναι προφανώς χαμηλότερος από την περίπτωση που το μήκος διάχυσης στη βάση είναι διπλάσιο, ιδιαίτερα για τις 2 μεγαλύτερες αποστάσεις των πίσω επαφών όπου η αντίσταση σειράς (η οποία παραμένει ουσιαστικά ανεπηρέαστη από το μήκος διάχυσης) λαμβάνει υψηλότερες τιμές και επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την απόδοση των διατάξεων.

Κεφάλαιο 6



Σχήμα 6.16. Μέγιστη απόδοση ηλιακού κυττάρου διπλής ένωσης συναρτήσει του μεγέθους των πίσω επαφών για διαφορετικές αποστάσεις αυτών και μήκος διάχυσης στη βάση $400\mu\text{m}$.

Η σύγκριση των 2 δομών γίνεται στο ακόλουθο σχήμα όπου παρουσιάζεται η απόλυτη διαφορά στην απόδοση των δύο διατάξεων συναρτήσει του λόγου d/l για διαφορετικές αποστάσεις των πίσω επαφών.



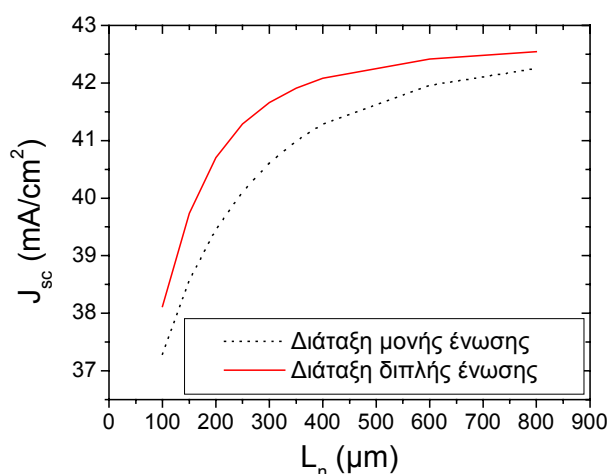
Σχήμα 6.17. Διαφορά απόδοσης (απόλυτη) της δομής 2 ενώσεων (η_2) σε σχέση με την αντίστοιχη μονής ένωσης (η_1) συναρτήσει του μεγέθους των πίσω επαφών και παράμετρο την απόστασή τους l .

Από την ανάλυση των καμπυλών του σχήματος 6.17 παρατηρείται ότι η απόδοση της διάταξης διπλής ένωσης είναι σε όλες τις περιπτώσεις καλύτερη από την αντίστοιχη

μιας ένωσης, αποτέλεσμα που μπορεί να αποδοθεί στην ύπαρξη της πίσω ένωσης που συμβάλλει στο φωτόρευμα, ενώ η μεταβολή της διαφοράς της συναρτήσεως του μεγέθους των πίσω επαφών έχει παρόμοια μορφή με τις καμπύλες του σχήματος 6.11.

6.5 Γενική επίδραση του μήκους διάχυσης στις διατάξεις σημειακής επαφής

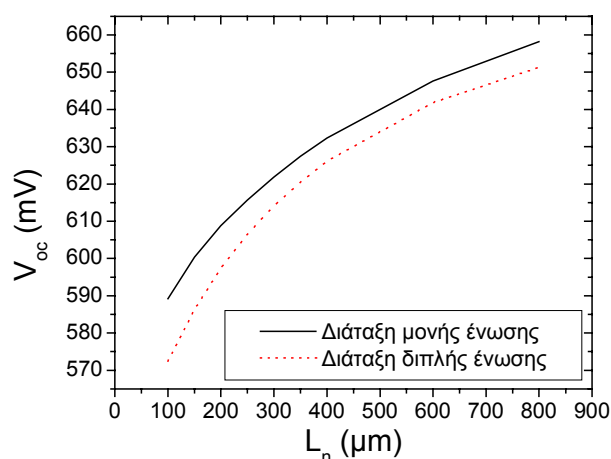
Στις ενότητες 6.3 και 6.4 εξετάστηκαν διεξοδικά οι διαφορετικές δομές σημειακών επαφών θεωρώντας στις προσομοιώσεις 2 διαφορετικά μήκη διάχυσης φορέων μειονότητας στη βάση, όπου στη μια περίπτωση η τιμή του ήταν διπλάσια του πάχους της βάσης, ενώ στην άλλη ίση. Σε αυτό το τμήμα θα μελετηθεί γενικά σαν παράμετρος στα βασικά μεγέθη των υπό μελέτη διατάξεων, δηλαδή το ρεύμα βραχυκυκλώματος, τάση ανοιχτού κυκλώματος και την μέγιστη απόδοση. Στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις η απόσταση των πίσω επαφών θεωρείται δεδομένη (50μm) ενώ το ποσοστό κάλυψης της πίσω επιφάνειας από αυτές είναι 1%, με σκοπό την επίτευξη συνδυασμού σχετικά χαμηλής αντίστασης σειράς και σχεδόν αμελητέες επανασυνδέσεις στην πίσω επιφάνεια, δεδομένου ότι το οξείδιο θεωρείται ιδανικό. Το πάχος της βάσης λαμβάνεται το ίδιο με τις προηγούμενες ενότητες, δηλαδή 400μm. Το ακόλουθο σχήμα παρουσιάζει τη μεταβολή του ρεύματος βραχυκυκλώματος των 2 διατάξεων συναρτήσεως του μήκους διάχυσης στη βάση.



Σχήμα 6.18. Ρεύμα βραχυκυκλώματος των δύο διατάξεων συναρτήσεως του μήκους διάχυσης φορέων μειονότητας στη βάση, όπου το πάχος της είναι 400μm.

Από τη σύγκριση των καμπυλών του σχήματος 6.18 παρατηρούμε ότι το ρεύμα της διάταξης 2 ενώσεων παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητο όσο το μήκος διάχυσης είναι μεγαλύτερο από το πάχος της βάσης, ενώ όταν αυτό μειωθεί κάτω από τα 300 μm , τότε το J_{sc} ελαττώνεται ραγδαία. Αντίθετα, το ρεύμα βραχυκυκλώματος της δομής 1 ένωσης είναι σημαντικά πιο ευαίσθητο στη μεταβολή του L_n , και προφανώς πάντα χαμηλότερο από το αντίστοιχο της δομής 2 ενώσεων. Ένα άλλο στοιχείο που μπορεί να αναφερθεί είναι ότι για πολύ χαμηλά ή πολύ υψηλά μήκη διάχυσης τα ρεύματα των 2 διατάξεων είναι παραπλήσια. Έτσι, όταν το μήκος διάχυσης είναι μεγάλο που υποδηλώνει χαμηλό ποσοστό επανασύνδεσης στη βάση, σε συνδυασμό με τις ελαχιστοποιημένες απώλειες στην πίσω επιφάνεια δίνει τη δυνατότητα αποτελεσματικής συλλογής φορέων και για τη δομή μονής ένωσης. Αντίθετα, όταν το L_n είναι πολύ χαμηλό, οι επανασυνδέσεις φορέων στη βάση είναι τόσο μεγάλες που σημαίνει ότι σχεδόν όλοι δημιουργούνται κοντά στην μπροστινή επιφάνεια, δηλαδή ο πίσω εκπομπός συλλέγει πολύ μικρό ρεύμα.

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος των δύο διατάξεων συναρτήσει του μήκους διάχυσης στη βάση προβάλλεται στο σχήμα 6.19.

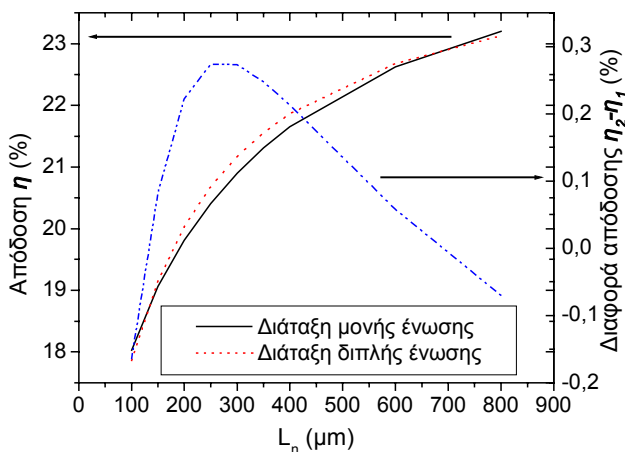


Σχήμα 6.19. Τάση ανοιχτού κυκλώματος των δύο διατάξεων συναρτήσει του μήκους διάχυσης φορέων μειονότητας στη βάση, όπου το πάχος της είναι 400 μm .

Στην περίπτωση αυτή, η V_{oc} των δύο δομών παρουσιάζει ουσιαστικά την ίδια εξάρτηση από το μήκος διάχυσης για ένα μεγάλο εύρος μεταβολής του. Η εικόνα αυτή αλλάζει για πολύ χαμηλές τιμές του L_n , όπου παρατηρείται μια απότομη πτώση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος της διάταξης δύο ενώσεων σε σχέση με την αντίστοιχη μιας ένωσης. Σε αυτή την περίπτωση, επειδή το ρεύμα που συλλέγει ο πίσω εκπομπός είναι μικρό, η τάση για την οποία αυτό αλλάζει πρόσημο και δρα ανταγωνιστικά στο

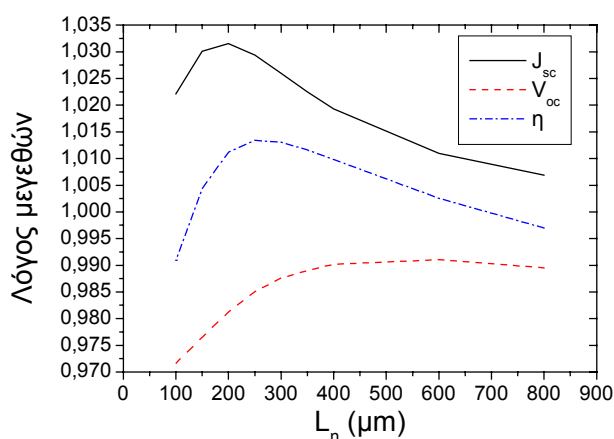
αντίστοιχο του μπροστινού εκπομπού, όπως διαπιστώθηκε στο σχήμα 6.1 εμφανίζεται πολύ νωρίς, με αποτέλεσμα η V_{oc} του στοιχείου να είναι χαμηλή.

Στο σχήμα 6.20, η μια καμπύλη εμφανίζει την ποσοστιαία απόδοση των 2 στοιχείων όταν μεταβάλλεται το μήκος διάχυσης (αριστερός άξονας), ενώ στο δεξί άξονα η άλλη καμπύλη παρουσιάζει την αντίστοιχη διαφορά των αποδόσεων για τις δομές αυτές. Παρατηρούμε ότι το φ/β στοιχείο των 2 ενώσεων είναι καλύτερο για μήκη διάχυσης περίπου ίσα ή και λίγο μικρότερα από το πάχος της βάσης με το μέγιστο της διαφοράς να παρατηρείται για L_n κοντά στα 300 μm , ενώ αντίθετα η άλλη διάταξη επωφελείται πολύ από τα μεγάλα μήκη διάχυσης λόγω των μειωμένων επανασυνδέσεων στη βάση και στην πίσω επιφάνεια. Επίσης, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι ακόμη και για μήκος διάχυσης 100 μm (1/4 του πάχους της βάσης) οι αποδόσεις των 2 διατάξεων παραμένουν κοντά στο 18%, τιμή ικανοποιητική που οφείλεται στο γεγονός ότι οι περισσότεροι φορείς δημιουργούνται σε μικρό βάθος, άρα συλλέγονται αποτελεσματικά από τη μπροστινή ένωση και μικρό ποσοστό αυτών επανασυνδέεται. Από την άλλη πλευρά, σε κάθε περίπτωση η διαφορά των αποδόσεων των διαφορετικών δομών δεν ξεπερνάει το 0.3 %, που σημαίνει ότι είναι περίπου ισοδύναμες.



Σχήμα 6.20. Μέγιστη απόδοση των δύο διατάξεων και διαφορά απόδοσης (απόλυτη) της δομής διπλής ένωσης (η_2) μείον την αντίστοιχη μονής ένωσης (η_1) συναρτήσει του μήκους διάχυσης φορέων μειονότητας στη βάση για πάχος αυτής 400 μm .

Τέλος, κλείνοντας αυτή την ενότητα, στο σχήμα 6.21 παρουσιάζεται για άμεση σύγκριση ο λόγος της διάταξης διπλής ένωσης προς την αντίστοιχη μιας ένωσης για κάθε ένα από τα μεγέθη που εξετάστηκαν πριν συναρτήσει του μήκους διάχυσης.

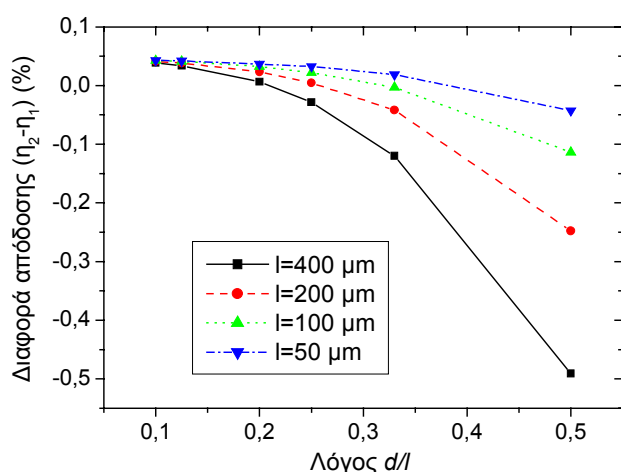


Σχήμα 6.21. Λόγος ρευμάτων βραχυκυκλώματος (J_{sc}), τάσεων ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) και απόδοσης (η) του φ/β στοιχείου διπλής ένωσης προς το αντίστοιχο μιας ένωσης συναρτήσει του μήκους διάχυσης και για πάχος βάσης 400 μm .

Παρατηρούμε ότι ο λόγος των ρευμάτων βραχυκυκλώματος αυξάνει μονότονα όσο μειώνεται το μήκος διάχυσης και φτάνει σε ένα μέγιστο για L_n περίπου 250 μm , ενώ η περαιτέρω μείωσή του οδηγεί σε απότομη πτώση του λόγου αυτού αφού η ισχυρή επανασύνδεση στη βάση δεν επιτρέπει στον πίσω εκπομπό να παράγει ικανοποιητικό ρεύμα. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν το μήκος διάχυσης είναι μεγάλο (μεγαλύτερο από το πάχος της βάσης) το ρεύμα της διάταξης μονής ένωσης τείνει να εξισωθεί με το αντίστοιχο της διάταξης διπλής ένωσης, όπως παρατηρήθηκε και στο σχήμα 6.16. Αντίστοιχα, ο λόγος των τάσεων ανοιχτού κυκλώματος των 2 διατάξεων παραμένει σταθερός για μήκη διάχυσης μεγαλύτερα από το πάχος της βάσης, όπως συζητήθηκε νωρίτερα, όπου η V_{oc} της δομής των 2 ενώσεων ισούται με το 98.5% της αντίστοιχης 1 ένωσης. Από εκεί και πέρα αρχίζει να πέφτει και όταν το μήκος διάχυσης φτάσει περίπου τα $\frac{3}{4}$ του πάχους της βάσης (300 μm) τότε η πτώση της γίνεται πιο έντονη. Συνεπώς, για αυτή περίπου την τιμή του L_n το φ/β στοιχείο δύο ενώσεων εμφανίζει το μεγαλύτερο συγκριτικό πλεονέκτημα στην απόδοση, όπως προκύπτει και από το σχήμα 6.20, ενώ παραμένει καλύτερη από την άλλη δομή για μήκη διάχυσης από 150 μm ως 600 μm . Αυτά τα αποτελέσματα συμφωνούν και με την ανάλυση των Van Kerschaver et al. [1], όπου στη συγκεκριμένη εργασία εξετάζονται δομές με 2 διαφορετικά πάχη.

6.6 Ανάλυση της δομής 2 ενώσεων για φωτισμό από την πίσω επιφάνεια

Μια σημαντική εφαρμογή που έχει προταθεί για τη διάταξη διπλής ένωσης είναι η περίπτωση όπου το στοιχείο φωτίζεται και στις 2 επιφάνειες [5]. Η ύπαρξη της δεύτερης ένωσης δίνει συγκριτικό πλεονέκτημα σε σχέση με την αντίστοιχη διάταξη μιας ένωσης λόγω της αποτελεσματικότερης συλλογή φορέων. Για αυτό το λόγο έχει ενδιαφέρον να εξετάσουμε την απόδοση της διάταξης όταν φωτίζεται από την πίσω επιφάνεια και να δούμε πόσο μεταβάλλεται σε σχέση με τη συνήθη περίπτωση φωτισμού από μπροστά. Οι προσομοιούμενες δομές έχουν μήκος διάχυσης φορέων μειονότητας στη βάση 800μm και πάχος 400μm, ενώ για λόγους απλούστευσης έχει θεωρηθεί μηδενική σκίαση εξαιτίας των ηλεκτροδίων στις 2 επιφάνειες.



Σχήμα 6.22. Διαφορά απόδοσης (απόλυτη) του φ/β στοιχείου διπλής ένωσης όταν φωτίζεται από την πίσω επιφάνεια (η_2) μείον την αντίστοιχη όταν φωτίζεται από την μπροστινή (η_1) συναρτήσει του λόγου d/l και των αποστάσεων των πίσω επαφών.

Το σχήμα 6.22 παρουσιάζει την διαφορά στην απόδοση (απόλυτη) του φ/β στοιχείου διπλής ένωσης όταν φωτίζεται από την πίσω πλευρά μείον την αντίστοιχη όταν για φωτισμό από την μπροστινή πλευρά, συναρτήσει του λόγου d/l για διαφορετικές αποστάσεις των πίσω επαφών. Όπως είναι αναμενόμενο, η απόδοση της διάταξης μεταβάλλεται ανεπαίσθητα με το φωτισμό, δηλαδή συμπεριφέρεται περίπου συμμετρικά, είτε φωτίζεται από την μπροστινή επιφάνεια είτε από την πίσω. Παρόλα αυτά υπάρχει μια μικρή διαφοροποίηση, όπου για μικρούς λόγους d/l (μικρότερους από 0.25) το φ/β στοιχείο υπερτερεί ελαφρά (μέχρι 0.043%) όταν φωτίζεται από την πίσω επιφάνεια. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στη μικρότερη αντίσταση σειράς, δεδομένου ότι

το μεγαλύτερο ποσοστό των παραγόμενων φορέων διανύουν μικρότερη απόσταση για να φτάσουν στις επαφές. Επίσης για μικρές αποστάσεις των επαφών η διάταξη επωφελείται όταν φωτίζεται από την πίσω επιφάνεια, αν και η μέγιστη διαφορά φτάνει περίπου την ίδια τιμή για όλες όταν ο λόγος d/l γίνει 0.1.

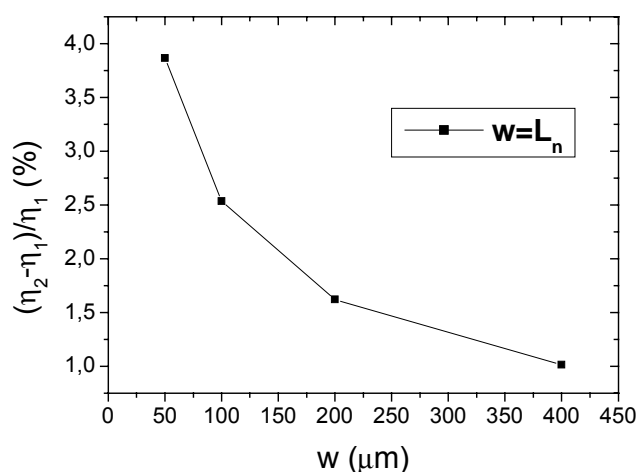
Τέλος, παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνει ο λόγος d/l , δηλαδή αυξάνει το ποσοστό κάλυψης της πίσω επιφάνειας από τις επαφές η απόδοση του φ/β στοιχείου πέφτει αισθητά όταν φωτίζεται από πίσω, γεγονός που οφείλεται στην αυξημένη επιφανειακή επανασύνδεση στην περιοχή των πίσω επαφών.

6.7 Σύγκριση των δομών 1 και 2 ενώσεων για διαφορετικό πάχος βάσης

Δεδομένου ότι η διάταξη των 2 ενώσεων έχει τη δυνατότητα συλλογής φορέων στην πίσω επιφάνεια είναι αναμενόμενο ότι όσο πιο λεπτή είναι η βάση του στοιχείου, τόσο μεγαλύτερη είναι η συμμετοχή του πίσω εκπομπού στην παραγωγή ρεύματος. Επιπλέον, η τάση της βιομηχανίας είναι να χρησιμοποιεί όλο και πιο λεπτά δισκία για την παραγωγή φ/β στοιχείων για εξοικονόμηση υλικού που συνεπάγεται σε μείωση του τελικού κόστους παραγωγής τους. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η σχετική διαφορά απόδοσης των διατάξεων 1 και 2 ενώσεων συναρτήσει του πάχους της βάσης υπό την θεώρηση ότι $w=L_n$. Η καμπύλη έχει υπολογιστεί για μικρή απόσταση των πίσω επαφών (50 μm) και λόγο $d/l=0.2$ όπου επιτυγχάνεται συνδυασμός χαμηλής αντίστασης σειράς και επιφανειακών επανασυνδέσεων.

Όπως παρατηρούμε από το σχήμα 6.23, όσο μειώνεται το πάχος της βάσης, η διαφορά απόδοσης υπέρ της δομής 2 ενώσεων αυξάνει, η οποία φτάνει περίπου το 4% για $w=50\mu\text{m}$. Σε αυτή την περίπτωση η πίσω ένωση συμβάλλει αποτελεσματικά στο φωτόρευμα, όπου ο συνδυασμός λεπτού πάχους και ιδιαίτερα χαμηλού μήκους διάχυσης ωφελεί την δομή 2 ενώσεων.

Όπως παρατηρούμε από το σχήμα 6.23, όσο μειώνεται το πάχος της βάσης, η διαφορά απόδοσης υπέρ της δομής 2 ενώσεων αυξάνει, η οποία φτάνει περίπου το 4% για $w=50\mu\text{m}$. Σε αυτή την περίπτωση η πίσω ένωση συμβάλλει αποτελεσματικά στο φωτόρευμα, όπου ο συνδυασμός λεπτού πάχους και ιδιαίτερα χαμηλού μήκους διάχυσης ωφελεί την δομή 2 ενώσεων.



Σχήμα 6.23. Διαφορά απόδοσης (σχετική) του φ/β στοιχείου 2 ενώσεων (η_2) μείον την αντίστοιχη της δομής 1 ένωσης (η_1) συναρτήσει του πάχους της βάσης w , για απόσταση των πίσω επαφών $l=50\mu\text{m}$ και λόγο $d/l=0.2$.

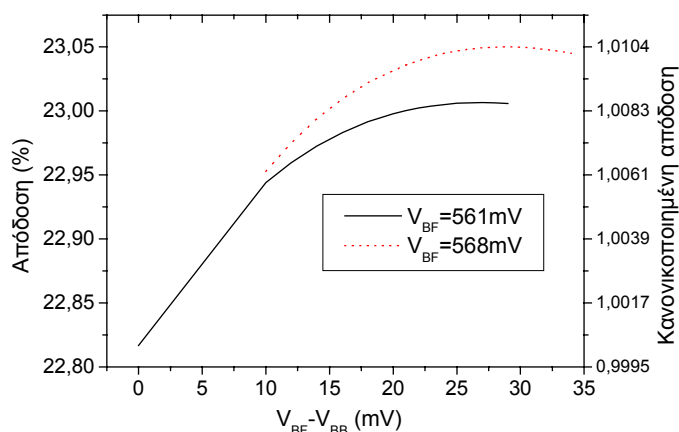
Η σχετικά αυξανόμενη απόδοση που παρουσιάζει η δομή 2 ενώσεων συγκριτικά με την αντίστοιχη μιας ένωσης που παρατηρήθηκε με την ελάττωση του πάχους της βάσης είναι μια ενδιαφέρουσα διαπίστωση, δεδομένου ότι η μελλοντική τάση της βιομηχανίας είναι να χρησιμοποιεί όλο και λεπτότερα δισκίδια για την κατασκευή φ/β στοιχείων, έτσι ώστε να μειώνεται το κόστος από την εξοικονόμηση υλικού, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως.

6.8 Μελέτη της δομής 2 ενώσεων υπό διαφορετικές τάσεις πόλωσης των εκπομπών

Οι αναλύσεις που διεξήχθησαν ως τώρα για τη δομή των 2 ενώσεων αφορούσαν ίδια τάση πόλωσης για τον μπροστινό και πίσω εκπομπό (βραχυκυκλωμένοι). Σε αυτό το τμήμα θα μελετήσουμε την επίδραση στην απόδοση της διάταξης στην περιοχή κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος, υποθέτοντας ότι οι τάσεις στις 2 ενώσεις διαφέρουν μεταξύ τους κατά ένα μικρό ποσό ΔV που κυμαίνεται σε μερικές δεκάδες mV. Με άλλα λόγια, θεωρούμε τη διάταξη ως στοιχείο τριών ακροδεκτών που θυμίζει τρανζίστορ. Στις καμπύλες που θα ακολουθήσουν η απόσταση των πίσω επαφών θεωρείται δεδομένη (400μm) όπως και το μέγεθός τους ($d=40\mu\text{m}$). Επιπλέον εξετάζεται και η περίπτωση που ο φωτισμός του φ/β στοιχείου γίνεται από την πίσω επιφάνεια.

Κεφάλαιο 6

Το σχήμα 6.24 απεικονίζει την απόδοση της διάταξης, θεωρώντας φωτισμό από την μπροστινή επιφάνεια και την τάση V_{BF} στην μπροστινή ένωση σταθερή στα 561mV (τιμή που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος στην περίπτωση όπου οι 2 ενώσεις είναι βραχυκυκλωμένες) και στα 568mV. Ο δεξιός άξονας έχει κανονικοποιηθεί ως προς την μέγιστη απόδοση της δομής όταν οι δύο εκπομποί είναι ενωμένοι.



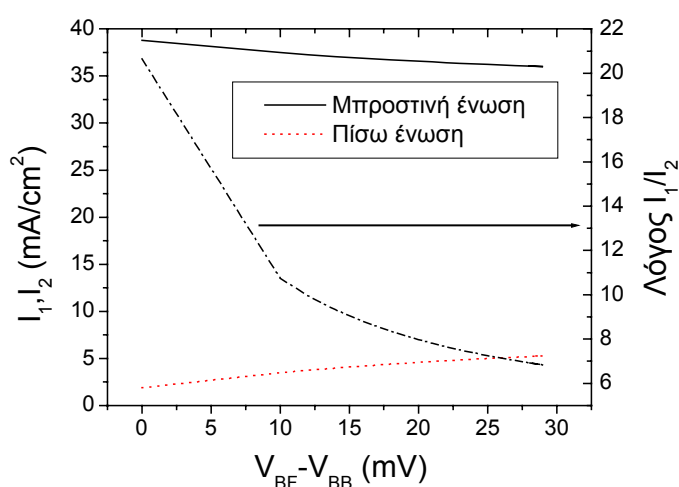
Σχήμα 6.24. Απόδοση της διάταξης διπλής ένωσης συναρτήσει της διαφοράς ΔV μεταξύ της τάσης της μπροστινής (V_{BF}) και της πίσω ένωσης (V_{BB}) με παράμετρο την V_{BF} για δεδομένη απόσταση των πίσω επαφών (400 μ m) και ποσοστό κάλυψης από αυτές (1%). Ο δεξιός άξονας δείχνει την απόδοση κανονικοποιημένη προς την αντίστοιχη μέγιστη όταν οι 2 ενώσεις έχουν την ίδια τάση (561mV).

Η μελέτη του σχήματος 6.24 δείχνει ότι η ελάττωση της τάσης στην πίσω ένωση μέχρι το ποσό των 30mV περίπου, αυξάνει τη μέγιστη απόδοση της διάταξης. Η βελτίωση αυτή είναι πιο έντονη αν ανέβει η τάση της μπροστινής ένωσης στα 568mV. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι μειώνοντας την τάση στην πίσω ένωση συγκριτικά με την μπροστινή, αυξάνεται το ρεύμα της πίσω ένωσης σε αντίθεση με το αντίστοιχο της μπροστινής, το οποίο πέφτει, με αποτέλεσμα να υπάρχει κατά κάποιον τρόπο ένας καταμερισμός των ρευμάτων. Αυτό το γεγονός έχει σαν αποτέλεσμα χαμηλότερες απώλειες ισχύος λόγω αντίστασης σειράς δεδομένης της γνωστής εξάρτησης των ωμικών απωλειών ισχύος από το τετράγωνο του ρεύματος.

Η ποιοτική ανάλυση της προηγούμενης παραγράφου μπορεί να ερμηνευτεί καλύτερα μέσω του σχήματος 6.25 το οποίο απεικονίζει τα ρεύματα των 2 ενώσεων όπως και το λόγο αυτών συναρτήσει της διαφοράς δυναμικού μεταξύ τους για δεδομένη τάση στην μπροστινή ένωση (561mV). Όπως είναι επόμενο, η μείωση κατά

Κεφάλαιο 6

μερικές δεκάδες mV της τάσης της πίσω ένωσης σε σχέση με την μπροστινή αυξάνει αισθητά το ρεύμα στην πίσω ένωση, ενώ αντίθετα το ρεύμα της μπροστινής ένωσης που είναι και το μεγαλύτερο μειώνεται ελαφρά. Συνεπώς ο λόγος των δύο ρευμάτων πέφτει μια τάξη μεγέθους ή και περισσότερο, δηλαδή υπάρχει μια τάση εξισορρόπησης. Σε αυτό το γεγονός οφείλεται η ελάττωση των ωμικών απωλειών όπως έχει ήδη αναφερθεί. Προφανώς αυτό ισχύει μέχρι κάποιο σημείο διότι από ένα σημείο και μετά το ρεύμα στην μπροστινή ένωση αρχίζει να πέφτει έντονα, οπότε η συνολική ισχύς μειώνεται.



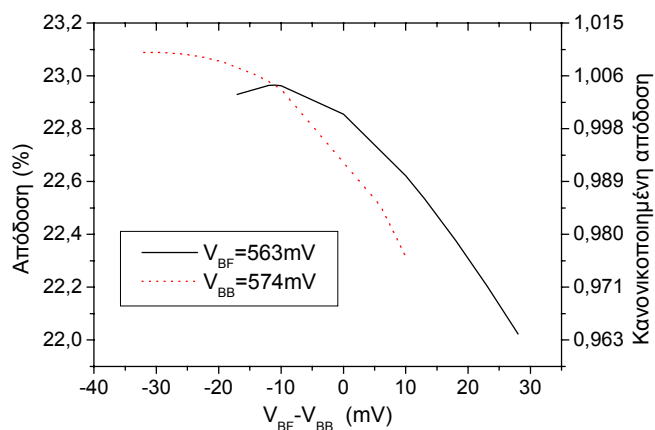
Σχήμα 6.25. Λόγος ρευμάτων της μπροστινής (I_1) προς το αντίστοιχο της πίσω ένωσης (I_2) και αντίστοιχα ρεύματα των δύο εκπομπών συναρτήσει της διαφοράς δυναμικού μεταξύ τους για την ίδια διάταξη της εικόνας 6.20. Η τάση στην μπροστινή ένωση είναι 561mV.

Το επόμενο σχήμα εμφανίζει την μεταβολή της απόδοσης της διάταξης με αντίστοιχο τρόπο όπως στο 6.25 στην περίπτωση φωτισμού από την πίσω επιφάνεια. Στη μία καμπύλη θεωρούμε την τάση στην μπροστινή ένωση σταθερή στα 563mV (τιμή που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος όταν οι ενώσεις είναι στο ίδιο δυναμικό) ενώ στην άλλη το δυναμικό της πίσω ένωσης είναι λίγο υψηλότερο (574mV).

Παρατηρούμε ότι σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, η απόδοση αυξάνεται όταν το δυναμικό της πίσω ένωσης είναι υψηλότερο σε σχέση με της μπροστινής και φτάνει σε μέγιστο όταν η διαφορά τους είναι περίπου 30mV, όπως και στο σχήμα 6.25. Αυτή η διαπίστωση συμφωνεί και με την προηγούμενη ανάλυση αφού

Κεφάλαιο 6

εξαιτίας του φωτισμού στη πίσω επιφάνεια το περισσότερο ρεύμα συλλέγεται από την πίσω ένωση. Επίσης, το μέγιστο κέρδος στην απόδοση είναι στα επίπεδα του σχήματος 6.24, οπότε συμπεραίνουμε ότι η διάταξη συμπεριφέρεται συμμετρικά ως προς την επιφάνεια που φωτίζεται.



Σχήμα 6.26. Απόδοση της διάταξης διπλής ένωσης συναρτήσει της διαφοράς ΔV μεταξύ της τάσης της μπροστινής (V_{BF}) και της πίσω ένωσης (V_{BB}) με παράμετρο την V_{BF} (συνεχής καμπύλη) και την V_{BB} (διακεκομμένη καμπύλη) για δεδομένη απόσταση των πίσω επαφών (400 μ m) και ποσοστό κάλυψης από αυτές (1%). Ο δεξιός άξονας δείχνει την απόδοση κανονικοποιημένη προς την αντίστοιχη μέγιστη όταν οι 2 ενώσεις έχουν την ίδια τάση (563mV).

Κλείνοντας, θα αναφέρουμε σαν γενικό συμπέρασμα ότι με την κατάλληλη επιλογή δυναμικών στις 2 ενώσεις της διάταξης μπορούμε να επιτύχουμε μια σχετική αύξηση της απόδοσης του φ/β στοιχείου που μπορεί να φτάσει περίπου το 1%. Έτσι, για κάθε διάταξη διπλής ένωσης θεωρούμενη ως στοιχείο τριών ακροδεκτών έχουμε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης της απόδοσής της, η λύση του οποίου δίνει τα κατάλληλα δυναμικά στις ενώσεις που μπορούν να επιτευχθούν με κατάλληλη ρύθμιση του σημείου λειτουργίας του στοιχείου.

6.9 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο μελετήθηκε μέσω εξομοιώσεων η διάταξη 2 ενώσεων, και παράλληλα συγκρίθηκε ως προς την απόδοση και τα υπόλοιπα βασικά μεγέθη με την αντίστοιχη μιας ένωσης η οποία εξετάστηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Διαπιστώθηκε ότι η πίσω ένωση βοηθάει αποτελεσματικά στη συλλογή φορέων,

κυρίως όταν το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας είναι περίπου ίσο με το πάχος της βάσης ή και λίγο μικρότερο. Αυτό φαίνεται στο ρεύμα βραχυκυκλώματος που είναι αισθητά βελτιωμένο συγκριτικά με το αντίστοιχο του φ/β στοιχείου μιας ένωσης. Επίσης η αντίσταση σειράς του λαμβάνει συγκριτικά σημαντικά μικρότερες τιμές κυρίως για σχετικά μεγάλες διαστάσεις των πίσω επαφών, ακόμα χαμηλότερες και από την μονοδιάστατη δομή, γεγονός που την καθιστά ιδανικότερη επιλογή για συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας, δεδομένου ότι σε αυτές τις εφαρμογές οι ωμικές απώλειες είναι από τους κυρίαρχους παράγοντες μείωσης της απόδοσης των στοιχείων. Αντίθετα, η τάση ανοιχτού κυκλώματος της διάταξης είναι μικρότερη, γεγονός που οφείλεται στις επανασυνδέσεις στον πίσω εκπομπό. Έτσι η διαφορά στην απόδοση των 2 διατάξεων εξαρτάται κυρίως από το μήκος διάχυσης στη βάση, την απόσταση και το μέγεθος των πίσω επαφών. Συγκεκριμένα, για μεγάλα ή πολύ μικρά μήκη διάχυσης στη βάση η διάταξη μιας ένωσης παρουσιάζει καλύτερη απόδοση, ενώ στις άλλες περιπτώσεις συμβαίνει το αντίθετο. Για τις παραμέτρους που εξετάσαμε στις προηγούμενες παραγράφους, το μέγιστο κέρδος στην απόδοση συγκριτικά με την διάταξη μιας ένωσης ήταν περίπου 4% (σχετικό) θεωρώντας λεπτό πάχος βάσης και μικρό μήκος διάχυσης ($w=L_n=50\mu\text{m}$). Το κέρδος αυτό αναμένεται να είναι ακόμα μεγαλύτερο όταν η βάση είναι λιγότερο νοθευμένη, δεδομένου ότι σε αυτή την περίπτωση η αντίσταση σειράς αυξάνεται και μπορεί να επηρεάσει καθοριστικά την απόδοση των διατάξεων, όπως διαπιστώθηκε από την ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι όταν οι 2 ενώσεις βρίσκονται υπό διαφορετικό δυναμικό (μερικές δεκάδες mV) κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος του φ/β στοιχείου, η απόδοση αυξάνει αισθητά. Αυτή η ενδιαφέρουσα παρατήρηση θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια πιο αποτελεσματική αξιοποίηση της διάταξης ως στοιχείο τριών ακροδεκτών.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Van Kerschaver E., Zechner C. και Dicker J., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 47, 2000, σελ. 711.
- [2] Swanson R. M., Beckwith S. K., Crane R. A., Eades W. D., Kwark Y. H., Sinton R. A. και Swirhun S. E., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 31, 1984, σελ. 661.
- [3] King R. R., Sinton R. A. και Swanson R. M., *20th IEEE PV Spec. Conf.*, Las Vegas, USA, 1988, σελ. 538.
- [4] Mulligan W. P., Rose D. H., Cudzinovie M. J., De Ceuster D. M., McIntosh K. R., Smith D. D. και Swanson R. M., *19th EPV Sol. Energy Conf.*, Paris, France, 2004, σελ. 387.
- [5] Warabisako T., Matsukuma K., Kokunai S., Kida Y., Uematsu T. και Yagi H., *23rd IEEE PV Spec. Conf.*, Louisville, USA, 1993, σελ. 248.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ ΜΟΝΗΣ ΚΑΙ ΔΙΠΛΗΣ ΕΝΩΣΗΣ – ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

7.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα τρία κεφάλαια περιγράφηκε αναλυτικά το θεωρητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για την προσομοίωση των δύο διαφορετικών διατάξεων και στη συνέχεια παρουσιάστηκαν αποτελέσματα από τις εξομοιώσεις.

Το κεφάλαιο αυτό αφορά το πρώτο μέρος του πειραματικού σκέλους της διατριβής, όπου θα περιγραφεί η σχεδίαση των διατάξεων καθώς και τα στάδια κατασκευής τους. Η βασική κατεύθυνση της σχεδίασης είναι η υλοποίηση δομών με χαρακτηριστικά πολύ κοντά σε αυτά που μελετήθηκαν στη θεωρητική ανάλυση με σκοπό τον έλεγχο της ορθότητας του μοντέλου, δίνοντας έμφαση στην αντίσταση σειράς των στοιχείων.

Η κατασκευή των φ/β στοιχείων των δύο τύπων έγινε χρησιμοποιώντας τις εγκαταστάσεις και τον εξοπλισμό του καθαρού χώρου του ινστιτούτου μικροηλεκτρονικής που βρίσκεται στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε Δημόκριτος, ενώ η σχεδίαση των μάσκων οπτικής λιθογραφίας πραγματοποιήθηκε στους σταθμούς εργασίας του τμήματος σχεδιασμού ολοκληρωμένων κυκλωμάτων χρησιμοποιώντας το πακέτο λογισμικού Mentor Graphics [1]. Οι μάσκες χρωμίου παραγγέλθηκαν στην εταιρεία Photronics [2]. Παρόλο που τα στάδια λιθογραφίας αποφεύγονται όσο το δυνατό περισσότερο στη βιομηχανία κατασκευής φ/β στοιχείων επειδή είναι πολύπλοκα και οδηγούν σε υψηλό κόστος κατασκευής, η μεγάλη ακρίβεια που παρέχουν στην υλοποίηση μικρών δομών είναι απαραίτητη για τις μελετούμενες διατάξεις.

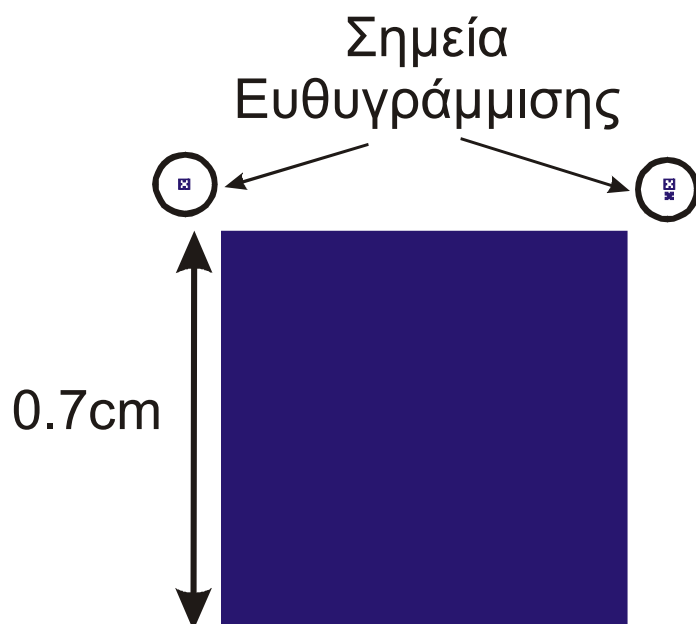
7.2 Περιγραφή βασικής σχεδίασης δομής μιας ένωσης- Μπροστινή επιφάνεια

Κάθε μια από τις πειραματικές φ/β διατάξεις που σχεδιάστηκαν καταλαμβάνουν επιφάνεια διαστάσεων 0.9 x 0.9 cm, ενώ το κενό διαχωρισμού μεταξύ δύο διαφορετικών στοιχείων είναι 200μm. Έτσι, ένα δισκίο 4 ιντσών διαμέτρου περιέχει 56 τέτοια στοιχεία. Επιπλέον, είναι προφανές ότι οι μάσκες για τις διαδικασίες

λιθογραφίας της μπροστινής επιφάνειας είναι κοινές για τις διατάξεις 1 και 2 ενώσεων δεδομένου ότι δεν διαφέρουν σε αυτή την περιοχή.

7.2.1 Διαμόρφωση εκπομπού

Η πρώτη μάσκα λιθογραφίας της μπροστινής επιφάνειας ορίζει την περιοχή σχηματισμού του εκπομπού. Αυτή είναι ένα τετράγωνο διαστάσεων 0.7x0.7cm όπως απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα, στην οποία γίνεται νόθευση με Φώσφορο που διαμορφώνει την ένωση, όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Να σημειωθεί ότι η πραγματική μάσκα είναι το αρνητικό του σχήματος 7.1, δηλαδή οι χρωματισμένες περιοχές του είναι διαφανείς και οι υπόλοιπες καλύπτονται από χρώμιο.



Σχήμα 7.1. Τμήμα μάσκας (αρνητικό) για οπτική λιθογραφία που απεικονίζει το παράθυρο σχηματισμού του μπροστινού εκπομπού ενός φ/β στοιχείου.

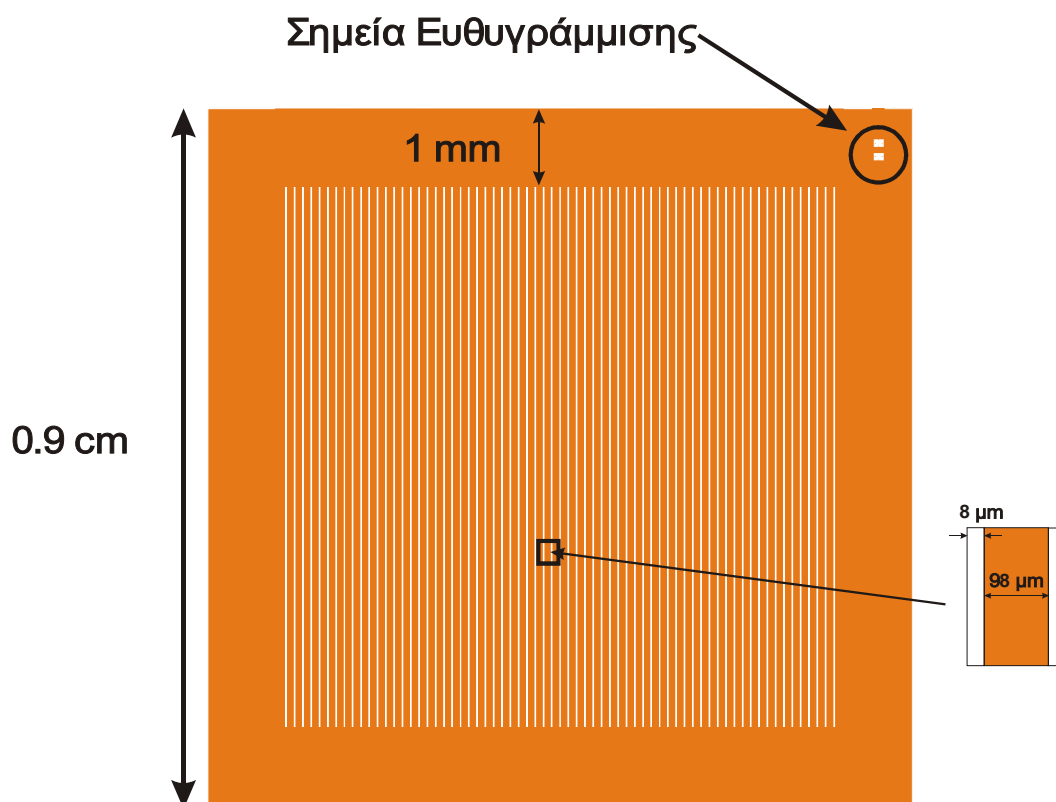
Δεδομένου ότι η μάσκα του σχήματος 7.1 ορίζει την πρώτη μπροστινή λιθογραφία, έχει πρόσθετα σημεία ευθυγράμμισης και από τις 2 πλευρές που χρησιμεύουν σαν οδηγοί για την αντίστοιχη μάσκα της πίσω επιφάνειας του δισκίου. Αναλυτικά, τα σημεία ευθυγράμμισης είναι κατάλληλα σχήματα τα οποία επιτρέπουν τη σωστή τοποθέτηση των διαφορετικών επιπέδων μασκών ως προς την οριζόντια και κάθετη διεύθυνση έτσι ώστε να μην υπάρχει σφάλμα στις διαδοχικές λιθογραφίες. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μάσκας του σχήματος 7.1 είναι ότι διαθέτει σημεία ευθυγράμμισης στην πάνω αριστερή και δεξιά περιοχή όπως αναφέρθηκε πριν, μερικά

από τα οποία χρησιμοποιούνται ως αναφορά για την ευθυγράμμιση με την μάσκα που αφορά την επόμενη μπροστινή λιθογραφία, ενώ τα υπόλοιπα σχετίζονται με την λιθογραφία της πίσω επιφάνειας.

7.2.2 Παράθυρα νόθευσης κάτω από τα μπροστινά ηλεκτρόδια

Το επόμενο στάδιο λιθογραφίας της μπροστινής επιφάνειας είναι η δημιουργία λεπτών ανοιγμάτων στη θέση που θα δημιουργηθούν τα μπροστινά ηλεκτρόδια με σκοπό να ακολουθήσει μια επιπλέον νόθευση (με Αρσενικό ή Φώσφορο) για να δημιουργηθεί μια περιοχή τύπου n^{++} . Έτσι, ο εκπομπός που προκύπτει θα είναι δύο σταδίων, όπου όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 2.3.1.5, με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα να ελαχιστοποιηθεί το ρεύμα επανασύνδεσής του μέσω κατάλληλων προφίλ νόθευσης.

Το σχήμα 7.2 απεικονίζει την μάσκα που ορίζει τα παράθυρα που καθορίζουν το δεύτερο στάδιο νόθευσης. Όπως φαίνεται στη λεπτομέρεια του σχήματος, το πλάτος των ανοιγμάτων είναι $8\mu\text{m}$ και η απόσταση αυτών $98\mu\text{m}$.



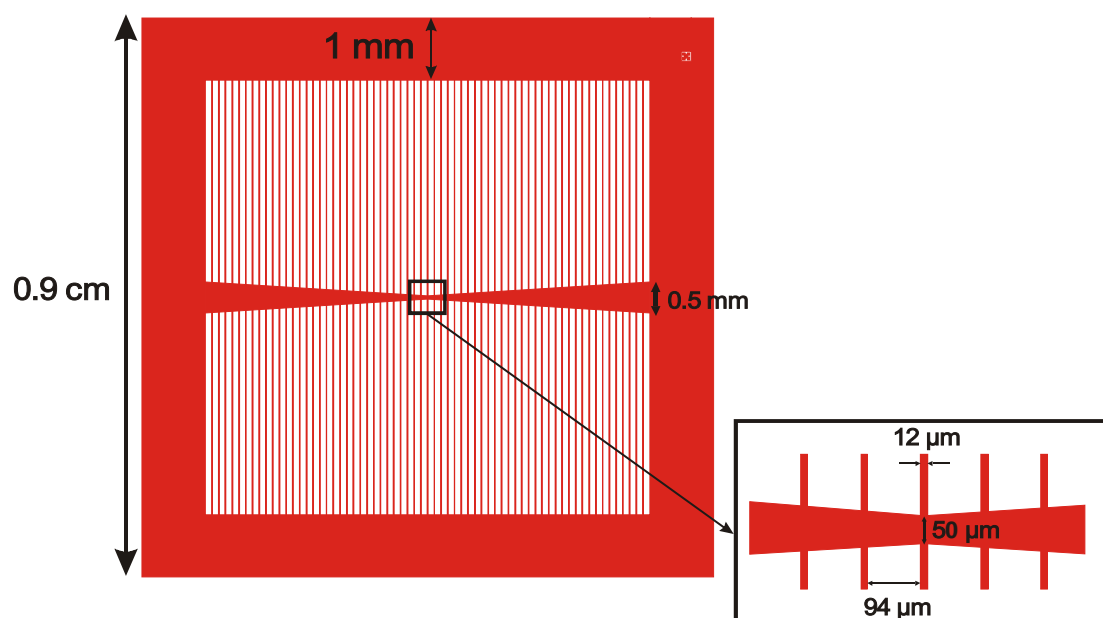
Σχήμα 7.2. Τμήμα μάσκας οπτικής λιθογραφίας που απεικονίζει το παράθυρο για το δεύτερο στάδιο νόθευσης του εκπομπού ενός φ/β στοιχείου.

Κεφάλαιο 7

Το πλάτος των ανοιγμάτων στη μάσκα είναι μικρότερο από το αντίστοιχο των ηλεκτροδίων, έτσι ώστε η έντονα νοθευμένη περιοχή να βρίσκεται όλη κάτω από τα ηλεκτρόδια.

7.2.3 Μπροστινό μέταλλο

Το τελευταίο στάδιο λιθογραφίας για τη μπροστινή επιφάνεια καθορίζει το μέταλλο. Η σχεδίαση αυτής της μάσκας ήταν απαραίτητο να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε οι ωμικές απώλειες που οφείλονται σε αυτό και στη ροή του ρεύματος στον εκπομπό να είναι αμελητέες σε σχέση με την αντίσταση σειράς της βάσης των διατάξεων. Για αυτό το λόγο, όπως διακρίνεται στη λεπτομέρεια του σχήματος 7.3 η απόσταση των ηλεκτροδίων είναι πολύ μικρή ($d=94\mu\text{m}$), όπως και το πλάτος τους ($L=12\mu\text{m}$). Επιπρόσθετα, η ύπαρξη του μεταλλικού πλαισίου πλάτους 1mm που περιβάλλει το στοιχείο, όπως και το οριζόντιο κεντρικό ηλεκτρόδιο βοηθούν στη μείωση της συνολικής αντίστασης αφού επιτρέπουν την παράλληλη διασύνδεση των ηλεκτροδίων σε διαφορετικά σημεία. Προφανώς, τόσο πυκνό πλέγμα έχει σαν αποτέλεσμα, αυξημένες απώλειες σκίασης αλλά ο βασικός στόχος της σχεδίασης είναι η ελαχιστοποίηση των ωμικών απωλειών.



Σχήμα 7.3. Τμήμα μάσκας οπτικής λιθογραφίας που απεικονίζει το μπροστινό μέταλλο ενός φ/β στοιχείου.

Κεφάλαιο 7

Η εκτίμηση της αντίστασης του μετάλλου μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης (2.23) του κεφαλαίου 2 η οποία δίνει την αντίσταση που οφείλεται σε 1 ηλεκτρόδιο. Στην περίπτωση μας, η βασική διαφορά είναι ότι υπάρχει το περιφερειακό πλαίσιο που ενώνει τις άκρες τους, ενώ στο κέντρο υφίσταται ένα άλλο οριζόντιο αρκετά φαρδύ ηλεκτρόδιο όπως αναφέρθηκε πριν. Αν αγνοήσουμε το μεσαίο ηλεκτρόδιο, η αντίσταση ενός μεμονωμένου ηλεκτροδίου R_{finger} θα είναι η μισή από αυτή που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2 λόγω του καταμερισμού του ρεύματος που οφείλεται στο πλαίσιο, δηλαδή

$$R_{finger} = \frac{1}{6} \rho_{met} \frac{l}{aL} \quad (7.1)$$

όπου ρ_{met} είναι η ειδική αντίσταση του μετάλλου (2.65 $\mu\Omega.cm$ για το Αλουμίνιο), l το μήκος των ηλεκτροδίων (0.7cm), L το πλάτος (στην πράξη είναι 10 μm , λίγο μικρότερο από της μάσκας) και a το πάχος τους (1 μm). Η προσθήκη του κεντρικού οριζόντιου ηλεκτροδίου, σε συνδυασμό με την παράλληλη διασύνδεση των ηλεκτροδίων οδηγεί στον ακόλουθη προσεγγιστική σχέση υπολογισμού της συνολικής αντίστασης R του μετάλλου, όπου n ο αριθμός των ηλεκτροδίων ($n=66$ για τη μάσκα του σχήματος 7.3)

$$R_{metal} = \frac{R_{finger}}{4n} \quad (7.2)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των σταθερών προκύπτει ότι $R=11.7m\Omega$.

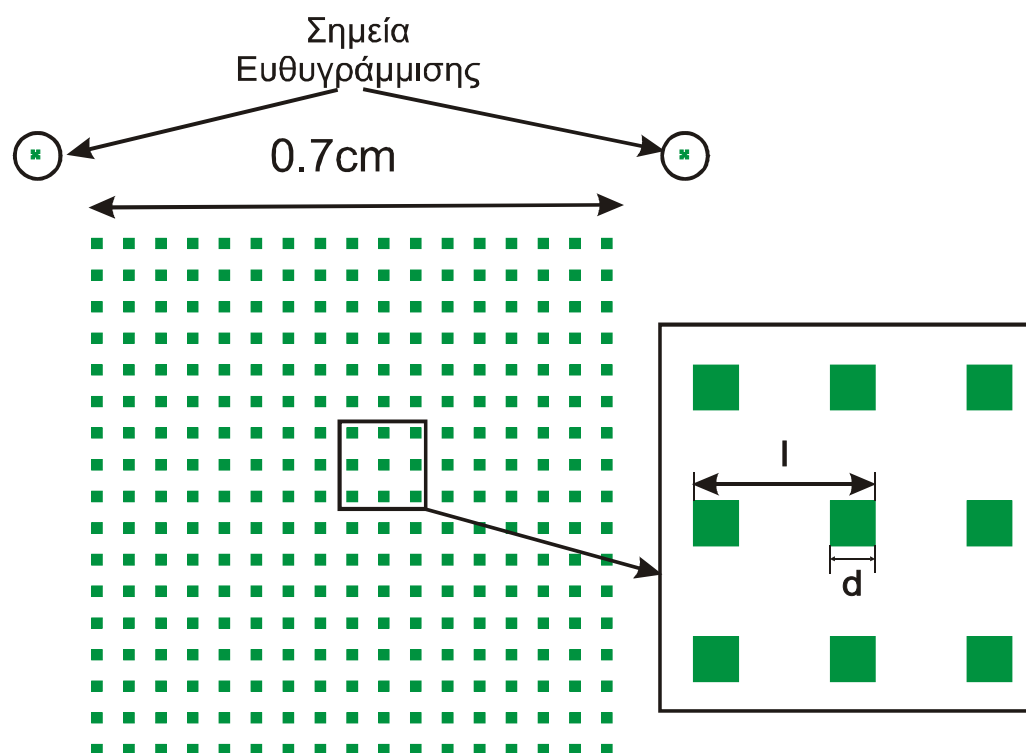
Με ανάλογο τρόπο μπορεί να υπολογιστεί και η αντίσταση σειράς που οφείλεται στον εκπομπό, δηλαδή τη συνολική αντίσταση των λωρίδων του ημιαγωγού που παρεμβάλλονται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια. Αυτή είναι

$$R_{emitter} = \frac{1}{6} \rho_s \frac{d}{x_j n l} \quad (7.3)$$

όπου ρ_s είναι η ειδική αντίσταση του εκπομπού, που για θεωρούμενη νόθευση $7 \times 10^{18} cm^{-3}$ αντιστοιχεί στην τιμή των 7.5 $m\Omega.cm$. [3-4] και x_j το βάθος του (1 μm). Με αντικατάσταση, προκύπτει $R_{emitter}=2.54m\Omega$. Στους υπολογισμούς η αντίσταση του περιφερειακού πλαισίου και του κεντρικού οριζόντιου ηλεκτροδίου θεωρείται αμελητέα.

7.2.4 Σημειακές πίσω επαφές

Το ακόλουθο σχήμα παρουσιάζει σχηματικά τη μάσκα (το αρνητικό της) που ορίζει τα ανοίγματα σχηματισμού των σημειακών πίσω επαφών, όπως και τις περιοχές όπου θα γίνει η νόθευση με Βόριο προς σχηματισμό του τοπικού πεδίου πίσω επιφάνειας (BSF)

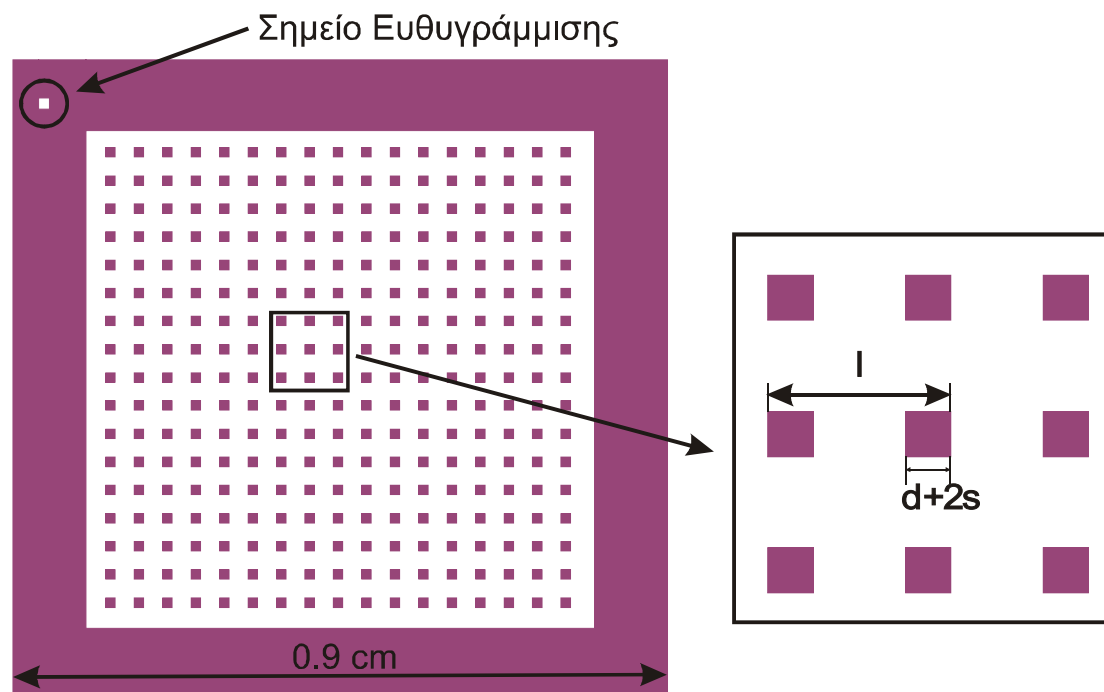


Σχήμα 7.4 Μάσκα οπτικής λιθογραφίας (αρνητικό) που καθορίζει τις σημειακές πίσω επαφές για ένα φ/β στοιχείο.

Όπως φαίνεται στη λεπτομέρεια του σχήματος 7.4, η απόσταση l όπως και το πλάτος d των ανοιγμάτων είναι σταθερά στην περιοχή που ορίζει ένα φ/β στοιχείο, δηλαδή στο τετράγωνο διαστάσεων $0.7 \times 0.7 \text{cm}$ που είναι η ενεργός περιοχή του. Αυτές οι δύο παράμετροι (l, d) όμως μεταβάλλονται από στοιχείο σε στοιχείο έτσι ώστε η αντίσταση σειράς των δομών που περιλαμβάνονται σε ένα δισκίδιο να είναι διαφορετική. Συγκεκριμένα, η μάσκα περιέχει 24 διαφορετικά ζεύγη τιμών (l, d) που αντιστοιχούν σε εκείνα των προσομοιώσεων που συζητήθηκαν αναλυτικά στα προηγούμενα κεφάλαια, ενώ διαθέτει και περιοχές όπου το άνοιγμα καταλαμβάνει όλο το τετράγωνο των $0.7 \times 0.7 \text{cm}$ (μονοδιάστατη περίπτωση). Το σύνολο των μασκών που εμφανίζονται στα σχήματα (7.1)-(7.4) καθορίζουν τα λιθογραφικά στάδια της δομής μιας ένωσης.

7.2.5 Πίσω εκπομπός (Δομή 2 ενώσεων)

Η ακόλουθη μάσκα λιθογραφίας καθορίζει τις περιοχές όπου θα γίνει νόθευση φωσφόρου για το σχηματισμό του πίσω εκπομπού της διάταξης 2 ενώσεων

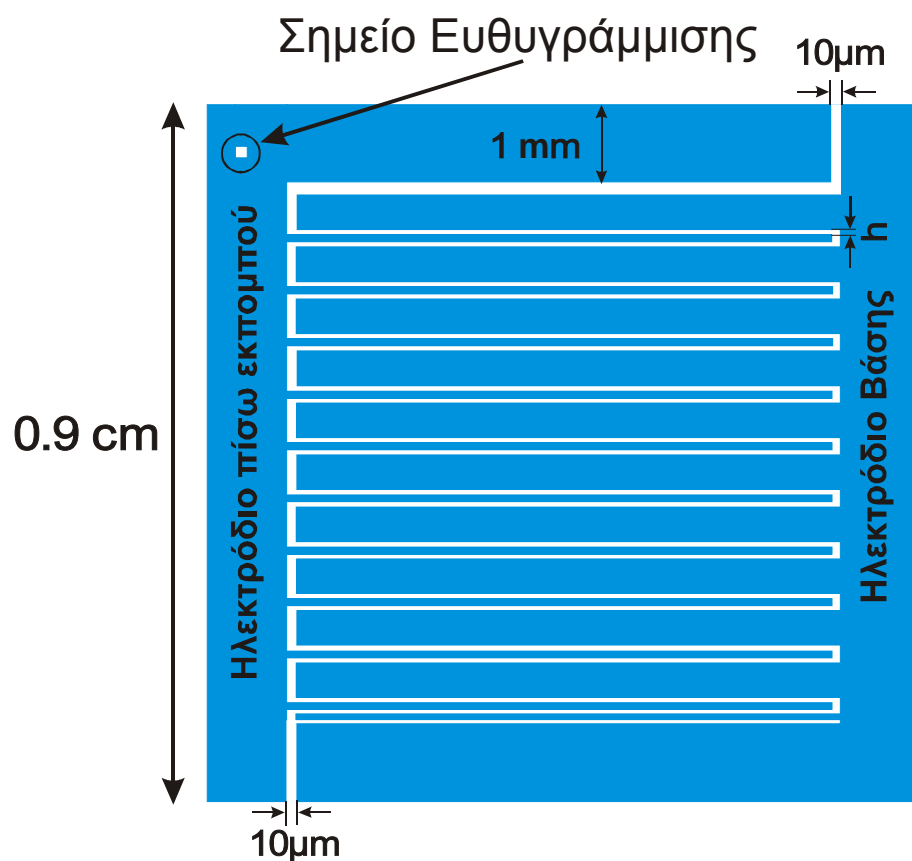


Σχήμα 7.5. Μάσκα οπτικής λιθογραφίας για τον καθορισμό του πίσω εκπομπού του φ/β στοιχείου 2 ενώσεων.

Σε αντίθεση με το σχήμα 7.4 αυτή η μάσκα είναι θετική, που σημαίνει ότι η νόθευση θα γίνει στις μη χρωματισμένες περιοχές. Προφανώς, οι θέσεις των τετραγώνων συμπίπτουν με αυτές των πίσω επαφών, μόνο που σε αυτή την περίπτωση οι διαστάσεις των πλευρών τους είναι λίγο μεγαλύτερες, όπως φαίνεται στη λεπτομέρεια του σχήματος 7.5 για να αποφευχθούν τα βραχυκυκλώματα μεταξύ του εκπομπού και των σημειακών επαφών. Το μέγεθος s είναι συνήθως $5\mu\text{m}$ με εξαίρεση τις δομές με τη μικρότερη απόσταση l των επαφών και το μεγαλύτερο ποσοστό κάλυψης ($d/l=0.5$), όπου τότε είναι μικρότερο.

7.2.6 Πίσω μέταλλο (Δομή 2 ενώσεων)

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται σχηματικά η μορφή της μάσκας που καθορίζει τη λιθογραφία σχηματισμού του πίσω μετάλλου (οι αναλογίες διαφέρουν στην πραγματική) για τη δομή των 2 ενώσεων.



Σχήμα 7.6. Σχηματικό διάγραμμα μάσκας οπτικής λιθογραφίας (οι απεικονιζόμενες αναλογίες διαφέρουν στην πράξη) για τη δημιουργία του πίσω μετάλλου της δομής 2 ενώσεων.

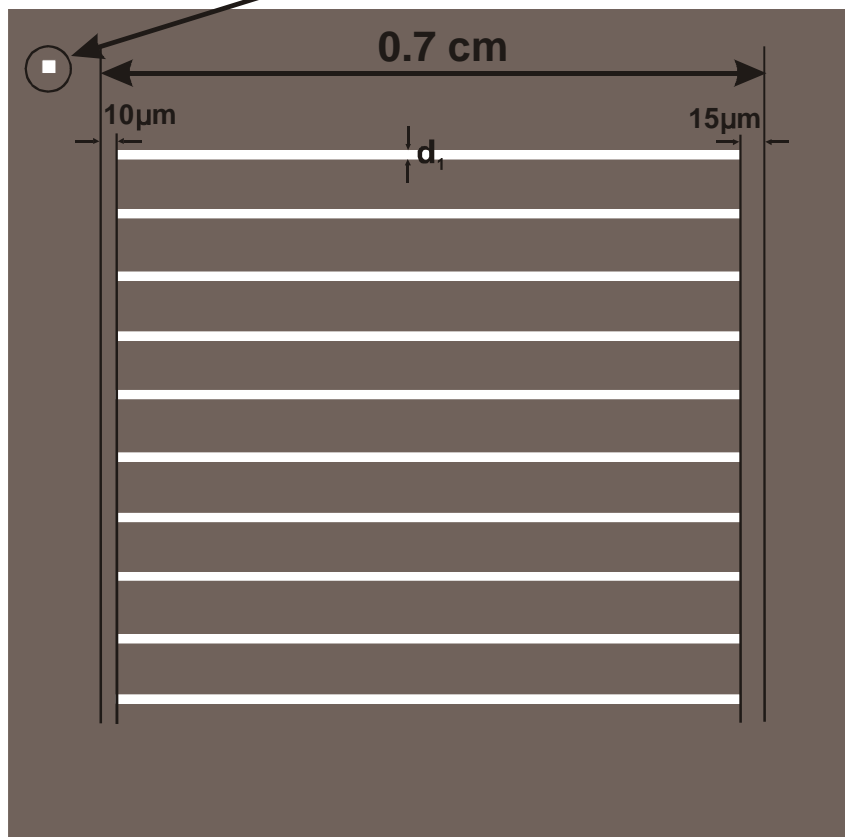
Ουσιαστικά, το πίσω μέταλλο αποτελείται από δύο διαφορετικά ηλεκτρόδια κτενωτού σχήματος, όπου το αριστερό ορίζει την επαφή του πίσω εκπομπού (τύπου n) ενώ το δεξί της βάσης (τύπου p). Τα επιμέρους ηλεκτρόδια της βάσης έχουν σχεδιαστεί να είναι πολύ πιο φαρδιά σε σχέση με τα αντίστοιχα του πίσω εκπομπού δεδομένου ότι συγκριτικά αυτός συλλέγει σημαντικά λιγότερο ρεύμα, όπως διαπιστώθηκε στις προσομοιώσεις, ενώ το πλάτος και των 2 εξαρτάται από την απόσταση l των πίσω επαφών. Επιπλέον, η κάθετη απόσταση μεταξύ τους που συμβολίζεται ως h στο σχήμα είναι πολύ μικρή ($4\mu\text{m}$ ή $2\mu\text{m}$ για τις δομές με τη μικρότερη απόσταση των πίσω επαφών) προκειμένου η κάλυψη από το μέταλλο της πίσω επιφάνειας να είναι σχεδόν πλήρης. Επίσης, το οριζόντιο διάκενο που τα διαχωρίζει είναι $10\mu\text{m}$, όπως διακρίνεται στο σχήμα. Έτσι, σε γενικές γραμμές με αυτή τη σχεδίαση επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση της αντίστασης σειράς του μετάλλου. Από την άλλη πλευρά, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό των σημείων ευθυγράμμισης για να αποφευχθούν

ανεπιθύμητα βραχυκυκλώματα που μπορεί να οφείλονται στις διαδικασίες νόθευσης των προηγούμενων σταδίων.

7.2.7 Επαφές πίσω εκπομπού (Δομή 2 ενώσεων)

Το επόμενο σχήμα παρουσιάζει την μάσκα (οι αναλογίες διαφέρουν στην πράξη) που ορίζει τις περιοχές όπου θα γίνουν οι επαφές με τα ηλεκτρόδια του πίσω εκπομπού

Σημείο Ευθυγράμμισης



Σχήμα 7.7. Σχηματικό διάγραμμα μάσκας οπτικής λιθογραφίας (οι απεικονιζόμενες αναλογίες και ο αριθμός των ανοιγμάτων διαφέρουν στην πράξη) για το σχηματισμό των επαφών του πίσω εκπομπού της δομής 2 ενώσεων.

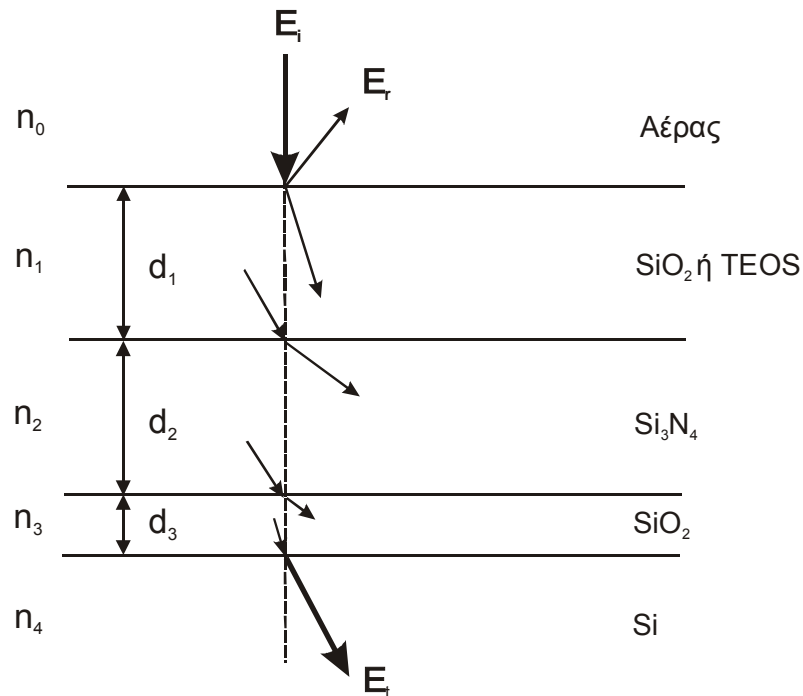
Όπως φαίνεται στο σχήμα, τα ανοίγματα της μάσκας έχουν πλάτος d_1 το οποίο για τις δομές με τις δύο μικρότερες αποστάσεις των πίσω επαφών (50 και 100μm) είναι 3μm, ενώ για τις 2 μεγαλύτερες (200 και 400μm) που έχουν σημαντικά φαρδύτερα ηλεκτρόδια, είναι 6μm και 12μm αντίστοιχα. Συνοπτικά, η διάταξη δύο ενώσεων

απαιτεί επιπλέον 3 στάδια λιθογραφίας για την κατασκευή της σε σχέση με την δομή 1 ένωσης.

7.3 Σχεδιασμός αντανακλαστικών επιστρώσεων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, ένα σημαντικό ποσοστό της βελτίωσης της απόδοσης των φ/β στοιχείων πυριτίου συνίσταται στον προσεκτικό σχεδιασμό των αντανακλαστικών επιστρώσεων και στη διαμόρφωση της μπροστινής επιφάνειας με στόχο την ελαχιστοποίηση της ανάκλασης του ηλιακού φωτός. Στην περίπτωση των πειραματικών διατάξεων της διατριβής η σχεδίαση περιορίστηκε στη δημιουργία αντανακλαστικών επιστρώσεων μόνο, δεδομένου ότι η διαδικασία σχηματισμού ανεστραμμένων πυραμίδων στην επιφάνεια του φ/β στοιχείου είναι επίπονη και επικίνδυνη αφού απαιτεί χρήση ισχυρών οξέων.

Οι υπό κατασκευή διατάξεις, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα διαθέτουν διπλή αντανακλαστική επίστρωση αποτελούμενη από υμένα Si_3N_4 και TEOS (είδος οξειδίου του πυριτίου) σχηματισμένα πάνω από ένα λεπτό θερμικό οξείδιο δεδομένου πάχους.



Σχήμα 7.8. Αντανακλαστικές επιστρώσεις των πειραματικών διατάξεων. Το κατώτερο λεπτό στρώμα SiO₂ έχει σχηματιστεί για να αποφευχθεί η απευθείας επαφή του Νιτριδίου στο Si.

Το αντικείμενο της σχεδίασης είναι η εύρεση του βέλτιστου πάχους των υμενίων Si_3N_4 και TEOS έτσι ώστε η συνολική ανάκλαση για το ηλιακό φάσμα να είναι η μικρότερη δυνατή. Η ανάπτυξη αυτών των φιλμ γίνεται με τη βοήθεια της τεχνολογίας CVD (Chemical Vapor Deposition, χημική εναπόθεση ατμών) που διατίθεται στο εργαστήριο μικροηλεκτρονικής του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Για να αποφευχθεί η απευθείας επαφή του Si_3N_4 πάνω στο πυρίτιο, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ανάπτυξη τάσεων (stress) στην διεπιφάνεια, δημιουργήθηκε το θερμικό οξειδίο η ύπαρξη του οποίου βοηθά στη μείωση των επιφανειακών ανασυνδέσεων, ενώ παράλληλα είναι αρκετά λεπτό ώστε να μην επηρεάζει πολύ την συνολική ανάκλαση του φωτός.

Προκειμένου να υπολογιστεί το βέλτιστο πάχος των δύο υμενίων, πρέπει να ληφθεί υπόψιν η μεταβολή του ηλιακού φάσματος συναρτήσει του μήκους κύματος λ όπως και το γεγονός ότι η φασματική απόκριση Q ενός φ/β στοιχείου εξαρτάται επίσης από αυτό. Μια συνάρτηση που λαμβάνει υπόψιν αυτά τα στοιχεία είναι η ανάκλαση με συντελεστή βάρους (weighted reflection, R_w) και δίνεται από την ακόλουθη σχέση [5]

$$R_w = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda)R(\lambda)Q(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda)Q(\lambda)d\lambda} \quad (7.4)$$

όπου $R(\lambda)$ είναι ο συντελεστής ανάκλασης και $F(\lambda)$ η ροή φωτονίων του ηλιακού φάσματος. Η (7.4) ελαχιστοποίηση της (7.4) ουσιαστικά μεγιστοποιεί το ρεύμα βραχυκυκλώματος J_{sc} του φ/β στοιχείου, αφού μπορεί εναλλακτικά να γραφεί ως

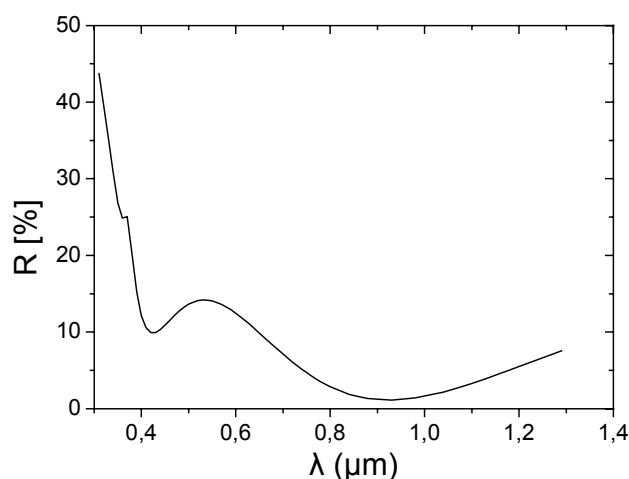
$$R_w = 1 - J_{sc}/J_{sc}(R=0) \quad (7.5)$$

όπου $J_{sc}(R=0)$ εκφράζει το ρεύμα βραχυκυκλώματος για μηδενική ανάκλαση, ενώ το J_{sc} ορίζεται από την έκφραση

$$J_{sc} = e \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda)(1 - R(\lambda))Q(\lambda)d\lambda \quad (7.6)$$

Συνεπώς, ο υπολογισμός των βέλτιστων παχών d_1, d_2 των υμενίων πραγματοποιήθηκε με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της (7.4). Η εύρεση της συνολικής ανάκλασης για τη δομή του σχήματος 7.8 έγινε μέσω της μεθόδου των πινάκων (matrix method) η οποία είναι αρκετά διαδεδομένη στη θεωρία της οπτικής [6-8], μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και περιγράφεται συνοπτικά στο Παράρτημα Α. Οι υπολογισμοί μας εφαρμόστηκαν για την περίπτωση κάθετης πρόσπτωσης του φωτός,

ενώ θεωρήθηκε ότι τα υμένια δεν έχουν καθόλου οπτική απορρόφηση και ότι ο συντελεστής διάθλασής τους είναι αμετάβλητος για τα μήκη κύματος που μελετούμε. Για απλούστευση στους υπολογισμούς, η φασματική απόκριση του φ/β στοιχείου θεωρήθηκε ιδανική για τα μήκη κύματος 0.4-1.0 μm και μηδενική στα υπόλοιπα. Ο συντελεστής διάθλασης και απορρόφησης του Si συναρτήσει του μήκους κύματος λαμβάνεται από τα δεδομένα του Green [9]. Συνεπώς τα αποτελέσματα των υπολογισμών έδειξαν ότι για πάχος του οξειδίου $d_3=125 \text{ \AA}$, τα βέλτιστα πάχη των υμενίων είναι $d_1=97\text{nm}$ για το TEOS και $d_2=58\text{nm}$ για το Si_3N_4 . Για αυτές τις παραμέτρους η τιμή της ανάκλασης με συντελεστή βάρους (weighted reflection) είναι 7.08%. Η καμπύλη του επόμενου σχήματος απεικονίζει το συντελεστή ανάκλασης συναρτήσει του μήκους κύματος για αυτά τα δεδομένα.



Σχήμα 7.9. Θεωρητικά υπολογισμένος συντελεστής ανάκλασης για βέλτιστο πάχος Si_3N_4 58nm και TEOS 97nm, ενώ το πάχος του θερμικού οξειδίου κάτω από τα υμένια είναι 125 \AA .

Προφανώς η ύπαρξη των 2 υμενίων έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση δύο ελαχίστων στην ανάκλαση (το θερμικό οξείδιο είναι πολύ λεπτό και ουσιαστικά δεν την επηρεάζει).

7.4 Διαδικασία κατασκευής διατάξεων

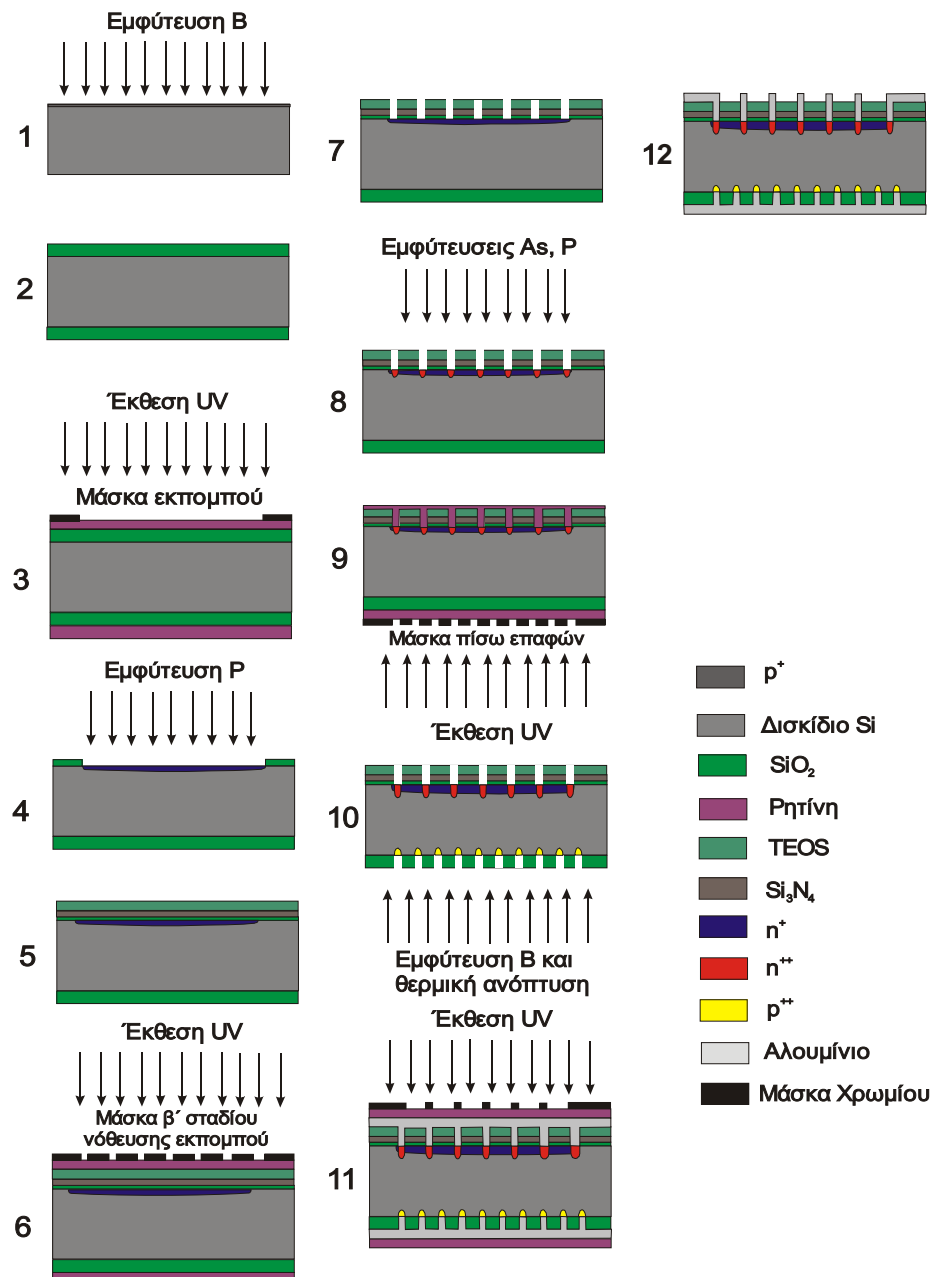
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα στάδια κατασκευής των 2 διαφορετικών διατάξεων, μονής και διπλής ένωσης, όπως εφαρμόστηκαν στο ινστιτούτο μικροηλεκτρονικής του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Όλες οι πειραματικές δομές κατασκευάστηκαν σε δισκία μονοκρυσταλλικού πυριτίου νοθευμένα με Βόριο και

Κεφάλαιο 7

ειδικής αντίστασης ρ περίπου $1\Omega\cdot\text{cm}$. αναπτυγμένα με τη μέθοδο Czochralski, από την εταιρεία OKMETIK [10] τα οποία είναι κατεργασμένα έτσι ώστε και οι 2 επιφάνειές τους να είναι λείες (double polished) για να είναι εφικτές οι λιθογραφικές διαδικασίες και στις 2 όψεις.

7.4.1 Διάταξη μιας ένωσης.

Τα ακόλουθα βήματα περιγράφουν τις διαδικασίες κατασκευής της δομής 1 ένωσης, ενώ εμφανίζονται στο σχήμα 7.10.



Σχήμα 7.10. Σχηματικό διάγραμμα των διεργασιών κατασκευής της δομής μίας ένωσης.

- 1) Το πρώτο στάδιο είναι καθαρισμός των δισκιδίων με την μέθοδο Piranha (διάλυμα H_2O_2 και H_2SO_4 σε αναλογία 1:1). Έτσι προετοιμάζονται τα δισκία για εμφύτευση Βορίου στην μπροστινή επιφάνεια με δόση $3 \times 10^{-13} \text{cm}^{-2}$ και ενέργεια ιόντων 100 keV. Η προκαταρκτική αυτή εμφύτευση εφαρμόζεται για να αποφευχθεί η δημιουργία επιφανειακού στρώματος αντιστροφής (inversion layer) που θα προκύψει από την ανάπτυξη του οξειδίου που θα ακολουθήσει.
- 2) Στη συνέχεια ακολουθεί καθαρισμός των δισκιδίων με τη μέθοδο RCA, με σκοπό να εισαχθούν στο φούρνο για υγρή οξείδωση, η οποία διαρκεί 75 λεπτά σε θερμοκρασία 1050°C . Η τελική αυτή θερμοκρασία επιτυγχάνεται με ρυθμό ανόδου $5^\circ\text{C}/\text{min}$ και στο τέλος η πτώση της γίνεται με ρυθμό $3^\circ\text{C}/\text{min}$. Το τελικό πάχος του οξειδίου που προκύπτει είναι περίπου 6250\AA . Να σημειωθεί ότι ο φούρνος έχει καθαριστεί πριν την οξείδωση για να μην επηρεαστεί η ποιότητα του οξειδίου.
- 3) Το επόμενο βήμα είναι η πρώτη λιθογραφία που καθορίζει το σχηματισμό του εκπομπού. Σαν προκαταρκτική διαδικασία επιστρώνεται ρητίνη και στις 2 επιφάνειες του δισκιδίου (στην πίσω για προστασία) με φυγοκεντρική μέθοδο (spinner) στις 7000rpm για $30''$ και τα δισκία ψήνονται στους 95°C για 5 λεπτά. Η λιθογραφία ύστερα γίνεται με έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία για $50''$ της μπροστινής επιφάνειας μέσω της μάσκας (η μορφή της απεικονίζεται στο σχήμα 7.1). Ύστερα ακολουθεί εμφάνιση, όπου τα τμήματα της ρητίνης που έχουν εκτεθεί στην ακτινοβολία διαλύονται, και τελικό ψήσιμο των δειγμάτων στους 110°C για $15'$. Το βήμα αυτό ολοκληρώνεται με υγρή εγχάραξη σε διάλυμα BHF για $8.5'$ που απομακρύνει το οξύ στις περιοχές όπου δεν υπάρχει ρητίνη και πλύσιμο των δειγμάτων σε απιονισμένο νερό.
- 4) Αφού αφαιρεθεί η ρητίνη από τα δισκία με χρήση ακετόνης-προπανόλης, γίνεται καθαρισμός σε διάλυμα Piranha και ακολουθεί εμφύτευση ιόντων φωσφόρου προς σχηματισμό του μπροστινού εκπομπού με ενέργεια 80 keV και δόση $7 \times 10^{14} \text{cm}^{-2}$.
- 5) Μετά το στάδιο της εμφύτευσης τα δείγματα καθαρίζονται σε RCA για να εισαχθούν στο φούρνο για ξηρή οξείδωση σε τελική θερμοκρασία 1000°C για $5'$ σε περιβάλλον O_2 η οποία επιτυγχάνεται με ρυθμό ανόδου $7^\circ\text{C}/\text{min}$ και καθόδου $5^\circ\text{C}/\text{min}$ (μετά την ολοκλήρωσή της). Έτσι αναπτύσσεται θερμικό οξύδιο πάχους 125\AA . Μετά ακολουθεί η εναπόθεση των υμενίων Si_3N_4 (580

Å) και TEOS (1100 Å) με τη μέθοδο CVD. Το φιλμ TEOS έχει πάχος λίγο μεγαλύτερο από το βέλτιστο, διότι η εγχάραξη που θα ακολουθήσει μετά από την λιθογραφία που θα αναφερθεί παρακάτω θα το λεπτύνει, οπότε το τελικό φιλμ που θα προκύψει θα έχει περίπου το επιθυμητό πάχος.

- 6) Στο βήμα αυτό επιστρώνονται με ρητίνη στις 2 επιφάνειες τα δισκίδια (στην πίσω για προστασία) για να διεξαχθεί η δεύτερη λιθογραφία (με τις ίδιες συνθήκες του σταδίου 3) που καθορίζεται από τη μάσκα του σχήματος 7.2, η οποία ορίζει τις περιοχές που θα γίνει η επιπλέον νόθευση του μπροστινού εκπομπού.
- 7) Μετά την ολοκλήρωση της λιθογραφίας και την εμφάνιση της ρητίνης, έπεται υγρή εγχάραξη του στρώματος TEOS σε διάλυμα με 2% HF για 2' και πλύση των δειγμάτων σε απιονισμένο νερό. Στη συνέχεια αυτά εισάγονται στον αντιδραστήρα πλάσματος όπου γίνεται εγχάραξη του Si_3N_4 σε αέριο SF_6 για 50''. Να σημειωθεί ότι για να εκτιμηθεί η συνθήκη αυτή χρησιμοποιήθηκε ένα δισκίδιο ως μάρτυρας.
- 8) Μετά τη διαδικασία αφαίρεσης της ρητίνης, τα δείγματα εισάγονται σε πρώτη φάση για εμφύτευση ιόντων As με ενέργεια 100 keV και δόση $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, η οποία ακολουθείται από μια ακόμη σε μικρότερη δόση και ενέργεια ($5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, 40 keV). Η διαδικασία ολοκληρώνεται με ιοντική εμφύτευση φωσφόρου στα 40 keV και δόση $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Η επιλογή της εμφύτευσης As έγινε επειδή είναι βαρύ ιόν και έτσι τα ιόντα του δεν διαπερνούν σε βάθος τα υμένα TEOS και Si_3N_4 όπως έδειξαν προσομοιώσεις με το λογισμικό πακέτο SRIM [11]. Για τον ίδιο λόγο και η τελική εμφύτευση με φώσφορο έγινε σε χαμηλή ενέργεια. Η συνολική ποσότητα ιόντων δοτών που διεξήχθη στο βήμα αυτό θα δώσει ένα προφίλ εκπομπού με υψηλή νόθευση στις περιοχές που ορίζει αυτή η μάσκα.
- 9) Στη συνέχεια, τα δισκίδια επιστρώνονται με ρητίνη για να γίνει η λιθογραφία της πίσω επιφάνειας όπου χρησιμοποιείται η μάσκα που ορίζει τις περιοχές των σημειακών επαφών (σχήμα 7.4). Σε αυτή την περίπτωση προστατεύεται η μπροστινή επιφάνεια. Η διαδικασία γίνεται με τον ίδιο τρόπο και συνθήκες όπως στις προηγούμενες λιθογραφίες, με τη διαφορά ότι απαιτείται ευθυγράμμιση των μασκών της μπροστινής πλευράς με την πίσω (αυτό γίνεται με επιπλέον σημάδια ευθυγράμμισης στη μάσκα του σχ. 7.1).

- 10) Ακολούθως, μετά την εμφάνιση της ρητίνης και την εγχάραξη σε διάλυμα BHF αυτή απομακρύνεται με χρήση ακετόνης-προπανόλης και τα δείγματα καθαρίζονται με τη μέθοδο Piranha. Ύστερα, εισάγονται για εμφύτευση με Βόριο ενέργειας 30 keV και δόση $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$. Σε επόμενη φάση γίνεται ένας ακόμη καθαρισμός με RCA (χωρίς χρήση HF) και τα δισκία μπαίνουν στο φούρνο για θερμική ανόπτυση στους 1030 °C τελική θερμοκρασία και χρόνο 30' σε περιβάλλον N₂ η οποία επιτυγχάνεται με ρυθμό ανόδου 7 °C/min και στο τέλος τα δείγματα ψύχονται κατά 5 °C/min. Αυτές οι συνθήκες δημιουργούν τις προϋποθέσεις για το σχηματισμό του πεδίου πίσω επιφάνειας (BSF) στις περιοχές των πίσω επαφών, ενώ παράλληλα έτσι διαμορφώνεται και το προφίλ νόθευσης του εκπομπού.
- 11) Στο βήμα αυτό τα δισκίδια εισάγονται στον εξαχνωτή αλουμινίου για τη δημιουργία του μετάλλου στη μπροστινή και πίσω επιφάνεια. Κατόπιν, επιστρώνεται ρητίνη στις 2 επιφάνειες (στην πίσω για προστασία) για να γίνει η τελική λιθογραφία του μπροστινού μετάλλου.
- 12) Σε αυτό το τελικό στάδιο, μετά την εμφάνιση της ρητίνης, γίνεται εγχάραξη του αλουμινίου σε διάλυμα H₃PO₄ και ισοπροπανόλης, για να αφαιρεθεί το μέταλλο στις περιοχές που δεν υπάρχει ρητίνη, και να προκύψει το μπροστινό πλέγμα του εκπομπού. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την απομάκρυνση της ρητίνης από τα δείγματα και την θερμική ανόπτυση του αλουμινίου στους 370 °C για 30', διεργασία που έχει δειχθεί ότι βελτιώνει την απόδοση των φ/β στοιχείων [12].

7.4.2 Διάταξη δύο ενώσεων

Σε αντιστοιχία με την προηγούμενη ενότητα περιγράφουμε τις διαδικασίες κατασκευής της δομής 2 ενώσεων, όπως εμφανίζονται στο σχήμα 7.11.

- 1) Το πρώτο στάδιο είναι καθαρισμός των δισκιδίων με την μέθοδο Piranha. Έτσι προετοιμάζονται τα δισκία για εμφύτευση Βορίου στην μπροστινή και πίσω επιφάνεια με δόση $3 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ και ενέργεια ιόντων 100 keV. Η προκαταρκτική αυτή εμφύτευση εφαρμόζεται για να αποφευχθεί η δημιουργία επιφανειακού στρώματος αντιστροφής (inversion layer) που θα προκύψει από την ανάπτυξη του οξειδίου που θα ακολουθήσει, όπου σε αυτή

την περίπτωση μας ενδιαφέρει και η πίσω επιφάνεια, όπου θα σχηματιστεί η δεύτερη ένωση.

- 2) Στη συνέχεια, τα δισκία καθαρίζονται με τη μέθοδο RCA, με σκοπό να εισαχθούν στο φούρνο για υγρή οξείδωση, η οποία διαρκεί 1 ώρα και 35' σε θερμοκρασία 1050°C όπου το προφίλ μεταβολής της θερμοκρασίας είναι το ίδιο με το αντίστοιχο βήμα της προηγούμενης ενότητας. Το τελικό πάχος του οξειδίου που προκύπτει είναι περίπου 6500Å. Να σημειωθεί ότι ο φούρνος έχει καθαριστεί πριν την οξείδωση για να μην επηρεαστεί η ποιότητα του οξειδίου.
- 3) Το επόμενο βήμα είναι η λιθογραφία της πίσω επιφάνειας που καθορίζει το σχηματισμό του αντίστοιχου εκπομπού. Σαν προκαταρκτική διαδικασία επιστρώνεται ρητίνη και στις 2 επιφάνειες του δισκιδίου (στην μπροστινή για προστασία). Η λιθογραφία ύστερα γίνεται με έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία για 50'' της πίσω επιφάνειας μέσω της μάσκας (η μορφή της απεικονίζεται στο σχήμα 7.5).
- 4) Μετά την εμφάνιση της ρητίνης και το τελικό ψήσιμο των δειγμάτων ακολουθεί υγρή εγχάραξη σε διάλυμα BHF που απομακρύνει το οξείδιο στις περιοχές όπου δεν υπάρχει ρητίνη για να αποκαλυφθεί η επιφάνεια που ορίζει την περιοχή του πίσω εκπομπού. Κατόπιν αφαιρείται και η υπόλοιπη ρητίνη με ακετόνη-προπανόλη και τα δισκία καθαρίζονται με Piranha για να εισαχθούν προς εμφύτευση ιόντων φωσφόρου ενέργειας 90 keV και δόσης $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Αυτή η νόθευση καθορίζει το σχηματισμό της πίσω ένωσης.
- 5) Στο στάδιο αυτό τα δείγματα καθαρίζονται με τη μέθοδο RCA και αφού καθαριστεί ο φούρνος εισάγονται για υγρή οξείδωση σε τελική θερμοκρασία 1050 °C για 50', η οποία επιτυγχάνεται με ρυθμό ανόδου 7 °C/min και μετά το τέλος του χρόνου αυτού ψύχονται κατά 5 °C/min. Αυτή η διεργασία εφαρμόζεται προκειμένου να δημιουργηθεί ένα προστατευτικό οξείδιο στην πίσω επιφάνεια.
- 6) Ακολούθως, τα δισκία επιστρώνονται με ρητίνη για να γίνει λιθογραφία στην μπροστινή επιφάνεια όπου χρησιμοποιείται η πρώτη μάσκα που ορίζει την περιοχή του μπροστινού εκπομπού (σχήμα 7.1). Σε αυτή την περίπτωση προστατεύεται με ρητίνη η πίσω επιφάνεια. Η διαδικασία αυτή απαιτεί την τοποθέτηση της μπροστινής μάσκας έτσι ώστε να είναι ευθυγραμμισμένη με

την πίσω πλευρά (αυτό γίνεται με χρήση κατάλληλων σημαδιών ευθυγράμμισης).

- 7) Στη συνέχεια, γίνεται εμφάνιση της ρητίνης και τελικό ψήσιμο για να οδηγηθούν τα δείγματα για υγρή εγχάραξη σε διάλυμα BHF. Μετά το πλύσιμο σε απιονισμένο νερό, αφαιρείται η υπόλοιπη ρητίνη σε ακετόνη-προπανόλη και τα δισκίδια καθαρίζονται με Piranha. Το βήμα αυτό ολοκληρώνεται με εμφύτευση ιόντων φωσφόρου ενέργειας 80 keV και δόσης $7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ (ίδιες συνθήκες με το βήμα 4 της προηγούμενης ενότητας). Έτσι καθορίζεται ο σχηματισμός του μπροστινού εκπομπού.
- 8) Αφού ολοκληρωθεί η εμφύτευση, τα δείγματα καθαρίζονται σε RCA για να εισαχθούν στο φούρνο για ξηρή οξείδωση σε τελική θερμοκρασία 1000 °C για 4' σε περιβάλλον O_2 η οποία επιτυγχάνεται με ρυθμό ανόδου 7 °C/min και καθόδου 5 °C/min (μετά την ολοκλήρωσή της). Έτσι αναπτύσσεται θερμικό οξείδιο με περίπου το ίδιο πάχος που αναφέρεται στο βήμα 5 της προηγούμενης ενότητας). Μετά ακολουθεί η εναπόθεση των υμενίων Si_3N_4 (580 Å) και TEOS (1200 Å) με τη μέθοδο CVD. Τα φιλμ αυτά αποτελούν την αντιανακλαστική επίστρωση του φ/β στοιχείου, ενώ επιπλέον αποτελούν και μάσκα προστασίας από τις επόμενες ιοντικές εμφυτεύσεις.
- 9) Στο βήμα αυτό επιστρώνονται με ρητίνη στις 2 επιφάνειες τα δισκίδια (στην πίσω για προστασία) για να διεξαχθεί η δεύτερη λιθογραφία που καθορίζεται από τη μάσκα του σχήματος 7.2, η οποία ορίζει τις περιοχές που θα γίνει η επιπλέον νόθευση του μπροστινού εκπομπού.
- 10) Μετά την ολοκλήρωση της λιθογραφίας και την εμφάνιση της ρητίνης, έπεται υγρή εγχάραξη του στρώματος TEOS σε διάλυμα με 2% HF. Στη συνέχεια αυτά εισάγονται στον αντιδραστήρα πλάσματος όπου γίνεται εγχάραξη του Si_3N_4 σε αέριο SF_6 με συνθήκες εγχάραξης τις ίδιες που περιγράφηκαν στο στάδιο 7 της προηγούμενης ενότητας.
- 11) Μετά τη διαδικασία αφαίρεσης της ρητίνης σε ακετόνη-προπανόλη, τα δείγματα εισάγονται σε πρώτη φάση για εμφύτευση ιόντων As με ενέργεια 50 keV και δόση $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με ιοντική εμφύτευση φωσφόρου (το οποίο είναι ελαφρύ ιόν και εισχωρεί σε μεγαλύτερο βάθος στο Si) στα 40 keV και δόση $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Η επιλογή της εμφύτευσης As έγινε επειδή είναι βαρύ ιόν και έτσι τα ιόντα του δεν διαπερνούν σε βάθος τα υμένα TEOS και Si_3N_4 όπως έδειξαν προσομοιώσεις

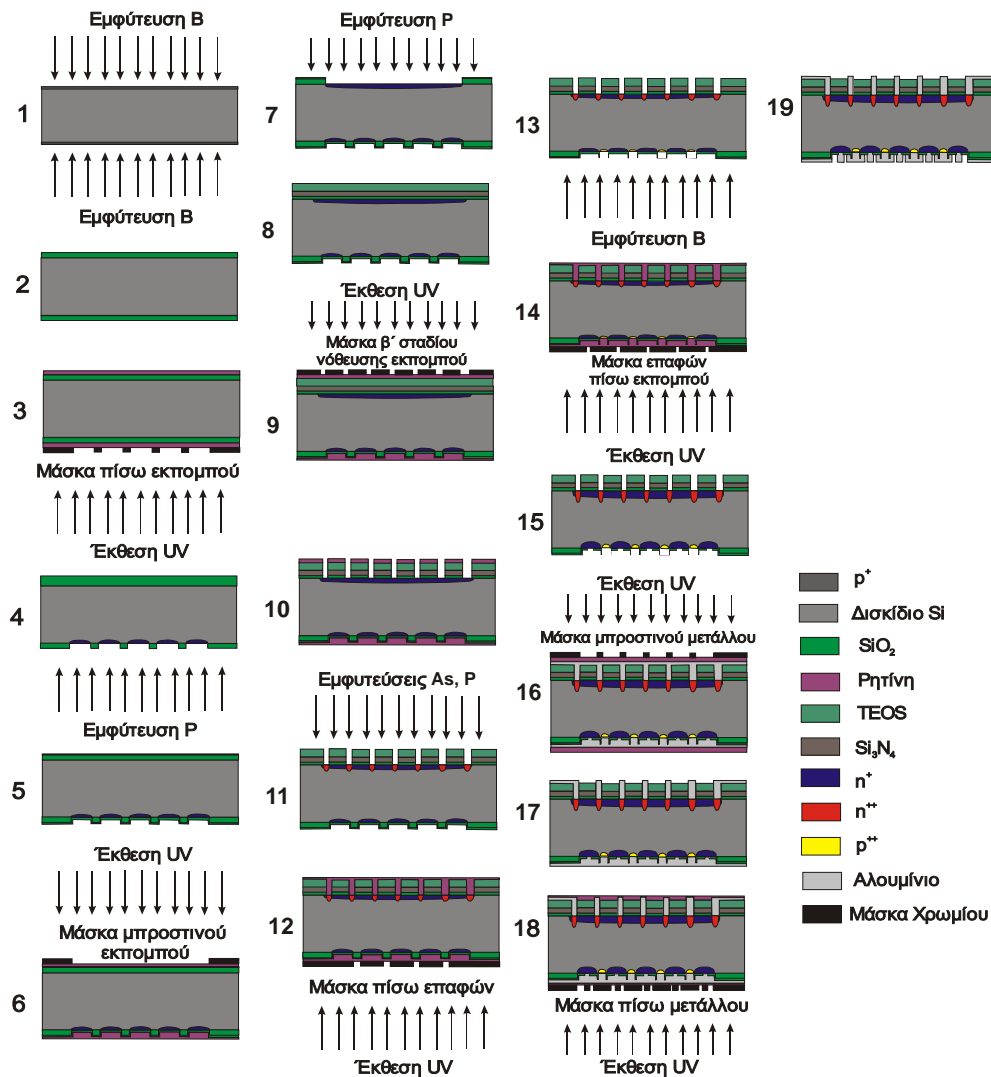
με το λογισμικό πακέτο SRIM [11]. Για τον ίδιο λόγο οι ενέργειες των ιόντων αποφασίστηκε να είναι χαμηλές. Η συνολική ποσότητα ιόντων δοτών που διεξήχθη στο βήμα αυτό θα δώσει ένα προφίλ εκπομπού με υψηλή νόθευση στις περιοχές που ορίζει αυτή η μάσκα.

- 12) Σε αυτό το στάδιο, τα δισκίδια επιστρώνονται με ρητίνη για να γίνει λιθογραφία στην πίσω επιφάνεια όπου χρησιμοποιείται η μάσκα που ορίζει τις περιοχές των σημειακών επαφών (σχήμα 7.4). Σε αυτή την περίπτωση προστατεύεται η μπροστινή επιφάνεια.
- 13) Ακολούθως, μετά την εμφάνιση της ρητίνης και την υγρή εγχάραξη σε διάλυμα BHF, αυτή απομακρύνεται με χρήση ακετόνης-προπανόλης και τα δείγματα καθαρίζονται με τη μέθοδο Piranha. Ύστερα, εισάγονται για εμφύτευση με Βόριο ενέργειας 25 keV και δόση $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$. Η υψηλή συγκέντρωση Βορίου σε συνδυασμό με τη χαμηλή ενέργεια εμφύτευσης δημιουργεί πεδίο πίσω επιφάνειας (BSF) στις περιοχές των πίσω επαφών.
- 14) Το βήμα αυτό αφορά το στάδιο οπτικής λιθογραφίας που καθορίζει τις περιοχές που θα γίνουν οι επαφές του πίσω εκπομπού (σχ. 7.7). Η μπροστινή επιφάνεια των δισκιδίων προστατεύεται με ρητίνη. Σε αυτή την περίπτωση η έκθεση στην ακτινοβολία UV διαρκεί 60'.
- 15) Στη συνέχεια μετά την εμφάνιση της ρητίνης και την υγρή εγχάραξη σε BHF των δισκιδίων για να απομακρυνθεί το οξείδιο από τις περιοχές που θα γίνουν οι επαφές με το μέταλλο της πίσω ένωσης, αφαιρείται η υπόλοιπη ρητίνη και τα δείγματα καθαρίζονται με Piranha για να επακολουθήσει θερμική ανόπτυση στους 1030 °C τελική θερμοκρασία και χρόνο 30' σε περιβάλλον N_2 η οποία επιτυγχάνεται με ρυθμό ανόδου 5 °C/min και στο τέλος ψύχονται κατά 5 °C/min. Με το πέρας τη διεργασίας αυτής τα εμφυτευμένα ιόντα λαμβάνουν τις τελικές τους θέσεις και διαμορφώνονται τα επιθυμητά προφίλ νόθευσης για τις ενώσεις και το BSF των πίσω επαφών.
- 16) Στο βήμα αυτό τα δισκίδια εισάγονται στον εξαγωγτή αλουμινίου για την εναπόθεση του μετάλλου στη μπροστινή και πίσω επιφάνεια. Κατόπιν, επιστρώνεται ρητίνη στις 2 επιφάνειες (στην πίσω για προστασία) για να γίνει η λιθογραφία του μπροστινού μετάλλου (σχ. 7.3).
- 17) Κατόπιν, γίνεται εμφάνιση της ρητίνης και υγρή εγχάραξη του αλουμινίου σε διάλυμα H_3PO_4 και ισοπροπανόλης, για να αφαιρεθεί το μέταλλο στις περιοχές που δεν υπάρχει ρητίνη, και να προκύψει το πλέγμα του μπροστινού

εκπομπού. Όταν επιτελεστεί αυτή η διεργασία, η υπόλοιπη ρητίνη απομακρύνεται σε διάλυμα ακετόνης-προπανόλης.

18) Σε αυτό το στάδιο, επιστρώνεται εκ νέου ρητίνη στις 2 επιφάνειες (αυτή τη φορά προστατεύεται η μπροστινή) για να ακολουθήσει η τελική λιθογραφία του πίσω μετάλλου που προσδιορίζει τα ηλεκτρόδια της πίσω ένωσης και της βάσης (σχ. 7.6).

19) Το τελικό βήμα είναι η εγχάραξη του αλουμινίου σε διάλυμα H_3PO_4 και ισοπροπανόλης, που απομακρύνει το μέταλλο στις περιοχές που δεν υπάρχει ρητίνη, και διαμορφώνει το πίσω πλέγμα. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την αφαίρεση της ρητίνης από τα δείγματα και την θερμική ανόπτυση του αλουμινίου στους $370\text{ }^\circ\text{C}$ για $30'$, προς βελτίωση της απόδοσης των φ/β στοιχείων [12].



Σχήμα 7.11. Σχηματικό διάγραμμα των διεργασιών κατασκευής της δομής δύο ενώσεων.

Κεφάλαιο 7

Συνοπτικά, η διαδικασία κατασκευής φ/β στοιχείων και ειδικά της δομής δύο ενώσεων περιλαμβάνει πολλά στάδια, σημαντικό μέρος των οποίων είναι οι οπτικές λιθογραφίες. Επιπλέον, ειδικά για τη δομή αυτή απαιτείται ιδιαίτερα προσεκτικός χειρισμός των δειγμάτων κατά την εκτέλεση των διεργασιών γιατί στην αντίθετη περίπτωση είναι πολύ πιθανό να παρουσιαστούν πολλές διατάξεις με βραχυκυκλωμένες τις ενώσεις πίσω εκπομπού και βάσης. Επιπρόσθετα, διαπιστώθηκε ότι η τελική ανόπτυση του Αλουμινίου είναι δυνατό να οδηγήσει επίσης σε αυτό το αποτέλεσμα κάποιες από τις δομές που λειτουργούσαν κανονικά πριν.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Mentor Graphics, *Design Architect (IC)*, www.mentor.com.
- [2] Photronics Inc, *Photomasks and Reticle Lithography Solution*, www.photronics.com.
- [3] Thurber W. R., Mattis R. L., Liu Y. M., και Filliben J. J., *J. of the Electrochemical Society*, Τόμος 31, 1984, σελ. 597.
- [4] Thurber W. R., Mattis R. L., Liu Y. M., και Filliben J. J., *J. of the Electrochemical Society*, Τόμος 31, 1984, σελ. 2291.
- [5] Zhao J. και Green M. A., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 38, 1991, σελ. 1925.
- [6] O.S Heavens, *The Optical Properties of Thin Solid Films*, Dover, 1991.
- [7] Brickman L. A., *7th EPV Sol. Energy Conf.*, Sevilla, Spain, 1988 σελ. 1050.
- [8] Born E. και Wolf M., *Principles of Optics*, 5th ed., New York: Pergamon, 1975.
- [9] Green M. A., *Silicon Solar Cells*, University of New South Wales, Australia, 1995.
- [10] OKMETIC, High Quality Silicon Wafers, www.okmetic.com.
- [11] SRIM 2000, *The Stopping and Range of Ions in Matter*, www.srim.org.
- [12] Zhao J., Wang A., Altermatt P., και Green M. A., *Appl. Phys. Lett.*, Τόμος 66, 1995, σελ. 3636.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ-ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ Φ/Β ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΜΟΝΗΣ ΚΑΙ ΔΙΠΛΗΣ ΕΝΩΣΗΣ**8.1 Εισαγωγή**

Στα προηγούμενο κεφάλαιο δόθηκαν οι βασικές κατευθύνσεις και μια ποιοτική περιγραφή του σχεδιασμού των πειραματικών φ/β διατάξεων. Στη συνέχεια αναλύθηκαν διεξοδικά οι διεργασίες κατασκευής αυτών των δομών, όπως περίπου διεξήχθησαν στο εργαστήριο μικροηλεκτρονικής του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος.

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί το δεύτερο και τελευταίο μέρος του πειραματικού σκέλους της διατριβής, το οποίο αφορά το χαρακτηρισμό και τις ηλεκτρικές μετρήσεις των δομών αυτών. Ο βασικός σκοπός του χαρακτηρισμού των διατάξεων είναι ο έλεγχος της ορθότητας του θεωρητικού μοντέλου που δόθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, όπου έμφαση δίνεται στην μέτρηση της αντίστασης σειράς που οφείλεται στο μέγεθος και την απόσταση των πίσω επαφών. Οι ηλεκτρικές μετρήσεις των δομών διεξήχθησαν κατά ένα μέρος σε εργαστήριο χαρακτηρισμού του ινστιτούτου μικροηλεκτρονικής, ενώ το υπόλοιπο έγινε στο εργαστήριο ηλεκτροτεχνικών υλικών του τμήματος ηλεκτρολόγων μηχανικών και μηχανικών Η/Υ του ΕΜΠ, στο οποίο υπάρχει σύστημα μετρήσεων σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Στο πρώτο τμήμα του κεφαλαίου θα δοθεί μια περιγραφή των τεχνικών χαρακτηρισμού, μέσω των οποίων λαμβάνονται οι χαρακτηριστικές τάσεως ρεύματος (IV) καθώς και ο τρόπος εξαγωγής της αντίστασης σειράς των φ/β στοιχείων. Οι τεχνικές αυτές διαφέρουν για τις δομές μονής και διπλής ένωσης, συνεπώς θα αναλυθούν ξεχωριστά. Στη συνέχεια θα ακολουθήσουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων (ξεχωριστά για τις δύο δομές), τα οποία θα συγκριθούν με τις θεωρητικές προσομοιώσεις.

8.2 Τεχνικές χαρακτηρισμού και απεικόνιση των πειραματικών δομών

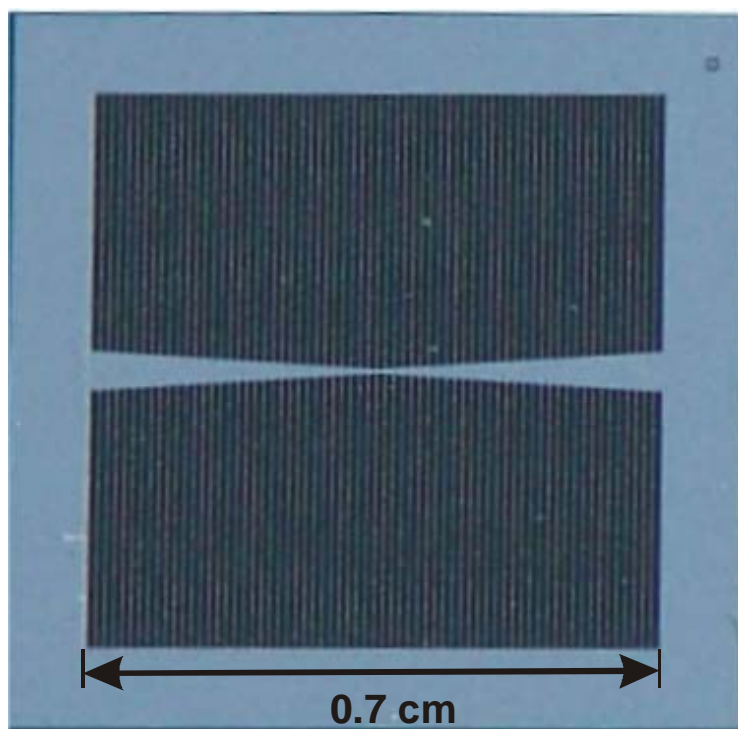
Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι πειραματικές διατάξεις σχεδιάστηκαν έτσι ώστε σε κάθε δισκίδιο να περιλαμβάνει 56 φ/β στοιχεία. Με αυτό

Κεφάλαιο 8

τον τρόπο, επιτυγχάνονται εις διπλούν όλοι οι διαφορετικοί συνδυασμοί αποστάσεων και μεγεθών των πίσω επαφών που μελετήθηκαν στις προσομοιώσεις (24), ενώ επιπλέον προστέθηκαν συνολικά 8 ίδιες συμβατικές δομές που αντιστοιχούν στη μονοδιάστατη περίπτωση, όπου η επαφή καταλαμβάνει ολόκληρη την πίσω επιφάνεια. Προτού προχωρήσουμε στην ανάλυση των τεχνικών χαρακτηρισμού των δομών, θα παρουσιάσουμε ενδεικτικές εικόνες των πειραματικών διατάξεων.

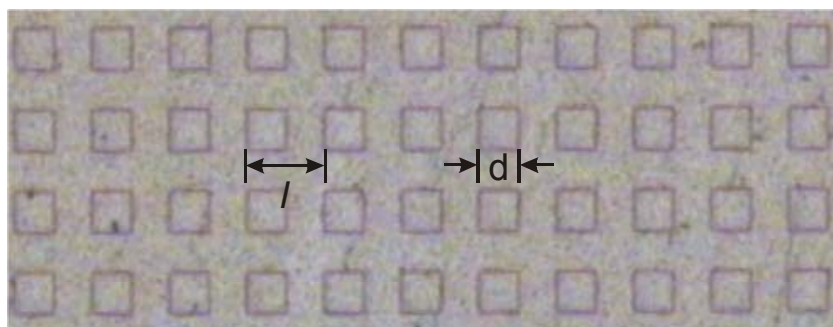
8.2.1 Απεικόνιση πειραματικών δομών

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται σε φωτογραφία, η μπροστινή επιφάνεια των πειραματικών φ/β στοιχείων, η οποία είναι κοινή για τις δομές μονής και διπλής ένωσης. Η ενεργός περιοχή των στοιχείων, καταλαμβάνει επιφάνεια διαστάσεων 0.7 x 0.7cm.



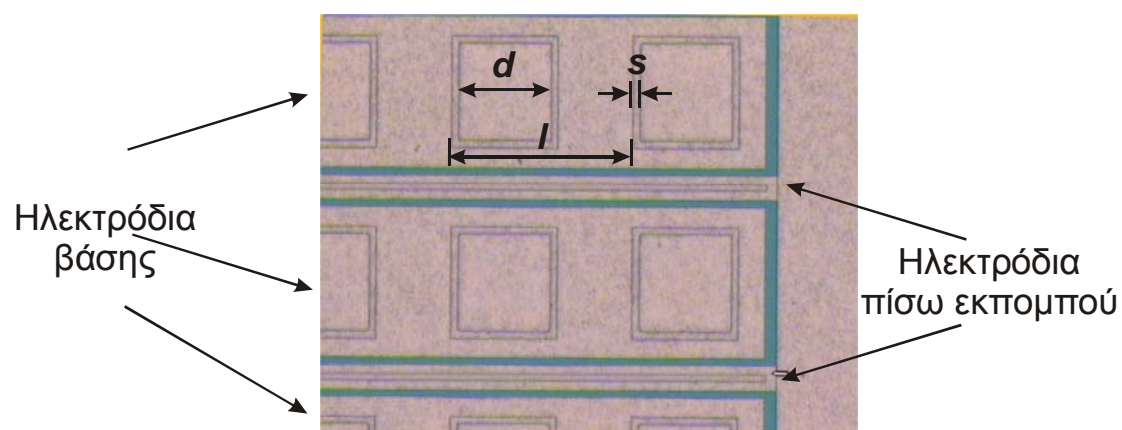
Σχήμα 8.1. Μπροστινή επιφάνεια πειραματικής φ/β διάταξης.

Η διαφορά στις δύο δομές βρίσκεται στην πίσω επιφάνεια. Στο φ/β στοιχείο μιας ένωσης η πίσω επιφάνεια είναι πλήρως καλυμμένη από το αλουμίνιο και οι επαφές γίνονται με μικρά ανοίγματα στο οξείδιο (σχ. 8.2). Οι αποστάσεις l και το μήκος πλευράς d των πίσω επαφών απεικονίζονται στο σχήμα.



Σχήμα 8.2. Λεπτομέρεια τμήματος πίσω επιφάνειας της δομής μονής ένωσης.

Στην περίπτωση της δομής 2 ενώσεων υπάρχουν ξεχωριστά ηλεκτρόδια για τον πίσω εκπομπό και τη βάση (σχ. 8.3)



Σχήμα 8.3. Τμήμα της πίσω επιφάνειας της δομής 2 ενώσεων όπου φαίνονται σε λεπτομέρεια τα ηλεκτρόδια του εκπομπού και της βάσης και οι επαφές.

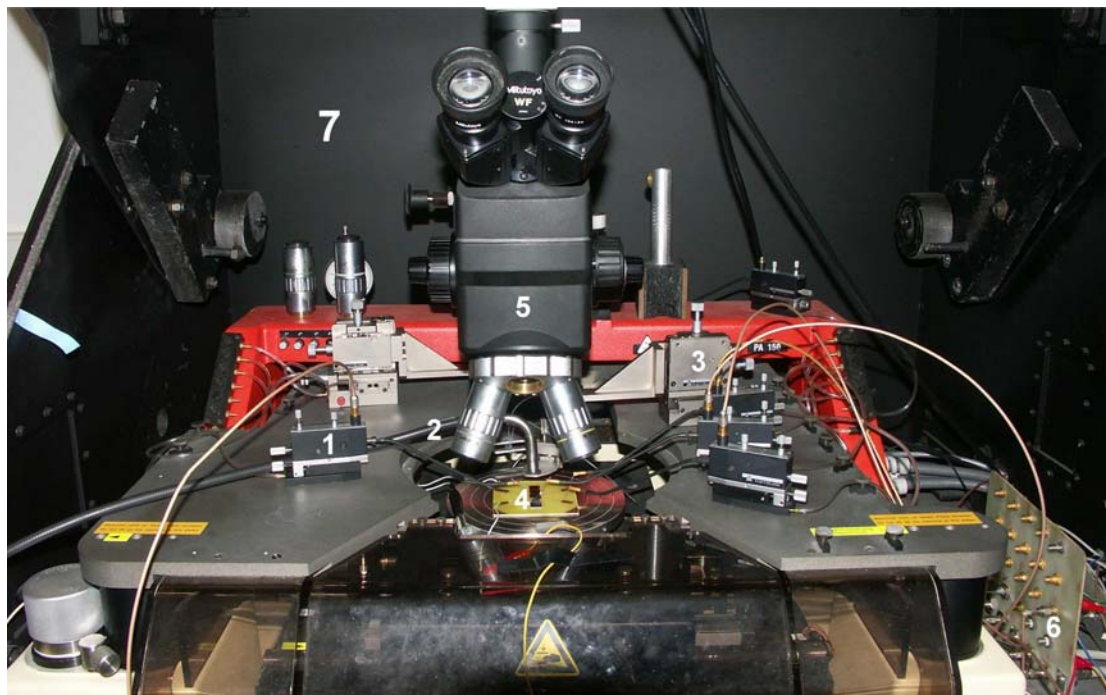
Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα ηλεκτρόδια της βάσης είναι πολύ φαρδύτερα σε σχέση με τα αντίστοιχα της πίσω ένωσης επειδή συλλέγουν πολύ περισσότερο ρεύμα. Το περίγραμμα πάχους s γύρω από τις επαφές είναι η περιοχή που απομονώνει τον εκπομπό από αυτές.

8.2.2 Σύστημα χαρακτηρισμού

Το βασικό σύστημα που έγιναν οι ηλεκτρικές μετρήσεις στο ινστιτούτο μικροηλεκτρονικής του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος είναι ένα ημιαυτόματο σύστημα χαρακτηρισμού (prober) με ακίδες της εταιρίας Karl Suss [1], το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 8.4. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη μετακίνηση της μεταλλικής βάσης (chuck) που τοποθετείται το δείγμα με μεγάλη ακρίβεια, ενώ επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα διασύνδεσής του με υπολογιστή για αυτοματοποιημένες μετρήσεις.

Κεφάλαιο 8

Ο φωτισμός του δείγματος γίνεται μέσω μιας λάμπας αλογόνου ισχύος 150 W της οποίας το φως καθοδηγείται μέσω της οπτικής ίνας που φαίνεται στο σχήμα, ενώ υπάρχει δυνατότητα μεταβολής της έντασής του. Με τη βοήθεια ειδικού μηχανισμού στήριξης κατάλληλα προσαρμοσμένου (αντικείμενο με την αρίθμηση 3 στο σχήμα), το φως μπορεί να κατευθυνθεί εύκολα στο φ/β στοιχείο στο οποίο διεξάγεται η μέτρηση.



Σχήμα 8.4. Τυπικό σύστημα χαρακτηρισμού με ακίδες. 1) Μηχανισμός ακίδων, 2) Οπτική ίνα, 3) μηχανισμός στήριξης οπτικής ίνας, 4) δείγμα τοποθετημένο στη μεταλλική βάση του συστήματος, 5) οπτικό μικροσκόπιο με ενσωματωμένη κάμερα για απεικόνιση σε Η/Υ, 6) πλακέτα ηλεκτρικών συνδέσεων, 7) σκοτεινός θάλαμος (dark box)

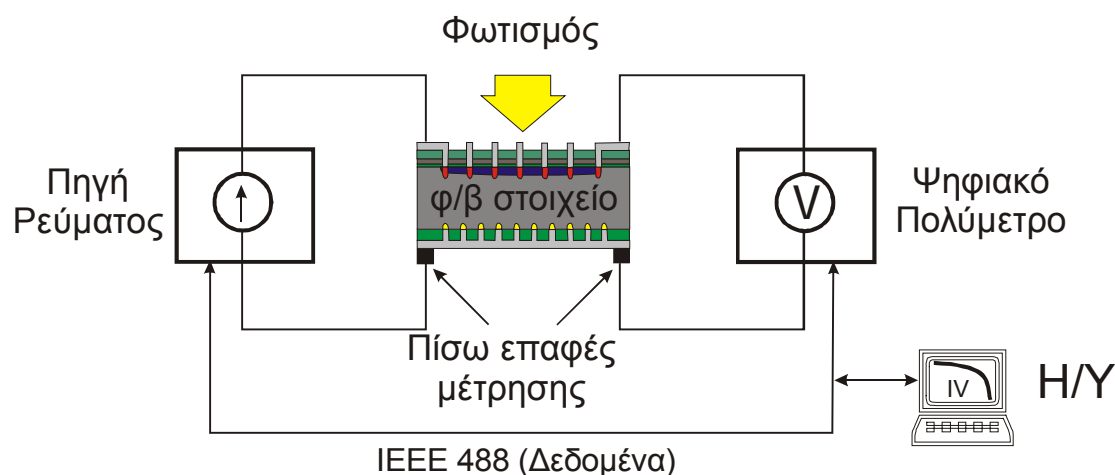
Το σύστημα χαρακτηρισμού έχει επιπλέον τη δυνατότητα λήψης της εικόνας του μικροσκοπίου μέσω κάμερας στον υπολογιστή.

8.2.3 Συνδεσμολογία μετρήσεων για τη δομή μιας ένωσης

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ενδεικτικά η συνδεσμολογία που πραγματοποιήθηκε για τη λήψη των χαρακτηριστικών τάσεως ρεύματος (IV) των στοιχείων μιας ένωσης. Η ίδια συνδεσμολογία χρησιμοποιήθηκε επιπλέον και για τη μέτρηση της αντίστασης σειράς, τεχνική που θα αναλυθεί παρακάτω.

Όπως φαίνεται στο σχήμα, για την λήψη της χαρακτηριστικής IV απαιτείται ένα ψηφιακό πολύμετρο, το οποίο μετράει την τάση στα άκρα του φ/β στοιχείου και μια προγραμματιζόμενη πηγή ρεύματος (συνήθως χρησιμοποιείται η Keithley Current

Source 220) η οποία παρέχει το ρεύμα στο στοιχείο υπό συνθήκες σκότους ή υπό φωτισμό (σαν φορτίο). Το ψηφιακό πολύμετρο στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ήταν το Keithley 196 Digital Multimeter και εναλλακτικά το Keithley 2000 Digital Multimeter. Τα όργανα αυτά έχουν τη δυνατότητα διασύνδεσης με υπολογιστή μέσω του πρωτοκόλλου IEEE 488 (GPIB), οπότε είναι εφικτή η λήψη της χαρακτηριστικής IV στον Η/Υ μέσω του λογισμικού Labview [2].



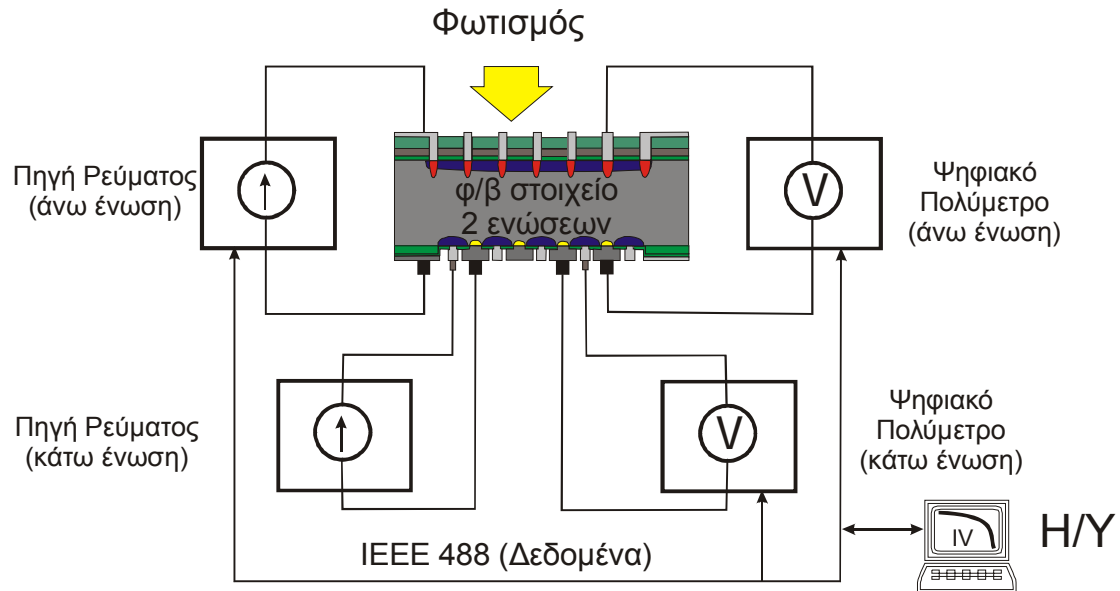
Σχήμα 8.5. Σχηματικό διάγραμμα πειραματικής μέτρησης της χαρακτηριστικής IV για τη δομή μονής ένωσης.

Ένα στοιχείο που πρέπει να τονιστεί είναι ότι για να αποφευχθεί η εισαγωγή παρασιτικών αντιστάσεων λόγω του συστήματος μέτρησης και του τσοκ, χρησιμοποιήθηκε τεχνική συνδεσμολογίας με 4 ακίδες (4 point probe), γεγονός που απαιτεί τη χρήση κατάλληλου συστήματος επαφών για την πίσω επιφάνεια του στοιχείου που απομονώνει το τσοκ από την διάταξη. Με αυτό τον τρόπο εφαρμόζεται ανεξάρτητη διασύνδεση πηγής ρεύματος και ψηφιακού πολυμέτρου.

8.2.4 Συνδεσμολογία μετρήσεων για τη δομή 2 ενώσεων

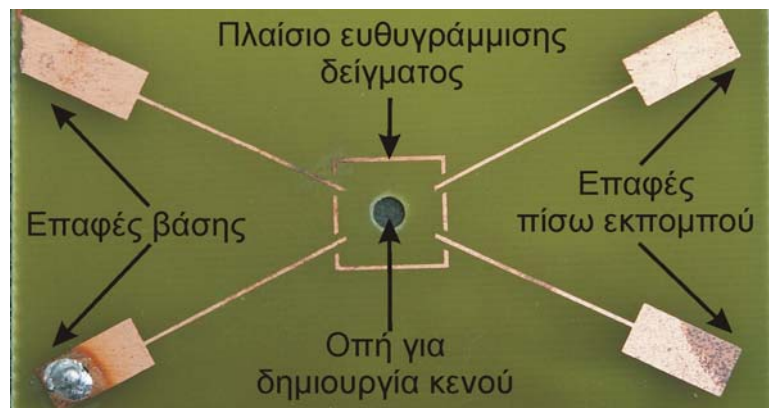
Δεδομένου ότι το φ/β στοιχείο 2 ενώσεων έχει ένα επιπλέον εκπομπό στην πίσω πλευρά, για το χαρακτηρισμό του απαιτείται μια επιπλέον πηγή ρεύματος η οποία τον τροφοδοτεί, όπως και ένα επιπλέον πολύμετρο για να μπορεί να παρακολουθείται η τάση του. Μια τυπική συνδεσμολογία για το σκοπό αυτό φαίνεται στο σχήμα 8.6, όπου απεικονίζεται το σύστημα μέτρησης. Τα χρησιμοποιούμενα όργανα είναι τα ίδια με αυτά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα (πηγή ρεύματος Keithley 220 και ψηφιακά πολύμετρα Keithley 196 και Keithley 2000). Η λήψη των χαρακτηριστικών IV γίνεται συναρτήσει της μεταβολής του ρεύματος στη μπροστινή ένωση, για

δεδομένο σταθερό ρεύμα της πίσω, ενώ καταγράφονται οι τάσεις στους δύο εκπομπούς. Τα αποτελέσματα αυτά αποθηκεύονται σε Η/Υ μέσω του λογισμικού Labview προς περαιτέρω επεξεργασία.



Σχήμα 8.6. Σχηματικό διάγραμμα τυπικής συνδεσμολογίας για το χαρακτηρισμό της δομής 2 ενώσεων.

Επειδή οι επαφές του πίσω εκπομπού και της βάσης βρίσκονται στην μη φωτιζόμενη πλευρά του φ/β στοιχείου, για να επιτευχθεί η μέτρηση ήταν απαραίτητη η σχεδίαση ειδική πλακέτας (σχ. 8.7) στην οποία τοποθετείται το υπό μέτρηση φ/β στοιχείο και απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα. Αυτή έχει ως σκοπό αφενός τη σωστή μέτρηση των τάσεων μέσω της τεχνικής των 4 ακίδων και αφετέρου τη κατάλληλη τοποθέτηση του δείγματος έτσι ώστε να μην βραχυκυκλώνουν οι επαφές του πίσω εκπομπού και της βάσης.

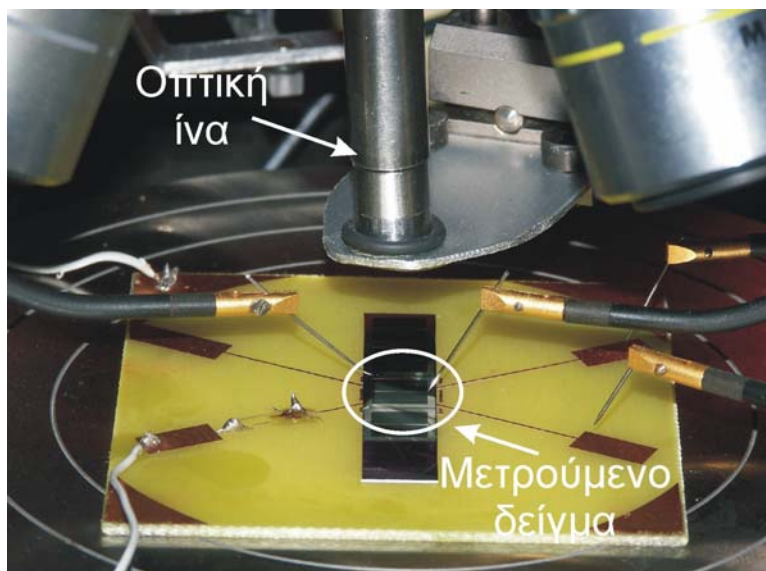


Σχήμα 8.7. Φωτογραφία πλακέτας για το χαρακτηρισμό της δομής 2 ενώσεων

Κεφάλαιο 8

Όπως φαίνεται στο σχήμα, στην πλακέτα έχει οριστεί ένα πλαίσιο στο οποίο γίνεται η σωστή τοποθέτηση του δείγματος με τη βοήθεια του οπτικού μικροσκοπίου. Τα ηλεκτρόδια είναι ηλεκτρικά απομονωμένα μεταξύ τους, όπου αυτά της αριστερής πλευράς είναι οι επαφές της βάσης, ενώ της δεξιάς είναι του πίσω εκπομπού. Προς απλούστευση της συνδεσμολογίας, η μια από τις επαφές (πάνω αριστερά) συνδέεται με τη γείωση του συστήματος και χρησιμοποιείται ως κοινή γείωση για τις πηγές ρεύματος. Επίσης, η κάτω αριστερά επαφή αποτελεί την κοινή γείωση για τα ψηφιακά πολύμετρα.

Το επόμενο σχήμα δείχνει παραστατικά σε φωτογραφία τη διεξαγωγή μιας μέτρησης υπό φωτισμό όπου φαίνεται η τοποθέτηση του δείγματος στην πλακέτα.



Σχήμα 8.8. Φωτογραφία διεξαγωγής μέτρησης ϕ/β στοιχείου διπλής ένωσης.

Για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση απαιτείται η κοπή του δισκιδίου σε λωρίδες όπως φαίνεται στο σχήμα και το στοιχείο υπό μέτρηση ευθυγραμμίζεται στην πλακέτα. Η τρύπα στην πλακέτα δημιουργεί κενό το οποίο επιτρέπει την καλή επαφή με αυτή και το δείγμα.

8.2.5 Τεχνική μέτρησης αντίστασης σειράς (R_s)

Η συνδεσμολογία χαρακτηρισμού των διατάξεων που αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εξαγωγή της αντίστασης σειράς. Η τεχνική μέτρησής της διαφέρει για τις 2 δομές, οπότε θα αναλυθεί χωριστά.

8.2.5.1 Αντίσταση σειράς διάταξης μιας ένωσης

Ο υπολογισμός της αντίστασης σειράς μπορεί να γίνει με καλή ακρίβεια με τη βοήθεια μετρήσεων υπό φωτισμό και σκοτάδι. Συγκεκριμένα, όταν το φ/β στοιχείο δεν φωτίζεται, η τάση V_{da} για την οποία αντιστοιχεί ρεύμα ισοδύναμο με το ρεύμα βραχυκυκλώματος (I_{sc}) σε συνθήκες φωτισμού, είναι προφανώς μεγαλύτερη από την τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) του στοιχείου, λόγω της πτώσης δυναμικού που οφείλεται στην αντίσταση σειράς. Συνεπώς ισχύει [3]

$$V_{da} - V_{oc} = R_s I_{sc} \quad (8.1)$$

Από την (8.1) προκύπτει η σχέση εξαγωγής της αντίστασης σειράς

$$R_s = \frac{V_{da} - V_{oc}}{I_{sc}} \quad (8.2)$$

Έτσι, προκειμένου να υπολογίσουμε την R_s της πειραματικής δομής, αρχικά τη φωτίζουμε και μετρούμε το ρεύμα βραχυκυκλώματος και την τάση ανοιχτού κυκλώματος. Στη συνέχεια, διακόπτουμε τη φωτεινή διέγερση και τροφοδοτούμε το στοιχείο με ρεύμα ίσο με I_{sc} . Η τάση που μετρούμε στα άκρα του (V_{da}), επιτρέπει τον καθορισμό της R_s μέσω της (8.2).

8.2.5.2 Αντίσταση σειράς διάταξης 2 ενώσεων

Η μέτρηση της αντίστασης σειράς για τη δομή 2 ενώσεων ακολουθεί το ίδιο σκεπτικό με την προηγούμενη ενότητα, με τη διαφορά ότι δεν είναι άμεσος ο τρόπος εκτίμησης των παραμέτρων της σχέσης (8.2). Έτσι, σε συνθήκες φωτισμού το ρεύμα βραχυκυκλώματος ισούται με το άθροισμα των αντίστοιχων ρευμάτων στις 2 ενώσεις, δηλαδή

$$I_{sc} = I_{sc1} + I_{sc2} \quad (8.3)$$

όπου I_{sc1} είναι το ρεύμα βραχυκυκλώματος της πάνω ένωσης και I_{sc2} είναι το αντίστοιχο της πίσω ένωσης. Αυτά μπορούν να μετρηθούν με τη βοήθεια των 2 ψηφιακών πολυμέτρων του σχήματος 8.6.

Στη συνέχεια πρέπει να καθοριστεί η V_{oc} . Σε αυτή την περίπτωση αποφεύγεται η ηλεκτρική σύνδεση των 2 εκπομπών, διότι θα εισάγει παρασιτικές ωμικές αντιστάσεις στο σύστημα. Για να βρεθεί λοιπόν η συνθήκη ανοιχτού κυκλώματος, τροφοδοτούμε με ίσα και αντίθετα ρεύματα τις 2 ενώσεις, τέτοια ώστε η τάση σε αυτές να είναι ίδια. Σε

Κεφάλαιο 8

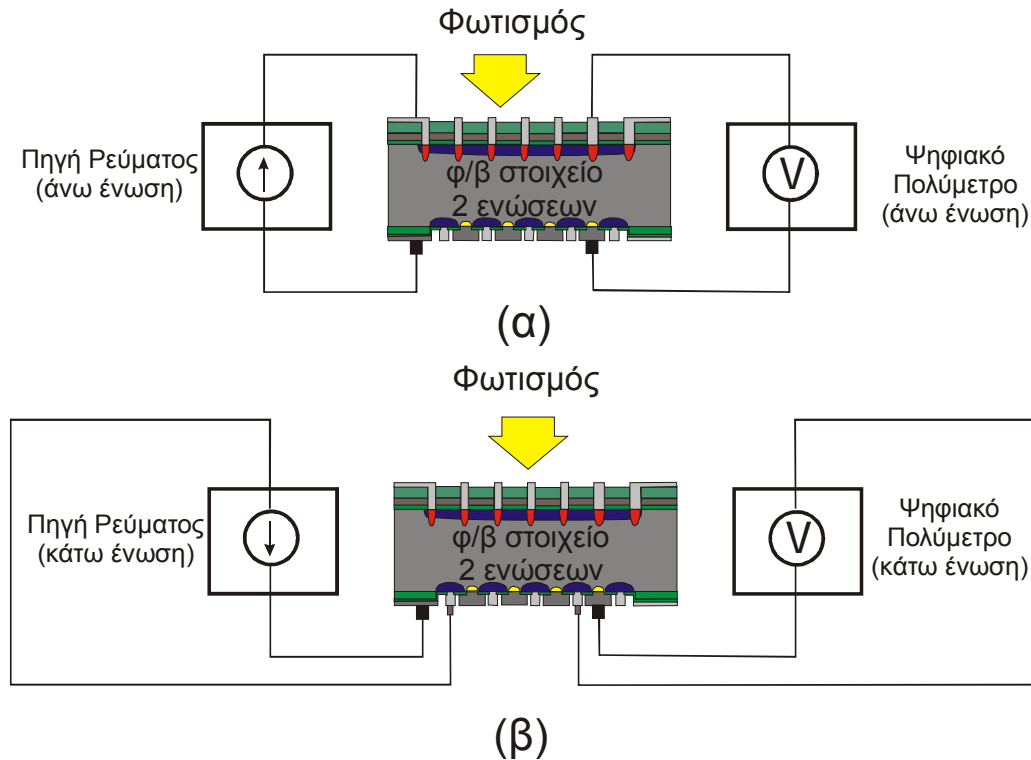
αυτή την περίπτωση, το ρεύμα που διαρρέει το στοιχείο μηδενίζεται, οπότε η τιμή αυτή του δυναμικού που μετρούν τα πολύμετρα είναι η V_{oc} .

Η τελευταία παράμετρος που απαιτείται να βρεθεί είναι η V_d . Σε αυτό το στάδιο, διακόπτεται το φως και τροφοδοτούμε την πάνω και κάτω ένωση με ρεύματα I_{d1} και I_{d2} αντίστοιχα, τέτοια ώστε το άθροισμά τους να ισούται με το ρεύμα βραχυκυκλώματος, ενώ ταυτόχρονα φροντίζουμε οι τιμές τους να είναι τέτοιες ώστε το δυναμικό που μετρούν τα 2 πολύμετρα (V_{d1} , V_{d2}) να είναι το ίδιο, το οποίο ουσιαστικά αποτελεί την ζητούμενη V_d . Συνοπτικά, πρέπει να ισχύουν ταυτόχρονα τα ακόλουθα:

$$I_{sc} = I_{d1} + I_{d2} \quad (8.4)$$

$$V_{d1} = V_{d2} = V_d \quad (8.5)$$

Έχοντας ολοκληρώσει τον καθορισμό των απαιτούμενων παραμέτρων, από την 8.2 εξάγεται η αντίσταση σειράς.



Σχήμα 8.9. Συνδεσμολογία μέτρησης της αντίστασης σειράς της κάθε ένωσης ξεχωριστά: α) πίσω ένωση ανοιχτοκυκλωμένη, β) μπροστινή ένωση ανοιχτή.

Ένα άλλο σημείο που μπορεί να μελετηθεί είναι η αντίσταση σειράς που παρουσιάζει η διάταξη εξετάζοντας κάθε ένωση ξεχωριστά, δηλαδή αφήνοντας τη μια από τις 2 ενώσεις ανοιχτοκυκλωμένη (σχ. 8.9). Συγκεκριμένα, στη μια περίπτωση η μέτρηση της R_s γίνεται αφήνοντας τον πίσω εκπομπού ανοιχτοκυκλωμένο και λαμβάνοντας την τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc1} και το ρεύμα βραχυκυκλώματος J_{sc1} της μπροστινής ένωσης

Κεφάλαιο 8

υπό φωτισμό και στην συνέχεια την τάση V_{da1} που προκύπτει από την τροφοδοσία της με το ίδιο ρεύμα σε συνθήκες σκότους. Με ανάλογο τρόπο εξάγονται οι παράμετροι V_{oc2} , J_{sc2} , και V_{da2} για τη δεύτερη συνδεσμολογία, όπου η μπροστινή ένωση είναι ανοιχτοκυκλωμένη. Έτσι, η πρώτη κατάσταση λειτουργίας είναι ουσιαστικά ισοδύναμη με τη δομή μπροστινής ένωσης που εξετάστηκε νωρίτερα, ενώ η δεύτερη αντιστοιχεί με τη διάταξη πίσω ένωσης που συζητήθηκε στο κεφάλαιο 6 (σχήμα 6.7).

Συνεπώς σύμφωνα με την προηγούμενη ενότητα, οι αντιστάσεις σειράς R_{s1} και R_{s2} υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$R_{s1} = \frac{V_{da1} - V_{oc1}}{I_{sc1}} \quad (8.6)$$

$$R_{s2} = \frac{V_{da2} - V_{oc2}}{I_{sc2}} \quad (8.7)$$

Από τις (8.6) και (8.7) μπορούν να καθοριστούν οι αντιστάσεις σειράς για τις 2 διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας της διάταξης.

8.3 Μετρήσεις χαρακτηριστικών IV σε συνθήκες σκότους

Σε αυτή την ενότητα θα αναλυθούν οι χαρακτηριστικές τάσεως-ρεύματος για τις δύο διαφορετικές δομές. Τα στοιχεία των καμπυλών δίνουν διάφορες πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των διόδων που απαρτίζουν τα φ/β στοιχεία. Επιπρόσθετα, με τη βοήθεια του συστήματος μετρήσεων σε χαμηλές θερμοκρασίες του εργαστηρίου ηλεκτροτεχνικών υλικών του ΕΜΠ θα περιγραφεί η συμπεριφορά της δομής μονής ένωσης σε χαμηλές θερμοκρασίες.

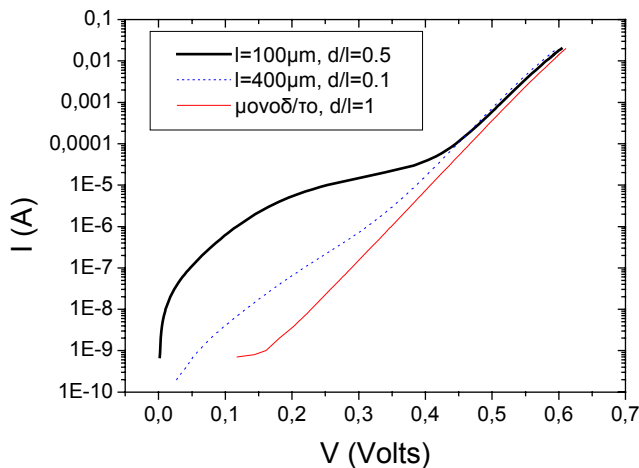
8.3.1 Δομή μονής ένωσης

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα οι καμπύλες IV για φ/β στοιχεία μιας ένωσης από το ίδιο δισκίδιο, των οποίων το μέγεθος και οι αποστάσεις των πίσω επαφών διαφέρουν, ενώ η μια από τις χαρακτηριστικές αντιστοιχεί στη συμβατική δομή όπου η επαφή καταλαμβάνει ολόκληρη την πίσω επιφάνεια.

Από την μελέτη των καμπυλών, παρατηρούμε ότι η πιο ιδανική χαρακτηριστική είναι αυτή που η επαφή καταλαμβάνει ολόκληρη την πίσω επιφάνεια, η οποία παραμένει γραμμική σχεδόν σε όλη την κλίμακα των τάσεων, ενώ επιπλέον ο συντελεστής ποιότητας της διόδου (n) είναι κοντά στη μονάδα, όπως θα φανεί

Κεφάλαιο 8

παρακάτω. Η καμπύλη που αντιστοιχεί σε απόσταση επαφών 400 μm και λόγο $d/l=0.1$ παρουσιάζει μια τυπική χαρακτηριστική που αντιστοιχεί στο μοντέλο των δύο διόδων όπως δίνεται στην εξίσωση (1.25) του πρώτου κεφαλαίου, όπου η περιοχή 0.2-0.4 V αντιστοιχεί στον δεύτερο εκθετικό όρο, ενώ η υπόλοιπη (0.4-0.6V) στον πρώτο όπου ο συντελεστής ποιότητας κυμαίνεται περίπου στη μονάδα. Δεδομένου ότι η αντίσταση σειράς των στοιχείων είναι σχετικά μικρή, η κάμψη της χαρακτηριστικής στις μεγάλες τάσεις είναι ανεπαίσθητη. Ενδιαφέρον παρουσιάζει όμως η μορφή της τρίτης καμπύλης, ($l=100\mu\text{m}$, $d/l=0.5$), η οποία παρουσιάζει μια χαρακτηριστική καμπούρα για μια μεγάλη περιοχή τάσεων (0.05-0.4V). Μια ανάλογη συμπεριφορά αν και σε μικρότερο βαθμό, έχει παρουσιαστεί στα φ/β στοιχεία PERL υψηλής απόδοσης [4], η οποία αποδίδεται στη συμπεριφορά των φορέων που βρίσκονται κοντά στη διεπιφάνεια Si-SiO₂, οι οποίοι επηρεάζουν τον επιφανειακό ρυθμό επανασύνδεσης. Στην περίπτωση μας πάντως η καμπύλη εμφανίζει τελείως μη γραμμική συμπεριφορά.



Σχήμα 8.10. Χαρακτηριστικές IV διατάξεων μονής ένωσης σε συνθήκες σκότους από το ίδιο δισκίδιο (κάτω ψηφίδα). Το συγκεκριμένο δισκίδιο έχει μία αντιανακλαστική επίστρωση από SiO₂ 110 nm πάχους.

Το γραμμικό τμήμα των χαρακτηριστικών IV των φ/β στοιχείων στις μεγαλύτερες περιοχές τάσεων παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής του ρεύματος επανασύνδεσης του στοιχείου (τομή της ευθείας με τον άξονα των ρευμάτων για $V=0$) όπως και το συντελεστή ποιότητας της ένωσης για την περιοχή αυτή (κλίση της χαρακτηριστικής). Συνεπώς από τις ληφθείσες καμπύλες των στοιχείων έγινε γραμμική παρεμβολή του τμήματος αυτού και προέκυψαν οι τιμές των παραμέτρων αυτών που παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα για το πρώτο δισκίδιο (με την απλή αντιανακλαστική

Κεφάλαιο 8

επίστρωση από SiO₂). Ο υπολογισμός του συντελεστή ποιότητας έγινε θεωρώντας θερμοκρασία περιβάλλοντος 23 °C για όλα τα δείγματα.

Άνω Ψηφίδα								
	l=400μm		l=200μm		l=100μm		l=50μm	
d/l	J ₀ (pA)	n	J ₀ (pA)	n	J ₀ (pA)	n	J ₀ (pA)	n
0,5	3	1,02	58,8	1,2	103	1,23	-	-
0,33	132	1,24	3400	1,48	21,9	1,14	-	-
0,25	634	1,36	19	1,14	11500	1,64	-	-
0,2	4,18	1,04	1230	1,39	68	1,21	-	-
0,125	8,38	1,05	5,52	1,02	30,9	1,14	-	-
0,1	45,7	1,15	-	-	8670	1,57	-	-
1(α)	1,46	1,01						
1(β)	2,28	1,03						
1(γ)	1,33	1						
1(δ)	-	-						
Κάτω Ψηφίδα								
	l=400μm		l=200μm		l=100μm		l=50μm	
d/l	J ₀ (pA)	n	J ₀ (pA)	n	J ₀ (pA)	n	J ₀ (pA)	n
0.5	2,21	1,01	-	-	10	1,09	2,7	1
0.33	2,44	1,01	-	-	20	1,13	24,6	1,12
0.25	447	1,33	-	-	2,8	1,02	2,31	1,01
0.2	3,14	1,01	-	-	3,9	1,02	6,33	1,06
0.125	3430	1,5	-	-	6,3	1,02	9,34	1,05
0.1	4,21	1,03	-	-	7,79	1,05	-	-
1(α)	-	-						
1(β)	-	-						
1(γ)	1,28	1,01						
1(δ)	-	-						

Πίνακας 8.1. Παράμετροι χαρακτηριστικών IV σκότους φ/β στοιχείων του δισκίου με την απλή αντιανακλαστική επίστρωση SiO₂.

Από τα δεδομένα του πίνακα 8.1, παρατηρούμε ότι ένα σημαντικό ποσοστό των φ/β στοιχείων του δισκίου, έχει συντελεστή ποιότητας πολύ κοντά στη μονάδα και επιπλέον αυτά έχουν τα χαμηλότερα ρεύματα ανασύνδεσης (μερικά pA). Σε αυτά τα στοιχεία η χαρακτηριστική τους είναι γραμμική για μεγάλη περιοχή τάσεων και έχει συμπεριφορά που περιγράφεται καλά από το μοντέλο των 2 διόδων. Επιπλέον, όλα τα στοιχεία με την επαφή που καλύπτει ολόκληρη την πίσω επιφάνεια έχουν γραμμική χαρακτηριστική με συντελεστή ποιότητας 1 σχεδόν σε όλες τις περιοχές τάσεων. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν μερικά φ/β στοιχεία που έχουν η γραμμική τους περιοχή είναι περιορισμένη σε μια πολύ μικρή περιοχή τάσεων, σχετικά υψηλών, όπου η γραμμική παρεμβολή δείχνει συντελεστές ποιότητας αρκετά πάνω από τη μονάδα και

Κεφάλαιο 8

πολύ υψηλά ρεύματα ανασύνδεσης, που σημαίνει ότι το γραμμικό μοντέλο δεν μπορεί να εφαρμοστεί ικανοποιητικά σε αυτές τις περιπτώσεις δεδομένου ότι η συμπεριφορά του φ/β στοιχείου αποκλίνει σημαντικά από την ιδανική δίοδο.

Με τον ίδιο τρόπο, ο πίνακας 8.2 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά των φ/β στοιχείων του δεύτερου δισκιδίου το οποίο διαθέτει διπλή αντιανακλαστική επίστρωση από Si_3N_4 (57nm) και TEOS (110nm), όπως προκύπτουν από τις χαρακτηριστικές IV.

Άνω Ψηφίδα								
	l=400μm		l=200μm		l=100μm		l=50μm	
d/l	J_0 (pA)	n	J_0 (pA)	n	J_0 (pA)	n	J_0 (pA)	n
0,5	4,48	1,02	3,28	1,01	4,02	1,01	-	-
0,33	4,88	1,04	5,17	1,05	2,92	1,02	-	-
0,25	168	1,24	2,75	1,02	5,34	1,05	-	-
0,2	7,23	1,06	10	1,08	4,22	1,04	-	-
0,125	5,81	1,05	2,35	1,01	2,86	1,02	-	-
0,1	130	1,24	-	-	1,77	1	-	-
1(α)	-	-						
1(β)	2,82	1,01						
1(γ)	2,9	1						
1(δ)	2,89	1,01						
Κάτω Ψηφίδα								
	l=400μm		l=200μm		l=100μm		l=50μm	
d/l	J_0 (pA)	n	J_0 (pA)	n	J_0 (pA)	n	J_0 (pA)	n
0.5	2,79	1,01	-	-	3	1,01	4,29	1,02
0.33	2	1,01	-	-	1,95	1,01	1,77	1,01
0.25	1,52	1,01	-	-	1,76	1,01	1,57	1,01
0.2	3,18	1,04	-	-	2,16	1,01	1,78	1,01
0.125	3,96	1,05	-	-	2,74	1,02	3,06	1,02
0.1	2,47	1,03	-	-	2,24	1,02	1040	1,4
1(α)	-	-						
1(β)	6,75	1,02						
1(γ)	4,2	1,01						
1(δ)	-	-						

Πίνακας 8.2. Παράμετροι χαρακτηριστικών IV σκότους φ/β στοιχείων του δισκίου με την διπλή αντιανακλαστική επίστρωση Si_3N_4 (57nm) και TEOS (110nm).

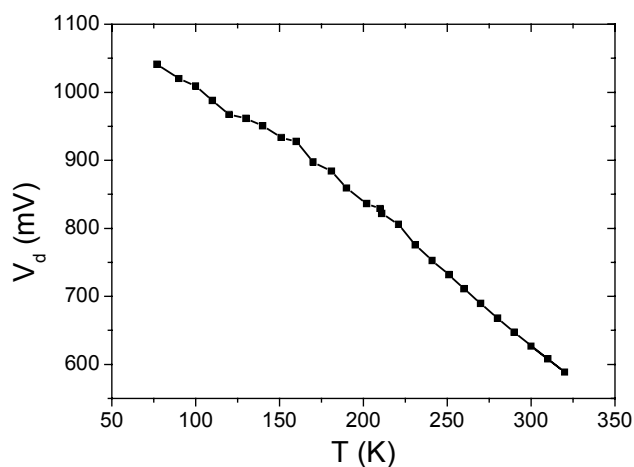
Όπως προκύπτει από τον πίνακα 8.2, σχεδόν όλα τα φ/β στοιχεία έχουν χαρακτηριστικές σχεδόν ιδανικές, με ρεύματα επανασύνδεσης της τάξης των μερικών pA και συντελεστή ποιότητας πολύ κοντά ή ίσο με τη μονάδα για μια μεγάλη περιοχή τάσεων.

8.3.1.1 Μετρήσεις σε διαφορετικές θερμοκρασίες

Κεφάλαιο 8

Πέρα από τις μετρήσεις σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, μελετήθηκε η συμπεριφορά των φ/β στοιχείων μονής ένωσης υπό χαμηλές θερμοκρασίες με τη βοήθεια του συστήματος που υφίσταται στο εργαστήριο ηλεκτροτεχνικών υλικών του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών και Μηχ/κών Η/Υ ΕΜΠ. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ένα φ/β στοιχείο (κομμένο από δισκίδιο διαφορετικό από αυτά της προηγούμενης ενότητας). Το στοιχείο αυτό εισάγεται στον κρουστάτη στον οποίο η ροή υγρού αζώτου υπό συνθήκες κενού εξασφαλίζει την ψύξη του δείγματος, ενώ η ρύθμιση της θερμοκρασίας γίνεται με τη βοήθεια κατάλληλου ελεγκτή που ρυθμίζει τη λειτουργία της αντίστασης του κρουστάτη, έτσι ώστε να διατηρείται η επιθυμητή θερμοκρασία. Η εξαγωγή της χαρακτηριστικής IV γίνεται με την τροφοδοσία της διάταξης μέσω της πηγής ρεύματος Yokogawa 7651 ενώ η τάση στα άκρα της λαμβάνεται από βολτόμετρο ακριβείας (δυνατότητας μέτρησης τάσεων της τάξης των nV). Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύονται σε Η/Υ μέσω κατάλληλου λογισμικού.

Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει την μεταβολή της τάσης V_d στα άκρα του στοιχείου για δεδομένο ρεύμα 20mA συναρτήσει της θερμοκρασίας.

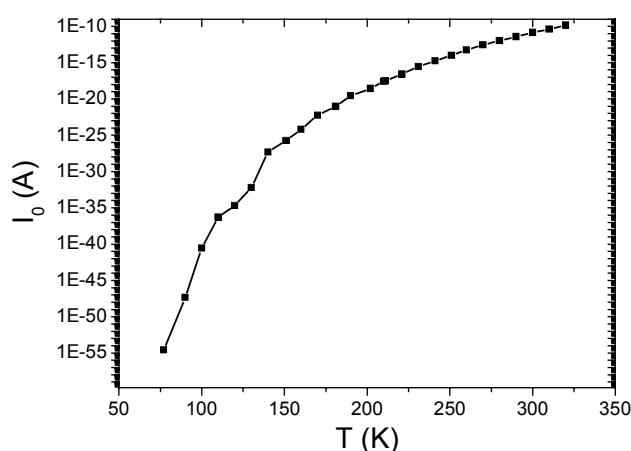


Σχήμα 8.11. Μεταβολή της τάσης στα άκρα του φ/β στοιχείου για δεδομένο ρεύμα (20mA) συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Από την καμπύλη του σχήματος παρατηρούμε ότι η τάση στα άκρα του στοιχείου αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την πτώση της θερμοκρασίας όπως θα ήταν αναμενόμενο, ενώ η κλίση της καμπύλης είναι περίπου -2mV/K .

Ένα άλλο μέγεθος που έχει ενδιαφέρον ως προς την εξάρτησή του με τη θερμοκρασία είναι το ρεύμα επανασύνδεσης του στοιχείου. Η εξαγωγή του μέσω της

χαρακτηριστικής IV δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης της ενδογενούς συγκέντρωσης n_i . Με αυτό τον τρόπο την υπολόγισαν με καλή ακρίβεια οι Sproul και Green [5-6] για μεγάλο εύρος θερμοκρασιών χρησιμοποιώντας φ/β στοιχεία τύπου PERC με χαρακτηριστική σχεδόν ιδανική (συντελεστής ποιότητας διόδου $n=1$) για μεγάλο εύρος τάσεων. Οι Misiakos και Tsamakos [7] την υπολόγισαν και αυτοί με μεγάλη ακρίβεια μέσω μετρήσεων χωρητικότητας σε διάταξη διόδου pin (ανιχνευτή ακτινοβολίας πυριτίου). Το ακόλουθο σχήμα παριστάνει το ρεύμα επανασύνδεσης στο φ/β στοιχείο συναρτήσει της θερμοκρασίας, όπως εκτιμήθηκε από τις χαρακτηριστικές IV.



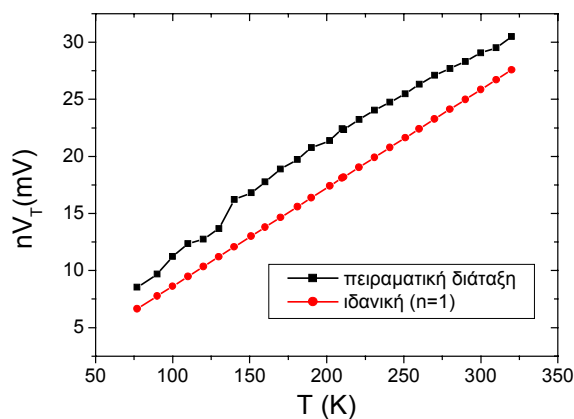
Σχήμα 8.12. Ρεύμα ανασύνδεσης της διάταξης συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Η καμπύλη του σχήματος 8.12 δείχνει την έντονη εξάρτηση του ρεύματος ανασύνδεσης I_0 της δομής από τη θερμοκρασία. Στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες ειδικά (κάτω από 150 K), η πτώση που παρατηρείται είναι μερικές τάξεις μεγέθους για μεταβολή της θερμοκρασίας κατά 10 K. Αυτό το γεγονός μπορεί να αποδοθεί στην τετραγωνική εξάρτηση του ρεύματος ανασύνδεσης από την παράμετρο n_i (σχέση 1.24) η οποία αλλάζει πολύ για αυτές τις περιοχές θερμοκρασιών [6,7].

Το επόμενο διάγραμμα αναπαριστά το γινόμενο του συντελεστή ποιότητας της διόδου του φ/β στοιχείου επί τη θερμική τάση V_T ως συνάρτηση της θερμοκρασίας της διάταξης, ενώ παρατίθεται για σύγκριση η καμπύλη της ιδανικής διόδου με $n=1$. Από την πειραματική καμπύλη προκύπτει μια ουσιαστικά γραμμική εξάρτηση του μεγέθους αυτού από την θερμοκρασία, γεγονός που σημαίνει ότι ο συντελεστής ποιότητας της διόδου δεν μεταβάλλεται πολύ και παραμένει λίγο μεγαλύτερος από τη μονάδα (μεταξύ 1.1 και 1.3 για όλη την περιοχή των θερμοκρασιών), όπως φαίνεται και από το σχήμα

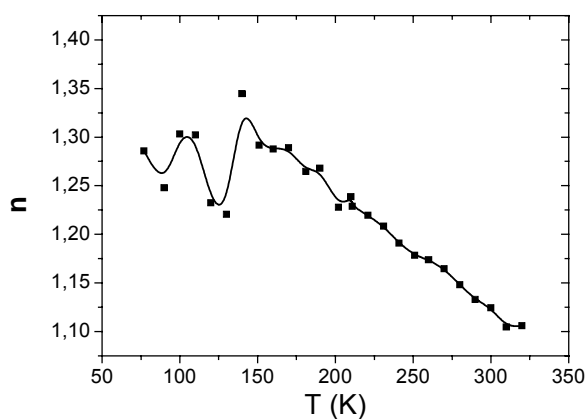
Κεφάλαιο 8

8.14. Στις χαμηλές θερμοκρασίες υπάρχει μια σχετικά υψηλή διακύμανση πιθανόν λόγω μεγαλύτερου σφάλματος στην προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων, όπου η κλίση των χαρακτηριστικών αλλάζει έντονα.



Σχήμα 8.13. Συντελεστής ποιότητας της διόδου του φ/β στοιχείου επί την θερμική τάση V_T συναρτήσει της θερμοκρασίας και σύγκριση με την ιδανική περίπτωση ($n=1$).

Σε γενικές γραμμές πάντως ο συντελεστής ποιότητας αυξάνεται ελαφρά με τη μείωση της θερμοκρασίας. Προφανώς η χαρακτηριστική του φ/β στοιχείου απέχει κάπως από την ιδανική δεδομένου ότι ο συντελεστής ποιότητάς του δεν ισούται με τη μονάδα ακόμα και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (περίπου 300 K).



Σχήμα 8.14. Μεταβολή του συντελεστή ποιότητας της διόδου του φ/β στοιχείου συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται όλα τα μεγέθη που εξήχθησαν από τις χαρακτηριστικές IV του φ/β στοιχείου σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Κεφάλαιο 8

T (K)	I_0 (A)	nV_T (mV)	n	V_d (mV)
320	$1,48 \times 10^{-10}$	30,4971	1,106	588,6
310	$3,99 \times 10^{-11}$	29,5072	1,105	608
300	$1,41 \times 10^{-11}$	29,0698	1,124	626,6
290	$3,77 \times 10^{-12}$	28,3126	1,133	647,1
280	$1,07 \times 10^{-12}$	27,7008	1,148	667,9
270	$2,75 \times 10^{-13}$	27,0929	1,164	689,4
260	$5,58 \times 10^{-14}$	26,3019	1,174	711,1
251	$9,9 \times 10^{-15}$	25,4842	1,178	731,7
241	$1,76 \times 10^{-15}$	24,7341	1,191	752,6
231	$2,9 \times 10^{-16}$	24,05	1,208	775,6
221	$2,62 \times 10^{-17}$	23,2234	1,219	805,6
211	$3,15 \times 10^{-18}$	22,3414	1,229	821,8
210	$2,74 \times 10^{-18}$	22,4115	1,238	829
202	$2,72 \times 10^{-19}$	21,3721	1,228	836,2
190	$2,81 \times 10^{-20}$	20,7598	1,268	859,1
181	$9,3 \times 10^{-22}$	19,7239	1,265	884,1
170	$5,52 \times 10^{-23}$	18,8822	1,289	897,3
160	$6,53 \times 10^{-25}$	17,7557	1,288	927,6
151	$1,9 \times 10^{-26}$	16,8067	1,292	933,4
140	$4,93 \times 10^{-28}$	16,2232	1,345	950,7
130	$6,09 \times 10^{-33}$	13,6743	1,221	961,4
120*	$2,12 \times 10^{-35}$	12,7437	1,232	967,3
110	$5,14 \times 10^{-37}$	12,3428	1,302	987,9
100	$2,77 \times 10^{-41}$	11,231	1,303	1009
90	$4,42 \times 10^{-48}$	9,6781	1,248	1020
77	$2,66 \times 10^{-55}$	8,5323	1,286	1041

Πίνακας 8.3. Παράμετροι χαρακτηριστικών IV φ/β στοιχείου για διαφορετικές θερμοκρασίες.

Η ακρίβεια των παραμέτρων που προέκυψαν από τις χαρακτηριστικές IV του στοιχείου, θα μπορούσε να ήταν ακόμα καλύτερη αν είχε χρησιμοποιηθεί κάποιο από τα δείγματα με γραμμική χαρακτηριστική σε όλη σχεδόν την περιοχή των τάσεων.

8.3.2 Διάταξη 2 ενώσεων

Με παρόμοιο τρόπο όπως και στην προηγούμενη ενότητα, λαμβάνονται οι χαρακτηριστικές τάσεως ρεύματος για τη διάταξη 2 ενώσεων. Τέτοιες δομές μετρήθηκαν από 3 διαφορετικά δισκία, όπου να σημειωθεί ότι ένα μεγάλο ποσοστό αυτών είχαν βραχυκυκλωμένες τις ενώσεις πίσω εκπομού και βάσης, οπότε αυτές δεν μετρήθηκαν.

Στους επόμενους πίνακες (8.4-8.6) παρατίθενται το ρεύμα ανασύνδεσης και ο συντελεστής ποιότητας της άνω ένωσης για τα δισκία με αριθμό 15, 4 και 16. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος όπου πραγματοποιήθηκαν οι μέτρησεις ήταν 21⁰C.

Κεφάλαιο 8

d	l	J_0 (pA) - άνω ένωση	n - άνω ένωση
100	200	164	1,28
133	400	2,21	1,04
80	400	2,11	1,03
40	400	2,07	1,02

Πίνακας 8.4. Παράμετροι χαρακτηριστικών IV σκότους δομών 2 ενώσεων για το δισκίδιο με αριθμό 15 (άνω ψηφίδα).

d	l	J_0 (pA) - άνω ένωση	n - άνω ένωση
Άνω ψηφίδα			
40	400	1,59	1,04
100	400	2,12	1,05
133	400	6,37	1,1
25	200	2,79	1,06
40	200	17,6	1,17
50	200	4,63	1,09
20	100	2,13	16,25
Κάτω ψηφίδα			
50	400	3,41	1,05
200	400	2,1	1,04
25	100	2,24	1,03
Μονοδ/το (α)	-	6,05	1,08
Μονοδ/το (β)	-	2,09	1,05
Μονοδ/το (γ)	-	2,09	1,05
Μονοδ/το (δ)	-	3,9	1,08

Πίνακας 8.5. Παράμετροι χαρακτηριστικών IV σκότους δομών 2 ενώσεων για το δισκίδιο με αριθμό 4.

d	l	J_0 (pA) - άνω ένωση	n - άνω ένωση
33	100	8440	1,64
50	100	25,1	1,16
5	50	3,41	1,06

Πίνακας 8.6. Παράμετροι χαρακτηριστικών IV σκότους δομών 2 ενώσεων για το δισκίδιο με αριθμό 16 (άνω ψηφίδα).

Από τα δεδομένα των πινάκων 8.4-8.6 παρατηρούμε ότι στα περισσότερα φ/β στοιχεία που μετρήθηκαν η πάνω ένωση έχει σχεδόν ιδανική χαρακτηριστική σκότους με συντελεστή ποιότητας κοντά στη μονάδα.

8.4 Μετρήσεις αντιστάσεως σειράς

Σε αυτή την ενότητα θα παρατεθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων της αντίστασης σειράς των διατάξεων μονής και διπλής ένωσης για τα δισκίδια που αναφέρθηκαν πριν. Η μεθοδολογία εξαγωγής της R_s που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή που περιγράφηκε στην ενότητα 8.2.5. Επιπρόσθετα, θα γίνει σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με προσομοιώσεις που αντιστοιχούν σε δομές παραπλήσιες με τις κατασκευασθείσες.

Κεφάλαιο 8

8.4.1 Πειραματικές τιμές αντίστασης σειράς των δομών μονής ένωσης

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τον υπολογισμό της αντίστασης σειράς των δομών μονής ένωσης σε 2 διαφορετικά δισκίδια (το ένα με απλή αντιανακλαστική επίστρωση από οξείδιο και το άλλο με διπλή, αποτελούμενη από Si_3N_4 και TEOS). Σύμφωνα με την ενότητα 8.2.5.1, προκειμένου να εξαχθεί η R_s γίνεται μέτρηση της τάσης στα άκρα του στοιχείου (V_d) σε συνθήκες σκότους και υπό φωτισμό (τάση ανοιχτού κυκλώματος V_{oc}) όπου το ρεύμα που διαρρέει το στοιχείο στις 2 περιπτώσεις είναι 20mA. Ο υπολογισμός της γίνεται μέσω της σχέσης 8.2.

Άνω Ψηφίδα									
	l=400μm			l=200μm			l=100μm		
d/l	V_d (mV)	V_{oc} (mV)	R_s (Ω)	V_d (mV)	V_{oc} (mV)	R_s (Ω)	V_d (mV)	V_{oc} (mV)	R_s (Ω)
0,5	597,6	593,9	0,185	603,1	601,3	0,092	601,5	599,5	0,1
0,33	598	595	0,15	587,6	585,3	0,115	603,6	601,5	0,105
0,25	598,2	595	0,16	604	601,1	0,145	599	597	0,1
0,2	600	595,5	0,225	589,6	586,3	0,165	602,2	599,6	0,13
0,125	585,8	578,5	0,365	573,8	568,5	0,265	591,3	588	0,165
0,1	588,4	580,8	0,38	-	-	-	587,1	583,7	0,17
l(α)	609,4	607,8	0,08						
l(β)	608,9	607,6	0,065						
l(γ)	608,6	607,4	0,06						
l(δ)	-	-							
Κάτω Ψηφίδα									
	l=400μm			l=100μm			l=50μm		
d/l	V_d (mV)	V_{oc} (mV)	R_s (Ω)	V_d (mV)	V_{oc} (mV)	R_s (Ω)	V_d (mV)	V_{oc} (mV)	R_s (Ω)
0,5	602,4	599,3	0,155	603,5	601,5	0,1	589,7	588	0,085
0,33	601,3	598	0,165	600	597,5	0,125	591,9	590,1	0,9
0,25	600,9	597,5	0,17	598,6	596	0,13	595,2	593,3	0,095
0,2	597	592	0,25	591,5	588,5	0,15	592,3	590,2	0,105
0,125	592,7	584,5	0,41	575,5	571,5	0,2	577,8	575	0,14
0,1	598	590,3	0,385	576,1	572,1	0,2	-	-	-
l(α)	-	-	-						
l(β)	-	-	-						
l(γ)	610,8	609,5	0,065						
l(δ)	-	-	-						

Πίνακας 8.7. Μετρήσεις αντίστασης σειράς για το δισκίδιο με την απλή αντιανακλαστική επίστρωση από οξείδιο.

Άνω Ψηφίδα									
	l=400μm			l=200μm			l=100μm		
d/l	V _d (mV)	V _{oc} (mV)	R _s (Ω)	V _d (mV)	V _{oc} (mV)	R _s (Ω)	V _d (mV)	V _{oc} (mV)	R _s (Ω)
0,5	584	581	0,15	584,5	582,7	0,09	585	582,3	0,085
0,33	594,5	591	0,175	591,8	589,2	0,13	596,6	594,5	0,105
0,25	592,8	588,6	0,21	598,7	595,5	0,16	596,2	593,5	0,135
0,2	593,7	588,4	0,265	596,4	593	0,17	598,8	595,8	0,15
0,125	596,5	589,1	0,37	598,4	593,8	0,23	597,5	594	0,175
0,1	601,9	594,6	0,365	-	-	-	603	599,2	0,19
l(α)	-	-	-						
l(β)	587,4	585,4	0,1						
l(γ)	585,4	584	0,07						
l(δ)	586,3	584,7	0,08						
Κάτω Ψηφίδα									
	l=400μm			l=100μm			l=50μm		
d/l	V _d (mV)	V _{oc} (mV)	R _s (Ω)	V _d (mV)	V _{oc} (mV)	R _s (Ω)	V _d (mV)	V _{oc} (mV)	R _s (Ω)
0,5	594,5	591,5	0,15	592,9	591,2	0,085	593,35	591,75	0,08
0,33	604,9	600,5	0,22	605,7	603	0,135	606,3	604,4	0,095
0,25	608,4	604,2	0,21	606,5	603,6	0,145	607,1	605,1	0,1
0,2	605	600,5	0,225	603	600,5	0,125	605,4	603,5	0,095
0,125	603,4	595,5	0,395	598,8	595	0,19	597	594,3	0,135
0,1	609,8	602,1	0,385	603,4	599,8	0,18	598,6	595,7	0,145
l(α)	-	-	-						
l(β)	574,4	572	0,12						
l(γ)	583	581	0,1						
l(δ)	-	-	-						

Πίνακας 8.8. Μετρήσεις αντίστασης σειράς για το δισκίδιο με την διπλή αντιανακλαστική επίστρωση αποτελούμενη από Si₃N₄ και TEOS.

Το φωτόρευμα των 20mA που ορίστηκε σαν ρεύμα αναφοράς για τη μέτρηση της R_s, αντιστοιχεί σε φωτισμό λίγο μεγαλύτερης έντασης από το ηλιακό φάσμα AM1.5 (περίπου 120mW/cm² συγκριτικά με τα 100mW/cm² του AM1.5).

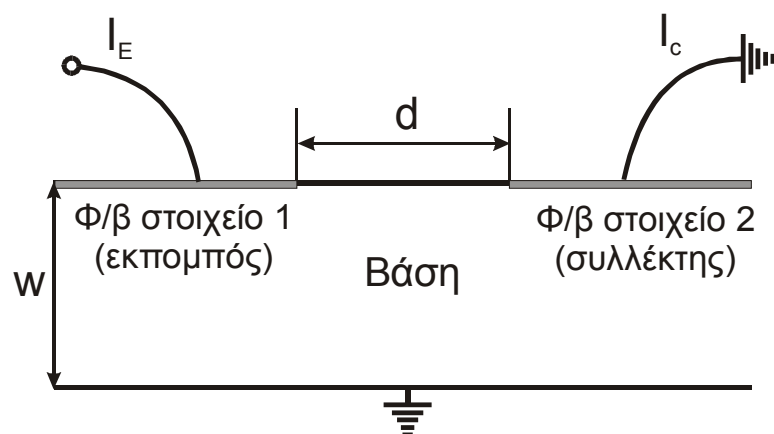
8.4.2 Σύγκριση πειραματικών τιμών της R_s με το μοντέλο για τη δομή μονής ένωσης

Προκειμένου να ελεγχθεί η ορθότητα του μοντέλου, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις προσαρμοσμένες στις παραμέτρους των πειραματικών διατάξεων. Συγκεκριμένα, οι υπολογισμοί έγιναν για δομές με ειδική αντίσταση $\rho=1\Omega\cdot\text{cm}$ ($N_A=1,38\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$), πάχος $w=380\mu\text{m}$, και για αντιανακλαστική επίστρωση με φιλμ Si₃N₄ και TEOS με τα βέλτιστα πάχη (58nm και 97nm αντίστοιχα) και με κατώτερο στρώμα οξειδίου πάχους 125 Å. Επιπλέον, το ρεύμα ανασύνδεσης στον εκπομπό

Κεφάλαιο 8

θεωρήθηκε 10^{-12} A/cm², τιμή που αντιστοιχεί στην ίδια τάξη μεγέθους με αυτή των καλύτερων πειραματικών διατάξεων.

Το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας στη βάση (L_n) είναι μια παράμετρος που απαιτεί ειδικές τεχνικές για να μετρηθεί, π.χ μετρώντας την καμπύλη πτώσης του φωτορεύματος και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος του στοιχείου (μέθοδος PCD, Photocurrent Voltage Decay [3]). Μια εναλλακτική μέθοδος, μέσω της οποίας μπορεί να επιτευχθεί μια καλή εκτίμηση του μήκους διάχυσης, όπως και άλλων παραμέτρων μεταφοράς σε ένα ημιαγωγό, δόθηκε από τους Misiakos, Tsoi και Neugroschel [8]. Η μελέτη τους έγινε για διατάξεις διπολικών τρανζίστορ τύπου pnp, αλλά μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση των δομών μας μέσω μετρήσεων σε 2 γειτονικά φ/β στοιχεία, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα



Σχήμα 8.15. Σχηματική διάταξη μετρήσεων για την εκτίμηση του μήκους διάχυσης των πειραματικών φ/β στοιχείων.

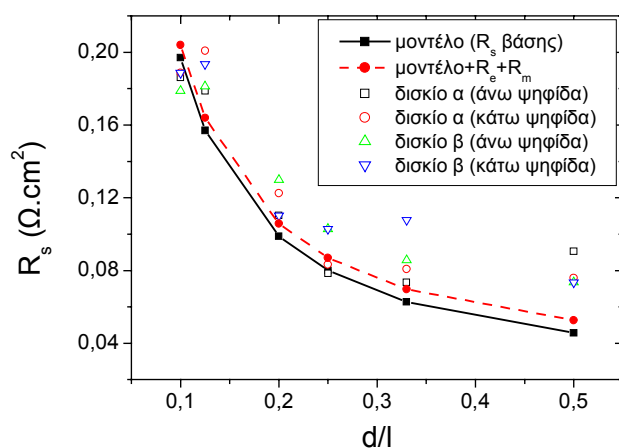
Συγκεκριμένα, η διαδικασία εφαρμόζεται σε συνθήκες σκότους, όπου πολώνουμε ορθά το ένα φ/β στοιχείο (το οποίο το θεωρούμε ως εκπομπό) με δεδομένο ρεύμα και μετρούμε το αντίστοιχο ρεύμα που λαμβάνει το δεύτερο στοιχείο (θεωρούμενο ως συλλέκτης). Σύμφωνα με την προαναφερθείσα εργασία, το ρεύμα του συλλέκτη φθίνει εκθετικά, όσο αυξάνεται ο λόγος της απόστασης εκπομπού-συλλέκτη d προς το μήκος διάχυσης L των φορέων μειονότητας στη βάση, δηλαδή

$$I_c = C \exp(-fd / L) \quad (8.9)$$

όπου C, f παράμετροι εξαρτώμενοι από τους λόγους w/L , S_1L/D , S_2L/D . Τα μεγέθη S_1, S_2 είναι οι ταχύτητες ανασύνδεσης στη μπροστινή και πίσω επιφάνεια αντίστοιχα και D η σταθερά διάχυσης.

Τα φ/β στοιχεία που προσαρμόζονται καλύτερα στη δομή του σχήματος 8.15 είναι εκείνα στα οποία η επαφή καλύπτει όλη την πίσω επιφάνεια (μονοδιάστατες δομές). Για αυτό το λόγο οι μετρήσεις έγιναν σε τέτοιες διατάξεις. Στην περίπτωση μας η απόσταση εκπομπού συλλέκτη d είναι 2100μm. Συνεπώς για ρεύμα εκπομπού $I_E=20\text{mA}$, το ρεύμα του συλλέκτη που μετρήθηκε είναι $I_C=48\text{nA}$ (για τις μονοδιάστατες δομές του δισκίου 15). Βάσει αυτών των μετρήσεων, από τα διαγράμματα της εργασίας εξήχθησαν οι παράμετροι C_f για διαφορετικές περιπτώσεις και προέκυψε ότι το μήκος διάχυσης στη βάση βρίσκεται στην περιοχή των 200μm ($w/L\approx 2$). Έτσι στις προσομοιώσεις θεωρήθηκε ότι $L_n=200\mu\text{m}$.

Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται οι μετρηθείσες τιμές της R_s για τις διαφορετικές αποστάσεις των πίσω επαφών όπως ελήφθησαν από τους πίνακες 8.7-8.8 πολλαπλασιασμένες με την ενεργό επιφάνεια των στοιχείων ($0,49\text{cm}^2$), ενώ επιπλέον παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για σύγκριση. Συγκεκριμένα, η συνεχής καμπύλη αναπαριστά την αντίσταση σειράς που οφείλεται στη βάση, ενώ η διακεκομμένη είναι η αντίσταση σειράς της βάσης στην οποία έχει συμπεριληφθεί η συνεισφορά του εκπομπού (R_e) και του μπροστινού ηλεκτροδίου (R_m) (κεφάλαιο 7).

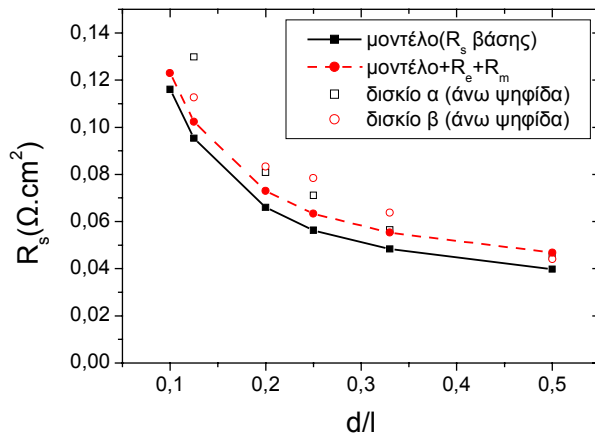


Σχήμα 8.16. Πειραματικές τιμές αντιστάσεων σειράς δομών μονής ένωσης συναρτήσει του μεγέθους της πλευράς των πίσω επαφών d κανονικοποιημένη ως προς την απόστασή τους l η οποία είναι 400μm. Συγκριτικά παρατίθεται η θεωρητικά υπολογιζόμενη αντίσταση σειράς της βάσης (συνεχής γραμμή) και η εκτιμώμενη συνολική (διακεκομμένη γραμμή) που αντιστοιχεί στο άθροισμα των αντιστάσεων σειράς βάσης, εκπομπού (R_e) και μπροστινού ηλεκτροδίου (R_m).

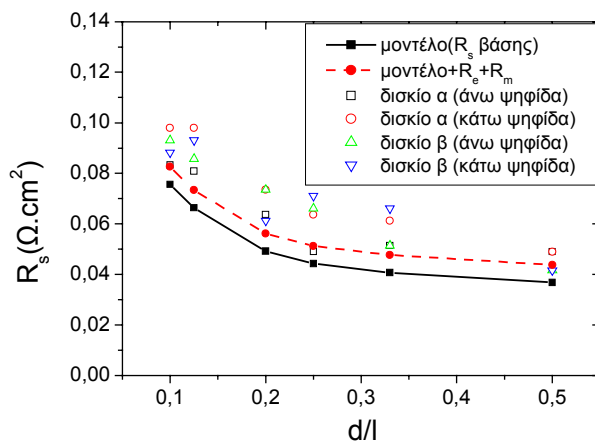
Η γενική μελέτη των σχημάτων 8.16-8.19 δείχνει ότι υπάρχει μια σημαντική διασπορά των πειραματικών δεδομένων καθώς λόγω του μικρού μεγέθους των αντιστάσεων σειράς οι μετρούμενες τάσεις V_{oc} και V_d υπό φωτισμό και σκότος αντίστοιχα είναι παραπλήσιες. Επιπρόσθετα, η τάση ανοιχτού κυκλώματος των φ/β στοιχείων είναι

Κεφάλαιο 8

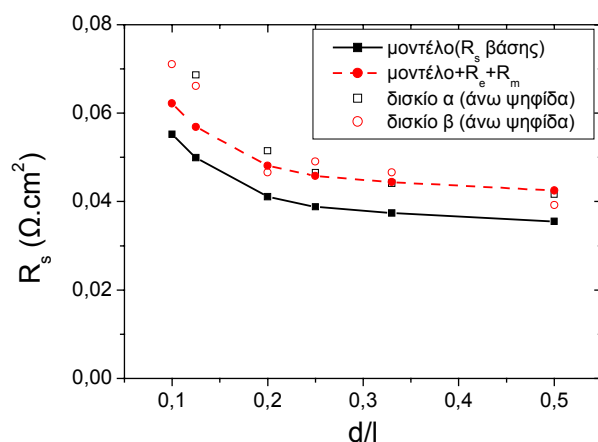
αρκετά ευαίσθητη στη μεταβολή της θερμοκρασίας, γεγονός που επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων. Προφανώς η διακύμανση των πειραματικών μετρήσεων είναι μικρότερη για τις δομές με τις μεγαλύτερες αποστάσεις των πίσω επαφών (400 και 200 μm), όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα 8.16-8.17.



Σχήμα 8.17. Πειραματικές τιμές αντιστάσεων σειράς δομών μονής ένωσης συναρτήσει του μεγέθους της πλευράς των πίσω επαφών d κανονικοποιημένη ως προς την απόστασή τους l η οποία είναι 200 μm . Συγκριτικά παρατίθεται η θεωρητικά υπολογιζόμενη αντίσταση σειράς της βάσης (συνεχής γραμμή) και η εκτιμώμενη συνολική (διακεκομμένη γραμμή) που αντιστοιχεί στο άθροισμα των αντιστάσεων σειράς βάσης, εκπομπού (R_e) και μπροστινού ηλεκτροδίου (R_m).



Σχήμα 8.18. Πειραματικές τιμές αντιστάσεων σειράς δομών μονής ένωσης συναρτήσει του μεγέθους της πλευράς των πίσω επαφών d κανονικοποιημένη ως προς την απόστασή τους l , η οποία είναι 100 μm . Συγκριτικά παρατίθεται η θεωρητικά υπολογιζόμενη αντίσταση σειράς της βάσης (συνεχής γραμμή) και η εκτιμώμενη συνολική (διακεκομμένη γραμμή) που αντιστοιχεί στο άθροισμα των αντιστάσεων σειράς βάσης, εκπομπού (R_e) και μπροστινού ηλεκτροδίου (R_m).



Σχήμα 8.19. Πειραματικές τιμές αντιστάσεων σειράς δομών μονής ένωσης συναρτήσει του μεγέθους της πλευράς των πίσω επαφών d κανονικοποιημένη ως προς την απόστασή τους l , η οποία είναι 50μm. Συγκριτικά παρατίθεται η θεωρητικά υπολογιζόμενη αντίσταση σειράς της βάσης (συνεχής γραμμή) και η εκτιμώμενη συνολική (διακεκομμένη γραμμή) που αντιστοιχεί στο άθροισμα των αντιστάσεων σειράς βάσης, εκπομπού (R_e) και μπροστινού ηλεκτροδίου (R_m).

Περνώντας στη σύγκριση των πειραματικών δεδομένων και των προσομοιώσεων, παρατηρούμε μια καλή συμφωνία, όπου η θεωρητικά υπολογιζόμενη R_s είναι σε γενικές γραμμές λίγο μικρότερη από την πειραματική. Ειδικά στα σχήματα 8.17-8.19 όπου οι τιμές των αντιστάσεων σειράς είναι αρκετά μικρές ο συνυπολογισμός των ωμικών απωλειών του εκπομπού και του μπροστινού ηλεκτροδίου είναι απαραίτητος για την ακριβέστερη εκτίμηση των πειραματικών τιμών της R_s . Η συμφωνία είναι καλύτερη στην περίπτωση των διατάξεων με τις μεγαλύτερες αποστάσεις των πίσω επαφών (200 και 400μm), όπου όπως αναφέρθηκε νωρίτερα υπάρχει μικρότερη διακύμανση των πειραματικών τιμών που υποδηλώνει καλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις. Αξιοσημείωτη είναι επίσης και η καλή σύμπτωση των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για λόγο $d/l=0,5$ και για όλες σχεδόν τις δομές, όπου η R_s είναι μικρή και τείνει προς την αντίστοιχη τιμή της μονοδιάστατης διάταξης στην οποία η επαφή καλύπτει ολόκληρη την πίσω επιφάνεια.

8.4.3 Πειραματικές τιμές αντίστασης σειράς δομών δύο ενώσεων

Για την εξαγωγή της αντίστασης σειράς των δομών 2 ενώσεων χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που αναλύθηκε στην ενότητα 8.2.5.2, όπου τροφοδοτούμε τους δύο

Κεφάλαιο 8

εκπομπούς με τέτοια ρεύματα έτσι ώστε οι τάσεις των 2 ενώσεων για τις μετρήσεις υπό φωτισμό και σκοτάδι να είναι ίσες. Η διάταξη φωτίζεται από την μπροστινή επιφάνεια έτσι ώστε το συνολικό φωτόρευμα (άθροισμα ρευμάτων των 2 ενώσεων) να είναι περίπου 20mA. Στους ακόλουθους πίνακες παρουσιάζεται η τιμή της αντίστασης σειράς και οι μετρήσεις των τάσεων V_{oc} και V_d υπό φωτισμό και σκοτάδι αντίστοιχα για τα φ/β στοιχεία των 3 διαφορετικών δισκιδίων.

d (μm)	l (μm)	V_d (mV)	V_{oc} (mV)	R_s (Ω)
100	200	579,1	578,2	0,0458
133	400	588,9	587,1	0,0925
80	400	594,2	590	0,211
40	400	588,3	580,5	0,39

Πίνακας 8.9. Μετρήσεις τάσεων και αντίσταση σειράς για το δισκίδιο με αριθμό 15 (άνω ψηφίδα).

d (μm)	l (μm)	V_d (mV)	V_{oc} (mV)	R_s (Ω)
Άνω Ψηφίδα				
40	400	609,4	603,8	0,28
100	400	600,2	597,5	0,135
133	400	595,7	593,5	0,11
25	200	589,2	585,5	0,185
40	200	594,8	592,5	0,115
50	200	591,7	589,5	0,11
10	100	586,4	584,3	0,105
20	100	591,3	589,5	0,09
Κάτω Ψηφίδα				
50	400	589,5	583,4	0,305
200	400	590,7	589,3	0,07
25	100	577	575,5	0,075
1D (α)	-	601,5	600	0,075
1D (β)	-	615,7	614,4	0,065
1D (γ)	-	616,9	615,5	0,07
1D (δ)	-	616,8	615,5	0,065

Πίνακας 8.10. Μετρήσεις τάσεων και αντίσταση σειράς για το δισκίδιο με αριθμό 4.

d (μm)	l (μm)	V_d (mV)	V_{oc} (mV)	R_s (Ω)
33	100	585,6	584,7	0,045
50	100	582	581,3	0,035
5	50	589	587,6	0,07

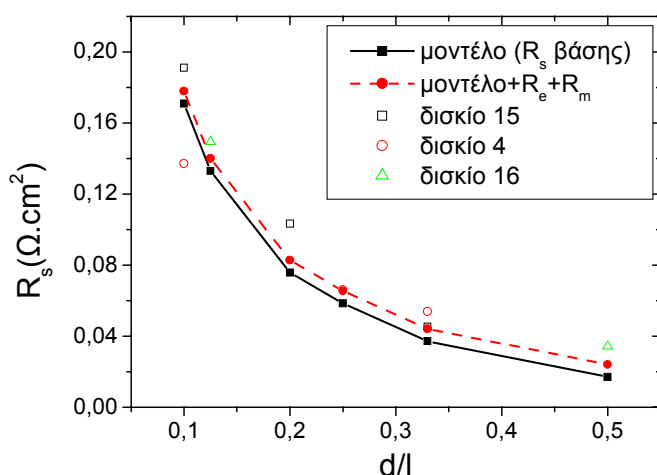
Πίνακας 8.11. Μετρήσεις τάσεων και αντίσταση σειράς για το δισκίδιο με αριθμό 16 (άνω ψηφίδα).

Στον πίνακα 8.10 παρατίθενται επιπλέον αποτελέσματα μετρήσεων αντίστασης σειράς για τις τυπικές δομές στις οποίες η επαφή καλύπτει όλη την πίσω επιφάνεια

(μονοδιάστατες , 1D) για λόγους αναφοράς. Δεδομένου ότι ένα μεγάλο ποσοστό των διατάξεων σε όλα τα δισκία είχαν βραχυκυκλωμένες τις ενώσεις πίσω εκπομπού και βάσης, δεν ήταν δυνατόν να μετρηθούν οι αντιστάσεις σειράς για το σύνολο των υπαρχόντων συνδυασμών (d,l) που σχεδιάστηκαν. Το μεγαλύτερο πρόβλημα υπήρχε στις διατάξεις με τη μικρότερη απόσταση μεταξύ των πίσω επαφών (50 μ m).

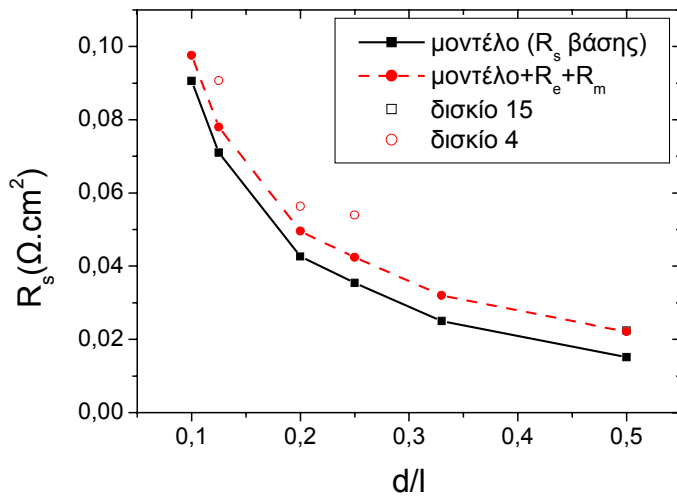
8.4.4 Σύγκριση πειραματικών τιμών της R_s με τις θεωρητικές για τη δομή 2 ενώσεων

Σε αναλογία με την ενότητα 8.4.2, τα σχήματα 8.20-8.23 αναπαριστούν τα πειραματικά αποτελέσματα της αντίστασης σειράς που αναγράφονται στους πίνακες 8.9-8.11 πολλαπλασιασμένα επί την επιφάνεια του φ/β στοιχείου (0,49cm²) και παρατίθεται σύγκριση με το θεωρητικό μοντέλο. Σε αναλογία με την προηγούμενη ενότητα, η συνεχής καμπύλη αναπαριστά την αντίσταση σειράς που οφείλεται στη βάση, ενώ η διακεκομμένη είναι η αντίσταση σειράς της βάσης στην οποία έχει συμπεριληφθεί η συνεισφορά του εκπομπού (R_e) και του μπροστινού ηλεκτροδίου (R_m)

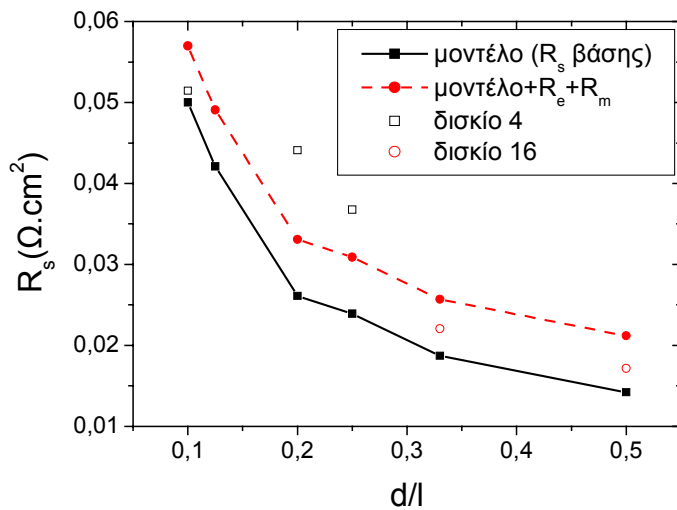


Σχήμα 8.20. Πειραματικές τιμές αντιστάσεων σειράς δομών 2 ενώσεων συναρτήσει του μήκους της πλευράς των πίσω επαφών d κανονικοποιημένη ως προς την απόστασή τους l που σε αυτό το διάγραμμα είναι 400 μ m. Συγκριτικά παρατίθεται η θεωρητικά υπολογιζόμενη αντίσταση σειράς της βάσης (συνεχής γραμμή) και η εκτιμώμενη συνολική (διακεκομμένη γραμμή) που αντιστοιχεί στο άθροισμα των αντιστάσεων σειράς βάσης, εκπομπού (R_e) και μπροστινού ηλεκτροδίου (R_m).

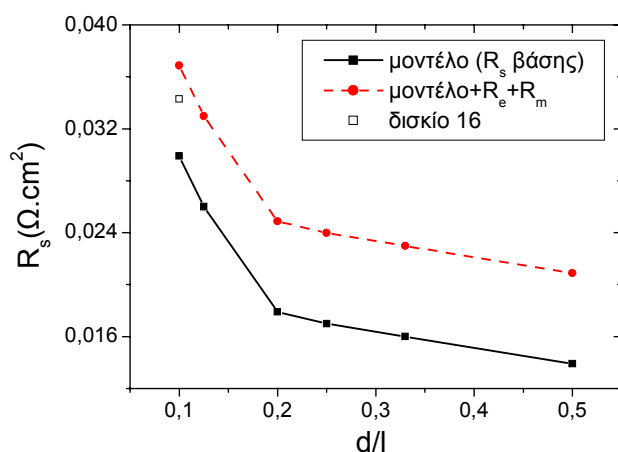
Κεφάλαιο 8



Σχήμα 8.21. Πειραματικές τιμές αντιστάσεων σειράς δομών 2 ενώσεων συναρτήσει του μήκους της πλευράς των πίσω επαφών d κανονικοποιημένη ως προς την απόστασή τους l που σε αυτό το διάγραμμα είναι 200 μm . Συγκριτικά παρατίθεται η θεωρητικά υπολογιζόμενη αντίσταση σειράς της βάσης (συνεχής γραμμή) και η εκτιμώμενη συνολική (διακεκομμένη γραμμή) που αντιστοιχεί στο άθροισμα των αντιστάσεων σειράς βάσης, εκπομπού (R_e) και μπροστινού ηλεκτροδίου (R_m).



Σχήμα 8.22. Πειραματικές τιμές αντιστάσεων σειράς δομών 2 ενώσεων συναρτήσει του μήκους της πλευράς των πίσω επαφών d κανονικοποιημένη ως προς την απόστασή τους l που σε αυτό το διάγραμμα είναι 100 μm . Συγκριτικά παρατίθεται η θεωρητικά υπολογιζόμενη αντίσταση σειράς της βάσης (συνεχής γραμμή) και η εκτιμώμενη συνολική (διακεκομμένη γραμμή) που αντιστοιχεί στο άθροισμα των αντιστάσεων σειράς βάσης, εκπομπού (R_e) και μπροστινού ηλεκτροδίου (R_m).



Σχήμα 8.23. Πειραματικές τιμές αντιστάσεων σειράς δομών 2 ενώσεων συναρτήσει του μήκους της πλευράς των πίσω επαφών d κανονικοποιημένη ως προς την απόστασή τους l που σε αυτό το διάγραμμα είναι 50μm. Συγκριτικά παρατίθεται η θεωρητικά υπολογιζόμενη αντίσταση σειράς της βάσης (συνεχής γραμμή) και η εκτιμώμενη συνολική (διακεκομμένη γραμμή) που αντιστοιχεί στο άθροισμα των αντιστάσεων σειράς βάσης, εκπομπού (R_e) και μπροστινού ηλεκτροδίου (R_m).

Από τη μελέτη των σχημάτων αυτών παρατηρούμε ότι υπάρχει μια καλή συμφωνία πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για την αντίσταση σειράς, όπως και στην περίπτωση των φ/β στοιχείων μιας ένωσης. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως τα πειραματικά δεδομένα είναι περιορισμένα, δεδομένου τον μικρό αριθμό των διατάξεων με λειτουργική την πίσω ένωση. Ένα άλλο σημείο που επισημάνθηκε στη θεωρητική ανάλυση και παρατηρήθηκε και στις μετρήσεις είναι οι μικρές τιμές που λαμβάνει η R_s σε σχέση με τη δομή μιας ένωσης, γεγονός που επηρεάζει και την ακρίβεια των μετρήσεων λόγω μεταβολών στη θερμοκρασία του στοιχείου. Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις (σχ. 8.22-8.23) η συμμετοχή του αθροίσματος των αντιστάσεων σειράς του μπροστινού εκπομπού και του αντίστοιχου μετάλλου στη συνολική R_s είναι σχεδόν εξίσου σημαντική με αυτήν της βάσης.

8.4.5. Μετρήσεις αντιστάσεων σειράς με μία από τις 2 ενώσεις ανοιχτοκυκλωμένη

Σε αυτή την ενότητα επαναλαμβάνουμε τις μετρήσεις για τον υπολογισμό της R_s , χρησιμοποιώντας τη δεύτερη μεθοδολογία, η οποία υλοποιείται σε 2 στάδια (σχ. 8.9), όπου στο ένα εξάγεται η αντίσταση σειράς της διάταξης θεωρώντας την πίσω ένωση ανοιχτοκυκλωμένη, ενώ στο άλλο ακολουθείται η ίδια διαδικασία με ανοιχτό τον μπροστινό εκπομπό. Επειδή το μήκος διάχυσης στη βάση είναι σχετικά μικρό όπως επισημάνθηκε νωρίτερα (περίπου 200μm), η διάταξη παράγει σημαντικά χαμηλότερο

Κεφάλαιο 8

φωτόρευμα στη δεύτερη συνδεσμολογία (μπροστινή ένωση ανοιχτοκυκλωμένη). Έτσι προκειμένου η μετρηθείσα διαφορά μεταξύ των τάσεων υπό φωτισμό και σκοτάδι (V_{oc} και V_d) να είναι αξιόπιστη αυξήσαμε το φωτισμό (σε ισοδύναμη ένταση μεταξύ 2 και 3 ήλιων), έτσι ώστε η διάταξη να παραμένει σε χαμηλή έγχυση και να εμφανίζει την ίδια R_s σε σχέση με την περίπτωση του τυπικού φωτισμού (1 ήλιου).

Στους επόμενους πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις διατάξεις των δισκιδίων 4, 15 και 16. Τα σύμβολα των μεγεθών που αναφέρονται αντιστοιχούν σε εκείνα της ενότητας 8.2.5.2.

d (μm)	l (μm)	I_{sc1} (mA)	V_{da1} (mV)	V_{oc1} (mV)	R_{s1} (Ω)	I_{sc2} (mA)	V_{da2} (mV)	V_{oc2} (mV)	R_{s2} (Ω)
Άνω Ψηφίδα									
133	400	49	677,8	644,5	0,68	11	597,6	596,6	0,09
100	400	40	644,8	633,3	0,288	9	591,3	588,2	0,34
80	400	40,4	646,4	632,5	0,344	9,5	590,4	589	0,147
40	400	40,3	652,4	632,3	0,5	8,27	589,5	586,6	0,351
50	200	40,6	649	631,7	0,426	9	583	581,3	0,189
40	200	40,4	642,6	630,8	0,292	9,2	583,6	582,3	0,141
25	200	38,7	641,8	630	0,305	8,4	582,7	581	0,202
20	100	40,5	639,5	632,6	0,17	10	578,1	577,1	0,1
Κάτω Ψηφίδα									
200	400	45	646,2	637,4	0,196	8	587,2	586,5	0,088
100	400	45,8	678,1	644	0,745	10	603	600,5	0,25
50	400	43,5	650	635	0,345	4,6	570,7	569,3	0,304
50	200	47,3	673,8	646	0,588	13,7	608,2	605,7	0,182

Πίνακας 8.12. Αποτελέσματα μετρήσεων για την εξαγωγή αντίστασεων σειράς για το δισκίδιο με αριθμό 4 όπου η μία από τις δύο ενώσεις αφήνεται ανοιχτοκυκλωμένη.

d (μm)	l (μm)	I_{sc1} (mA)	V_{da1} (mV)	V_{oc1} (mV)	R_{s1} (Ω)	I_{sc2} (mA)	V_{da2} (mV)	V_{oc2} (mV)	R_{s2} (Ω)
100	200	40,9	632,6	624	0,21	3,6	546	545	0,278

Πίνακας 8.13. Αποτελέσματα μετρήσεων για την εξαγωγή αντίστασεων σειράς για το δισκίδιο με αριθμό 15 (άνω ψηφίδα) όπου η μία από τις δύο ενώσεις αφήνεται ανοιχτοκυκλωμένη.

d (μm)	l (μm)	I_{sc1} (mA)	V_{da1} (mV)	V_{oc1} (mV)	R_{s1} (Ω)	I_{sc2} (mA)	V_{da2} (mV)	V_{oc2} (mV)	R_{s2} (Ω)
50	400	57	653,5	673	0,342	14,6	623,2	620,5	0,185
50	100	56,3	651	645	0,107	5,3	581,9	581,5	0,075

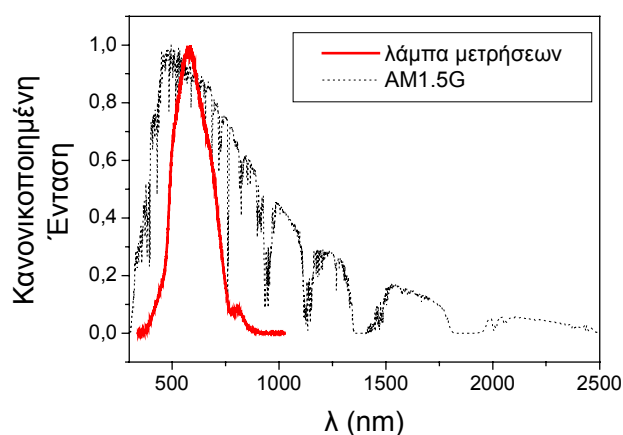
Πίνακας 8.14. Αποτελέσματα μετρήσεων για την εξαγωγή αντίστασεων σειράς για το δισκίδιο με αριθμό 16 (άνω ψηφίδα) όπου η μία από τις δύο ενώσεις αφήνεται ανοιχτοκυκλωμένη.

Από τα δεδομένα των πινάκων, παρατηρούμε ότι η αντίσταση σειράς R_{s2} του στοιχείου σε κατάσταση λειτουργίας όπου η μπροστινή ένωση είναι ανοιχτοκυκλωμένη είναι μικρότερη από την αντίστοιχη αντίσταση R_{s1} (πίσω ένωση ανοιχτή). Αυτό το γεγονός

παρουσιάζει ενδιαφέρον διότι η δεύτερη κατάσταση λειτουργίας ουσιαστικά αντιστοιχεί στη δομή σημειακών επαφών πίσω ένωσης (point contact) που προτάθηκε από τους Swanson et al. [9], η οποία έχει εμφανίσει υψηλές αποδόσεις και κυρίως υπό συγκέντρωση ακτινοβολίας. Η ιδιαίτερα χαμηλή αντίσταση σειράς της δομής πίσω ένωσης επισημάνθηκε και στην θεωρητική ανάλυση του κεφαλαίου 6 (ενότητα 6.3.3). Επιπλέον, η πρώτη κατάσταση λειτουργίας τυπικά αντιστοιχεί στη δομή PERL που αναλύθηκε εκτενώς στα προηγούμενα κεφάλαια. Επίσης πρέπει να σημειωθεί η σχετικά έντονη διακύμανση στις εξαχθείσες τιμές των αντιστάσεων σειράς που οφείλεται πιθανόν στην ευαισθησία της δομής στη μεταβολή της θερμοκρασίας (που είναι μεγαλύτερη λόγω του αυξημένου φωτισμού). Επιπρόσθετα στη δεύτερη κατάσταση λειτουργίας, λόγω του χαμηλού φωτορεύματος που συλλέγει η διάταξη, οι μικρές διαφορές των τάσεων υπό φωτισμό και σκοτάδι οδηγούν σε λιγότερο ακριβή εκτίμηση της αντίστασης, ειδικά στις δομές που η πίσω ένωση συλλέγει χαμηλό φωτόρευμα. Έτσι, αν ληφθεί υπόψιν και η θέρμανση του στοιχείου λόγω της αυξημένης έντασης του φωτός κατά τη λήψη των μετρήσεων στους πίνακες 8.12-8.14, οι τιμές των αντιστάσεων σειράς που προέκυψαν δεν είναι ιδιαίτερα ακριβείς.

8.5 Μετρήσεις χαρακτηριστικών IV των διατάξεων υπό φωτισμό

Σε αυτή την ενότητα θα αναλυθούν οι χαρακτηριστικές τάσεως – ρεύματος των 2 διαφορετικών δομών υπό φωτισμό. Οι καμπύλες λήφθηκαν σε H/Y πραγματοποιώντας την των συνδεσμολογία που περιγράφεται στα σχήματα 8.5 και 8.6 για τις διατάξεις μονής και διπλής ένωσης αντίστοιχα. Ο φωτισμός των δειγμάτων έχει ρυθμιστεί σε ένταση ακτινοβολίας η οποία μετρήθηκε στα 120.51mW/cm^2 με τη βοήθεια του οργάνου μετρήσεως ισχύος/ενέργειας (radiant power/energy meter) της ORIEL, μοντέλο 70260, το οποίου ο αισθητήρας είναι φωτοδίοδος (μοντέλο 70286). Σε αυτή την οπτική ισχύ επιτυγχάνεται φωτόρευμα περίπου 20mA στις δομές με τα καλά χαρακτηριστικά. Προφανώς, το φάσμα της λάμπας αλογόνου που διέρχεται μέσω της οπτικής ίνας όπως περιγράφεται στην ενότητα 8.2.2 και φωτίζει τα δείγματα διαφέρει από το πρότυπο AM1.5 (κεφάλαιο 1), όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα, όπου για λόγους σύγκρισης οι 2 κατανομές είναι κανονικοποιημένες ως προς τη μονάδα. Η λήψη του φάσματος πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια φασματομέτρου οπτικής ίνας (fiber optic spectrometer) της Ocean Optics, μοντέλο SD2000.

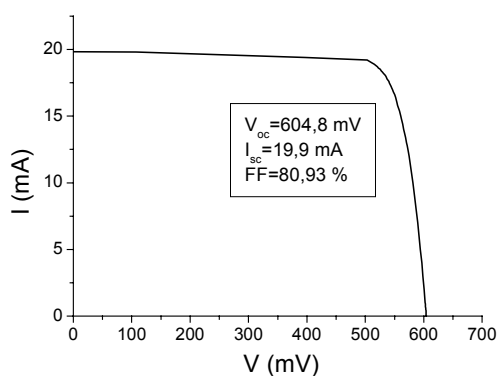


Σχήμα 8.24. Πρότυπο φάσμα AM1.5G και το αντίστοιχο της λάμπας στην έξοδο της οπτικής ίνας που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις υπό φωτισμό. Οι εντάσεις των φασμάτων είναι κανονικοποιημένες ως προς τη μονάδα.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 8.24, το φάσμα της λάμπας όπως εξέρχεται από την οπτική ίνα έχει πολύ μικρότερο εύρος από το πρότυπο ηλιακό και παρουσιάζει μέγιστο κοντά στα 600nm. Συνεπώς τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν παρακάτω αφορούν τον συγκεκριμένο τρόπο φωτισμού, ενώ η συμπεριφορά των διατάξεων στο ηλιακό φως αναμένεται να είναι διαφορετική και θα αναλυθεί ξεχωριστά.

8.5.1 Πειραματικές χαρακτηριστικές IV δομών μονής ένωσης

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη IV υπό φωτισμό ενός φ/β στοιχείου μονής ένωσης που έχει ληφθεί από το δεύτερο δισκίδιο (δομές με τη διπλή αντιανακλαστική επίστρωση Si_3N_4 και TEOS) με καλά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 8.25. Χαρακτηριστική IV φ/β στοιχείου μονής ένωσης από το δισκίδιο με τις 2 αντιανακλαστικές επιστρώσεις (Si_3N_4 και TEOS) με $\lambda=50\mu\text{m}$ και $d=12\mu\text{m}$.

Κεφάλαιο 8

Αυτό που παρουσιάζει ενδιαφέρον στην καμπύλη του σχήματος 8.25 είναι ο αρκετά υψηλός παράγοντας πλήρωσης (80,87%) που εν μέρει αντικατοπτρίζει τις χαμηλές ωμικές απώλειες στη διάταξη. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά μεγέθη (ρεύμα βραχυκυκλώματος (I_{sc}), τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}), μέγιστη ισχύς (P_m) και παράγων πλήρωσης (FF) των φ/β στοιχείων για τα 2 διαφορετικά δισκίδια απεικονίζονται στους ακόλουθους πίνακες

Άνω Ψηφίδα								
	l=400μm				l=100μm			
d/l	I_{sc} (mA)	V_{oc} (mV)	P_m (mW)	FF (%)	I_{sc} (mA)	V_{oc} (mV)	P_m (mW)	FF (%)
0,5	19	593,2	9,031	80,13	18,1	595,2	8,39	77,88
0,33	19,2	593	9,293	81,62	19,9	599,3	9,502	79,67
0,25	21	594	9,459	75,83	20,2	596,5	9,062	75,21
0,2	21,5	596	10,15	79,21	19,5	599,3	9,574	81,92
0,125	18,5	576,1	8,663	81,28	19,3	587,4	9,343	82,41
0,1	18,9	576,9	8,796	80,67	19,8	579,6	7,817	68,12
	l=200μm				1D (d/l=1)			
0,5	20	598,8	9,34	78	19,4	605,8	9,713	82,65
0,33	-	-	-	-	19,3	605,3	9,664	82,72
0,25	19,3	598,5	9,482	82,09	19	603,9	9,194	80,13
0,2	19,2	583,3	8,501	75,91	-	-	-	-
0,125	19,5	563	8,677	79,04				
0,1	-	-	-	-				
Κάτω Ψηφίδα								
	l=400μm				l=100μm			
0,5	19,1	599,5	9,364	81,78	18	598	8,789	81,65
0,33	19,2	597,5	9,351	81,51	19,1	596,7	9,288	81,5
0,25	19	595,3	8,808	77,87	21,1	594,6	9,818	78,26
0,2	19,3	591,8	9,295	81,38	-	-	-	-
0,125	20	586,2	8,698	74,19	19,8	570,6	8,998	79,64
0,1	19,3	586,6	9,157	80,88	19,3	570,4	8,807	80
	l=50μm				1D (d/l=1)			
0,5	19,6	585,2	9,484	82,69	-	-	-	-
0,33	19,8	587,5	9,103	78,25	-	-	-	-
0,25	19,3	591,8	9,408	82,37	19,3	607,6	9,772	83,33
0,2	19,3	587	9,332	82,37	-	-	-	-
0,125	19,9	571	9,081	79,92				
0,1	-	-	-	-				

Πίνακας 8.15. Χαρακτηριστικά μεγέθη πειραματικών IV φ/β στοιχείων υπό φωτισμό του δισκίου μονής ένωσης με την απλή αντανάκλαστική επίστροψη SiO₂.

Να σημειωθεί ότι επειδή σε μερικές περιπτώσεις η ένταση της λάμπας είχε διακυμάνσεις, ορισμένα φ/β στοιχεία παρουσίασαν φωτόρευμα υψηλότερο του αναμενόμενου (πάνω από 20mA), που σημαίνει ότι φωτίστηκαν σε μεγαλύτερη ισχύ

Κεφάλαιο 8

συγκριτικά με τα υπόλοιπα, συνεπώς η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς τους είναι σε υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με την αναμενόμενη.

Άνω Ψηφίδα								
d/l	l=400μm				l=100μm			
	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	P _m (mW)	FF (%)	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	P _m (mW)	FF (%)
0,5	19,5	577,6	9,255	82,17	19	579,3	8,874	80,62
0,33	19,3	588,5	9,17	80,74	19,8	593,3	9,425	80,23
0,25	19,8	588	9,139	78,5	19,6	591,7	9,536	82,22
0,2	19,8	587,3	9,298	79,96	20	594,8	9,339	78,51
0,125	19,6	588,7	9,402	81,48	19,5	591,2	9,408	81,61
0,1	19,8	592	9,117	77,78	19,3	597,1	9,447	81,98
d/l	l=200μm				1D (d/l=1)			
	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	P _m (mW)	FF (%)	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	P _m (mW)	FF (%)
0,5	19,1	579,1	9,13	82,54	19,8	583,4	9,265	80,21
0,33	19,5	586,6	9,324	81,51	19,1	582,2	9,145	82,24
0,25	19,5	593,9	9,539	82,37	19,4	580,2	8,947	79,49
0,2	19,3	591,5	9,389	82,24	-	-	-	-
0,125	19,4	590,2	9,329	81,48				
0,1	-	-	-	-				
Κάτω Ψηφίδα								
d/l	l=400μm				l=100μm			
	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	P _m (mW)	FF (%)	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	P _m (mW)	FF (%)
0,5	19,2	590	9,403	83,01	19,8	591,7	9,494	81,04
0,33	19,8	600,9	9,825	82,58	19	600,2	9,237	81
0,25	19,3	602,5	9,43	81,1	19,5	603,2	9,65	82,04
0,2	18,7	597,7	9,177	82,11	19,5	598,3	9,563	81,97
0,125	19,4	594,7	9,388	81,37	19,9	595,7	9,779	82,49
0,1	19,3	600	9,576	82,69	19,3	598,5	9,477	82,04
d/l	l=50μm				1D (d/l=1)			
	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	P _m (mW)	FF (%)	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	P _m (mW)	FF (%)
0,5	-	-	-	-	-	-	-	-
0,33	19,4	602	9,58	82,03	19,9	570,5	9,152	80,61
0,25	19,9	604,8	9,74	80,93	18,2	575,7	8,532	81,43
0,2	19,4	602,6	9,706	83,03	-	-	-	-
0,125	19,3	593,5	9,512	83,04				
0,1	20	593,9	8,986	75,65				

Πίνακας 8.16. Χαρακτηριστικά μεγέθη πειραματικών IV φ/β στοιχείων υπό φωτισμό του δισκίου μονής ένωσης με την διπλή αντιανακλαστική επίστρωση (Si₃N₄ και TEOS).

Από τα δεδομένα των πινάκων 8.15 και 8.16, παρατηρούμε ότι η μέγιστη ισχύς των φ/β στοιχείων για αυτό το φωτισμό δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις, όπου στις περισσότερες δομές του πρώτου δισκιδίου αυτή μεταβάλλεται στην περιοχή του 8,4-9,5mW, ενώ στο δεύτερο είναι λίγο μεγαλύτερη, όπου στα καλύτερα στοιχεία ξεπερνά τα 9,7mW. Η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι σχετικά σταθερή, όπου στις καλές δομές είναι περίπου 600mV. Αξιοσημείωτη είναι η V_{oc} των μονοδιάστατων διατάξεων του πρώτου δισκιδίου όπως απεικονίζεται στον πίνακα 8.15, η οποία είναι περίπου

Κεφάλαιο 8

605mV, ενώ η καλύτερη από αυτές είναι λίγο μικρότερη από 608mV. Οι συγκεκριμένες διατάξεις κατατάσσονται στις καλύτερες του δισκιδίου αυτού. Επίσης το ρεύμα βραχυκυκλώματος στις δομές του πίνακα 8.16 είναι συγκριτικά μεγαλύτερο σε σχέση με τις αντίστοιχες του άλλου δισκιδίου, αποτέλεσμα που οφείλεται στην διπλή αντιανακλαστική επίστρωση. Τέλος, οι περισσότερες διατάξεις και στα 2 δισκίδια έχουν υψηλούς παράγοντες πλήρωσης, μεγαλύτερους από 80%, γεγονός που εν μέρει οφείλεται στις χαμηλές ωμικές απώλειες που ήταν βασική παράμετρος της σχεδίασης. Σε γενικές γραμμές, η δομή της πίσω επιφάνειας (ποσοστό κάλυψης και απόσταση των πίσω επαφών) δεν φάνηκε να έχει επίδραση στην απόδοση των φ/β στοιχείων αφού το μήκος διάχυσης φορέων μειονότητας στη βάση εκτιμήθηκε χαμηλό.

Στον επόμενο πίνακα παρατίθενται αποτελέσματα προσομοιώσεων για διατάξεις με αντίστοιχα χαρακτηριστικά με τις πειραματικές που αναφέρθηκαν στην ενότητα 8.4.2.

Θεωρητικές προσομοιώσεις										
d/l	l=400μm					l=200μm				
	I _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	R _s (Ω.cm ²)	η (%)	FF (%)	I _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	R _s (Ω.cm ²)	η (%)	FF (%)
0,5	35,568	603,93	0,0457	17,74	82,56	35,565	603,93	0,0398	17,74	82,59
0,33	35,601	604,02	0,0627	17,74	82,47	35,601	604,03	0,0483	17,75	82,55
0,25	35,614	604,04	0,08	17,72	82,38	35,613	604,05	0,0563	17,75	82,5
0,2	35,62	604,06	0,0988	17,70	82,28	35,62	604,08	0,066	17,74	82,45
0,125	35,626	604,15	0,157	17,64	81,97	35,626	604,15	0,0953	17,71	82,3
0,1	35,628	604,2	0,197	17,60	81,75	35,628	604,2	0,116	17,69	82,19
l=100μm					l=50μm					
0,5	35,564	603,93	0,0368	17,74	82,61	35,563	603,93	0,0355	17,74	82,61
0,33	35,6	604,03	0,0407	17,76	82,59	35,601	604,04	0,0374	17,76	82,61
0,25	35,613	604,05	0,0443	17,76	82,57	35,614	604,05	0,0388	17,77	82,6
0,2	35,619	604,08	0,0492	17,76	82,54	35,619	604,08	0,0411	17,77	82,59
0,125	35,627	604,15	0,0664	17,74	82,45	35,627	604,15	0,0499	17,77	82,54
0,1	35,628	604,2	0,0756	17,74	82,4	35,628	604,2	0,0552	17,76	82,51
1D (d=l)										
1	35,43	603,4	0,0316	17,66	82,62					

Πίνακας 8.17. Αποτελέσματα θεωρητικών προσομοιώσεων για δομές με αντίστοιχα χαρακτηριστικά με τις πειραματικές ($\rho=1\Omega.cm$, $J_0=10^{-12}A/cm^2$ και $L_n=200\mu m$.)

Οι προσομοιώσεις με αυτές τις παραμέτρους δείχνουν ότι τόσο το ρεύμα βραχυκυκλώματος όσο και η τάση ανοιχτού κυκλώματος επωφελούνται ελάχιστα από την μείωση του ποσοστού κάλυψης της πίσω επιφάνειας από αυτές. Συνεπώς, η απόδοση των δομών είναι ουσιαστικά σταθερή (περίπου 17,7%) και μειώνεται ελαφρά στις διατάξεις με τη μεγαλύτερη αντίσταση σειράς. Επιπλέον, ένα σημαντικό στοιχείο είναι οι τιμές του *FF* που έρχονται σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Σε αυτή την περίπτωση η μονοδιάστατη δομή έχει απόδοση περίπου ισοδύναμη με τις

Κεφάλαιο 8

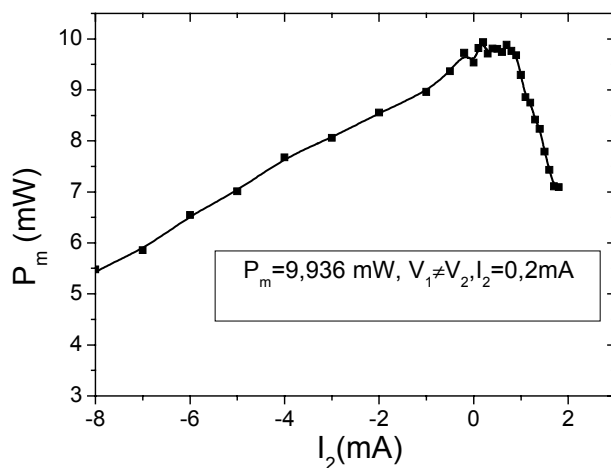
υπόλοιπες δεδομένου ότι επωφελείται από τη χαμηλή αντίσταση σειράς. Επιπλέον, η τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) των καλών πειραματικών διατάξεων παίρνει τιμές αρκετά κοντά στις θεωρητικές.

8.5.2 Πειραματικές χαρακτηριστικές διατάξεων 2 ενώσεων

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 8.2.4 και απεικονίζεται στο σχήμα 8.6, για τις μετρήσεις της δομής 2 ενώσεων χρησιμοποιούνται 2 πηγές ρεύματος που τροφοδοτούν τους αντίστοιχους εκπομπούς. Ο χαρακτηρισμός της διάταξης περιλαμβάνει ένα σύνολο χαρακτηριστικών IV όπου σε κάθε μια το ρεύμα της πίσω ένωσης διατηρείται σταθερό και το ρεύμα της μπροστινής μεταβάλλεται, οπότε λαμβάνεται η δεδομένη καμπύλη, για ισχύ φωτισμού περίπου $100\text{mW}/\text{cm}^2$. Επιπρόσθετα, καταγράφονται οι τάσεις των 2 ενώσεων. Με αυτό τον τρόπο, υπάρχει η δυνατότητα να καθοριστεί η αποδιδόμενη ισχύς του στοιχείου μέσω της σχέσης

$$P = I_1V_1 + I_2V_2 \quad (8.10)$$

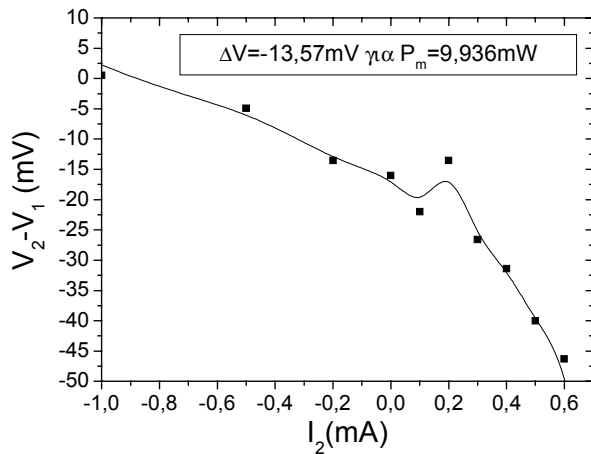
όπου I_1 , V_1 , I_2 , V_2 το ρεύμα και η τάση της πάνω και κάτω ένωσης αντίστοιχα. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η μέγιστη ισχύς που αποδίδει το στοιχείο συναρτήσει της μεταβολής του ρεύματος στην πίσω ένωση για μια δεδομένη διάταξη του δισκίου 4.



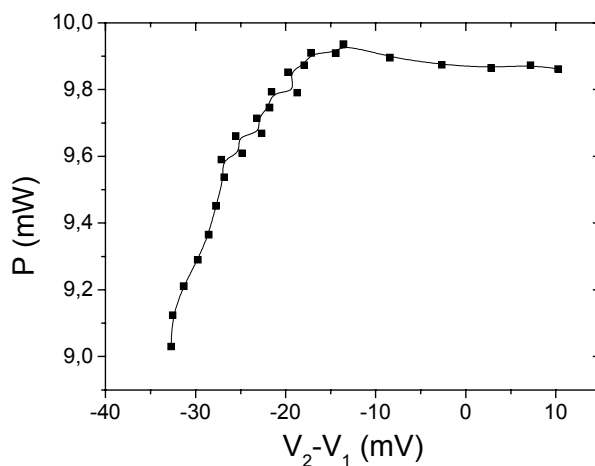
Σχήμα 8.26. Μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς συναρτήσει του ρεύματος της πίσω ένωσης, υπό διαφορετικές τάσεις των 2 εκπομπών σε δομή του δισκίου 4 με απόσταση πίσω επαφών $l=400\mu\text{m}$ και πλευρά $d=40\mu\text{m}$.

Κεφάλαιο 8

Παρατηρούμε ότι η ισχύς που αποδίδει το στοιχείο μεγιστοποιείται όταν το ρεύμα στην πίσω ένωση είναι αρκετά μικρό (0,2mA). Το διάγραμμα του επομένου σχήματος εμφανίζει τη διαφορά του δυναμικού μεταξύ της κάτω και της άνω ένωσης στην οποία επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της αποδιδόμενης ισχύος που απεικονίστηκε στο σχ. 6.28 συναρτήσει του ρεύματος στην κάτω ένωση. Αντίστοιχα, στο σχ. 8.28 παρουσιάζεται η ισχύς P του στοιχείου συναρτήσει της διαφοράς των τάσεων για ρεύμα στην πίσω ένωση 0,2 mA.



Σχήμα 8.27. Διαφορά τάσεων μεταξύ των ενώσεων στα σημεία απόδοσης μείστης ισχύος συναρτήσει του ρεύματος στην πίσω ένωση για φ/β στοιχείο του δισκίου 4 με απόσταση πίσω επαφών $l=400\mu\text{m}$ και πλευρά $d=40\mu\text{m}$.



Σχήμα 8.28. Αποδιδόμενη ισχύς συναρτήσει της διαφοράς τάσεων των 2 ενώσεων για $I_2=0,2\text{mA}$ σε φ/β στοιχείο του δισκίου 4 με απόσταση πίσω επαφών $l=400\mu\text{m}$ και πλευρά $d=40\mu\text{m}$.

Κεφάλαιο 8

Από τα σχήματα 8.27 και 8.28 παρατηρούμε ότι το στοιχείο αποδίδει καλύτερα όταν το δυναμικό της πίσω ένωσης είναι ελαφρά χαμηλότερο από το αντίστοιχο της μπροστινής (κατά μερικές δεκάδες mV). Η διαφορά αυτή αυξάνεται όσο το ρεύμα της πίσω ένωσης μεγαλώνει. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το μέγιστο της ισχύος εμφανίζεται για $\Delta V=13,57\text{mV}$. Να σημειωθεί ότι η διασπορά των σημείων στα διαγράμματα οφείλεται στις διακυμάνσεις έντασης της λάμπας. Η βελτίωση της απόδοσης του στοιχείου 2 ενώσεων για ελαφρώς διαφορετικά δυναμικά εκπομπών είχε παρατηρηθεί και στις προσομοιώσεις (κεφάλαιο 6).

Από τις χαρακτηριστικές των υπολοίπων φ/β στοιχείων που μετρήθηκαν των 3 διαφορετικών δισκιδίων που εξετάζουμε, προέκυψαν παρόμοια αποτελέσματα που συνοψίζονται στους επόμενους πίνακες, όπου καταγράφεται η μέγιστη ισχύς που αποδίδει το στοιχείο με διαφορετικά δυναμικά στις 2 ενώσεις (P_{max}), τα ρεύματα και οι τάσεις του άνω και κάτω εκπομπού σε αυτό το σημείο λειτουργίας (I_{1max} , I_{2max} και V_{1max} , V_{2max}) όπως και η διαφορά των δυναμικών $V_{1max}-V_{2max}$ (ΔV).

d (μm)	l (μm)	I_{1max} (mA)	I_{2max} (mA)	V_{1max} (mV)	V_{2max} (mV)	ΔV (mV)	P_{max} (mW)
Άνω Ψηφίδα							
40	400	18,3	0,2	537,2	523,6	13,57	9,936
100	400	18,3	0,6	527,4	459,3	68,15	9,927
133	400	18,3	0,6	527,1	436,2	90,85	9,908
25	200	17,9	0,6	527,7	451,6	76,1	9,718
40	200	18	0,6	530,3	456,6	73,6	9,819
50	200	18,3	0,5	523,3	462	61,3	9,807
10	100	18,2	0,6	519,7	430,8	88,99	9,718
20	100	17,6	0,8	541,5	403,8	137,7	9,853
Κάτω Ψηφίδα							
50	400	18,2	0,2	519,3	483,5	35,79	9,548
200	400	18,3	0,3	526,2	474,6	51,61	9,772
25	100	18,3	0,3	518,9	443,9	75,06	9,629

Πίνακας 8.18. Μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς (P_{max}) υπό φωτισμό, εξαχθείσα από τις χαρακτηριστικές IV των φ/β στοιχείων του δισκίου 4. Ο πίνακας παραθέτει επιπλέον τις τάσεις (V_{1max} , V_{2max}), τη διαφορά τους (ΔV) και τα ρεύματα (I_{1max} , I_{2max}) των 2 ενώσεων.

d (μm)	l (μm)	I_{1max} (mA)	I_{2max} (mA)	V_{1max} (mV)	V_{2max} (mV)	ΔV (mV)	P_{max} (mW)
100	200	17,8	0,4	513,5	413	100,5	9,306
133	400	19,1	0,2	513,5	477,5	35,95	9,903
80	400	19	0,2	523	480,6	42,3	10,03
40	400	19,2	0,3	510,7	447,1	63,62	9,94

Πίνακας 8.19. Μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς (P_{max}) υπό φωτισμό, εξαχθείσα από τις χαρακτηριστικές IV των φ/β στοιχείων του δισκίου 15 (άνω ψηφίδα). Ο πίνακας παραθέτει επιπλέον τις τάσεις (V_{1max} , V_{2max}), τη διαφορά τους (ΔV) και τα ρεύματα (I_{1max} , I_{2max}) των 2 ενώσεων.

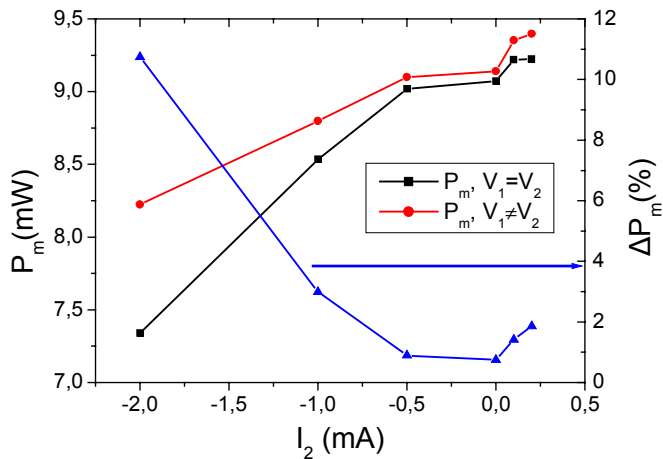
Κεφάλαιο 8

d (μm)	l (μm)	$I_{1\text{max}}$ (mA)	$I_{2\text{max}}$ (mA)	$V_{1\text{max}}$ (mV)	$V_{2\text{max}}$ (mV)	ΔV (mV)	P_{max} (mW)
33	100	16,8	0,3	514,9	474,6	40,29	8,793
50	100	18	0,4	512,6	468,3	44,29	9,414
5	50	18,3	0,5	523,5	416,2	107,3	9,789

Πίνακας 8.20. Μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς (P_{max}) υπό φωτισμό, εξαχθείσα από τις χαρακτηριστικές IV των φ/β στοιχείων του δισκίου 16 (άνω ψηφίδα). Ο πίνακας παραθέτει επιπλέον τις τάσεις ($V_{1\text{max}}$, $V_{2\text{max}}$), τη διαφορά τους (ΔV) και τα ρεύματα ($I_{1\text{max}}$, $I_{2\text{max}}$) των 2 ενώσεων.

Τα στοιχεία των πινάκων δείχνουν ότι σε όλες τις διατάξεις η μέγιστη ισχύς επιτυγχάνεται όταν η τάση της μπροστινής ένωσης είναι υψηλότερη από την αντίστοιχη της πίσω όπου η διαφορά αυτή κυμαίνεται στην περιοχή 14-100mV περίπου, ενώ στην πλειονότητα των δομών παίρνει τιμές 40-70mV. Επιπλέον το μέγιστο αυτό επιτυγχάνεται για ρεύματα στην πίσω ένωση που βρίσκονται στο διάστημα 0,2-0,7 mA. Γενικά παρατηρήθηκε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση όσο υψηλότερο είναι αυτό το ρεύμα, δηλαδή για καλύτερα χαρακτηριστικά της πίσω ένωσης. Τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την αποδιδόμενη ισχύ επιτυγχάνονται κυρίως από τις δομές του δισκιδίου 4 και από κάποιες μεμονωμένες των υπόλοιπων δισκιδίων.

Ένα άλλο στοιχείο που είναι σημαντικό να μελετηθεί είναι η διαφορά που παρουσιάζει το φ/β στοιχείο στην αποδιδόμενη ισχύ για την κατάσταση λειτουργίας με τους 2 εκπομπούς ενωμένους. Για να ληφθεί αυτό το σημείο ελέγχεται από κάθε χαρακτηριστική για ποιές τιμές ρευμάτων οι τάσεις στις 2 ενώσεις είναι περίπου ίσες. Να σημειωθεί ότι αυτό δεν είναι εφικτό για όλες τις καμπύλες, δεδομένου ότι σε κάποιες περιπτώσεις η μεταβολή του δυναμικού της μπροστινής ή της πίσω ένωσης είναι απότομη (ειδικά όταν το ρεύμα που τροφοδοτεί την πίσω ένωση είναι τέτοιο ώστε περνάει σε αντιστροφή, δηλαδή η τάση της αλλάζει πρόσημο και παίρνει υψηλές τιμές). Έτσι η σύγκριση που πραγματοποιείται είναι για τις χαρακτηριστικές στις οποίες υπάρχουν σημεία όπου τα δυναμικά των 2 ενώσεων είναι ουσιαστικά ίδια (διαφέρουν το πολύ μερικά mV). Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η μέγιστη ισχύς ενός φ/β στοιχείου από το δισκίδιο 16 συναρτήσει του ρεύματος στην πίσω ένωση. Συγκριτικά παρατίθεται και η καμπύλη της ισχύος για την περίπτωση που τα δυναμικά των ενώσεων είναι ίσα. Στο δεξί άξονα εμφανίζεται η σχετική διαφορά της απόδοσης για τις 2 διαφορετικές περιπτώσεις (μπλε καμπύλη)



Σχήμα 8.29. Μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς συναρτήσει του ρεύματος της πίσω ένωσης, υπό διαφορετικές και ίσες τάσεις των 2 εκπομπών σε δομή του δισκίου 16 με απόσταση πίσω επαφών $l=100\mu\text{m}$ και πλευρά $d=50\mu\text{m}$. Ο δεξιός άξονας απεικονίζει τη σχετική (%) διαφορά στην ισχύ για τις 2 περιπτώσεις.

Από τις καμπύλες του σχήματος 8.29 παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μικρή αλλά αισθητή υπεροχή στην αποδιδόμενη ισχύ του στοιχείου για μικρές και θετικές τιμές του ρεύματος της πίσω ένωσης όταν τα δυναμικά των 2 εκπομπών διαφέρουν, στην περιοχή αυτή των ρευμάτων (κοντά στο σημείο μέγιστης απόδοσης ισχύος της διάταξης). Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε η βελτίωση στην περιοχή αυτή ήταν αναμενόμενη και παρατηρείται όταν η τάση στην μπροστινή ένωση είναι ελαφρά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της πίσω. Σε αυτή την περίπτωση το όφελος που υφίσταται από αυτό τον τρόπο λειτουργίας κυμαίνεται περίπου μεταξύ 0,5-2%. Παρόμοια βελτίωση είχε προβλεφθεί και από τις προσομοιώσεις (κεφάλαιο 6, σχ. 6.24), όπου για εκείνες τις παραμέτρους, η αύξηση που είχε παρατηρηθεί ήταν περίπου 1%. Επιπρόσθετα, παρουσιάζει ενδιαφέρον το γεγονός ότι στην περιοχή όπου το ρεύμα στην πίσω ένωση γίνεται αρνητικό, οπότε η αποδιδόμενη ισχύς του στοιχείου αρχίζει και μειώνεται, η πτώση είναι πολύ πιο απότομη στην περίπτωση που τα δυναμικά στις 2 ενώσεις είναι ίδια, ενώ όταν αυτά διαφέρουν η ισχύς εξακολουθεί να βρίσκεται σε σχετικά υψηλά επίπεδα. Να σημειωθεί ότι σε αυτή την περίπτωση, το βέλτιστο σημείο λειτουργίας αντιστοιχεί πλέον σε υψηλότερο δυναμικό στην πίσω ένωση.

Στους επόμενους πίνακες παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα της μέγιστης ισχύος που αποδίδεται από τις διατάξεις των 3 δισκιδίων όταν τα δυναμικά των 2 εκπομπών είναι περίπου ίσα (P_{ma}) και όταν διαφέρουν (P_{mb}), για δεδομένο ρεύμα στην πίσω ένωση I_2 (ίδια χαρακτηριστική). Επιπλέον παρουσιάζεται η ποσοστιαία

Κεφάλαιο 8

σχετική διαφορά ισχύος (ΔP_m), το ρεύμα της άνω ένωσης (I_{1a} , I_{1b}) και οι τάσεις (V_{1a} , V_{1b} , V_{2b}) των 2 τρόπων λειτουργίας (a και b αντίστοιχα), όπου το δυναμικό V_{2a} δεν αναφέρεται διότι είναι περίπου ίσο με το V_{1b} . Η επιλογή του ρεύματος I_2 είναι τέτοια ώστε η P_{ma} να είναι η μέγιστη δυνατή. Μερικά φ/β στοιχεία έχουν παραλειφθεί από τη σύγκριση, διότι δεν ήταν δυνατό να καθορισθεί με ακρίβεια η P_{ma} .

d (μm)	l (μm)	I_{1a} (mA)	I_{1b} (mA)	I_2 (mA)	V_{1a} (mV)	V_{1b} (mV)	V_{2b} (mV)	P_{mb} (mW)	P_{ma} (mW)	ΔP_m (%)
Άνω Ψηφίδα										
40	400	18,6	18,3	0,2	525,2	537,2	523,6	9,936	9,874	0,624
100	400	18,3	18	0,1	520,9	533,4	509,7	9,653	9,583	0,73
133	400	18,4	18	0	514,1	529,5	505,7	9,531	9,459	0,755
25	200	18,6	18,3	0,1	500,3	520,4	495,4	9,573	9,355	2,28
40	200	18,6	18,3	0,1	503,2	523,7	500,1	9,634	9,41	2,325

Πίνακας 8.21. Σύγκριση της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (P_{ma}) υπό φωτισμό, για ίσες τάσεις των 2 ενώσεων και διαφορετικές (P_{mb}) και δεδομένο ρεύμα I_2 στην πίσω ένωση (ίδια χαρακτηριστική) των δομών του δισκίου 4. Ο πίνακας παραθέτει επιπλέον τις τάσεις των εκπομπών (V_{1a} , V_{1b} , V_{2b}), τα ρεύματα στην άνω ένωση (I_{1a} , I_{1b}) και την ποσοστιαία σχετική διαφορά ισχύος για τους 2 τρόπους λειτουργίας (a και b).

d (μm)	l (μm)	I_{1a} (mA)	I_{1b} (mA)	I_2 (mA)	V_{1a} (mV)	V_{1b} (mV)	V_{2b} (mV)	P_{mb} (mW)	P_{ma} (mW)	ΔP_m (%)
100	200	18,4	17,8	0,1	477,3	514,8	473,2	9,211	8,829	4,147
133	400	19,3	18,8	0,1	485,2	521,4	485,7	9,852	9,413	4,456
80	400	19	18,5	0	498,5	526,9	501,1	9,748	9,471	2,842
40	400	19	18,9	0	502,3	511,3	495,7	9,664	9,545	1,231

Πίνακας 8.22. Σύγκριση της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (P_{ma}) υπό φωτισμό, για ίσες τάσεις των 2 ενώσεων και διαφορετικές (P_{mb}) και δεδομένο ρεύμα I_2 στην πίσω ένωση (ίδια χαρακτηριστική) των δομών του δισκίου 15 (άνω ψηφίδα). Τα σύμβολα των υπολοίπων μεγεθών αναλύονται στον πίνακα 8.21.

d (μm)	l (μm)	I_{1a} (mA)	I_{1b} (mA)	I_2 (mA)	V_{1a} (mV)	V_{1b} (mV)	V_{2b} (mV)	P_{mb} (mW)	P_{ma} (mW)	ΔP_m (%)
33	100	17,5	16,8	0,2	485,2	513,2	485,6	8,719	8,587	1,514
50	100	18,4	18,2	0,1	502,7	511,2	498,2	9,353	9,3	0,57
5	50	18,4	18,1	0,1	495,6	524,5	491,1	9,542	9,167	3,93

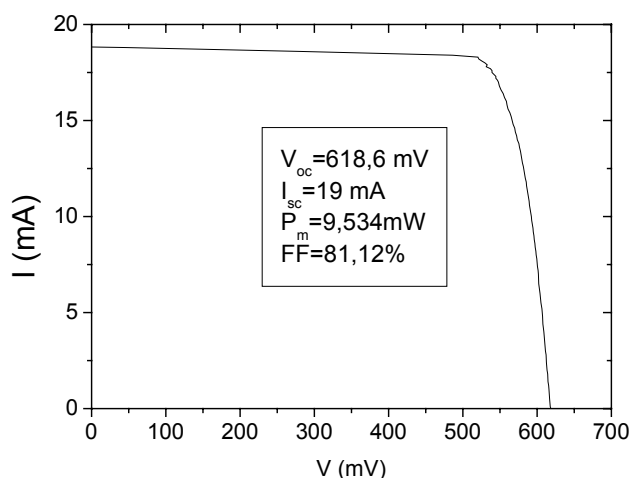
Πίνακας 8.23. Σύγκριση της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (P_{ma}) υπό φωτισμό, για ίσες τάσεις των 2 ενώσεων και διαφορετικές (P_{mb}) και δεδομένο ρεύμα I_2 στην πίσω ένωση (ίδια χαρακτηριστική) των δομών του δισκίου 16 (άνω ψηφίδα). Τα σύμβολα των υπολοίπων μεγεθών αναλύονται στον πίνακα 8.21.

Συγκρίνοντας την αποδιδόμενη ισχύ του στοιχείου για τους 2 διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας, παρατηρούμε ότι αυτή παρουσιάζεται μειωμένη για την περίπτωση που η διάταξη έχει τους εκπομπούς σε περίπου ίσα δυναμικά σε ποσοστό που κυμαίνεται κατά προσέγγιση μεταξύ 0,6 και 4,5%. Αυτή η διαφορά φαίνεται να επηρεάζεται σε γενικές γραμμές από τα χαρακτηριστικά της πίσω ένωσης, και συγκεκριμένα την τάση

Κεφάλαιο 8

που μπορεί να παράγει στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας. Έτσι, στις αρκετά καλές δομές (π.χ από της άνω ψηφίδα του δισκιδίου 4) η ΔP_m δεν ξεπερνάει το 1%, ενώ σε αυτές του δισκιδίου 15, όπου η πίσω ένωση δεν είναι τόσο καλή, είναι πάνω από 4%.

Ένα άλλο θέμα που θα μπορούσε να αναλυθεί, είναι η σύγκριση της δομής με τις αντίστοιχες μονής ένωσης. Αυτό μπορεί να γίνει θεωρώντας την πίσω ένωση ανοιχτοκυκλωμένη. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνονται τυπικές χαρακτηριστικές IV όπως η ακόλουθη που αφορά μια καλή δομή του δισκιδίου 4, η οποία έχει υποστεί θερμική ανόπτηση Αλουμινίου που βελτιώνει την απόδοσή της.



Σχήμα 8.30. Χαρακτηριστική IV φ/β στοιχείου 2 ενώσεων (ληφθείσα με ανοιχτή την πίσω ένωση) από το δισκίδιο 4 με $l=400\mu\text{m}$ και $d=40\mu\text{m}$.

Παρατηρούμε ότι το φ/β στοιχείο του σχήματος 8.30 έχει ιδιαίτερα υψηλή τάση ανοιχτού κυκλώματος (618,6mV). Στους επόμενους πίνακες παρατίθεται η μέγιστη ισχύς (P_{mc}) του κάθε στοιχείου όταν βρίσκεται σε κατάσταση λειτουργίας με ανοιχτή την πίσω ένωση (τρόπος λειτουργίας c) και συγκρίνεται με τους 2 υπόλοιπους τρόπους που αναφέρθηκαν πριν (a και b). Συγκριτικά παρατίθενται και οι τάσεις ανοιχτού κυκλώματος των 2 ενώσεων και ο παράγοντας πλήρωσης για αυτό τον τρόπο λειτουργίας. Η μέγιστη ισχύς που προκύπτει από τους 2 τελευταίους τρόπους λειτουργίας συγκρίνεται με τη βέλτιστη (P_{ma}) που προκύπτει από την τροφοδοσία των 2 ενώσεων με διαφορετικές τάσεις (πίνακες 8.18-8.20) μέσω της σχετικής ποσοστιαίας διαφοράς ΔP_{mb} , ΔP_{mc} . Για λόγους αναφοράς παρατίθενται επιπλέον και τα χαρακτηριστικά των μονοδιάστατων δομών του δισκιδίου 4.

Κεφάλαιο 8

d (μm)	l (μm)	I_{sc} (mA)	V_{oc1} (mV)	V_{oc2} (mV)	FF_c (%)	P_{ma} (mW)	P_{mb} (mW)	P_{mc} (mW)	ΔP_{mb} (%)	ΔP_{mc} (%)
Άνω Ψηφίδα										
40	400	19	618,6	578,8	81,12	9,936	9,874	9,534	0,62	4,05
100	400	19,1	614,5	565	82,22	9,927	9,583	9,65	3,47	2,79
133	400	19,1	610,6	559	81,72	9,908	9,459	9,531	4,53	3,81
25	200	19,3	605,4	550	81,59	9,718	9,355	9,533	3,74	1,9
40	200	19,1	611,9	557,7	81,46	9,819	9,41	9,521	4,17	3,03
50	200	19,2	609,6	553,1	81,69	9,807	-	9,561	-	2,51
10	100	19,5	607,5	544,1	81,17	9,718	-	9,616	-	1,05
20	100	19,3	614,5	552,5	81,55	9,853	-	9,672	-	
Κάτω Ψηφίδα										
50	400	19,1	601,9	531,5	81,07	9,548	-	9,32	-	2,39
200	400	19,2	607,5	544	82,27	9,772	-	9,596	-	1,8
25	100	19,1	601,5	508,1	82,28	9,629	-	9,453	-	1,83
1d (α)	-	19,2	598,6	-	82,5	-	-	9,482	-	-
1d (β)	-	19,4	613,7	-	83,7	-	-	9,965	-	-
1d (γ)	-	19,5	615,1	-	82,61	-	-	9,909	-	-
1d (δ)		19,6	615,1		82,59			9,957		

Πίνακας 8.24. Σύγκριση της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (P_{ma}) υπό φωτισμό, για διαφορετικές τάσεις των 2 ενώσεων, ίσες (P_{mb}) και θεωρώντας την πίσω ανοιχτοκυκλωμένη (P_{mc}) για τις δομές του δισκίου 4. Ο πίνακας παραθέτει επιπλέον τις τάσεις ανοιχτού κυκλώματος των εκπομπών (V_{oc1} , V_{oc2}), το ρεύμα βραχυκυκλώματος της άνω ένωσης (I_{sc}) και τον παράγοντα πλήρωσης για τον τρίτο τρόπο λειτουργίας (c). Επίσης αναφέρεται και η ποσοστιαία σχετική διαφορά ισχύος ΔP_{mb} , ΔP_{mc} των τρόπων λειτουργίας (b και c) σε σχέση με τον βέλτιστο (a). Για σύγκριση παρατίθενται τα αποτελέσματα από τις μονοδιάστατες δομές.

d (μm)	l (μm)	I_{sc} (mA)	V_{oc1} (mV)	V_{oc2} (mV)	FF_c (%)	P_{ma} (mW)	P_{mb} (mW)	P_{mc} (mW)	ΔP_{mb} (%)	ΔP_{mc} (%)
100	200	19,3	600,1	515,2	78,14	9,306	8,829	9,05	5,13	2,75
133	400	19,5	605,5	537,9	81,83	9,903	9,413	9,662	4,95	2,43
80	400	19,5	608,9	539,9	82,1	10,03	-	9,748	-	2,83
40	400	19,6	597,9	518,9	82,47	9,94	-	9,664	-	2,78

Πίνακας 8.25. Σύγκριση της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (P_{ma}) υπό φωτισμό, για διαφορετικές τάσεις των 2 ενώσεων, ίσες (P_{mb}) και θεωρώντας την πίσω ανοιχτοκυκλωμένη (P_{mc}) για τις δομές του δισκίου 15 (άνω ψηφίδα). Τα υπόλοιπα σύμβολα που παρατίθενται είναι ίδια με του πίνακα 8.24.

d (μm)	l (μm)	I_{sc} (mA)	V_{oc1} (mV)	V_{oc2} (mV)	FF_c (%)	P_{ma} (mW)	P_{mb} (mW)	P_{mc} (mW)	ΔP_{mb} (%)	ΔP_{mc} (%)
33	100	19,2	600,8	540,3	74,42	8,793	8,587	8,585	2,34	2,37
50	100	19	596,5	523,9	80,65	9,414	9,3	9,141	1,21	2,9
5	50	19,2	607,6	540,4	81,65	9,789	9,167	9,525	6,35	2,77

Πίνακας 8.26. Σύγκριση της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (P_{ma}) υπό φωτισμό, για διαφορετικές τάσεις των 2 ενώσεων, ίσες (P_{mb}) και θεωρώντας την πίσω ανοιχτοκυκλωμένη (P_{mc}) για τις δομές του δισκίου 16 (άνω ψηφίδα). Τα υπόλοιπα σύμβολα που παρατίθενται είναι ίδια με του πίνακα 8.24.

Από τα δεδομένα των πινάκων, 8.24-8.26 παρατηρούμε ότι στις περισσότερες δομές η μέγιστη ισχύς για την περίπτωση που το στοιχείο έχει την πίσω ένωση

Κεφάλαιο 8

ανοιχτοκυκλωμένη (P_{mc}) είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με την αντίστοιχη όπου οι 2 ενώσεις είναι στο ίδιο δυναμικό (P_{mb}). Αντίθετα, για το φ/β στοιχείο του δισκίου 4 που αναλύεται στην πρώτη γραμμή του πίνακα 8.24 ($d=40\mu\text{m}$, $l=400\mu\text{m}$) και παρουσιάζει τα καλύτερα χαρακτηριστικά από όλες τις δομές 2 ενώσεων του δισκιδίου η P_{mb} είναι πολύ κοντά στη βέλτιστη (P_{ma}) που αποδίδεται όταν οι 2 εκπομποί βρίσκονται σε διαφορετικά δυναμικά. Αυτό πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι η διάταξη χαρακτηρίστηκε μετά από τη θερμική ανόπτυση Al η οποία ενίσχυσε τα ήδη καλά χαρακτηριστικά του. Να σημειωθεί ότι η διεργασία αυτή πολλές φορές οδηγεί σε βραχυκύκλωμα τις ενώσεις πίσω εκπομπού και βάσης και για αυτό οι δομές μετρήθηκαν χωρίς την διεξαγωγή της. Παρόλα αυτά, η βέλτιστη απόδοση της δομής (P_{ma}) είναι αισθητά μεγαλύτερη συγκριτικά με τους 2 άλλους τρόπους λειτουργίας, με ποσοστά διαφοράς πάνω από 2% στις περισσότερες περιπτώσεις. Επίσης οι μονοδιάστατες δομές παρουσιάζουν ιδιαίτερα καλά χαρακτηριστικά, σε γενικές γραμμές καλύτερα από τις διατάξεις των 2 ενώσεων. Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει αποτελέσματα θεωρητικών προσομοιώσεων για τις δομές 2 ενώσεων σε αναλογία με τον πίνακα 8.17. Για λόγους σύγκρισης έχει προστεθεί 1 στήλη που παραθέτει τη σχετική διαφορά απόδοσης της δομής 2 ενώσεων σε σχέση με την αντίστοιχη 1 ένωσης.

Θεωρητικές προσομοιώσεις												
d/l	l=400μm						l=200μm					
	I _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	R _s (Ω.cm ²)	η (%)	Δη (%)	FF (%)	I _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	R _s (Ω.cm ²)	η (%)	Δη (%)	FF (%)
0,5	36,859	591,4	0,0171	17,97	1,32	82,44	36,912	591,25	0,0151	17,99	1,42	82,45
0,33	36,941	591	0,0372	17,97	1,32	82,32	36,96	591	0,025	18	1,36	82,39
0,25	36,962	591	0,0585	17,96	1,31	82,2	36,97	591	0,0354	17,99	1,34	82,33
0,2	36,970	590,9	0,0758	17,94	1,29	82,1	36,974	590,9	0,0426	17,98	1,32	82,29
0,125	36,977	590,9	0,133	17,87	1,26	81,78	36,978	590,9	0,071	17,94	1,29	82,13
0,1	36,978	590,9	0,171	17,82	1,24	81,56	36,978	590,9	0,0906	17,92	1,28	82,02
d/l	l=100μm						l=50μm					
	I _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	R _s (Ω.cm ²)	η (%)	Δη (%)	FF (%)	I _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	R _s (Ω.cm ²)	η (%)	Δη (%)	FF (%)
0,5	36,943	591,11	0,0142	18,01	1,47	82,46	36,961	591,1	0,0139	18,01	1,5	82,45
0,33	36,969	591	0,0187	18,01	1,39	82,43	36,974	591	0,016	18,01	1,39	82,44
0,25	36,974	591	0,0239	18,01	1,35	82,4	36,977	590,95	0,017	18,01	1,35	82,43
0,2	36,977	590,9	0,0261	18	1,33	82,38	36,978	590,9	0,0179	18,01	1,34	82,43
0,125	36,978	590,9	0,0421	17,98	1,3	82,29	36,979	590,9	0,026	18	1,31	82,38
0,1	36,979	590,9	0,05	17,97	1,29	82,25	36,979	590,9	0,0299	18	1,3	82,36
1D (d=l)												
1	35,43	603,4	0,0316	17,66	-	82,62						

Πίνακας 8.27. Αποτελέσματα θεωρητικών προσομοιώσεων για τις δομές 2 ενώσεων με χαρακτηριστικά προσαρμοσμένα στα πειραματικά.

Συγκρίνοντας του πίνακες 8.17 και 8.27 προκύπτει ότι η αυξημένη επανασύνδεση στην πίσω ένωση μειώνει σημαντικά την τάση ανοιχτού κυκλώματος αλλά και τον παράγοντα πλήρωσης της δομής σε σχέση με τη διάταξη μιας ένωσης και τη μονοδιάστατη. Αυτό αντισταθμίζεται από το ενισχυμένο ρεύμα βραχυκυκλώματος και τη σημαντικά μικρότερη αντίσταση σειράς που οδηγεί σε ελαφρά βελτιωμένη απόδοση για το φ/β στοιχείο 2 ενώσεων, με σχετική διαφορά η οποία δεν ξεπερνάει το 1,5%. Έτσι, η διαπίστωση ότι οι πειραματικές δομές παρουσιάζονται ως λιγότερο αποδοτικές στην κατάσταση λειτουργίας με τους εκπομπούς στο ίδιο δυναμικό, σε συνδυασμό με το γεγονός της υψηλής μέγιστης ισχύος άρα και απόδοσης που εμφανίζουν όταν οι ενώσεις βρίσκονται υπό διαφορετικές τάσεις σημαίνει ότι υπάρχει αρκετό περιθώριο βελτίωσής τους (π.χ θερμική ανόπτυση Αλουμινίου).

8.6 Απόδοση διατάξεων στο ηλιακό φάσμα και φασματική απόκριση

Στις προηγούμενες ενότητες αναλύθηκαν οι χαρακτηριστικές των πειραματικών φ/β διατάξεων για το δεδομένο φωτισμό της λάμπας αλογόνου, το οποίο διαφέρει σημαντικά από το πρότυπο AM1.5G, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.24. Έτσι, δεδομένου ότι τα φ/β στοιχεία προορίζονται για λειτουργία στο ηλιακό φως, έγιναν τέτοιες μετρήσεις σε κάποιο από τα καλύτερα δείγματα (μονοδιάστατη δομή από το δισκίο 4). Η μέτρηση έγινε στις 09/05/2005, ώρα 13:20 το μεσημέρι, απουσία νεφών. Για τη δεδομένη χρονική στιγμή, η προσπίπτουσα ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ήταν $P_{in}=971\text{W/m}^2$ ($97,1\text{mW/cm}^2$) σύμφωνα με τα μετεωρολογικά δεδομένα του ΕΜΠ. Στον επόμενο πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η εξαχθείσα απόδοση. Για σύγκριση παρατίθενται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τον τεχνητό φωτισμό των πειραμάτων, όπου με τη βοήθεια του οργάνου μέτρησης ισχύος της ORIEL εκτιμήθηκε η φωτεινή ισχύς της λάμπας στην έξοδο της οπτικής ίνας στην τιμή $P_{in}=120.51\text{mW/cm}^2$. Στον επόμενο πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο ηλιακό και τεχνητό φως. Η απόδοση των διατάξεων εξάγεται στις 2 περιπτώσεις με αναγωγή στην ίδια θερμοκρασία (22°C), έχοντας υπόψιν από το σχήμα 8.11 ότι η τάση ανοιχτού κυκλώματος πέφτει κατά $2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ και η μέτρηση στον ήλιο έγινε στους 32°C .

Κεφάλαιο 8

Τύπος φάσματος	I_{sc} (mA)	V_{oc} (mV)	FF (%)	P_{in} (mW/cm ²)	P_m (mW)	η (%)	η_i (%)
ηλιακό	14,7	605 (585)	82,61	97,1	7,347	15,44	17.48
τεχνητό	19,5	615,1	82,61	120,51	9,909	16.78	19

Πίνακας 8.28. Αποτελέσματα μετρήσεων στο ηλιακό και τεχνητό φως αντίστοιχα σε δομή (μονοδιάστατη) του δισκίου 4. Η τιμή σε παρένθεση της V_{oc} είναι στους 32⁰C όπου έγινε η μέτρηση ενώ η άλλη είναι ανηγμένη στους 22⁰C. Ως P_m συμβολίζεται η μέγιστη ισχύς του στοιχείου, (η) η απόδοσή του και (η_i) η απόδοση για την οποία θεωρείται αμελητέα η σκίαση από το μπροστινό ηλεκτρόδιο.

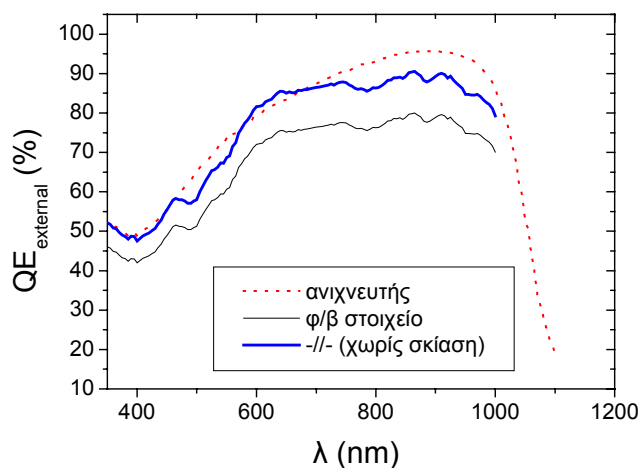
Από τα αποτελέσματα του πίνακα 8.28 παρατηρούμε ότι η απόδοση του φ/β στοιχείου στο ηλιακό φάσμα (15,44%) είναι χαμηλότερη συγκρινόμενη με το τεχνητό (19%), δεδομένου ότι το φως του ήλιου έχει πιο ευρεία κατανομή όπως φαίνεται στο σχήμα 8.24 και εκτείνεται σε συχνότητες μη αξιοποιήσιμες από τη διάταξη. Εντούτοις η απόδοσή του είναι αρκετά κοντά στη θεωρητική του πίνακα 8.27 (17.66%) αν αφαιρεθεί η σκίαση από το μπροστινό μέταλλο που είναι αυξημένη (13.2%).

Στο επόμενο σχήμα απεικονίζεται η εξωτερική κβαντική απόδοση ($QE_{external}$) του μονοδιάστατου φ/β στοιχείου του δισκίου 4 συγκρινόμενη με την αντίστοιχη ενός πρότυπου ανιχνευτή Si τύπου pin της Hamamatsu, μοντέλο S5106. Οι μετρήσεις ελήφθησαν με τη βοήθεια ενός μονοχρωμάτορα της ORIEL ο οποίος παρεμβλήθηκε μεταξύ της λάμπας και της οπτικής ίνας προκειμένου να επιτρέψει τη διέλευση του επιθυμητού μήκους κύματος (200-1000nm) και καταγράφηκε το φωτόρρευμα των 2 διατάξεων. Η εξαγωγή της καμπύλης της κβαντικής απόδοσης του στοιχείου προέκυψε χρησιμοποιώντας ως αναφορά την καμπύλη της φασματικής απόκρισης που παρέχει ο κατασκευαστής για τον ανιχνευτή, για μεγαλύτερη αξιοπιστία δεδομένου ότι ο μονοχρωμάτορας ήταν σχεδιασμένος να έχει αυξημένη απόκριση στα μικρά μήκη κύματος (περίπου 300-400nm)

Από την σύγκριση των καμπυλών του σχήματος παρατηρούμε ότι η κβαντική απόδοση του στοιχείου είναι μειωμένη σε σχέση με του ανιχνευτή κυρίως λόγω του σχετικά υψηλού ποσοστού σκίασης από το μπροστινό μέταλλο. Αν αφαιρεθούν αυτές οι απώλειες (που δεν υφίστανται στον ανιχνευτή) οι κβαντικές αποδόσεις των 2 δομών είναι περίπου ισοδύναμες με τον ανιχνευτή να υπερτερεί κυρίως στην περιοχή των 700-1000nm, ενώ το φ/β στοιχείο έχει μια σχετικά σταθερή κβαντική απόδοση για μήκη κύματος από 600-900nm. Η βελτιωμένη κβαντική απόδοση του ανιχνευτή είναι αναμενόμενη δεδομένου ότι έχει σχεδιαστεί να έχει υψηλή φασματική απόκριση (με

Κεφάλαιο 8

μέγιστο στα 960nm) και προφανώς εξαρτάται από το είδος των επιστρώσεων που διαθέτει.



Σχήμα 8.31. Εξωτερική κβαντική απόδοση φ/β στοιχείου (μονοδιάστατη δομή του δισκιδίου 4) με και χωρίς απώλειες σκίασης, συγκρινόμενη με την αντίστοιχη του πρότυπου ανιχνευτή S5106 της Hamamatsu.

Από την άλλη πλευρά η φασματική απόκριση του φ/β στοιχείου, μπορεί και αυτή να βελτιωθεί αν σχεδιαστεί με καλύτερες αντιανακλαστικές επιστρώσεις, και προφανώς μπορεί να διαφοροποιείται ελαφρά στα φ/β στοιχεία των άλλων δισκιδίων, όπου το πάχος των επιστρώσεων μπορεί να αλλάζει λίγο ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες εναπόθεσης.

8.7 Γενικά συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφηκε η διαδικασία χαρακτηρισμού και αναλύθηκαν τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις πειραματικές δομές 1 και 2 ενώσεων. Η αντίσταση σειράς των φ/β στοιχείων που μετρήθηκαν διαπιστώθηκε ότι ήταν σε καλή συμφωνία με το θεωρητικό μοντέλο και για τα δύο είδη διατάξεων. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η απόδοση των διατάξεων 2 ενώσεων υπό φωτισμό ήταν βέλτιστη όταν το δυναμικό του πίσω εκπομπού ήταν λίγο χαμηλότερο σε σχέση με του μπροστινού, χαρακτηριστικό που είχε παρατηρηθεί και στις προσομοιώσεις. Αντίθετα, για κατάσταση λειτουργίας όπου οι τάσεις τους ήταν ίσες, παρουσιάστηκε σημαντική

Κεφάλαιο 8

πτώση της μέγιστης ισχύος, γεγονός που επισημαίνει ότι υπάρχει δυνατότητα βελτίωσης των πειραματικών φ/β στοιχείων για αυτή την περίπτωση. Επιπλέον σε μετρήσεις που έγιναν στο ηλιακό φως σε φ/β στοιχεία 1 ένωσης παρατηρήθηκε ότι η απόδοσή τους ήταν κοντά στην αναμενόμενη θεωρητική (παραλείποντας τις απώλειες σκίασης που ούτως ή αλλιώς δεν λαμβάνονταν υπόψιν στις προσομοιώσεις).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Suss Microtec, www.suss.com.
- [2] National Instruments, *Labview version 5.0*, www.ni.com.
- [3] Goetzberger A., Knobloch J., Voss B., *Crystalline Silicon Solar Cells*, John Wiley and Sons, 1998, κεφ. 9.
- [4] Robinson S. J., Wenham S. R., Altermatt P., Aberle A. G., Heiser G. και Green M. A., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 78, 1995, σελ. 4740.
- [5] Sproul A. B. και Green M. A., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 70, 1991, σελ. 846.
- [6] Sproul A. B. και Green M. A., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 73, 1993, σελ. 1214.
- [7] Misiakos K., και Tsamakis D., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 74, 1993, σελ. 3293.
- [8] Misiakos K., Tsoi E. και Neugroschel A., *J. Appl. Phys.*, Τόμος 72, 1992, σελ. 1894.
- [9] Swanson R. M., Beckwith S. K., Crane R. A., Eades W. D., Kwark Y. H., Sinton R. A. και Swirhun S. E., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 31, 1984, σελ. 661.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη φωτοβολταϊκών διατάξεων μονοκρυσταλλικού πυριτίου με βάση σημειακής επαφής, σε θεωρητικό επίπεδο μέσω τρισδιάστατης προσομοίωσης και σε πειραματικό με την κατασκευή και τον χαρακτηρισμό τους. Μελετήθηκαν δυο διαφορετικές δομές, όπου η πρώτη διαθέτει μια μόνο ένωση η οποία είναι σχηματισμένη στη μπροστινή επιφάνεια ενώ η δεύτερη διαθέτει μια επιπλέον ένωση στην πίσω επιφάνεια. Έμφαση δόθηκε στην εκτίμηση της αντίστασης σειράς που οφείλεται σε φαινόμενα μεταφοράς φορέων στην περιοχή της βάσης του στοιχείου (spreading resistance) θεωρώντας ως βασικές παραμέτρους το μέγεθος και την απόσταση των πίσω επαφών. Επίσης έγινε σύγκριση των 2 δομών με αυτή που αντιστοιχεί σε τυπική φ/β διάταξη όπου η επαφή καταλαμβάνει ολόκληρη την πίσω επιφάνεια.

Αρχικά μελετήθηκε θεωρητικά η διάταξη σημειακής επαφής 1 ένωσης η οποία έχει διερευνηθεί αρκετά στη βιβλιογραφία λόγω των υψηλών αποδόσεων που παρουσιάζει, σε επίπεδο δισδιάστατων προσομοιώσεων κυρίως και σε περιορισμένο βαθμό μέσω τριδιάστατων εξαιτίας των αυξημένων απαιτήσεων σε υπολογιστική ισχύ. Έτσι, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του τρισδιάστατου μοντέλου της διατριβής έδειξαν ότι:

- το ρεύμα βραχυκλώματος όπως και η τάση ανοιχτού κυκλώματος αυξάνονται όσο μειώνονται οι διαστάσεις των πίσω επαφών, ενώ δεν επηρεάζονται από την μεταξύ τους απόσταση.
- όσο μικρότερο είναι το ρεύμα ανασύνδεσης στον εκπομπό, τόσο περισσότερο βελτιώνεται η τάση ανοιχτού κυκλώματος άρα και η συνολική απόδοση της διάταξης.
- Η αντίσταση σειράς (R_s) στη βάση αυξάνει σημαντικά με την ελάττωση του μεγέθους των πίσω επαφών η οποία για μικρούς λόγους d/l (μέγεθος πλευράς πίσω επαφών προς την απόσταση αυτών) μπορεί να είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της τυπικής φ/β διάταξης (μονοδιάστατη περίπτωση). Αντίθετα, η αντίσταση σειράς πέφτει σημαντικά όσο μικρότερες είναι οι αποστάσεις των πίσω επαφών. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η μείωση της νόθευσης στη βάση κατά μια τάξη μεγέθους συνοδεύεται από μια σχεδόν ισόποση αύξηση στην αντίσταση σειράς η

οποία είναι δυνατό να την καταστήσει κυρίαρχη αιτία στην πτώση της απόδοσης της διάταξης (για υλικό σχετικά χαμηλής νόθευσης). Παρόμοια εξάρτηση της R_s από το μέγεθος και την απόσταση των πίσω επαφών έχει διαπιστωθεί και στην υπάρχουσα βιβλιογραφία.

- Ποσοτικά, παρατηρήθηκε ότι το μέγεθος d/l για τον οποίο επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση, μεταβάλλεται από 0,2 σε 0,1 όταν ο λόγος της απόστασης των επαφών προς το πάχος της διάταξης πέφτει από 1 σε 0,125. Επίσης, για τις παραμέτρους που εξετάστηκαν, η μέγιστη σχετική βελτίωση στην απόδοση της δομής συγκριτικά με την συμβατική (μονοδιάστατη) φτάνει περίπου το 6%, δηλαδή η απόδοση αυξήθηκε από το 21,9% στο 23,2%.

Στη συνέχεια με τη βοήθεια του μοντέλου μελετήθηκε η δομή 2 ενώσεων και συγκρίθηκε με την αντίστοιχη μιας ένωσης (σε συνθήκες λειτουργίας όπου οι 2 ενώσεις είναι στο ίδιο δυναμικό), όπως και με την μονοδιάστατη. Ανάλογη σύγκριση έχει πραγματοποιηθεί στη βιβλιογραφία σε 1 εργασία, αλλά μόνο μέσω μονοδιάστατων και δισδιάστατων προσομοιώσεων, χωρίς ανάλυση της αντίστασης σειράς. Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του μοντέλου της διατριβής έδειξαν ότι:

- Το ρεύμα βραχυκυκλώματος της διάταξης 2 ενώσεων είναι βελτιωμένο συγκριτικά με το αντίστοιχο του φ/β στοιχείου μιας ένωσης και η αύξηση αυτή είναι περισσότερο έντονη όταν το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας είναι περίπου ίσο με το πάχος της βάσης ή και λίγο μικρότερο.
- Αντίθετα, η τάση ανοιχτού κυκλώματος της διάταξης είναι συγκριτικά μικρότερη, γεγονός που οφείλεται στις επανασυνδέσεις στον πίσω εκπομπό.
- Η αντίσταση σειράς της λαμβάνει συγκριτικά σημαντικά μικρότερες τιμές κυρίως για σχετικά μεγάλες διαστάσεις των πίσω επαφών, ενώ για κατάλληλες αποστάσεις και μεγέθη των πίσω επαφών είναι ακόμα χαμηλότερη και από της μονοδιάστατης δομής. Αυτό το χαρακτηριστικό την καθιστά καλύτερη επιλογή για συστήματα συγκεντρωμένης ακτινοβολίας, δεδομένου ότι σε αυτές τις εφαρμογές οι ωμικές απώλειες επηρεάζουν πολύ την λειτουργία των στοιχείων. Το συμπέρασμα αυτό μπορεί να επεκταθεί και στην περίπτωση όπου η βάση είναι ελαφρότερα νοθευμένη, αφού τότε η αντίσταση σειράς αυξάνει ανάλογα.

- Η διαφορά στην απόδοση των 2 διατάξεων εξαρτάται κυρίως από το μήκος διάχυσης στη βάση, το πάχος της, την απόσταση και το μέγεθος των πίσω επαφών. Για τις παραμέτρους που αναλύθηκαν, το μέγιστο (σχετικό) κέρδος στην απόδοση συγκριτικά με την διάταξη μιας ένωσης ήταν 4%.
- Ένα άλλο χαρακτηριστικό της δομής 2 ενώσεων που διαπιστώθηκε στις προσομοιώσεις και δεν είχε ως τώρα αναφερθεί, είναι η αισθητή αύξηση της απόδοσης της διάταξης όταν οι 2 ενώσεις βρίσκονται υπό διαφορετικό δυναμικό (κατά μερικές δεκάδες mV και κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος του φ/β στοιχείου).

Στο δεύτερο μέρος της διατριβής αναλύθηκαν οι πειραματικές δομές. Από την επεξεργασία των δεδομένων που ελήφθησαν μέσω του χαρακτηρισμού των διατάξεων 1 και 2 ενώσεων προκύπτουν τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα:

- Παρατηρήθηκε καλή συμφωνία μεταξύ των αντιστάσεων σειράς των πειραματικών δομών και των θεωρητικών προσομοιώσεων, γεγονός που επαληθεύει την ορθότητα του μοντέλου.
- Οι χαρακτηριστικές τάσεως ρεύματος των δομών 1 ένωσης παρουσίασαν σε πολλές περιπτώσεις απόκλιση από την ιδανική συμπεριφορά (εκθετικό μοντέλο) σε συνθήκες σκότους για τις χαμηλές και μεσαίες περιοχές τάσεων (0,05-0,4 V περίπου). Παρόμοια συμπεριφορά έχει αναφερθεί και στη βιβλιογραφία για τέτοιου τύπου δομές και αποδίδεται στην ύπαρξη του οξειδίου της πίσω επιφάνειας. Αντίθετα, οι μονοδιάστατες δομές εμφάνισαν ιδανική χαρακτηριστική.
- Επίσης, σε μετρήσεις σκότους υπό διαφορετικές θερμοκρασίες στη δομή 1 ένωσης παρατηρήθηκε μη γραμμική μεταβολή του ρεύματος ανασύνδεσης (J_0) που αποδίδεται στη μεταβολή της ενδογενούς συγκέντρωσης φορέων n_i .
- Οι παράγοντες πλήρωσης (FF) των περισσότερων φ/β στοιχείων στις μετρήσεις υπό φωτισμό ήταν αρκετά υψηλοί (πάνω από 80%) και αρκετά κοντά στις θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές και στις σχεδιαστικές απαιτήσεις. Επίσης παρουσίασαν ικανοποιητική απόδοση στο ηλιακό φως (15.44%), δεδομένου του σχετικά υψηλού συντελεστή σκίασης του μπροστινού μετάλλου (13.2%), ως αποτέλεσμα της απαίτησης χαμηλών ωμικών απωλειών κατά τον σχεδιασμό των φ/β στοιχείων.
- Η μέγιστη ισχύς των διατάξεων 2 ενώσεων εμφανιζόταν για ελαφρά διαφορετικές τάσεις των 2 εκπομπών όπως είχε προβλεφθεί και θεωρητικά.

Αντίθετα, σε κατάσταση λειτουργίας με τα δυναμικά των 2 ενώσεων ίσα, οι περισσότερες διατάξεις απέδωσαν σημαντικά χαμηλότερα από ότι αναμενόταν. Η διαδικασία θερμικής ανόπτυσης Αλουμινίου έδειξε να βελτιώνει αυτή τη συμπεριφορά.

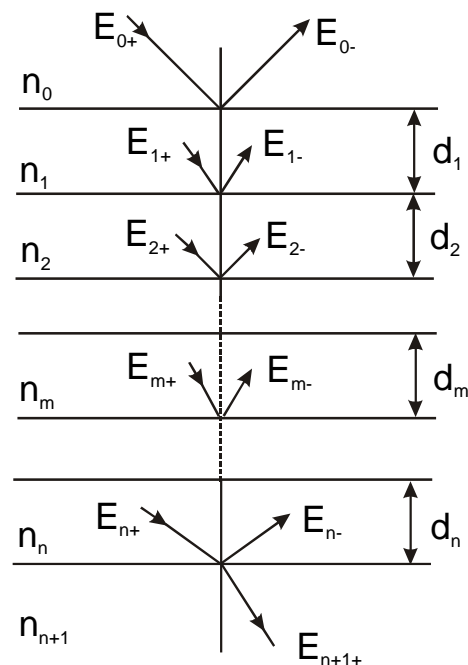
- Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων αντιστάσεων σειράς με ανοιχτοκυκλωμένη τη μία από τις 2 ενώσεις (θεώρηση της διάταξης ως στοιχείο 1 εκπομπού) προέκυψε ότι η R_s του στοιχείου όταν οι 2 ενώσεις είναι στο ίδιο δυναμικό ισούται περίπου με τον παράλληλο συνδυασμό των αντιστάσεων που λαμβάνονται από τους 2 διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας της δομής (μπροστινή ή πίσω ένωση ανοιχτοκυκλωμένη) για μικρές αποστάσεις των πίσω επαφών ή σχετικά μεγάλους λόγους d/l (πάνω από 0,25). Στις υπόλοιπες περιπτώσεις υπήρξε σημαντική απόκλιση και στις θεωρητικές εκτιμήσεις αλλά και στις πειραματικές μετρήσεις (τάσεις ενώσεων ίσες), αποτέλεσμα που πιθανόν οφείλεται στη διαφορετική κατανομή των φορέων για τις διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση θα είχε νόημα μια θεωρητική διερεύνηση του θέματος.

Στις προοπτικές συνέχισης της εργασίας αυτής θα μπορούσε να γίνει επέκταση του θεωρητικού μοντέλου έτσι ώστε να καλύψει και άλλες παραλλαγές φ/β στοιχείων με βάση σημειακής επαφής (όπως για παράδειγμα τη δομή σημειακών επαφών πίσω ένωσης που αναλύθηκε στην ενότητα 3.5 και την διάταξη PERT (Passivated Emitter, Rear Totally Diffused) της ενότητας 3.7.1. Επίσης ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η ανάπτυξη παρόμοιου μοντέλου για την προσομοίωση τέτοιων φ/β διατάξεων υψηλής απόδοσης υπό συνθήκες υψηλής έγχυσης, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν πολλά μοντέλα που να προσομοιώνουν τέτοιες συνθήκες σε φ/β στοιχεία. Όσον αφορά το πειραματικό μέρος θα μπορούσε να γίνει κάποια βελτιστοποίηση των διεργασιών κατασκευής των φ/β στοιχείων ώστε να επιτυγχάνουν υψηλότερες αποδόσεις, ενώ η χρήση δισκιδίων καλύτερης ποιότητας (με μεγάλους χρόνους ζωής φορέων μειονότητας) θα βοηθούσε στην καλύτερη σύγκριση των 2 δομών, πέρα από την βελτίωση της απόδοσης. Τέλος, ο χαρακτηρισμός των στοιχείων υπό συνθήκες που να προσομοιάζουν σε ακριβή βαθμό το ηλιακό φάσμα AM1.5 θα παρείχε τη δυνατότητα καλύτερης αξιολόγησης της απόδοσης των διατάξεων, ενώ με περαιτέρω μετρήσεις συναρτήσει της θερμοκρασίας σε φ/β στοιχεία που έχουν χαρακτηριστικές IV κοντά στην ιδανική μπορούν να ληφθούν σημαντικές πληροφορίες για τις παραμέτρους του υλικού.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ (MATRIX METHOD) ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

A.1 Περιγραφή της μεθόδου

Η εύρεση αναλυτικών εκφράσεων για τους συντελεστές ανάκλασης και διάδοσης σε ένα σύστημα πολλαπλών υμενίων (σχ. Α.1) αποτελεί γενικά μια σχετικά δύσκολη διαδικασία δεδομένου ότι οι τύποι που προκύπτουν είναι αρκετά πολύπλοκοι και δύσκολοι. Ο υπολογισμός τέτοιων εκφράσεων συνήθως γίνεται σταδιακά, οπότε γενικά διευκολύνει να δίνονται οι εκφράσεις για την ανάκλαση R και διάδοση T σε διαδοχική μορφή από ενδιάμεσες εξισώσεις έτσι ώστε να υπολογίζονται απλούστερα. Η μέθοδος των πινάκων δίνει τη δυνατότητα εύρεσης αυτών των εκφράσεων με τέτοια μορφή που να είναι αρκετά συνοπτική και εύχρηστη για τον αριθμητικό τους υπολογισμό. Η διαδικασία εξαγωγής των κατάλληλων τύπων όπως προκύπτει από τον Heavens [1], περιγράφεται παρακάτω. Η ίδια μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του συντελεστή ανάκλασης των πειραματικών φ/β διατάξεων που δίνεται στο σχήμα 7.9.



Σχήμα Α.1. Δομή συστήματος πολλών υμενίων με υπόστρωμα απείρου πάχους, όπου E οι συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου και οι δείκτες $+$ και $-$ αναφέρονται στο προσπίπτον και το ανακλώμενο κύμα αντίστοιχα.

Παράρτημα Α

Η ανάλυση θα περιοριστεί για την περίπτωση όπου η δέσμη προσπίπτει κάθετα. Στις σχέσεις που θα ακολουθήσουν χρησιμοποιούνται οι συντελεστές ανάκλασης και διάδοσης του Fresnel οι οποίοι συμβολίζονται r και t αντίστοιχα. Αυτοί είναι στη γενική περίπτωση μιγαδικοί και μπορούν να γραφτούν για το φιλμ m ως εξής:

$$r_m = g_m + ih_m \quad (\text{A.1})$$

$$t_m = 1 + g_m + ih_m \quad (\text{A.2})$$

Στη γενική περίπτωση όπου τα φιλμ $m-1$ και m έχουν απορρόφηση ο συντελεστής διάθλασης είναι επίσης μιγαδικός, άρα οι αντίστοιχοι συντελεστές διάθλασης θα είναι

$$\mathbf{n}_{m-1} = n_{m-1} - ik_{m-1} \quad (\text{A.3})$$

$$\mathbf{n}_m = n_m - ik_m \quad (\text{A.4})$$

Συνεπώς για κάθετη πρόσπτωση θα ισχύει

$$g_m = \frac{n_{m-1}^2 + k_{m-1}^2 - n_m^2 - k_m^2}{(n_{m-1} + n_m)^2 + (k_{m-1} + k_m)^2} \quad (\text{A.5})$$

$$h_m = \frac{2(n_{m-1}k_m - n_mk_{m-1})}{(n_{m-1} + n_m)^2 + (k_{m-1} + k_m)^2} \quad (\text{A.6})$$

Ο όρος που καθορίζει τη φάση στο $m-1$ φιλμ πάχους d_{m-1} (σχ. Α.1) εκφράζεται με την ακόλουθη σχέση

$$\begin{aligned} \exp i\delta_{m-1} &= \exp i \frac{2\pi}{\lambda} (n_{m-1} - ik_{m-1})d_{m-1} \\ &= \exp \alpha_{m-1} \exp i\gamma_{m-1} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

όπου $\alpha_{m-1} = \exp i \frac{2\pi}{\lambda} k_{m-1}d_{m-1}$ και $\gamma_{m-1} = \exp i \frac{2\pi}{\lambda} n_{m-1}d_{m-1}$. Μπορούμε πλέον να ορίσουμε τον πίνακα (C_m) για το υμένιο m του οποίου τα στοιχεία είναι μιγαδικά με τον παρακάτω τρόπο:

$$(C_m) = \begin{pmatrix} p_m + iq_m & r_m + is_m \\ t_m + iu_m & v_m + iw_m \end{pmatrix} \quad (\text{A.8})$$

Παράρτημα Α

Η χρήση δεικτών με διψήφια νούμερα εξυπηρετεί στο συμβολισμό των στοιχείων που αφορούν γινόμενα πινάκων. Συγκεκριμένα τα στοιχεία του γινομένου $(C_1)(C_2)$ είναι

$$(C_1)(C_2) = \begin{pmatrix} p_{12} + iq_{12} & r_{12} + is_{12} \\ t_{12} + iu_{12} & v_{12} + iw_{12} \end{pmatrix}$$

ενώ τα αντίστοιχα για το γινόμενο $(C_1)(C_2)(C_3)$ εκφράζονται ως

$$(C_1)(C_2)(C_3) = \begin{pmatrix} p_{13} + iq_{13} & r_{13} + is_{13} \\ t_{13} + iu_{13} & v_{13} + iw_{13} \end{pmatrix}$$

αυτός ο συμβολισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί μονοσήμαντα αφού το γινόμενο $(C_1)(C_3)$ που θα μπορούσε να δημιουργήσει σύγχυση δεν περιλαμβάνεται στην θεωρία αυτή. Ο κανόνας πολλαπλασιασμού πινάκων οδηγούν στις ακόλουθες αναδρομικές σχέσεις που επιτρέπουν τον υπολογισμό των στοιχείων του γινομένου $(C_1)(C_2)\dots(C_{n-1})$

$$\begin{aligned} p_{1,n+1} &= p_{1n}p_{n+1} - q_{1n}q_{n+1} + r_{1n}t_{n+1} - s_{1n}u_{n+1} \\ q_{1,n+1} &= q_{1n}p_{n+1} + p_{1n}q_{n+1} + s_{1n}t_{n+1} + r_{1n}u_{n+1} \\ r_{1,n+1} &= p_{1n}r_{n+1} - q_{1n}s_{n+1} + r_{1n}v_{n+1} - s_{1n}w_{n+1} \\ s_{1,n+1} &= q_{1n}r_{n+1} + p_{1n}s_{n+1} + s_{1n}v_{n+1} + r_{1n}w_{n+1} \\ t_{1,n+1} &= t_{1n}r_{n+1} - u_{1n}q_{n+1} + v_{1n}t_{n+1} - w_{1n}u_{n+1} \\ u_{1,n+1} &= u_{1n}p_{n+1} + t_{1n}q_{n+1} + w_{1n}t_{n+1} + v_{1n}u_{n+1} \\ v_{1,n+1} &= t_{1n}r_{n+1} - u_{1n}s_{n+1} + v_{1n}v_{n+1} - w_{1n}w_{n+1} \\ w_{1,n+1} &= u_{1n}r_{n+1} + t_{1n}s_{n+1} + w_{1n}v_{n+1} + v_{1n}w_{n+1} \end{aligned} \tag{A.9}$$

Τα στοιχεία του πίνακα (A.8) μπορούν να προκύψουν από τους συντελεστές Fresnel και τους τύπους της φάσης με την ακόλουθη αντιστοιχία

$$(C_m) = \begin{pmatrix} e^{i\delta_{m-1}} & r_m e^{i\delta_{m-1}} \\ r_m e^{-i\delta_{m-1}} & e^{-i\delta_{m-1}} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} p_m + iq_m & r_m + is_m \\ t_m + iu_m & v_m + iw_m \end{pmatrix} \tag{A.10}$$

και

$$p_m = e^{\alpha_{m-1}} \cos \gamma_{m-1}$$

$$q_m = e^{\alpha_{m-1}} \sin \gamma_{m-1}$$

$$r_m = e^{\alpha_{m-1}} (g_m \cos \gamma_{m-1} - h_m \sin \gamma_{m-1})$$

Παράρτημα Α

$$s_m = e^{\alpha_{m-1}} (h_m \cos \gamma_{m-1} + g_m \sin \gamma_{m-1})$$

$$t_m = e^{-\alpha_{m-1}} (g_m \cos \gamma_{m-1} + h_m \sin \gamma_{m-1})$$

$$u_m = e^{-\alpha_{m-1}} (h_m \cos \gamma_{m-1} - g_m \sin \gamma_{m-1})$$

$$v_m = e^{-\alpha_{m-1}} \cos \gamma_{m-1}$$

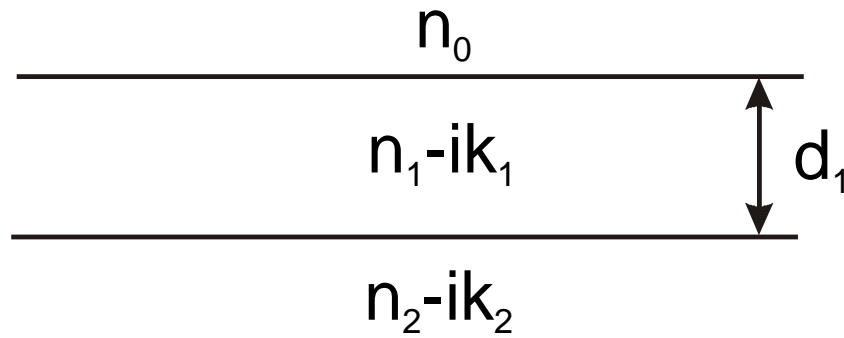
$$w_m = -e^{-\alpha_{m-1}} \sin \gamma_{m-1}$$

Α.2 Εφαρμογή της μεθόδου

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν 2 απλές εφαρμογές της παραπάνω μεθόδου, εξετάζοντας 2 συστήματα, όπου το ένα αποτελείται από ένα απλό φιλμ (που απορροφά ακτινοβολία) πάνω σε υπόστρωμα απείρου πάχους, το οποίο επίσης είναι απορροφητικό για την ακτινοβολία, ενώ το άλλο διαθέτει δύο απορροφητικά υμένια σε αντίστοιχο υπόστρωμα.

Α.2.1 Απλό φιλμ σε υπόστρωμα απείρου πάχους

Στο σχήμα Α.2 απεικονίζεται το σύστημα που αποτελείται από ένα υμένιο πάχους d_1 πάνω σε άπειρο υπόστρωμα, όπου και τα δύο είναι απορροφητικά



Σχήμα Α.2. Σύστημα με ένα απορροφητικό υμένιο σε άπειρο υπόστρωμα επίσης απορροφητικό.

Σύμφωνα με την ανάλυση της προηγούμενης ενότητας, οι ακόλουθες σχέσεις απαιτούνται για τον υπολογισμό της ανάκλασης σε οποιοδήποτε μήκος κύματος λ

$$g_1 = \frac{n_0^2 - n_1^2 - k_1^2}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2}$$

$$g_2 = \frac{n_1^2 - n_2^2 + k_1^2 - k_2^2}{(n_1 + n_2)^2 + (k_1 + k_2)^2}$$

$$h_1 = \frac{2n_0k_1}{(n_0 + n_1)^2 + k_1^2}$$

$$h_2 = \frac{2(n_1k_2 - n_2k_1)}{(n_1 + n_2)^2 + (k_1 + k_2)^2}$$

Παράρτημα Α

$$p_2 = e^{\alpha_1} \cos \gamma_1$$

$$q_2 = e^{\alpha_{m-1}} \sin \gamma_{m-1}$$

$$t_2 = e^{-\alpha_1} (g_2 \cos \gamma_1 + h_2 \sin \gamma_1)$$

$$u_2 = e^{-\alpha_1} (h_2 \cos \gamma_1 - g_2 \sin \gamma_1)$$

όπου $\alpha_1 = \frac{2\pi}{\lambda} k_1 d_1$ και $\gamma_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1$ (rad). Με τη βοήθεια των σχέσεων (Α.9) έχουμε

$$p_{12} = p_2 + g_1 t_2 - h_1 u_2$$

$$q_{12} = q_2 + h_1 t_2 + g_1 u_2$$

$$t_{12} = t_2 + g_1 p_2 - h_1 q_2$$

$$u_{12} = u_2 + h_1 p_2 + g_1 q_2$$

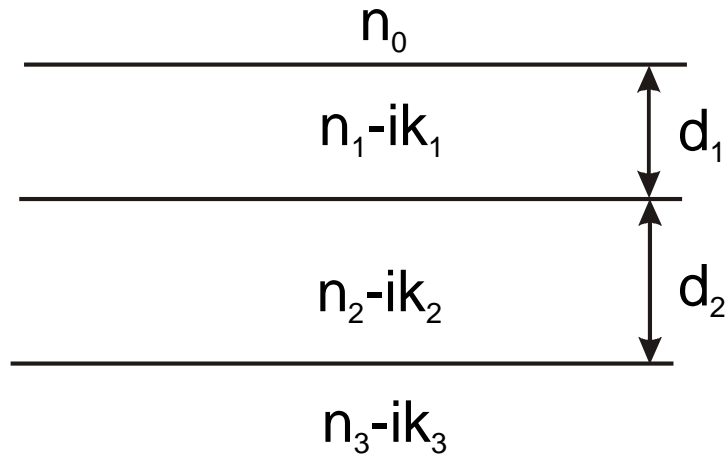
Έχοντας υπολογίσει τις ανωτέρω σχέσεις, ο υπολογισμός του συντελεστή ανάκλασης γίνεται εύκολα μέσω της ακόλουθης έκφρασης

$$R_1 = \frac{t_{12}^2 + u_{12}^2}{p_{12}^2 + q_{12}^2} \quad (\text{A.11})$$

Προφανώς στην περίπτωση που το υμένιο ή το υπόστρωμα έχουν μηδενική απορρόφηση (διαφανή) οι προηγούμενες εκφράσεις απλοποιούνται αρκετά. Αυτές οι περιπτώσεις εξετάζονται αναλυτικά στον Heavens.

Α.2.2 Διπλό φιλμ σε υπόστρωμα απείρου πάχους

Σε αυτό το σκέλος επεκτείνουμε τη μέθοδο στην πιο σύνθετη περίπτωση όπου προστίθεται ένα επιπλέον υμένιο, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα



Σχήμα Α.3. Σύστημα με 2 απορροφητικά υμένια σε άπειρο υπόστρωμα επίσης απορροφητικό.

Παράρτημα Α

Για τον υπολογισμό του συντελεστή ανάκλασης και διάδοσης αυτού του συστήματος, πέραν των εκφράσεων της προηγούμενης νεότητας απαιτούνται και οι ακόλουθες

$$\begin{aligned}
 p_3 &= e^{\alpha_2} \cos \gamma_2 & q_3 &= e^{\alpha_2} \sin \gamma_2 \\
 t_3 &= e^{-\alpha_2} (g_2 \cos \gamma_2 + h_3 \sin \gamma_2) \\
 u_3 &= e^{-\alpha_2} (h_3 \cos \gamma_2 - g_3 \sin \gamma_2) \\
 r_2 &= e^{\alpha_2} (g_2 \cos \gamma_1 - h_2 \sin \gamma_1) \\
 s_2 &= e^{\alpha_2} (h_2 \cos \gamma_1 + g_2 \sin \gamma_1) \\
 v_2 &= e^{-\alpha_1} \cos \gamma_1 & w_2 &= -e^{\alpha_1} \sin \gamma_1 \\
 r_{12} &= r_2 + g_1 v_2 - h_1 w_2 \\
 s_{12} &= s_2 + h_1 v_2 + g_1 w_2 \\
 v_{12} &= v_2 + g_1 r_2 - h_1 s_2 \\
 w_{12} &= w_2 + h_1 r_2 + g_1 s_2 \\
 p_{13} &= p_{12} p_3 - q_{12} q_3 + r_{12} t_3 - s_{12} u_3 \\
 q_{13} &= q_{12} p_3 + p_{12} q_3 + s_{12} t_3 + r_{12} u_3 \\
 t_{13} &= t_{12} p_3 - u_{12} q_3 + v_{12} t_3 - w_{12} u_3 \\
 u_{13} &= u_{12} p_3 + t_{12} q_3 + w_{12} t_3 - v_{12} u_3
 \end{aligned}$$

και τελικά ο συντελεστής ανάκλασης προκύπτει από τη σχέση

$$R_2 = \frac{t_{13}^2 + u_{13}^2}{p_{13}^2 + q_{13}^2} \quad (\text{A.12})$$

Γενικά η μέθοδος των πινάκων διευκολύνει αρκετά στον υπολογισμό των συντελεστών ανάκλασης και διάδοσης (σε διαφανές υπόστρωμα αλλιώς είναι μηδενικός) διότι οι τελικοί τύποι από όπου εξάγονται, είναι απλοί, όπως ο (A.11) και (A.12) και οι συντελεστές τους βρίσκονται σταδιακά, γεγονός που επιτρέπει την εύκολη υλοποίηση σε Η/Υ. Με αυτή τη μεθοδολογία αναπτύχθηκε κώδικας σε Η/Υ μέσω του οποίου προέκυψε ο συντελεστής ανάκλασης για τα 3 φιλμ των πειραματικών διατάξεων όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 7.

Περαιτέρω λεπτομέρειες για αυτή τη μέθοδο καθώς και για το θεωρητικό υπόβαθρο από το οποίο προκύπτουν μπορούν να βρεθούν στο κεφάλαιο 4 του βιβλίου του Heavens, όπως και στα βιβλία των Born και Wolf [2] και του Berning [3]. Ειδικά

Παράρτημα Α

για τις αντανάκλαστικές επιστρώσεις στο φ/β στοιχεία έχουν γίνει προσομοιώσεις με αυτή τη μέθοδο από τους Zhao et al. [4] και τους Bouhafs et al. [5] με στόχο την επιλογή κατάλληλων υλικών με βέλτιστο δείκτη διάθλασης και πάχος έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η επιφανειακή ανάκλαση στα φ/β στοιχεία υψηλής απόδοσης.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Heavens O. S., *Optical Properties of Thin Solid Films*, Dover Publications, New York, 1991, κεφάλαιο 4.
- [2] Born M. και Wolf A., *Principles of Optics*, 5^η έκδοση, Pergamon, New York, 1975.
- [3] Berning P. H., *Theory and calculation of optical thin films in: Physics of Thin Films Collec., vol. 1*, Academic Press, New York, 1963.
- [4] Zhao J. και Green M. A., *IEEE Trans. Electr. Dev.*, Τόμος 38, 1991, σελ. 1925.
- [5] Bouhafs D., Moussi A., Chikouche A. και Rouiz J. M., *Sol. Energy Mat. & Sol. Cells*, Τόμος 52, 1998, σελ. 79.