



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Πειραματική Μελέτη και Αξιολόγηση Ταχύρυθμων Laser  
Κάθετης Κοιλότητας για Υλοποίηση Οπτικών Διασυνδέσεων  
σε Υπολογιστικά Συστήματα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ελένη Δ. Κοσμά

**Επιβλέπων :** Ηρακλής Β. Αβραμόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2014





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Πειραματική Μελέτη και Αξιολόγηση Ταχύρυθμων Laser  
Κάθετης Κοιλότητας για Υλοποίηση Οπτικών Διασυνδέσεων  
σε Υπολογιστικά Συστήματα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ελένη Δ. Κοσμά

**Επιβλέπων :** Ηρακλής Β. Αβραμόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23<sup>η</sup> Ιουλίου 2014.

.....  
Ηρακλής Αβραμόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Νικόλαος Ουζούνγλου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Χρήστος Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2014

.....  
Ελένη Δ. Κοσμά

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ελένη Κοσμά, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Η Φωτονική είναι ένας πολλά υποσχόμενος κλάδος των επικοινωνιών, με πολλές δυνατότητες ανάπτυξης και έρευνας. Το laser αποτελεί μία μέθοδο με την οποία μπορούμε να αξιοποιήσουμε, όσο το δυνατόν καλύτερα, αυτές τις δυνατότητες και κυρίως το μεγάλο εύρος ζώνης που προσφέρει η οπτική ίνα. Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά ένα συγκεκριμένο είδος laser, το Laser Επιφανειακής Εκπομπής Κάθετης Κοιλότητας (Vertical Cavity Surface Emitting Laser - VCSEL) και πώς αυτό συμπεριφέρεται σαν κομμάτι μίας μεγαλύτερης οπτικής διάταξης. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η κατανόηση των βασικών αρχών που διέπουν τα VCSELS μέσω της αξιολόγησης και του χαρακτηρισμού τους στο εργαστήριο, με στόχο την υλοποίηση οπτικών διασυνδέσεων σε υπολογιστικά συστήματα. Επιπλέον στόχος της διπλωματικής είναι η επισκόπηση και η κατανόηση της βασικής λειτουργίας και χρήσης του Διανυσματικού Αναλυτή Δικτύου (VNA).

Πριν την παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων γίνεται μία εισαγωγή σε όλες έννοιες που σχετίζονται με την Οπτική, τα laser και τις διασυνδέσεις. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το γενικό θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά πληροφορίες για τον τομέα της φωτονικής, πώς η αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης οδηγεί σε μεγαλύτερες απαιτήσεις για εύρος ζώνης, την οπτική ολοκλήρωση και τα κέντρα δεδομένων. Στη συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των laser, με έμφαση στα χαρακτηριστικά και στον τρόπο λειτουργίας τους με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας. Το τρίτο κεφάλαιο αφιερώνεται στη μεγαλύτερη έκτασή του στα VCSEL. Αναφέρονται εκτενώς η δομή τους, τα χαρακτηριστικά τους, τα είδη τους και τα πλεονεκτήματά τους έναντι άλλων τύπων laser. Επίσης γίνεται αναφορά στις οπτικές διασυνδέσεις και τη φωτοδίοδο. Το τέταρτο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι βασικές αρχές λειτουργίας των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο. Περιγράφεται ο Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου (Vector Network Analyzer - VNA) και η διαδικασία βαθμονόμησής του, το Probe Station και γίνεται ανάλυση των S-παραμέτρων τις οποίες μετράει ο αναλυτής δικτύου. Αφού αναλύσουμε όλες τις θεωρητικές έννοιες, συνεχίζουμε στο πειραματικό κομμάτι που αναλύεται στο πέμπτο κεφάλαιο. Εκεί περιγράφεται λεπτομερώς η πειραματική διαδικασία και παρουσιάζονται τα αποτελέσματά της, ενώ στο έκτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μία προσομοίωση στο υπολογιστικό περιβάλλον VPI (Virtual Photonics Integrated) με σκοπό να επαληθευθούν οι πειραματικές μετρήσεις. Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθεται η ανάλυση των αποτελεσμάτων καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.



## **Λέξεις κλειδιά**

Laser κάθετη κοιλότητα επιφανειακή εκπομπή διασυνδέσεις υπολογιστικά συστήματα rf χαρακτηρισμός LIV καμπύλες S-parameters probe station VNA





## **Abstract**

Photonics is a very promising area in Telecommunication, that offers many possibilities for development and research. Lasers give the opportunities to take advantage of these possibilities and mostly of the large Bandwidth offered by the Optical Fiber. The present Diploma Thesis aims to the evaluation and characterization of VCSEL , a particular Laser type, and how it behaves when put in a large optical interconnection. The main purpose is to study and comprehend the basic principles of the VCSELS, through the experimental evaluation and characterization, in order to carry out optical interconnects in Data Centers. Another purpose of the Thesis is to understand the main functions and use of the Vector Network Analyzer (VNA).

Before the presentation of the experimental results, there is an introduction to every principle that is related to Photonics, lasers and interconnects. The first Chapter is about the general theoretical background of Photonics, the demands of the current communication technologies, the optical integration and the data centers. The second chapter is about the main principles of lasers and particularly the Stimulated Emission of Radiation. The third chapter is mainly dedicated to VCSELS and their properties, their structure and the advantages they have compared to other laser types. There is also a reference to optical interconnects and the Photodiode. All the main principles of the VNA and its calibration process, the probe station and the S-parameters are described in the fourth chapter. In the fifth chapter there is the detailed description of the experimental process that took place in the Photonics Communication Research Laboratory (PCRL). After the presentation of the experimental results, the simulation results are exhibited. The simulation of the experimental set-up, which is described in the sixth chapter, was conducted with the help of the VPI Transmission Maker simulation tool, in order to verify the experimental results. Lastly, all the experimental and simulation results are annotated in the seventh chapter, along with suggestions for further investigation and research.

## **Keywords**

Laser vertical cavity surface emitting interconnects data center rf characterization LIV curves S-parameters probe station VNA



## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια του εαρινού εξαμήνου του ακαδημαϊκού έτους 2014, στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και συγκεκριμένα στον Τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών.

Πρώτα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ηρακλή Αβραμόπουλο, επικεφαλή του Εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών, που μου έδωσε την ευκαιρία να συνεργαστώ με το Εργαστήριο και να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο επιστημονικό αντικείμενο, καθώς και για τη στήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους υποψήφιους διδάκτορες Ιωάννη Κανάκη και Νικόλαο Ηλιάδη που με βοήθησαν ουσιαστικά στην ολοκλήρωση της εργασίας, με τις συμβουλές τους και τη συνεχή και πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή τους, όπως επίσης και τον Νικόλαο Αργύρη για τη συμβολή και τη βοήθειά του στο προσομοιωτικό μέρος της εργασίας.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω τους δικούς μου ανθρώπους, τον πατέρα μου Δημήτρη, την γιαγιά μου Ελένη και τον αδερφό μου Γιάννη που στάθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στη Σχολή, όπως επίσης και όλους τους συγγενείς και φίλους μου.



## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	5
Abstract.....	9
Ευχαριστίες.....	11
Λίστα σχημάτων .....	15
<b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή</b>	
1.1 Φωτονική.....	19
1.2 Τεχνολογικές Εξελίξεις – Ανάγκη για Ευρυζωνικότητα.....	20
1.3 Οπτική Ολοκλήρωση.....	22
1.4 Κέντρα Πληροφορίας – Data Centers.....	23
<b>Κεφάλαιο 2 Laser</b>	
2.1 Γενικά για τα Laser.....	27
2.2 Χαρακτηριστικά των Laser .....	29
2.3 Η Φυσική των Laser.....	30
2.3.1 Ενεργό Μέσο.....	30
2.3.2 Οπτική κουλότητα .....	31
2.4 Λειτουργία των Laser.....	32
2.5 Τυπική Έξοδος Laser.....	37
2.6 Είδη Laser πολλαπλών καναλιών.....	38
<b>Κεφάλαιο 3 VCSEL</b>	
3.1 Εισαγωγή.....	43
3.1.1 Οπτικές Διασυνδέσεις (Optical Interconnects).....	43
3.2 VCSEL.....	45
3.2.1 Δομή.....	46
3.2.2 Γενικά Χαρακτηριστικά.....	47
3.2.3 Τύποι VCSEL.....	49
3.2.4 Εφαρμογές.....	52
3.2.5 VCSEL 1550nm.....	52
3.3 Φωτοδίοδος .....	53
3.3.1 Φωτοδίοδος P-N.....	53
3.3.2 Φωτοδίοδος P-I-N.....	56
3.3.3 Φωτοδίοδος Χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiode).....	58
3.3.4 Φωτοδίοδοι Schottky.....	58

## Κεφάλαιο 4

4.1 Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου (Vector Network Analyzer - VNA).....	59
4.2 Βαθμονόμηση του Διανυσματικού Αναλυτή Δικτύου (VNA Calibration).....	61
4.2.1 Τύποι Σφαλμάτων.....	62
4.2.2 Τύποι Βαθμονόμησης .....	63
4.3 Βαθμονόμηση στο Εργαστήριο.....	67
4.4 Παράμετροι Διασποράς (Scattering Parameters, S-parameters).....	69
4.4.1 Γενικά.....	69
4.4.2 Πλεονεκτήματα S-parameters.....	70
4.4.3 Μέτρηση των S-parameters μίας DUT με τη βοήθεια του VNA.....	72
4.4.4 Μεθοδολογία εύρεσης S-parameters.....	74
4.5 Probe Station.....	76

## Κεφάλαιο 5 Πειραματική Διαδικασία

5.1 Rf χαρακτηρισμός.....	79
5.2 Αποτελέσματα – Διαγράμματα.....	85

## Κεφάλαιο 6 VPI

6.1 Εισαγωγή.....	101
6.2 Στην πράξη.....	103
6.3 Συμπεράσματα.....	105

## Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα

7.1 Σύνοψη.....	107
7.2 Συμπεράσματα.....	107
7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	108

Βιβλιογραφία – Αναφορές.....	109
------------------------------	-----

## Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Γράφημα συνολικής IP κίνησης από το 2011 έως το 2016 [3].....	21
Σχήμα 1-2 : Νόμος του Moore.....	23
Σχήμα 1-3: Τυπικό Data Center[8].....	25
Σχήμα 2-1: Το πρώτο laser που υλοποιήθηκε ποτέ βασισμένο σε ένα κρύσταλλο από ρουβίνιο (ruby)[15].....	28
Σχήμα 2-2: Αρχή λειτουργίας του laser.....	30
Σχήμα 2-3: Φάσμα αυθόρμητης εκπομπής και οι διαδιδόμενοι ρυθμοί της κοιλότητας.....	31
Σχήμα 2-4: Αυθόρμητη εκπομπή.....	32
Σχήμα 2-5: Απορρόφηση.....	33
Σχήμα 2-6: εξαναγκασμένη εκπομπή.....	34
Σχήμα 2-7: Ενίσχυση – Απόσβεση.....	35
Σχήμα 2-8: Διάγραμμα άντλησης ( $\alpha$ ).....	36
Σχήμα 2-9: Διάγραμμα άντλησης ( $\beta$ ).....	37
Σχήμα 2-10: Παράδειγμα χρονικής συμπεριφοράς του τετραγώνου του πλάτους του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου $ A(t) ^2$ , σε περίπτωση 51 ρυθμών ταλάντωσης, με το ίδιο πλάτος $E_0$ και τυχαίες φάσεις.....	37
Σχήμα 2-11: Πρότυπο οπτικό πεδίο που κυκλοφορεί στο εσωτερικό κοιλότητας laser.....	38
Σχήμα 2-12: Αναπαράσταση κοιλότητας laser DFB και DBR [22].....	39
Σχήμα 2-13: Πολυσυχνотικό laser με WGR και το αντίστοιχο φάσμα[23].....	40
Σχήμα 3-1: Οπτική διασύνδεση ελευθέρου χώρου.....	43
Σχήμα 3-2: Υβριδικό PCB.....	44
Σχήμα 3-3: Πλήρως ενσωματωμένες οπτικές διασυνδέσεις.....	45
Σχήμα 3-4: Τυπική δομή VCSEL.....	47
Σχήμα 3-5: Δομές για περιορισμό ρεύματος.....	49

Σχήμα 3-6: Δομές για περιορισμό φωτός.....	51
Σχήμα 3-7: Χαρακτηριστική καμπύλη P-N φωτοδιόδου.....	54
Σχήμα 3-8: Διάγραμμα απλουστευμένης ετεροδομικής φωτοδιόδου.....	57
Σχήμα 3-9: Σχεδιάγραμμα λειτουργίας PIN φωτοδιόδου.....	57
Σχήμα 4-1: Block διάγραμμα Διανυσματικού Αναλυτή Δικτύου[32].....	59
Σχήμα 4-2: Anritsu Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου.....	60
Σχήμα 4-3: Παράγοντες σφαλμάτων στην πλήρη δίθυρη βαθμονόμηση[32].....	65
Σχήμα 4-4: Επίπεδο μετρήσεων πριν τη βαθμονόμηση.....	67
Σχήμα 4-5: Επίπεδο μετρήσεων μετά τη βαθμονόμηση.....	67
Σχήμα 4-6: Τύποι βαθμονόμησης[32].....	68
Σχήμα 4-7: Δίθυρο δίκτυο.....	69
Σχήμα 4-8: συνδεσμολογία μέτρησης S-parameters( $\alpha$ ).....	72
Σχήμα 4-9: Συνδεσμολογία μέτρησης S-parameters ( $\beta$ ).....	72
Σχήμα 4-10: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά Thevenin.....	74
Σχήμα 4-11: Απλοποιημένο ισοδύναμο.....	76
Σχήμα 4-12: Απεικόνιση lensed οπτικής ίνας.....	77
Σχήμα 5-1: Σύμβαση για την πόλωση των αξόνων ( $\alpha$ ) οριζόντια πόλωση ( $\beta$ ) κάθετη πόλωση.....	79
Σχήμα 5-2: Η διάταξη της πλατφόρμας μετρήσεων που αναπτύχθηκε. Απεικονίζεται το PM8 probe station (δεξιά) καθώς και ο Anritsu Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου VNA (αριστερά).....	80
Σχήμα 5-3: Εστίαση ( $\alpha$ ) στο rf probe tip και ( $\beta$ ) στη ρύθμιση του holder της οπτικής ίνας.....	81
Σχήμα 5-4: ( $\alpha$ ) θέτοντας σε επαφή το VCSEL chip με το GSG probe tip, ( $\beta$ ) το rf probe tip και το VCSEL chip μέσα από το μικροσκόπιο.....	81
Σχήμα 5-5: Αποτελέσματα βαθμονόμησης SOLT που ελήφθησαν σε διαστήματα 1 ώρας. Σε όλες τις περιπτώσεις έχουμε απώλειες από την ανάκλαση κάτω από 30dB.....	82



Σχήμα 5-6: Πειραματική διάταξη (α) για τις LIV μετρήσεις και (β) για τις μετρήσεις των S-παραμέτρων.....	83
Σχήμα 5-7: Ο χάρτης των VCSEL που μετρήθηκαν.....	85
Σχήμα 5-8: οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγχεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου A1 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση).....	85
Σχήμα 5-9: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης για VCSEL τύπου A1.....	86
Σχήμα 5-10: οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγχεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου A2 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση).....	87
Σχήμα 5-11: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης για VCSEL τύπου A2.....	87
Σχήμα 5-12: Οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγχεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου A3 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση).....	88
Σχήμα 5-13: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης του VCSEL τύπου A3.....	89
Σχήμα 5-14: Οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγχεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου B1 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση).....	90
Σχήμα 5-15: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης του VCSEL τύπου B1.....	90
Σχήμα 5-16: Οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγχεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου B2 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση).....	91
Σχήμα 5-17: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης του VCSEL τύπου B2.....	92
Σχήμα 5-18: Οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγχεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου B3 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση).....	93
Σχήμα 5-19: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης του VCSEL τύπου B3.....	93
Σχήμα 5-20: Οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγχεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου C1 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση).....	94
Σχήμα 5-21: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης του VCSEL τύπου C1.....	95
Σχήμα 5-22: Οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγχεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου C2 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση).....	95
Σχήμα 5-23: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης του VCSEL τύπου C2.....	96
Σχήμα 5-24: Οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγχεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου C3 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση).....	97

Σχήμα 5-25: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης του VCSEL τύπου C3.....	98
Σχήμα 5-26: Rollover ρεύμα, οπτική ισχύς εξόδου, λόγος σβέσης μεταξύ των πολώσεων και 3dB εύρος ζώνης για τα 8QW VCSELS που χαρακτηρίσθηκαν.....	99
Σχήμα 6-1: Διάταξη προσομοίωσης[39].....	102
Σχήμα 6-2: Διάγραμμα BER ως προς την ισχύ στο δέκτη (10G 1km).....	103
Σχήμα 6-3: Διάγραμμα BER ως προς την ισχύ στο δέκτη (10G 2km).....	104
Σχήμα 6-4: Διάγραμμα BER ως προς την ισχύ στο δέκτη (26G 1km).....	104
Σχήμα 6-5: Διάγραμμα BER ως προς την ισχύ στο δέκτη (26G 2km).....	105

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Φωτονική

Φωτονική ή Οπτική Τεχνολογία είναι η επιστήμη και η τεχνολογία του φωτός. Αποτελεί ένα ιδιαίτερα πρόσφατο πεδίο στη επιστήμη και την τεχνολογία, το οποίο ξεκίνησε ως σύνθεση διαφορετικών προσεγγίσεων (οπτική, επιστήμη των υλικών μηχανική, νανοτεχνολογία, φυσική και χημεία) με ένα κοινό σκοπό: την πλήρη κατανόηση και αξιολόγηση του φωτονίου, όπως ακριβώς η ηλεκτρονική βασίζεται στη χρησιμοποίηση των ηλεκτρονίων.

Όπως ο Γάλλος επιστήμονας Pierre Aigrain είχε πει [1]:

*«Η φωτονική είναι η επιστήμη που τιθασεύει το φώς. Η φωτονική περιλαμβάνει την παραγωγή φωτός, την ανίχνευση φωτός, τη διαχείριση του φωτός μέσω καθοδήγησης, διαχείρισης και ενίσχυσης, και, το πιο σημαντικό, την εκμετάλλευσή του για την ωφέλεια της ανθρωπότητας»*

Η Φωτονική θεωρείται μία από τις βασικότερες τεχνολογίες του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Συμπληρώνει την ηλεκτρονική με τη μορφή της οπτοηλεκτρονικής και κατέχει εξέχουσα θέση στον τομέα της έρευνας και της αγοράς, η οποία αναμένεται να συνεχιστεί και να αυξηθεί στο μέλλον.

Η εδραίωση της Φωτονικής έγινε το 1960 με την εφεύρεση του laser. Εκείνη την εποχή το laser εμφανίστηκε ως μια εφεύρεση χωρίς πεδίο εφαρμογής, «μία λύση που έψαχνε για το πρόβλημα». Κανείς δε φανταζόταν ότι μερικές δεκαετίες αργότερα θα έφερνε επανάσταση στην επιστήμη και τη βιομηχανία. Ακολούθησαν σημαντικές εφευρέσεις, όπως η ανάπτυξη των οπτικών ινών τη δεκαετία του 1970, καθώς και η κατασκευή του οπτικού ενισχυτή ίνας ερβίου το 1987, οι οποίες αποτέλεσαν τη βάση για την επανάσταση των τηλεπικοινωνιών στα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα και παρείχαν την απαραίτητη υποδομή για την ανάπτυξη του διαδικτύου.

Από τη δεκαετία του 1980 η Φωτονική έγινε συνώνυμη με τη μετάδοση δεδομένων μέσω οπτικών ινών. Παρόλο που η φωτονική περιλαμβάνει μεγάλο εύρος εφαρμογών, μεγαλύτερη βαρύτητα δόθηκε στις Τηλεπικοινωνίες μέχρι το 2001, όπου σημειώθηκε κρίση στον τομέα των Επικοινωνιών. Από τότε και ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια εμφανίζουν μεγάλη άνθηση οι μη-τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές, λόγω μεγαλύτερης ωριμότητας στον τομέα των φωτονικών υλών. Σήμερα η Φωτονική Τεχνολογία αποτελεί σημαντικό τομέα της επιστήμης και της τεχνολογίας με εκτεταμένες εφαρμογές στη ζωή του ανθρώπου.

Το πεδίο της φωτονικής περιλαμβάνει όλες τις έννοιες που σχετίζονται με την εκπομπή, τη διαμόρφωση, τη μετάδοση, την ενίσχυση και την ανίχνευση του φωτός που μεταφέρει την πληροφορία που θα μεταδοθεί από έναν πομπό στον αντίστοιχο δέκτη. Οι φωτονικές διατάξεις περιλαμβάνουν οπτοηλεκτρονικές διατάξεις (όπως laser και φωτοανιχνευτές), φωτονικούς κρυστάλλους, οπτικές ίνες, επίπεδους κυματοδηγούς και άλλα παθητικά στοιχεία.

Μερικές από τις περιοχές που βρίσκει εφαρμογή η φωτονική είναι:

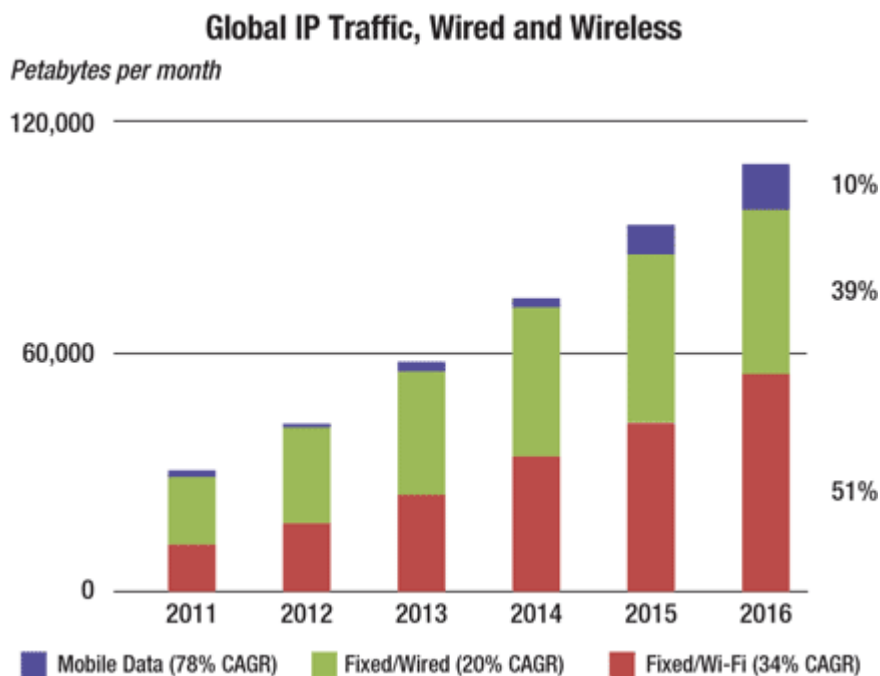
- οι τηλεπικοινωνίες (οπτικές ίνες, laser)
- η επεξεργασία πληροφοριών
- η μετρολογία (μέτρηση χρόνου και συχνότητας, μέτρηση αποστάσεων)
- η φασματοσκοπία
- η ολογραφία
- η ιατρική (χειρουργική, διόρθωση όρασης, ενδοσκόπηση, παρακολούθηση υγείας)
- η επεξεργασία υλικών με χρήση laser
- βιοφωτονική
- γεωργία
- ρομποτική
- άμυνα (ανιχνευτές υπερύθρου, πλοήγηση, διάσωση, εντοπισμός ναρκών)
- η αεροναυπηγική (φωτονικά γυροσκόπια).

## 1.2 Τεχνολογικές Εξελίξεις – Ανάγκη για Ευρυζωνικότητα

Η τεχνολογία στην εποχή μας εξελίσσεται ραγδαία. Ιδιαίτερως ο χώρος των επικοινωνιών παρουσίασε μια εκπληκτική ανάπτυξη από τα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Αποτέλεσμα αυτής της ανάπτυξης είναι το διαδίκτυο. Μέσω του διαδικτύου διακινείται τεράστιος όγκος δεδομένων και πάνω σε αυτό σχεδιάστηκαν καινοτόμες εφαρμογές για την μεταφορά δεδομένων. Όπως είναι λοιπόν φυσικό, το διαδίκτυο γνώρισε πολύ μεγάλη επιτυχία και η κίνηση αυξήθηκε θεαματικά.

Η εμφάνιση νέων διαδικτυακών εφαρμογών και υπηρεσιών όπως η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας και το on-line gaming στην καθημερινότητα των χρηστών καθώς και η διεύθυνση των υπηρεσιών νέφους (cloud computing) στις εταιρίες και τις επιχειρήσεις είναι μερικά από τα παραδείγματα που δείχνουν τη σημαντική αύξηση στη διακίνηση δεδομένων μέσω του διαδικτύου. Πιο συγκεκριμένα το 2012 η χρήση του ανήλθε στους 2,4 δισεκατομμύρια χρήστες παγκοσμίως, ενώ από το 2000 ως το 2012 σημειώθηκε αύξηση κατά 566%. [2]

Χαρακτηριστικό είναι το ακόλουθο γράφημα που απεικονίζει την αύξηση του όγκου δεδομένων διαδικτύου (IP traffic) στην πορεία του χρόνου, όπου προβλέπεται αύξηση σχεδόν 100% από το 2013 ως το 2016.



Σχήμα 1-1: Γράφημα συνολικής IP κίνησης από το 2011 έως το 2016 [3]

Η ευρεία αυτή χρήση του διαδικτύου καθώς και η εξέλιξη της μορφής και των εφαρμογών του (από την απλή περιήγηση και την αποστολή μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, σε νέες ευρυζωνικές εφαρμογές όπως αποστολή video και υπηρεσίες κοινωνικής δικτύωσης) οδήγησε σε μία αλματώδη αύξηση των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης. [4] Δημιουργείται έτσι επιτακτική ανάγκη για αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης τόσο στο δίκτυο πρόσβασης όσο και στο μητροπολιτικό δίκτυο και το δίκτυο κορμού. Στην προσπάθεια αυτή για επέκταση της ευρυζωνικότητας βρίσκουν άμεση εφαρμογή οι πηγές laser που χρησιμοποιούνται σαν φέροντα σήματα.

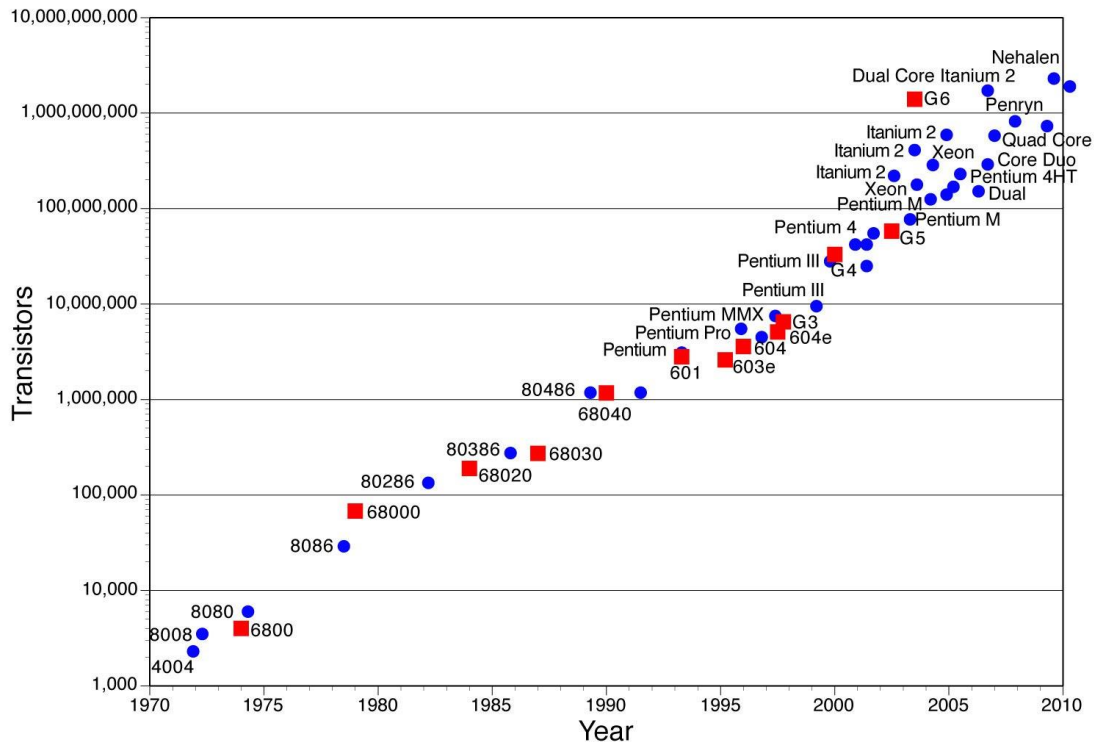
### 1.3 Οπτική Ολοκλήρωση

Στον τομέα της Φωτονικής η εξέλιξη της τεχνολογίας και η ανάπτυξη του διαδικτύου, πέρα από την ανάγκη για μεγαλύτερο εύρος ζώνης, δημιούργησε περισσότερες απαιτήσεις για χωρητικότητα στις οπτικές ίνες, στις οποίες η μέχρι τώρα διακριτοποιημένη (discretized) αρχιτεκτονική - δηλαδή η αρχιτεκτονική εκείνη κατά την οποία τα διάφορα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους με αγωγούς ή αγώγιμες διασυνδέσεις πάνω στην πλακέτα - δεν μπορούσε να ανταπεξέλθει. Υψηλό κόστος, πολυπλοκότητα και ελλιπής αξιοπιστία είναι μερικά από τα μειονεκτήματα που συνδέονται με τα πολλαπλά και ανεξάρτητα στοιχεία και ενώσεις. Για παράδειγμα ας υποθέσουμε ότι το εύρος ζώνης αυξάνεται κατά 75% κάθε χρόνο (όπως συμβαίνει σε πολλά σύγχρονα δίκτυα σήμερα) για τα επόμενα 10 χρόνια. Χρησιμοποιώντας τα σημερινά διακριτοποιημένα συστήματα, το διαδίκτυο θα απαιτούσε εκατομμύρια περισσότερες κάρτες γραμμής, χιλιάδες περισσότερους μηχανικούς για να τις εγκαταστήσουν καθώς επίσης θα κατανάλωνε περισσότερα από 3 GW ηλεκτρικής ενέργειας – ισοδύναμη με 7 μεσαίου μεγέθους μονάδες παραγωγής ενέργειας. Με τους περιορισμούς του προϋπολογισμού στους οποίους υπόκεινται οι εταιρείες τηλεπικοινωνιών, αυτό δεν θα ήταν εφικτό. Απάντηση δίνει η εισαγωγή μιας μεγάλης κλίμακας οπτικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, προσφέροντας μια εναλλακτική προσέγγιση στη δημιουργία ευέλικτων δικτύων.

Οι επιστήμονες από καιρό διερευνούσαν τη δυνατότητα ένταξης των οπτικών στοιχείων σε οπτικά ολοκληρωμένα κυκλώματα, τα οποία θα επέτρεπαν τη συνεχή αύξηση της πυκνότητάς τους, όπως ακριβώς τα ηλεκτρονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα. [5]

Στον τομέα της ηλεκτρονικής είναι ευρέως διαδεδομένος ο *Νόμος του Moore*, κατά τον οποίο ο αριθμός των τρανζίστορ που μπορούν να τοποθετηθούν χωρίς υπερβολικό κόστος σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα διπλασιάζεται ανά δύο έτη. [6]

Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει τον αριθμό των τρανζίστορ στα ολοκληρωμένα κυκλώματα από το 1971 ως το 2010 και αποτελεί επαλήθευση του Νόμου του Moore.



Σχήμα 1-2 : Νόμος του Moore

Μία αντίστοιχη πρόβλεψη υπάρχει και στα οπτικά κυκλώματα, ο «Νόμος του Moore για τη Φωτονική». Παρόλα αυτά, η ενσωμάτωση οπτικών στοιχείων επικοινωνιών θέτει σημαντικές προκλήσεις, λόγω της ποικιλομορφίας των στοιχείων και των λειτουργιών που απαιτούνται για τη δημιουργία, τη διαμόρφωση, την ανίχνευση και τη δρομολόγηση του φωτός. [5]

Λύση σε όλους αυτούς τους περιορισμούς δίνουν οι τεχνολογίες : CMOS Photonics, InP (μονολιθικά ή υβριδικά), Silica on Silicon και Laser VCSEL με τα οποία και θα ασχοληθούμε στην παρούσα διπλωματική εργασία. [7]

## 1.4 Κέντρα Πληροφορίας – Data Centers

Η συνεχώς αυξανόμενη πολυπλοκότητα των υπολογιστικών απαιτήσεων των χρηστών για την μεταφορά, επεξεργασία και αποθήκευση των δεδομένων τους, λόγω και της ευρείας χρήσης του διαδικτύου, έχει καταστήσει άμεση την ανάγκη της δημιουργίας Υπερυπολογιστών. Πρόκειται για υπολογιστές με τεράστιες δυνατότητες επεξεργασίας, που αφορούν στην ταχύτητά τους και στη δυνατότητα που παρέχουν για πολύπλοκους υπολογισμούς. Για την κάλυψη λοιπόν των υψηλών υπολογιστικών αναγκών δημιουργούνται συστοιχίες (ομάδες) από υπερυπολογιστές και καταναμημένους servers ώστε να είναι δυνατή η γρήγορη, αξιόπιστη και παράλληλη επεξεργασία δεδομένων κρατώντας ταυτόχρονα χαμηλά

τα επίπεδα κατανάλωσης ισχύος. Οι συστοιχίες αυτές των υπερυπολογιστών και των servers δημιουργούν συστήματα τα οποία συνολικά αναφέρονται ως Κέντρα Πληροφορίας (Data Centers)

Κύριος σκοπός των Data Centers είναι η αποθήκευση, η διαχείριση και η διάδοση των δεδομένων και των πληροφοριών που σχετίζονται και είναι απαραίτητα σε μία επιχείρηση (πχ εταιρίες επικοινωνιών, τράπεζες) ή κάποιον άλλον φορέα (πχ Πανεπιστήμια, Κρατικές Υπηρεσίες κτλ).

Τέτοια συστήματα μπορεί να είναι ιδιόκτητα και να έχουν αναπτυχθεί από την ίδια την επιχείρηση ή να έχουν αγοραστεί από άλλες εταιρείες πώλησης λογισμικού. Το Εθνικό Κέντρο Κλιματικών Δεδομένων (National Climatic Data Center - NCDC), για παράδειγμα, είναι ένα δημόσιο data center, το οποίο διατηρεί το μεγαλύτερο αρχείο του κόσμου με πληροφορίες για τον καιρό. Ένα ιδιωτικό data center μπορεί να υπάρχει εντός των εγκαταστάσεων ενός οργανισμού ή μπορεί να διατηρείται ως εξειδικευμένη εγκατάσταση.

Ένα Data Center αποτελείται συνήθως από το χώρο υπολογιστών, τον χώρο UPS (εφεδρική τροφοδοσία) και λοιπούς υποστηρικτικούς χώρους.[8] Περιλαμβάνει:

- Κλειστό κύκλωμα τηλεόρασης για την πλήρη κάλυψη της εγκατάστασης, που υποστηρίζει την καταγραφή, αναφορά και αυτόματη απεμπλοκή του συστήματος σε περίπτωση φωτιάς
- Κλιματισμό σε όλους τους χώρους για τη διατήρηση ιδανικών συνθηκών θερμοκρασίας
- Εξοπλισμό πυρανίχνευσης και πυρασφάλειας
- Εξοπλισμό Υγρανίχνευσης για τη διατήρηση ιδανικών συνθηκών υγρασίας
- Σύστημα Διαχείρισης Εγκατάστασης για την επιτήρηση και την εύρυθμη λειτουργία του Κέντρου
- Στοιχεία ασφάλειας δικτύου (firewalls, πύλες VPN, συστήματα ανίχνευσης εισβολών)

Πέρα από τις υπηρεσίες που προσφέρει, ένα Data Center έχει μεγάλες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια. Ιδιαίτερως αν λάβουμε υπόψη ότι στην ενέργεια που καταναλώνεται για τη λειτουργία ενός Data Center σε διαρκή βάση συνυπολογίζονται οι παροχές ισχύος στον υπολογιστικό εξοπλισμό, οι ανάγκες ψύξης αυτού του εξοπλισμού, αλλά και άλλες απώλειες, μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε το μέγεθος της ενέργειας που καταναλώνεται καθημερινά.

Πιο συγκεκριμένα, στις ΗΠΑ μέχρι πρόσφατα, το 1,5% του συνόλου της ηλεκτρικής κατανάλωσης (ή 61 δισεκατομμύρια κιλοβατώρες) χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά για την τροφοδοσία των servers και των Data Centers, κατανάλωση που ξεπερνάει



το μισό της κατανάλωσης ενέργειας για τον φωτισμό όλων των νοικοκυριών των ΗΠΑ (101 δισεκατομμύρια κιλοβατώρες). [9]

Εκτιμάται ότι κατά την τελευταία πενταετία το συνολικό ποσό ενέργειας που χρησιμοποιείται από τα εγχώρια Data Centers των ΗΠΑ, έχει διπλασιαστεί και υπάρχουν ενδείξεις ότι αυτή η τάση θα συνεχιστεί και στο μέλλον. [10]

Η αυξημένη ζήτηση ενέργειας θα απαιτούσε την προσθήκη νέων σταθμών παραγωγής ενέργειας. Από περιβαλλοντική άποψη, αυτό αντιστοιχεί σε σημαντική αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου και των ρυπογόνων εκπομπών, εάν το μεγαλύτερο μέρος της επιπλέον απαιτούμενης ενέργειας συνεχίσει να παράγεται στους παραδοσιακούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.

Γι αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνολογίες, «πράσινων» Data Centers που σκοπό έχουν την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των ρυπογόνων εκπομπών.

Στις μέρες μας, οι περισσότερες πρωτοβουλίες που αφορούν τα «Πράσινα» Data Centers ασχολούνται με την μείωση της κατανάλωσης του ενεργού εξοπλισμού και την αύξηση της αποδοτικότητάς του. Κυρίως στοχεύουν στην μείωση του λειτουργικού κόστους με την εφαρμογή αξιόπιστων σύγχρονων τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, που θα έχουν σαν αποτέλεσμα την βελτίωση των δεικτών απόδοσης (PUE, CiUE, κλπ) και την μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). [11]



*Σχήμα 1-3: Εγκατάσταση Data Center[8]*

Στην Ελλάδα τα περισσότερα από τα Data Centers σύμφωνα στατιστικές βρίσκονται στην Αθήνα (74%), μετά ακολουθεί η Θεσσαλονίκη (17%) και έπεται η επαρχία (9%). Τα στοιχεία αυτά δίνονται βέβαια με κάθε επιφύλαξη, καθώς κάποιες εταιρείες-οργανισμοί (μικρό ποσοστό) δεν δημοσιοποιούν στοιχεία για τη θέση των Data Centers τους, αναφέροντας απλά ότι βρίσκονται κάπου στην Ελλάδα. [12]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Laser

#### 2.1 Γενικά για τα laser

Τα laser αποτελούν αναμφίβολα ένα από τα πιο σημαντικά επιτεύγματα του περασμένου αιώνα. Χάρη στις ιδιότητές τους έχουν τη δυνατότητα να καλύπτουν ευρύ φάσμα εφαρμογών ενώ ταυτόχρονα αποτελούν έναν τομέα με τεράστιες δυνατότητες για έρευνα και περαιτέρω ανάπτυξη.

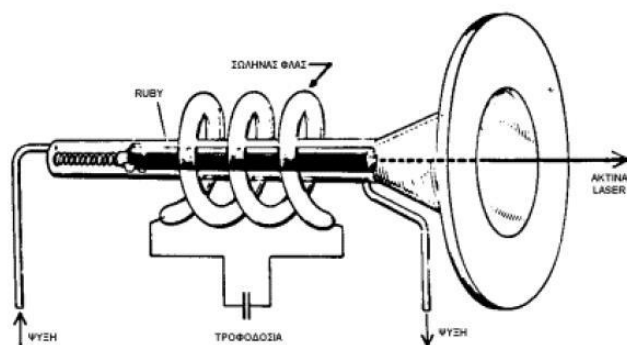
Η λέξη Laser προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, δηλαδή ενίσχυση φωτός μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας. Η εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας είναι μία φυσική διαδικασία η οποία προσδιορίστηκε για πρώτη φορά από τον Einstein και λαμβάνει χώρα όταν μία φωτεινή δέσμη διέρχεται μέσα από ένα κατάλληλο μέσο, στο οποίο έχουν διεγερθεί με κατάλληλο τρόπο τα άτομα που υπάρχουν στο εσωτερικό του, προκειμένου το μέσο αυτό να εκπέμψει φωτεινή ακτινοβολία. Η εκπεμπόμενη δέσμη έχει την ίδια κατεύθυνση και το ίδιο ακριβώς μήκος κύματος με την προσπίπτουσα φωτεινή δέσμη.[13]

#### Ιστορική αναδρομή

Ο Albert Einstein ήταν αυτός που εξήγησε πρώτος το 1917 τη θεωρία της εξαναγκασμένης εκπομπής, η οποία αποτέλεσε τη βάση για τη λειτουργία των laser. Η διατύπωση του Einstein βασίστηκε, όπως αναφέρεται και παραπάνω στην υπόθεση ότι όταν λαμβάνει χώρα αναστροφή πληθυσμών μεταξύ των ανώτερων και των κατώτερων επιπέδων ενός συστήματος ατόμων, είναι πιθανό να παρατηρηθεί ενισχυμένη εξαναγκασμένη εκπομπή. Η αναστροφή πληθυσμών πραγματοποιείται έπειτα από κατάλληλη διέγερση των ατόμων και μάλιστα η δέσμη που εκπέμπεται έχει συχνότητα και φάση η οποίες είναι ίδιες με τη συχνότητα και τη φάση του μέσου διέγερσης (συνήθως προσπίπτουσα ακτινοβολία). [14]

Από το 1920 μέχρι και το 1950 οι ερευνητές του επιστημονικού πεδίου αυτού είχαν στρέψει το ενδιαφέρον τους σε άλλους τομείς της επιστήμης, με αποτέλεσμα να μείνει αρκετά πίσω η προσπάθεια για τη σχεδίαση και την κατασκευή ενός laser, παρόλο που ήταν ήδη γνωστά τόσο η αρχή στην οποία βασιζόταν η λειτουργία, όσο και τα απλουστευμένα τεχνολογικά και κατασκευαστικά του χαρακτηριστικά. [15]

Στη δεκαετία του 1950 μια ομάδα από εξειδικευμένους επιστήμονες, με πρωτοπόρο τον Charles Hard Townes, έπειτα από πλήθος μελετών, οδηγήθηκε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει μία πρακτικά υλοποιήσιμη συσκευή, η λειτουργία της οποίας βασίζεται στη θεωρία της εξαναγκασμένης εκπομπής. Η συσκευή αυτή ονομάστηκε Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), μία συσκευή πρόδρομο του laser, η οποία όμως αντί για υπέρυθρη ή οπτική ακτινοβολία ενίσχυε μικροκύματα. Η ομάδα αυτή αποτελούνταν από τους : Charles Hard Townes, Joseph Weber, Alexander Prokhorov και Nikolai Basov. [14] Το 1960 έλαβε χώρα στα εργαστήρια του Hughes Aircraft Corporation στην Καλιφόρνια ένα πείραμα, το οποίο οδήγησε στην κατασκευή του πρώτου laser. Το πείραμα αυτό υλοποιήθηκε από τον Theodore Maiman, ήταν σχετικά απλό και βασιζόταν στη ύπαρξη ενός κρύσταλλου από ρουβίνιο (ruby).



Σχήμα 2-1: Το πρώτο laser που υλοποιήθηκε ποτέ βασισμένο σε ένα κρύσταλλο από ρουβίνιο (ruby)[15].

Ο κρύσταλλος είχε μήκος 2cm και διάμετρο 9mm. Οι δύο έδρες του ruby κρυστάλλου ήταν γυαλισμένες και είχαν πάνω τους μία λεπτή επίστρωση από άργυρο. Ο κρύσταλλος τοποθετήθηκε στο εσωτερικό ενός ελικοειδούς σωλήνα. Στο εσωτερικό του σωλήνα αυτού υπήρχε κατάλληλο φλας. Μόλις ενεργοποιούταν η λειτουργία του φλας, ο κρύσταλλος δεχόταν πολυχρωματικό φως και εξέπεμπε από το ένα του άκρο μία ιδιαίτερα λεπτή κόκκινη μονοχρωματική φωτεινή ακτίνα. Αυτή ακριβώς η διαδικασία εκπομπής αποτέλεσε την πρώτη λειτουργία μίας συσκευής laser. [15]

Το 1961 ιδρύθηκε η Trion Instruments η οποία ήταν η πρώτη εμπορική εταιρεία με laser. Την ίδια χρονιά ο Ali Javan ανακάλυψε το laser Ηλίου-Νέου (He-Ne) . Το 1962 ο Robert Hall και ο Nick Holonyak ανακάλυψαν το πρώτο ημιαγωγίμο laser στα εργαστήρια της General Electric ενώ το 1964 ανακαλύφθηκε το laser διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) από τον Kumar Patel. Τη δεκαετία του 1970 κατασκευάστηκαν lasers που βασίζονταν σε διάφορα πολυμερή υλικά. Τα lasers αυτά αξιοποιήθηκαν σε πολλαπλές ιατρικές εφαρμογές (πχ χειρουργικές επεμβάσεις στα μάτια). Τη

δεκαετία του 1980 σημειώθηκαν περαιτέρω εξελίξεις στην τεχνολογία των lasers με κυριότερη εξέλιξη τη δημιουργία laser ακτινών Χ. Κατά τις δεκαετίες που ακολούθησαν τα lasers παρουσίασαν ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον. Τη δεκαετία του 1990 δημιουργήθηκαν τα πρώτα κβαντικά lasers και το 2006 το πρώτο laser πυριτίου από τον John Bowers. [16]

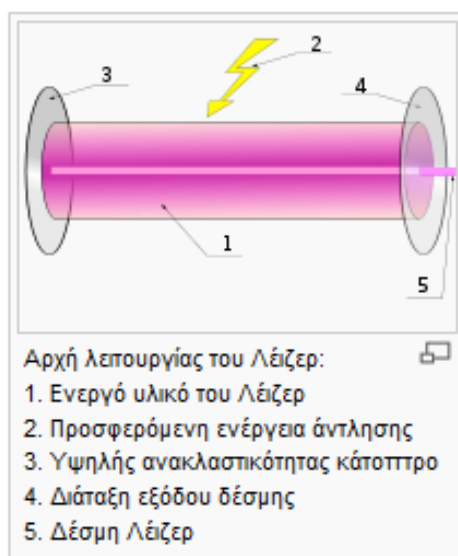
## 2.2 Χαρακτηριστικά των Laser

Η ακτινοβολία των laser έχει ορισμένα μοναδικά χαρακτηριστικά που την καθιστούν χρήσιμη σε πολλούς τομείς της επιστημονικής έρευνας. Κάποια από αυτά είναι [17]:

- Η μονοχρωματικότητά τους. Αν και καμία πηγή φωτός δεν μπορεί να δώσει απόλυτα μονοχρωματικό φως, η προσέγγιση σε αυτό είναι πολύ ικανοποιητική. Οφείλεται στο γεγονός ότι μόνο ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας  $\nu$  μπορεί να ενισχυθεί, και στο ότι η ταλάντωση μπορεί να συμβεί μόνο στη συχνότητα συντονισμού της οπτικής κοιλότητας που σχηματίζεται μεταξύ των δύο κατόπτρων.
- Η κατευθυντικότητα της δέσμης τους. Κριτήριο της δέσμης είναι το λεγόμενο άνοιγμά της, δηλαδή το διπλάσιο της γωνίας που σχηματίζει η εξωτερική ακτίνα της δέσμης με την κεντρική ακτίνα. Η δέσμη ενός laser είναι πολύ λεπτή και το άνοιγμά της πολύ μικρό.
- Η λαμπρότητα της δέσμης και η μεγάλη ένταση της ακτινοβολίας τους.
- Ο μεγάλος βαθμός συμφωνίας της ακτινοβολίας τους. Αν μια πηγή φωτός είναι τελείως σύμφωνη και στο χώρο και στο χρόνο, υπάρχει απόλυτη και σταθερή συσχέτιση μεταξύ των μεταβολών του ηλεκτρικού πεδίου της φωτεινής ακτινοβολίας σε ένα σημείο του χώρου με αυτές σε κάθε άλλο σημείο του. Αν η μεταβολή αυτή του ηλεκτρικού πεδίου μετρηθεί και στα δύο σημεία αυτά, μπορεί να πει κανείς με μεγάλη βεβαιότητα σε κάθε επόμενη χρονική στιγμή τι κάνει το ηλεκτρικό πεδίο σε δεύτερο σημείο, απλώς και μόνο μετρώντας το πεδίο στο πρώτο σημείο.
- Η πόλωση της δέσμης. Πολλά laser παράγουν πολωμένο φως, αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός πολωτικού στοιχείου που τοποθετείται μέσα στην οπτική κοιλότητα.

## 2.3 Η Φυσική των Laser

Είναι απαραίτητη μία πιο ενδοσκοπική ματιά στα laser για να κατανοήσουμε πλήρως τη δομή και τη λειτουργία τους. Θα λέγαμε ότι υπάρχουν δύο βασικά τμήματα στο εσωτερικό ενός laser, το ενεργό υλικό και η οπτική κοιλότητα στα οποία λαμβάνουν χώρα οι φυσικές διεργασίες που θα περιγράψουμε παρακάτω, με αποτέλεσμα να έχουμε ενίσχυση του φωτός στην έξοδο της συσκευής laser. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται σχηματικά η αρχή λειτουργίας του laser.



Σχήμα 2-2: Αρχή λειτουργίας του laser

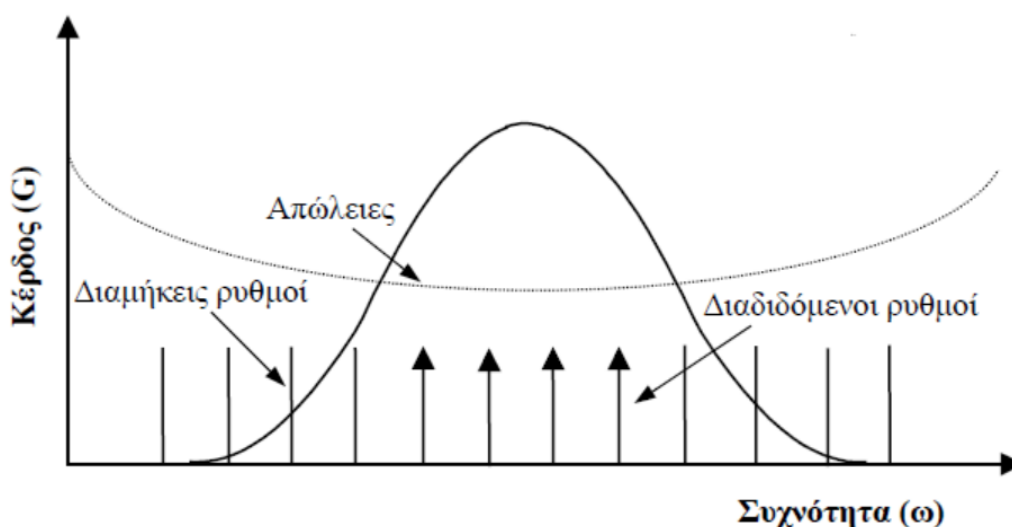
### 2.3.1 Ενεργό Μέσο

Είναι ένα υλικό το οποίο μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε μορφή (στερεή, υγρή, αέρια, πλάσμα) και έχει συγκεκριμένο μέγεθος, σχήμα, σύσταση και καθαρότητα. Το μέσο αυτό μπορεί να ενισχύσει το φως παράγοντας μια φωτεινή ακτίνα μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής, μία διαδικασία που θα περιγράψουμε ενδελεχώς παρακάτω. Ουσιαστικά είναι απαραίτητο για να αντισταθμίσει της απώλειες του αντηχείου. Όσο το ενεργό μέσο προσθέτει ενέργεια στο ενισχυόμενο φως, πρέπει και το ίδιο να λαμβάνει ενέργεια μέσω μίας διαδικασίας που ονομάζεται άντληση. Η άντληση μπορεί να γίνεται είτε από μία ηλεκτρική πηγή με τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος (ηλεκτρική άντληση), είτε μέσω μίας οπτικής πηγής (οπτική άντληση), σε ένα μήκος κύματος που δεν πρέπει να ξεπερνάει το μήκος κύματος του σήματος. Κάποια υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενεργό μέσο σε ένα laser είναι τα ακόλουθα:

- Ορισμένοι κρύσταλλοι εμπλουτισμένοι με ιόντα σπάνιων γαιών (πχ Νεοδύμιο (Nd), Υττέρβιο (Yb), Έρβιο (Er)) ή με ιόντα μετάλλων μετάπτωσης (πχ Τιτάνιο (Ti) και Χρώμιο (Cr))
- Υαλοί
- Αέρια όπως μίγματα Ηλίου και Νέου (HeNe), Αζώτου, μονοξειδίου και διοξειδίου του Άνθρακα.
- Ημιαγωγοί (πχ αρσενιούχου γαλλίου (GaAs), αζωτούχου γαλλίου (GaN))
- Υγρά χρωστικά [18]

### 2.3.2 Οπτική κοιλότητα

Η οπτική κοιλότητα από την άλλη είναι ουσιαστικά ένας οπτικός ταλαντωτής στάσιμων κυμάτων φωτός. Η οπτική κοιλότητα διαθέτει δύο ανακλαστικές επιφάνειες. Η μία ανακλά 100% τις ακτίνες φωτός, ενώ η άλλη τις ανακλά σε πολύ μεγάλο ποσοστό, της τάξης του 95-98% αφήνοντας μία δέσμη φωτός να περάσει στην οπή εξόδου. Οι επιφάνειες αυτές αναγκάζουν τα φωτόνια να περνούν αρκετές φορές από το ενεργό υλικό (τουλάχιστον δύο) προτού αποδεσμευτούν ή χαθούν λόγω απορρόφησης ή περίθλασης. Έτσι παράγονται στάσιμα κύματα σε συγκεκριμένες συχνότητες ταλάντωσης ή αλλιώς ρυθμούς ταλάντωσης, είτε διαμήκεις είτε εγκάρσιους, ανάλογα με τη γεωμετρία της οπτικής κοιλότητας (απόσταση ανακλαστικών επιφανειών, είδος κατόπτρων). Εάν το κέρδος της ενίσχυσης λόγω διέλευσης του φωτός μέσα από το ενεργό υλικό είναι μεγαλύτερο από τις απώλειες της κοιλότητας, τότε παρουσιάζεται εκθετική ενίσχυση του φωτός μέσα στην κοιλότητα. [19]



Σχήμα 2-3: Φάσμα αυθόρμητης εκπομπής και οι διαδιδόμενοι ρυθμοί της κοιλότητας

## 2.4 Λειτουργία των Laser

Η θεμελιώδης φυσική διεργασία πάνω στην οποία στηρίζεται το laser είναι η Εξαναγκασμένη Εκπομπή. Η κβαντική θεωρία υποδεικνύει πως τα άτομα υπάρχουν μόνο σε διακριτές ενεργειακές στάθμες, και σε συνηθισμένη θερμοκρασία βρίσκονται στη θεμελιώδη τους κατάσταση, δηλαδή τα ηλεκτρόνιά τους βρίσκονται στη χαμηλότερη δυνατή ενεργειακή στάθμη. Οποιαδήποτε μετακίνησή τους σε υψηλότερη ή χαμηλότερη στάθμη είναι αποτέλεσμα απορρόφησης ή εκπομπής ακτινοβολίας. Η ενέργεια  $E$  της ακτινοβολίας που παράγεται ή απορροφάται δίνεται από τη σχέση:

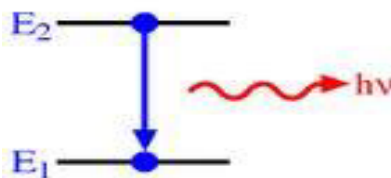
$$E = E_1 - E_2 = hf$$

όπου  $h$  είναι η σταθερά του Planck και έχει τιμή  $h=6.67 \times 10^{-34} J \cdot s = 4.11 \times 10^{-15} eV \cdot s$ .

Κάθε μόριο κατέχει μια σειρά ενεργειακών σταθμών και μπορεί να μεταβεί από μια χαμηλότερη σε μια υψηλότερη στάθμη με απορρόφηση ενός φωτονίου ενέργειας ίσης με την διαφορά των δύο ενεργειακών επιπέδων. Έτσι η συχνότητα του φωτονίου αυτού θα πρέπει να είναι τουλάχιστον:

$$\nu = \frac{E_1 - E_2}{h}$$

Ας θεωρήσουμε αρχικά δύο ενεργειακές στάθμες 1 και 2, ενός υλικού με ενέργειες  $E_1$  και  $E_2$  αντίστοιχα, με  $E_1 < E_2$ . Αν επιπλέον θεωρήσουμε ότι η στάθμη 1 αποτελεί την βασική στάθμη και το άτομο βρίσκεται στη στάθμη 2, τότε το άτομο τείνει να εκπέσει στην κατάσταση 1 που είναι ενεργειακά χαμηλότερη (ζώνη ενεργειακής ισορροπίας). Κατά τη μετάβαση αυτή ενέργεια απελευθερώνεται με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η διαδικασία αυτή λέγεται Αυθόρμητη Εκπομπή και η συχνότητα του εκπεμπόμενου κύματος δίνεται από τον τύπο που αναφέρθηκε παραπάνω.



Σχήμα 2-4: Αυθόρμητη εκπομπή



Το γεγονός ότι το άτομο μπορεί να αποδιεγερθεί από την κατάσταση 2 στην κατάσταση 1 προσδίδει στην διεγερμένη κατάσταση έναν πεπερασμένο χρόνο ζωής  $\tau$ . Κατά συνέπεια, σύμφωνα με την αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg ισχύει:

$$\Delta E \cong \frac{h}{\Delta t}$$

Υπάρχει δηλαδή αβεβαιότητα στην ενέργεια της διεγερμένης κατάστασης και συνεπώς προκύπτει μια Lorentzian κατανομή έντασης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας με μέγιστο στην συχνότητα συντονισμού που είναι η  $\nu_{12}$  που αναφέραμε πιο πάνω. Το μισό του FWHM (Full Width at Half Maximum) της κατανομής αυτής, που το συμβολίζουμε με  $\Gamma$ , είναι το φυσικό πλάτος της ατομικής μετάπτωσης και είναι αντιστρόφως ανάλογο του χρόνου ζωής  $\tau$ . Δηλαδή:

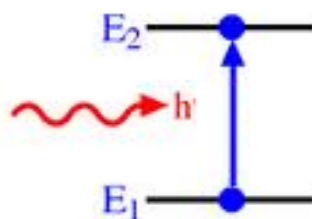
$$\Gamma = \frac{1}{2\pi\tau}$$

Αν υποθεθεί ότι τη χρονική στιγμή  $t$  υπάρχουν  $N_2$  άτομα ανά μονάδα όγκου στη στάθμη 2, ο ρυθμός αποδιέγερσης αυτών των ατόμων είναι ανάλογος με το  $N_2$  και είναι:

$$\frac{dN_2}{dt} = -2\pi\Gamma N_2$$

Αν τώρα στην παραπάνω λογική των δύο σταθμών θεωρήσουμε ότι το άτομο βρίσκεται αρχικά στη βασική στάθμη, τότε αυτό, χωρίς την επίδραση εξωγενούς διέγερσης, θα παραμείνει σε αυτή την κατάσταση. Με την πρόσπτωση όμως μιας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, συχνότητας  $\nu_{12}$  λαμβάνεται ακριβώς το ποσό ενέργειας που απαιτείται για την μετάπτωση από την 1 στην 2 και το άτομο διεγείρεται στην ενεργειακή κατάσταση 2. Η διαδικασία αυτή λέγεται όπως είπαμε απορρόφηση, και ο ρυθμός με τον οποίο λαμβάνει χώρα είναι αντίστοιχος με αυτόν της αυθόρμητης αποδιέγερσης και είναι:

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{12}N_1$$



Σχήμα 2-5: Απορρόφηση

Με  $W_{12} = \sigma_{12}F$ , όπου  $F$  η ροή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που προκαλεί την απορρόφηση και  $\sigma_{12}$  η ενεργός διατομή απορρόφησης της συγκεκριμένης μετάπτωσης. Η ενεργός διατομή, ουσιαστικά εκφράζει μια επιφάνεια γύρω από το άτομο μέσα στην οποία αν βρεθεί φωτόνιο θα γίνει εξαναγκασμένη απορρόφηση και δίνεται από τον τύπο:

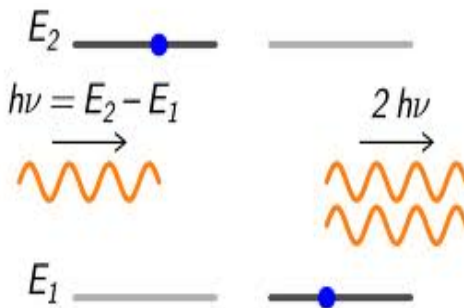
$$\sigma_{12} = \frac{\lambda^2}{2\pi}$$

όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη συχνότητα συντονισμού  $\nu_{12}$  αφού

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Ας θεωρήσουμε τώρα την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή ότι το άτομο βρίσκεται στη στάθμη 2 και επιπλέον ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει με συχνότητα ίση με αυτή της αυθόρμητης αποδιέγερσης, δηλαδή  $\nu_{12}$ . Σε αυτή την περίπτωση, επειδή η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει την ίδια συχνότητα με την ατομική, υπάρχει μία πεπερασμένη πιθανότητα, η ακτινοβολία αυτή να ωθήσει το άτομο να υποστεί την μετάπτωση από την στάθμη 2 στην 1. Η επιπλέον ενέργεια  $E_1 - E_2$  εκλύεται ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα που ενισχύει το προσπίπτον. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται Εξαναγκασμένη Εκπομπή. Και εδώ ισχύει:

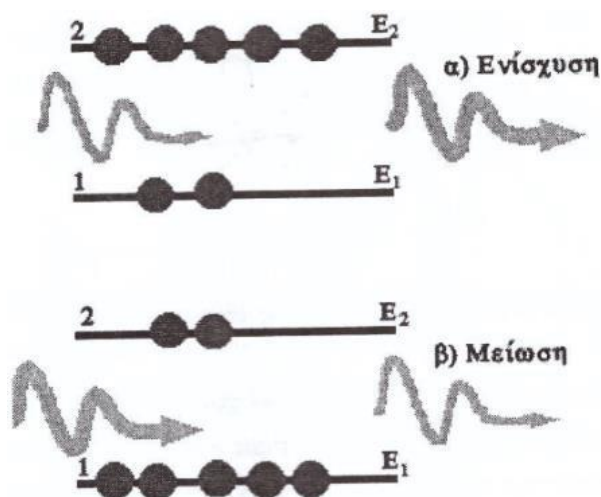
$$\frac{dN_2}{dt} = -W_{21}N_2 \quad \mu\epsilon \quad W_{21} = \sigma_{21}F$$



Σχήμα 2-6: Εξαναγκασμένη εκπομπή

Υπάρχει μια βασική διαφορά μεταξύ της αυθόρμητης και εξαναγκασμένης εκπομπής. Στην πρώτη περίπτωση η εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, κατά την αποδιέγερση του ατόμου, δεν έχει καθορισμένη φάση και η κατεύθυνση εκπομπής είναι τυχαία. Στην περίπτωση της εξαναγκασμένης εκπομπής η εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει την ίδια φάση και την ίδια διεύθυνση με τη προσπίπτουσα ακτινοβολία, είναι δηλαδή σύμφωνες. Όταν μια

ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία περνάει μέσα από μια συλλογή ατόμων η πιο ακριβής περιγραφή είναι ότι εξαναγκάζει τα ηλεκτρικά φορτία εντός των ατόμων να ταλαντώνονται σε σύμφωνη σχέση με αυτή. Τα άτομα δηλαδή αντιδρούν σαν μικροσκοπικές κεραιές, και έτσι η επανεκπεμπόμενη ακτινοβολία από το κάθε άτομο προκαλεί απορρόφηση ή ενίσχυση του σήματος.



Σχήμα 2-7: Ενίσχυση - Απόσβεση

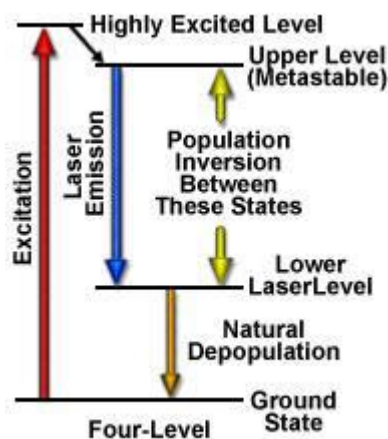
Η διεργασία της ατομικής απορρόφησης μπορεί χονδρικά να θεωρηθεί ως ανάστροφη της εξαναγκασμένης εκπομπής. Στη μια, άτομα που αρχικά βρίσκονται στη βασική κατάσταση μεταπίπτουν στην υψηλότερη ενεργειακή στάθμη, ενώ στην άλλη περίπτωση άτομα που βρίσκονται στην διεγερμένη κατάσταση μεταπίπτουν στη βασική στάθμη λόγω της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αναλυτικότερα τα άτομα αντιδρούν σαν μικρά ηλεκτρικά δίπολα. Αυτά που βρίσκονται στη βασική κατάσταση αντιδρούν απλώς σε αντίθετη φάση από την προσπίπτουσα ακτινοβολία μειώνοντας την, ενώ αυτά που βρίσκονται στην διεγερμένη κατάσταση αντιδρούν εν φάση ενισχυτικά. Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης στις δύο διεργασίες είναι η ίδια, αφού  $\sigma_{12} = \sigma_{21}$  και άρα  $W_{12} = W_{21}$ . Επομένως το ποια από τις δύο διεργασίες θα υπερισχύσει εξαρτάται από τον πληθυσμό της κάθε στάθμης σε άτομα. Αν η βασική στάθμη έχει περισσότερα άτομα τότε συνολικά υπερισχύει η ατομική απορρόφηση, ενώ αν η διεγερμένη στάθμη είναι περισσότερο κατειλημμένη υπερισχύει η εξαναγκασμένη εκπομπή και έχουμε ενίσχυση του σήματος. Είναι προφανές ότι αν  $N_2 > N_1$  τότε το υλικό είναι ενισχυτής σήματος ενώ αν  $N_2 < N_1$  το υλικό απορροφά ενέργεια και μειώνει το σήμα.

Εδώ ακριβώς υπεισέρχεται η ιδέα του laser. Αν με κάποιον τρόπο αναστραφούν οι αναλογίες ατομικών πληθυσμών, ώστε  $N_2 > N_1$ , κάτι που ονομάζεται αναστροφή πληθυσμών, τότε το κυρίαρχο φαινόμενο θα είναι αυτό της εξαναγκασμένης εκπομπής και θα έχουμε ενίσχυση σήματος από το μέσο. Από την πρώτη ματιά φαίνεται ότι είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένα σύστημα laser με τη χρήση ενός

μέσου μετάπτωσης από την 1 στην 2 αρχικά χρησιμοποιώντας την διαδικασία της απορρόφησης και έπειτα, αφού θα έχει γίνει η αναστροφή πληθυσμών, να ακολουθήσει το φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής. Κάτι τέτοιο όμως δεν μπορεί να συμβεί γιατί, όταν μετά την απορρόφηση εξισωθούν ο ατομικός πληθυσμός της αρχικής και διεγερμένης κατάστασης τότε θα εξισωθεί και η πιθανότητα να συμβεί είτε απορρόφηση είτε εξαναγκασμένη εκπομπή. Έτσι ο ρυθμός των ατομικών απορροφήσεων θα εξισωθεί με τον αριθμό των εξαναγκασμένων αποδιεγέρσεων και οι δυο διαδικασίες θα αλληλοεξουδετερωθούν. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα ακολουθείται η τεχνική, της μεθόδου άντλησης. [17], [20]

### Διάγραμμα Άντλησης

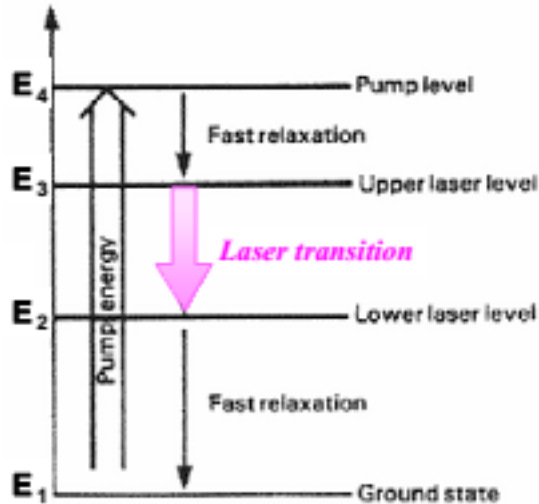
Με τον όρο άντληση εννοούμε την μεταφορά πληθυσμού από τη βασική σε μια ανώτερη διεγερμένη στάθμη, ώστε να πετύχουμε την αναστροφή πληθυσμού. Στη παρούσα φάση θα γίνει αναφορά στο σύστημα άντλησης τεσσάρων σταθμών, που είναι και το πιο συνηθισμένο σύστημα laser. Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα άντλησης τεσσάρων σταθμών.



Σχήμα 2-8: Διάγραμμα άντλησης (α)

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, αρχικά τα ηλεκτρόνια από την βασική στάθμη διεγείρονται στην στάθμη  $E_4$  από εισερχόμενα φωτόνια, που έχουν ενέργεια ίση με  $E_4 - E_1 = h\nu_{14}$ . Στην συνέχεια τα ηλεκτρόνια από την  $E_4$ , μεταβαίνουν απότομα στην στάθμη  $E_3$  η οποία λέγεται και μετασταθής. Τα ηλεκτρόνια από την στάθμη  $E_4$  στην  $E_3$  μπορεί να μεταβούν είτε μέσω θερμικής αποδιέγερσης που είναι και το σύνηθες είτε μέσω εκπομπή φωτονίων ενέργειας  $E_4 - E_3 = h\nu_{43}$ . Λέγεται

μετασταθής στάθμη, επειδή ο χρόνος ζωής της είναι μεγαλύτερος από αυτόν της  $E_2$  και έτσι δημιουργείται αναστροφή πληθυσμών μεταξύ των σταθμών  $E_3$  και  $E_2$ .

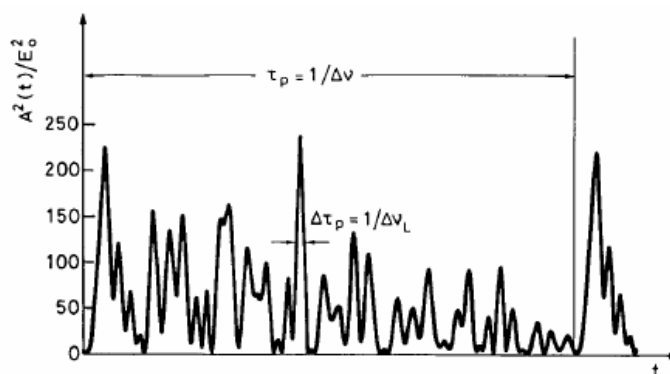


Σχήμα 2-9: Διάγραμμα άντλησης (β)

Με ένα φωτόνιο ενέργειας  $E_3 - E_2 = h\nu_{32}$ , μπορεί να ξεκινήσει η εξαναγκασμένη εκπομπή. Τα φωτόνια τα οποία προκύπτουν, ενισχύουν το φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής, έτσι ώστε τελικά να έχουμε μια πληθώρα φωτονίων ίδιας συχνότητας και συμφασικά. Έτσι παράγεται τελικά ένα συντονισμένο ηλεκτρομαγνητικό κύμα, μια ακτινοβολία laser.

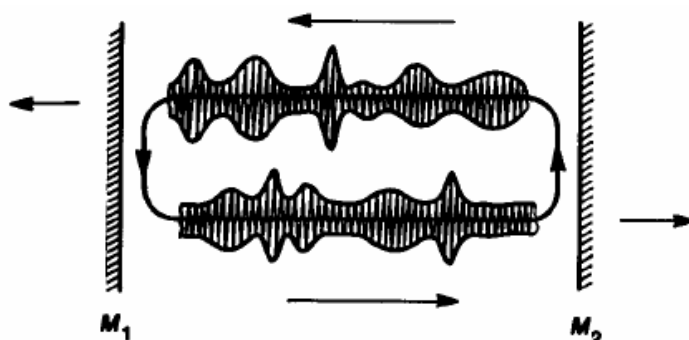
## 2.5 Τυπική Έξοδος Laser

Η τυπική έξοδος ενός laser με πολλαπλούς διαμήκεις ρυθμούς είναι η ακόλουθη



Σχήμα 2-10: Παράδειγμα χρονικής συμπεριφοράς του τετραγώνου του πλάτους του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου  $|A(t)|^2$ , σε περίπτωση 51 ρυθμών ταλάντωσης, με το ίδιο πλάτος  $E_0$  και τυχαίες φάσεις

Παρά το γεγονός ότι η έξοδος μοιάζει εντελώς τυχαία, επαναλαμβάνεται σε χρονικά διαστήματα ίσα με  $c/2L_e$ . Παρόλα αυτά οι συγγενείς φάσεις των ρυθμών είναι τυχαίες. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το εσωτερικό μιας κοιλότητας laser και πώς ένα οπτικό σήμα κυκλοφορεί εντός αυτής.



Σχήμα 2-11: Πρότυπο οπτικό πεδίο που κυκλοφορεί στο εσωτερικό κοιλότητας laser

Το σήμα στο εσωτερικό της κοιλότητας αναπαράγεται μετά από ένα roundtrip μέσα στο οποίο και ενισχύεται. Το πλάτος αλλάζει γραμμικά λόγω της ενίσχυσης και της σύζευξης εξόδου (outcoupling) ενώ δεν υπάρχουν μη γραμμικότητες μιας και το σχήμα του σήματος παραμένει ίδιο.

$$\omega_{ax} = \omega_{q+1} - \omega_q = \frac{2\pi c}{p} = \frac{2\pi}{T}$$

Οι βραχύτερες αιχμές στην έξοδο έχουν διάρκεια  $\Delta_{Tp} \sim 1/\Delta_{VL}$ , ενώ οι αλλαγές σε αυτήν αλλάζουν αργά με το χρόνο καθώς οι συγγενείς φάσεις ολισθαίνουν. Μία αργή φωτοδίοδος «βλέπει» μόνο τη μέση ισχύ εξόδου από την κοιλότητα του laser. [21]

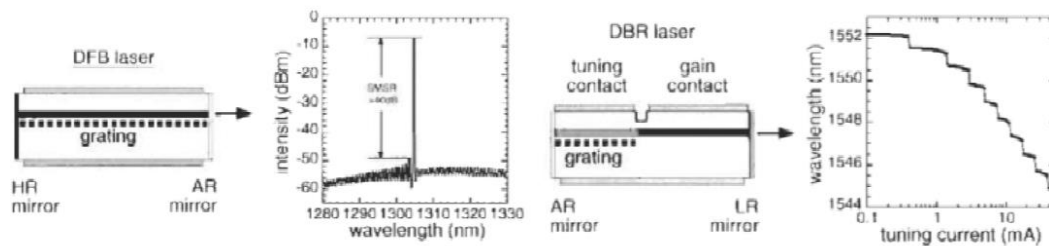
$$P_{out}^{ave} \propto \sum_i^n (E_{0,i})^2$$

## 2.6 Είδη Laser πολλαπλών καναλιών

### Laser τύπου DFB/DBR

Τα lasers Κατανεμημένης Ανάδρασης (DFB) μπορούν να οριστούν σαν τύπος ημιαγωγικών laser των οποίων η κοιλότητα αποτελείται από μια περιοδική δομή η

οποία περιέχει στο μέσον της ένα μετατοπιστή φάσης (phase shifter) και λειτουργεί σαν ένας κατανεμημένος ανακλαστήρας στο εύρος ζώνης της επιθυμητής εκπομπής συμπεριλαμβάνοντας επιπλέον και ένα στοιχείο κέρδους. Τα laser αυτά μπορούν να συντονιστούν σε ένα σχετικά μεγάλο εύρος συχνοτήτων που είναι της τάξης των αρκετών νανομέτρων. Τα lasers Κατανεμημένου Ανακλαστήρα Bragg (DBR) κατασκευάζονται με τουλάχιστον ένα κατανεμημένο ανακλαστήρα Bragg εξωτερικά από το στοιχείο κέρδους. Η διαφορά τους με τα DFB είναι ότι στα DFB lasers το στοιχείο που προκαλεί την ανάδραση είναι ενιαίο και κατανεμημένο σε όλο το μήκος της κοιλότητας μαζί με το στοιχείο κέρδους.



Σχήμα 2-12: Αναπαράσταση κοιλότητας laser DFB και DBR [22]

Στα DFB lasers η δομή περιλαμβάνει ένα κατανεμημένο φράγμα περίθλασης Bragg έτσι ώστε η μεταβολή μέσα σε αυτό να είναι περιοδική. [18] Με αυτόν τον τρόπο η ανάδραση της ενέργειας είναι περιοδική με βήμα  $\Lambda$ .

Αν η περίοδος κυμάτωσης  $\Lambda$  είναι ίση με:

$$\Lambda = \frac{l\lambda_B}{2n_e}$$

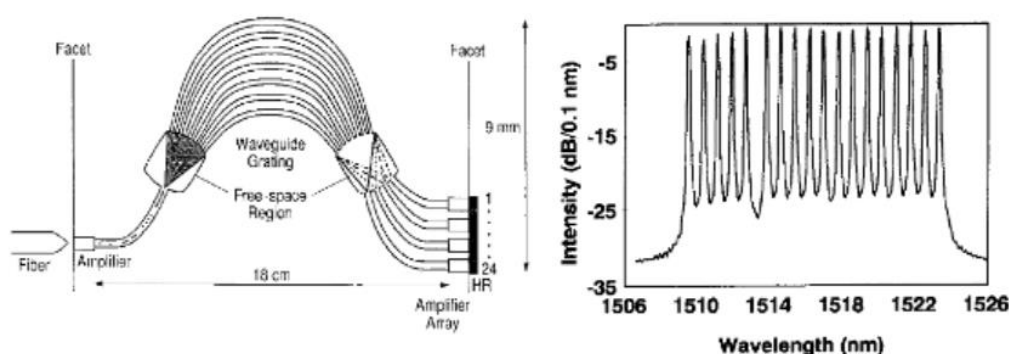
όπου  $l$  ακέραιος που εκφράζει την τάξη του φράγματος μεταγωγής,  $\lambda_B$  το μήκος κύματος Bragg και  $n_e$  ο δείκτης διάθλασης του μέσου τότε μόνο ο κοντινότερος ρυθμός στο  $\lambda_B$  ταλαντώνεται στην κοιλότητα και όλοι οι άλλοι αποσβένονται. Πρέπει να τονιστεί ότι η διαφορά αυτού του τύπου των lasers με τα υπόλοιπα είναι ότι η σύζευξη της ενεργού περιοχής με μια συντονιζόμενη δομή γίνεται στο εσωτερικό της κοιλότητας και όχι εξωτερικά. Παρόμοια λειτουργούν και τα DBR με τη διαφορά ότι το φράγμα μεταγωγής δεν καλύπτει την ενεργό περιοχή αλλά η απολαβή είναι έξω από το φράγμα περίθλασης όπως στο σχήμα. Η συνάρτηση μεταφοράς αυτού του τύπου των laser βρίσκεται μετασχηματίζοντας κατά Fourier την κρουστική απόκριση του laser και δίνει :

$$T(f) = \frac{\sin^2(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2}$$

όπου  $\tau$  ο χρόνος για μια πλήρη ταλάντωση στην κοιλότητα (roundtrip time).

## Πολυσυχνοτικά Laser

Εκτός από την παραπάνω κατηγορία των lasers μια άλλη τεχνική που έχει υιοθετηθεί για αυτού του τύπου τις διατάξεις βασίζεται στην τοποθέτηση ενός AWG (Arrayed Waveguide Grating) μέσα στην κοιλότητα του laser. Τα lasers αυτά ονομάζονται Πολυσυχνοτικά Lasers (Multifrequency Lasers) και η βασική τους διαφορά από τα υπόλοιπα πολυκαναλικά laser είναι ότι όλα τα κανάλια παράγονται στην ίδια κοιλότητα Fabry – Perot. [23]



Σχήμα 2-13: Πολυσυχνοτικό laser με WGR και το αντίστοιχο φάσμα[23]

Σε αυτή την υλοποίηση η απόσταση μεταξύ των καναλιών είναι 103 GHz (~0.8 nm) που καθένα από αυτά δίνει κατά μέσο όρο ισχύ εξόδου της τάξης των -14.6 dBm. Κατά τη εκτέλεση πειράματος μετάδοσης κάθε κανάλι διαμορφώθηκε στα 1.24 Gbps δίνοντας συνολικό ρυθμό μετάδοσης πάνω από 20 Gbps.

## Συντονιζόμενα Laser

Με βάση τους παραπάνω τύπους laser έχουν κατασκευαστεί διατάξεις laser οι οποίες έχουν την ικανότητα συντονισμού σε ένα μόνο κανάλι το οποίο μπορεί να κυμαίνεται σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Ο συντονισμός σε κάποια συγκεκριμένη συχνότητα γίνεται είτε με τον μηχανικό έλεγχο του μήκους της κοιλότητας, είτε με τον έλεγχο της θερμοκρασίας αυτής. Τα πολυκαναλικά laser είναι οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται περισσότερο από όλες στα υπάρχοντα συστήματα WDM ως τώρα. Ωστόσο στο μέλλον αναμένεται η αντικατάστασή τους με πολυκυματικές πηγές. Οι λόγοι που υπαγορεύουν μια τέτοια αλλαγή βασίζονται σε διάφορους παράγοντες. Πρώτα από όλα, τα πολυκαναλικά laser απαιτούν ξεχωριστές τροφοδοσίες για κάθε πηγή κάτι που αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος. Επιπλέον, η κατασκευή τους είναι ιδιαίτερα απαιτητική αυξάνοντας κατά πολύ το κόστος ανά μεταδιδόμενο κανάλι. Επιπρόσθετα, με την υιοθέτηση της τεχνολογίας DWDM προκύπτει η απαίτηση για περισσότερα κανάλια σε ένα



συγκεκριμένο φασματικό εύρος που θα πρέπει να έχουν απόσταση μεταξύ τους 100 ή ακόμη και 50 GHz. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι οι απαιτήσεις για περισσότερα κανάλια, που ο αριθμός τους πλέον δεν είναι συγκρίσιμος με αυτόν των πολυκαναλικών laser, είναι αυξημένες. Έτσι οι πολυκυματικές πηγές προσφέρουν μια εναλλακτική λύση στο πρόβλημα αυτό αφού με ένα laser ως είσοδο μπορούν να παράγουν πολλές συχνότητες στην έξοδο τους. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των πηγών αυτών είναι η δραματική μείωση του κόστους ανά κανάλι που παρέχουν σε συνδυασμό με τη συνοχή (coherence) μεταξύ των καναλιών. Μέχρι σήμερα κατά τη μετάδοση από τη μεριά του πομπού γινόταν διαμόρφωση της έντασης και από τη μεριά του δέκτη είχαμε άμεση αποδιαμόρφωση (μέθοδος IM/DD). Η παραγωγή πηγών με συνοχή επιτρέπουν τη χρήση τεχνικών διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που είναι ήδη γνωστές από άλλου τύπου τηλεπικοινωνιακά συστήματα, αυξάνοντας έτσι τη φασματική απόδοση. Σε αντίθεση με τα παραπάνω οι πολυκυματικές πηγές δημιουργούν πρόσθετες απαιτήσεις για σταθερότητα των καναλιών, ενώ ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά το σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων αφού τα μη – γραμμικά φαινόμενα μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα.

#### Laser τύπου VCSEL

Ένας άλλος τύπος laser με τον οποίο θα ασχοληθούμε εκτενώς παρακάτω και που αποτελεί σημαντική τεχνολογία για πολυσυχνοτικές συστοιχίες laser είναι το VCSEL (Vertical Cavity Surface – Emitting Laser)[24]. Το χαρακτηριστικό των lasers αυτών είναι ότι η ακτινοβολία εκπέμπεται κάθετα στην ημιαγώγιμη περιοχή τους. Ένα τέτοιου τύπου laser αποτελείται από δύο κατανεμημένης ανάδρασης κάτοπτρα Bragg τα οποία είναι αντίθετων προσμίξεων (n και p τύπου). Στο ενδιάμεσο αυτών βρίσκεται η περιοχή του κέρδους που στις περισσότερες περιπτώσεις τροφοδοτείται ηλεκτρικά.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

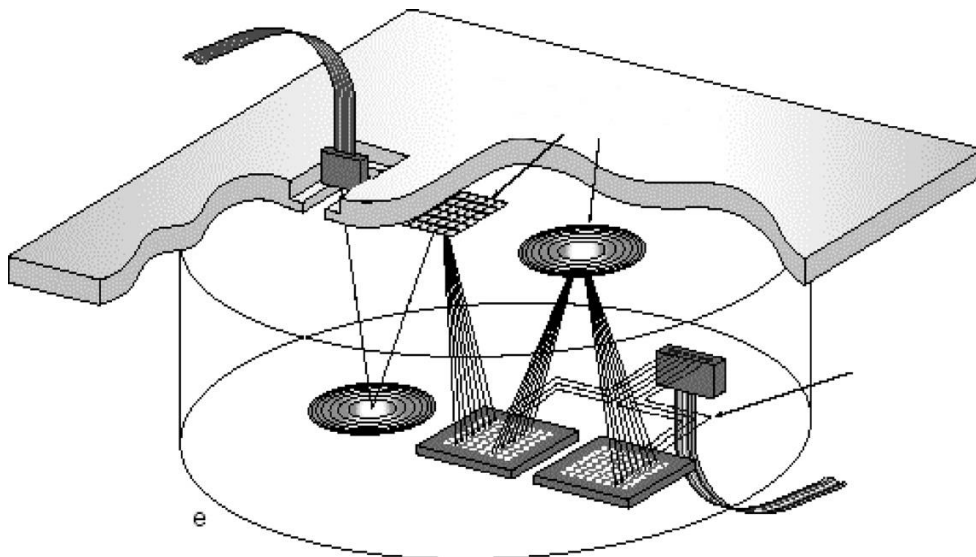
### VCSEL

#### 3.1 Εισαγωγή

##### 3.1.1 Οπτικές Διασυνδέσεις (Optical Interconnects)

Τα τελευταία χρόνια οι οπτικές ίνες έχουν κυριαρχήσει στον τομέα της επικοινωνίας μακρινών αποστάσεων (long-haul communication). Έτσι, στην ολόένα και αυξανόμενη ζήτηση για εύρος ζώνης αλλά και στην ανάγκη για χαμηλού κόστους επικοινωνία απαντούν οι πολλαπλές δυνατότητες που μας παρέχουν οι οπτικές διασυνδέσεις. Τα πλεονεκτήματά τους είναι πολλά και τα περιθώρια περαιτέρω βελτίωσης σημαντικά.

Μία χαρακτηριστική τεχνική οπτικής διασύνδεσης είναι η διασύνδεση ελευθέρου χώρου. Στις συνδέσεις αυτές υπάρχει ένας κενός χώρος μεταξύ δύο υποστρωμάτων (δύο ηλεκτρονικών πλακετών ή μιας ηλεκτρονικής και μιας οπτικής πλακέτας). Το οπτικό σήμα το οποίο εξέρχεται από την πηγή διαδίδεται σε μία καθορισμένη περιοχή στο άλλο υπόστρωμα, όπως δείχνει και το σχήμα:



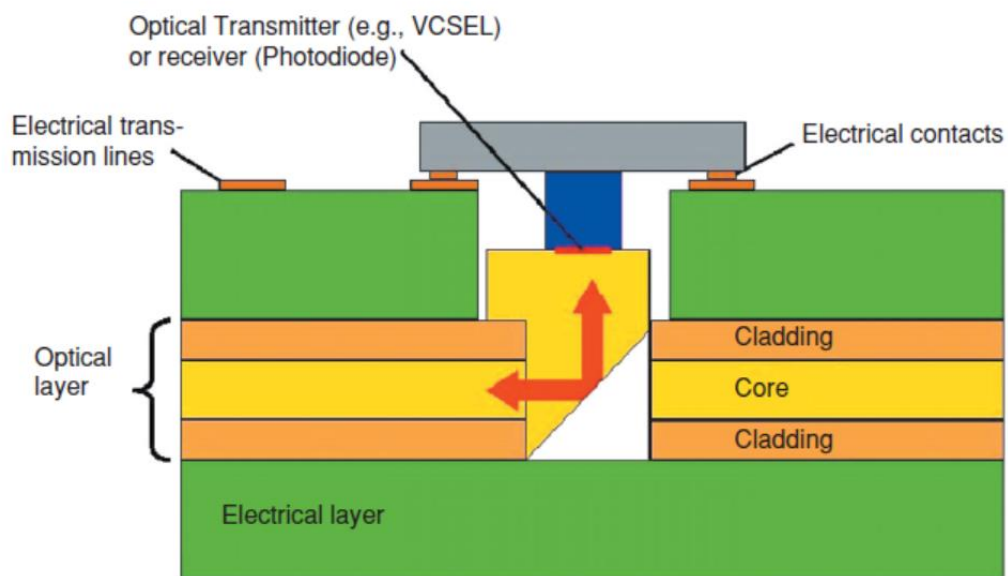
Σχήμα 3-1: Οπτική διασύνδεση ελευθέρου χώρου

Η αρχιτεκτονική είναι απλή αλλά η πραγματοποίησή της αρκετά δύσκολη. Όλα τα οπτικά στοιχεία καθώς και τα δύο υποστρώματα πρέπει να είναι τοποθετημένα με μεγάλη ακρίβεια στις καθορισμένες περιοχές, ενώ σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται ανακλαστικά οπτικά στοιχεία η ακρίβεια πρέπει να

διπλασιαστεί. Άλλο ένα μειονέκτημα των διασυνδέσεων ελευθέρου χώρου είναι η δυσκολία στη συντήρηση του συστήματος, καθώς επίσης και ότι το σύστημα είναι ευάλωτο σε εξωτερικούς παράγοντες όπως σκόνη ή κραδασμοί.

Οι οπτικές διασυνδέσεις ελευθέρου χώρου είναι ακόμα σε αρκετά πρώιμο στάδιο, δεν έχουν αναπτύξει την απαραίτητη αξιοπιστία, ενώ παρουσιάζουν αρκετές δυσκολίες στην κατασκευή τους. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων έχουν προταθεί πολλές λύσεις, οι περισσότερες εκ των οποίων επικεντρώνονται στην μείωση του όγκου και της ευπάθειας τους.

Προκειμένου να δοθεί λύση στα παραπάνω προβλήματα οι επιστήμονες κάνοντας χρήση της τεχνολογίας ημιαγωγικών υλικών επιχείρησαν να κατασκευάσουν οπτικά στοιχεία. Αρχικά, κατασκευάστηκαν επίπεδα οπτικά κυκλώματα (PLC- Planar Lightwave Circuit) σε σταθερό ή εύκαμπτο υπόστρωμα. Σε ένα δεύτερο στάδιο, πραγματοποιήθηκε η ολοκλήρωση των PLC με ηλεκτρικά κυκλώματα. Το οπτικό και το ηλεκτρικό κομμάτι των δομών αυτών αναπτύσσεται ξεχωριστά και μετά συνενώνονται δημιουργώντας την υβριδική οπτο-ηλεκτρονική πλατφόρμα. Ένα παράδειγμα υβριδικής τεχνολογίας φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα όπου ένα PLC έχει τοποθετηθεί πάνω σε μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB- Printed Circuit Board).



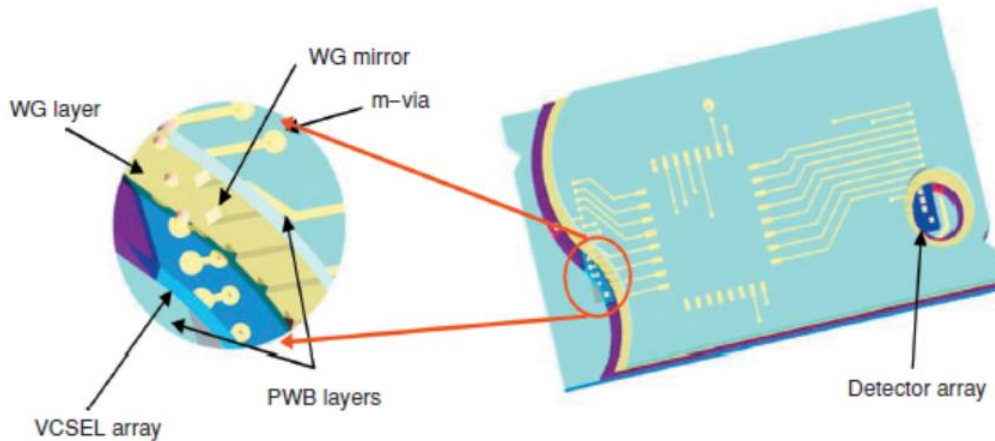
Σχήμα 3-2: Υβριδικό PCB

Για να πραγματοποιηθεί η σύζευξη ηλεκτρονικού-οπτικού (transmitter) και οπτικού-ηλεκτρονικού (receiver) χρησιμοποιούνται δομές όπως το VCSEL και η φωτοδίοδος.

### Πλήρως ενσωματωμένες οπτικές διασυνδέσεις

Οι οπτικοί κυματοδηγοί πάνω ή μέσα σε PCB αποτελούν ένα πολύ ισχυρό σύστημα, αλλά καταλαμβάνουν αρκετό χώρο. Η σταθεροποίηση του PCB, η κατάλληλη συσκευασία των στοιχείων και οι δυσκολίες ευθυγράμμισης είναι μερικά ακόμη ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν.

Μία λύση αποτελούν οι πλήρως ενσωματωμένες οπτικές διασυνδέσεις ένα παράδειγμα των οποίων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3-3: Πλήρως ενσωματωμένες οπτικές διασυνδέσεις

Τα στοιχεία μίας τέτοιας διάταξης περιλαμβάνουν: ένα laser κάθετης κοιλότητας VCSEL, couplers κυματοδηγών και πολυμερικοί κυματοδηγοί που λειτουργούν ως φυσικό στρώμα στο οποίο πραγματοποιείται η οπτική διασύνδεση. Το οδηγούμενο ηλεκτρικό σήμα που διαμορφώνει το VCSEL και το αποδιαμορφωμένο σήμα που λαμβάνεται στον φωτοδέκτη διαδίδονται στο ηλεκτρικό μέσο που συνδέεται με την επιφάνεια του PCB. [25]

### **3.2 VCSEL**

Στη συνέχεια θα μελετήσουμε ένα από τα σημαντικότερα δομικά στοιχεία των οπτικών διασυνδέσεων, το VCSEL, το οποίο ανήκει στην κατηγορία των λέιζερ επιφανειακής εκπομπής φωτός (surface emitting), χάρη στα οποία είναι εφικτή η παράλληλη μετάδοση πληροφορίας σε υπολογιστικά συστήματα.

#### Ιστορική αναδρομή

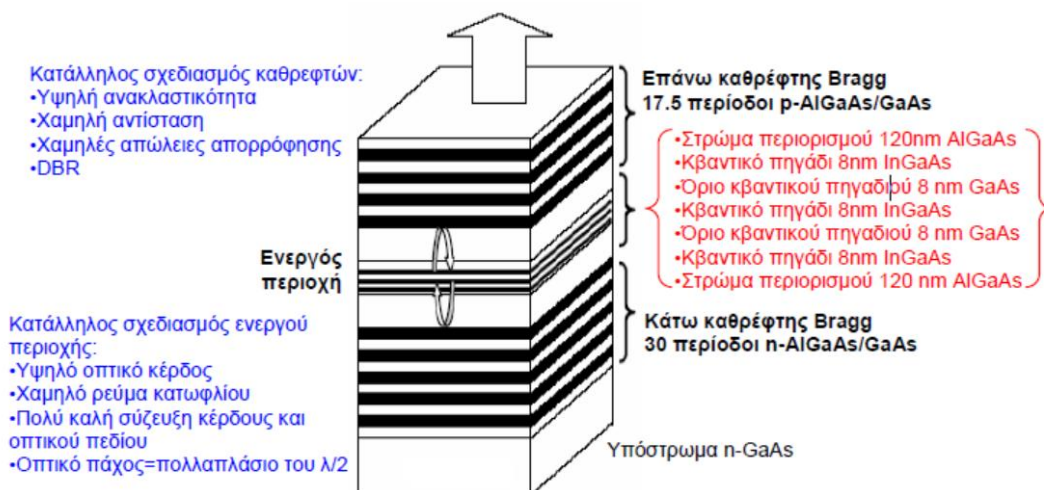
Το πρώτο VCSEL παρουσιάστηκε το 1979 από τους Soda, Iga, Kitahare και Yasuharu Suematsu, αλλά οι πρώτες διατάξεις για λειτουργία συνεχούς κύματος σε

Θερμοκρασία δωματίου αναφέρθηκαν μόλις το 1988. Το πρώτο ημιαγωγικό VCSEL εφευρέθηκε από τους Axel Scherer και Jack Jewell, δύο επιστήμονες της AT&T Bell Laboratories. Ο όρος VCSEL επινοήθηκε σε μία δημοσίευση της Optical Society of America το 1987. Σήμερα τα VCSELS έχουν αντικαταστήσει τα laser εκπομπής ακμής (edge-emitting laser) σε διάφορες εφαρμογές για επικοινωνία σε μικρή εμβέλεια όπως οι Gigabit Ethernet και Fibre Channel.

### 3.2.1 Δομή

Στο VCSEL, ο ημιαγωγός σχηματίζεται με εναπόθεση εναλλασσόμενων στρωμάτων υψηλού και χαμηλού δείκτη ανακλαστικότητας, πάχους ίσο με το  $\frac{1}{4}$  του μήκους κύματος της ακτινοβολίας. Η κλασική δομή που έχουν τα περισσότερα VCSELS αποτελείται από δύο παράλληλους καθρέφτες ανάμεσα στους οποίους παρεμβάλλεται ένα λεπτό ενεργό στρώμα. Τα στρώματα διαμορφώνονται σε ακριβή απόσταση το ένα από το άλλο, αναγκάζοντας να αντανακλούν σε συντονισμό, την ακτινοβολία, έτσι ώστε η ισχύς της δέσμης να είναι πολύ υψηλή (σε συντονισμό σημαίνει ότι τα μέγιστα και τα ελάχιστα της δημιουργούμενης ακτινοβολίας, εμφανίζονται συγχρόνως). Τα φωτόνια επίσης δημιουργούνται σε ένα πολύ μικρότερο ενεργό όγκο από το κλασικό λέιζερ ημιαγωγών, επηρεάζοντας την τιμή του ελάχιστου ρεύματος που χρειάζεται για να αρχίσει να εκπέμπει το VCSEL. Το πλήθος των στρωμάτων από τα οποία αποτελούνται οι καθρέφτες κυμαίνεται από 20 με 30, ενώ ο στόχος που τίθεται είναι η ανακλαστικότητα που θα έχουν οι καθρέφτες να είναι μεγαλύτερη από 99.9%, για να επιτευχθεί εκπομπή φωτός.[25]

Φυσικά, εκτός από το σχηματισμό της οπτικής κοιλότητας, θα πρέπει στη δομή που θα αναπτυχθεί να υπάρχει η δυνατότητα επαρκούς έγχυσης ηλεκτρονίων και οπών μέσα στη μικρού όγκου ενεργό περιοχή. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των VCSELS, το ρεύμα κατωφλίου, εξαρτάται, τόσο από το αν ο όγκος της ενεργού περιοχής είναι μικρός, όσο και από το πόσο καλά μπορεί να οριστεί το οπτικό πεδίο και να υπάρχει μεγάλη αλληλοεπικάλυψη με την ενεργό περιοχή. [24]



Σχήμα 3-4: Τυπική δομή VCSEL

Για μεγάλων αποστάσεων διασυνδέσεις είναι καταλληλότερα τα laser μεγάλου μήκους κύματος (1.3 $\mu\text{m}$  – 1.5 $\mu\text{m}$ ) λόγω της χαμηλής απορρόφησης του γυαλιού της οπτικής ίνας. Η απορρόφηση του κυματοδηγού δεν είναι τόσο σημαντική σε μικρού μήκους διασυνδέσεις, γι αυτό και δεν είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση γυάλινων οπτικών ινών. Πιο σημαντικά στη μείωση της κατανάλωσης ισχύος είναι η αποδοτικότητα μετατροπής του σήματος από ηλεκτρικό σε οπτικό και η αποδοτικότητα σύζευξης. Παρόλα αυτά πιο κατάλληλη πηγή από κάθε άλλο μήκος κύματος είναι στα 850 $\mu\text{m}$ , διότι η τεχνολογία κατασκευής του είναι αρκετά πιο ώριμη και οικονομική. [25]

### 3.2.2 Γενικά Χαρακτηριστικά

Τα ημιαγωγικά laser χρησιμοποιούνται ευρέως σε οπτικές επικοινωνίες και οπτικές συσκευές αποθήκευσης. Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο τύπους με βάση τη δομή τους: ο ένας τύπος είναι το laser που εκπέμπει από την ακίδα και ο άλλος τύπος το laser που εκπέμπει από την επιφάνειά του. Το laser εκπομπής ακμής έχει εξαιρετικά χαρακτηριστικά, αλλά είναι σχεδόν αδύνατη η δημιουργία δισδιάστατου 2D σήματος.

Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα στην παραγωγή των VCSELs σε αντίθεση με τα laser εκπομπής ακμής. Τα laser εκπομπής ακμής δεν μπορούν να ελεγχθούν και να χαρακτηριστούν πριν το τέλος της διαδικασίας παραγωγής. Αν δεν λειτουργούν σωστά, είτε λόγω κακών επαφών είτε λόγω χαμηλής ποιότητας των υλικών, τότε όλος ο χρόνος και τα υλικά κατασκευής αχρηστεύονται. Τα VCSELs όμως μπορούν να αξιολογηθούν σε πολλά στάδια κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους και να ελεγχθούν τυχών αστοχίες στην ποιότητα των υλικών και γενικά πιθανά προβλήματα στη διαδικασία. Για παράδειγμα αν το μέσο δεν είναι απολύτως

καθαρό από διηλεκτρικά υλικά, κατά τη διάρκεια της χάραξης με οξύ μία σύντομη εξέταση μπορεί να εντοπίσει ότι το ανώτερο μεταλλικό στρώμα δεν κάνει επαφή με το εσωτερικό στρώμα. [30]

Η χρήση των DBRs μειώνει τον κίνδυνο της καταστροφικής οπτικής βλάβης (COD) στους καθρέφτες, η οποία μπορεί να συμβεί στα κλασικά ημιαγωγικά λέιζερ (η ενεργή περιοχή κοντά στα άκρα απορροφά φως λόγω της κένωσης από επιφανειακή επανασύνδεση). Επίσης μειώνεται ο κίνδυνος μηχανικής βλάβης των καθρεφτών.

Ο μικρός όγκος της ενεργού περιοχής και η μεγάλη ανακλαστικότητα των καθρεφτών συνεισφέρουν στο πολύ χαμηλό ρεύμα κατωφλίου, της τάξης ακόμα και κάποιων  $\mu\text{A}$ , επιτυγχάνοντας έτσι μικρή κατανάλωση ισχύος και μειωμένη θέρμανση του λέιζερ. Αυτό το χαρακτηριστικό σε συνδιασμό με την απουσία του κινδύνου για COD, επεξηγεί την εξαιρετική αξιοπιστία των VCSELs και τους μεγάλους χρόνους ζωής που έχουν αναφερθεί σε πολλές περιπτώσεις.

Η επιφανειακή εκπομπή και το μικρό μέγεθος καθιστούν δυνατή την κατασκευή πολύ πυκνών 2-διάστατων συστοιχιών από VCSELs, κατάλληλες και για παράλληλη μετάδοση σε μονάδες πολλαπλών διαύλων.

Τα VCSELs δεν χρειάζεται να διαχωριστούν μεταξύ τους επομένως είναι δυνατή η μονολιθική ολοκλήρωσή τους μαζί με άλλα οπτοηλεκτρονικά στοιχεία όπως φωτοανιχνευτές, διαμορφωτές ή ετερο-διπολικά τρανζίστορ (HBT).

Εξαιτίας της κυλινδρικής συμμετρίας που παρουσιάζουν τα VCSELs, το φως που εκπέμπεται έχει κυκλική δέσμη και μικρή απόκλιση. Η σύζευξη με τις οπτικές ίνες είναι ακόμα και μέχρι 90% και επιτρέπει μεγαλύτερες ανοχές στην ευθυγράμμιση, μειώνοντας έτσι το κόστος εγκατάστασης. Για λόγους σύγκρισης αναφέρουμε πως, το φως που εκπέμπεται από ένα κλασικό ημιαγωγικό laser εκπομπής ακμής έχει ελλειπτική δέσμη με κάθετη και διαμήκη απόκλιση περίπου  $40^\circ$  και  $10^\circ$  αντίστοιχα, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η σύζευξη του φωτός στην οπτική ίνα χωρίς να υπάρχουν απώλειες ή χωρίς την χρήση εξειδικευμένων οπτικών εξαρτημάτων. [25],[24]

Επιπλέον επειδή τα VCSELs εκπέμπουν τη δέσμη κάθετα στην ενεργή περιοχή του laser, σε αντίθεση με την παράλληλη εκπομπή των laser εκπομπής ακμής, δεκάδες χιλιάδες VCSEL μπορούν να επεξεργασθούν συγχρόνως σε έναν 3 ιντσών wafer γαλλίου-αρσενίου ενώ παράλληλα η απόδοσή τους είναι σε μεγάλο βαθμό προβλεψιμη.



Τέλος, ενώ τα πρώτα VCSELS εξέπεμπαν σε πολλαπλούς διαμήκεις ή νηματοειδείς τρόπους, τα τελευταία χρόνια είναι πλέον συνήθη τα VCSEL ενός τρόπου (single mode).[25]

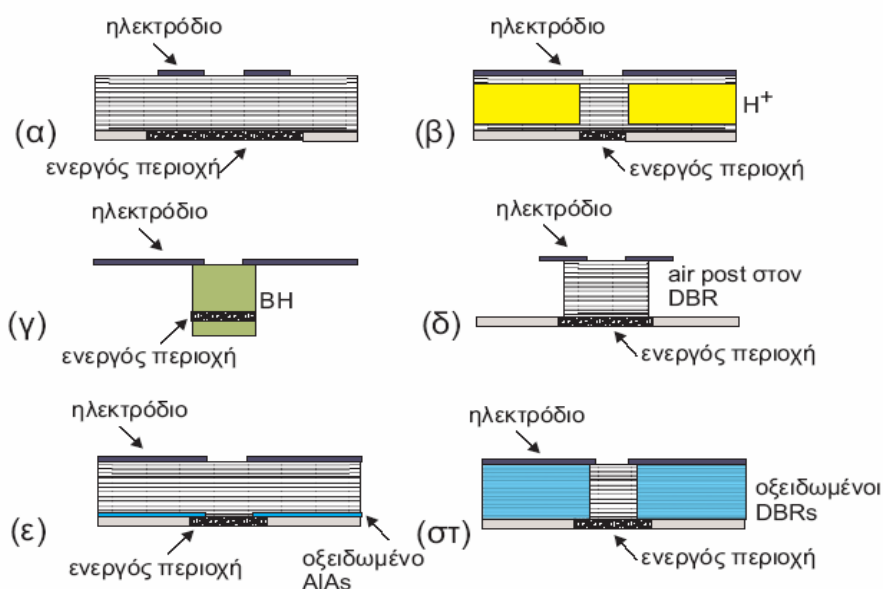
Παρ' όλα αυτά, τα VCSELS παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα σε σχέση με τα κλασικά ημιαγωγικά λέιζερ. Οι κατασκευαστικές ανοχές στην ανάπτυξη των VCSELS είναι πολύ πιο αυστηρές σε σχέση με αυτές των laser εκπομπής ακμής, με περιορισμό για παράδειγμα στο πάχος να είναι της τάξης του 1%. Ίσως το μεγαλύτερο μειονέκτημα των VCSELS είναι η τάση που εμφανίζουν για λειτουργία σε πολλαπλούς τρόπους ταλάντωσης, εξαιτίας της μεγάλης κατακόρυφης διάστασης της οπτικής κοιλότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το φάσμα εκπομπής να έχει πολλά μήκη κύματος που περιορίζουν την μέγιστη απόσταση εξαιτίας φαινομένων χρωματικής διασποράς.

### 3.2.3 Τύποι VCSEL

Ανάλογα με τη μέθοδο που εφαρμόζεται για τον περιορισμό του ρεύματος μέσα στην ενεργό περιοχή και για τον περιορισμό του φωτός, τα VCSEL χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες.

#### Περιορισμός του ρεύματος

Οι κυριότερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό του ρεύματος κατά την κατασκευή των VCSEL παρουσιάζονται στο σχήμα



Σχήμα 3-5: Δομές για περιορισμό ρεύματος

α) Με ηλεκτρόδιο τύπου δακτυλίου: Η δομή αυτή μπορεί να περιορίσει τη ροή ρεύματος σε γειτονικές περιοχές του δακτυλίου. Το φως που εκπέμπεται μπορεί να βγει έξω από το παράθυρο που βρίσκεται στο κέντρο του δακτυλίου. Κατασκευαστικά η δομή αυτή είναι αρκετά εύκολη, παρουσιάζει όμως το μειονέκτημα της όχι απόλυτης παγίδευσης του ρεύματος σε μικρή περιοχή λόγω φαινομένων διάχυσης.

β) Με βομβαρδισμό πρωτονίων: δημιουργείται ένα μονωτικό στρώμα από πρωτόνια ( $H^+$ ) το οποίο περιορίζει τη διάχυση του ρεύματος προς τις γύρω περιοχές.

γ) Τύπου καλυμμένης ετεροδομής (Buried Heterostructure, BH): Για να περιοριστεί το ρεύμα καλύπτεται η ενεργός περιοχή με έναν ημιαγωγό με μεγάλο ενεργειακό χάσμα. Ο δείκτης διάθλασης στην γύρω περιοχή μπορεί να πάρει πολύ μικρές τιμές με αποτέλεσμα την δημιουργία μιας index-guiding δομής. Οι σχηματισμοί τύπου BH είναι ιδανικοί ως προς τον περιορισμό τόσο του ρεύματος όσο και του φωτός αλλά δυστυχώς η κατασκευή τους είναι αρκετά περίπλοκη, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις πολύ μικρών 3-διάστατων στοιχείων.

δ) Τύπου air-post: Μέσω ενός κυκλικού ή ορθογώνιου διακένου (air-post) επιτυγχάνεται ο περιορισμός του ρεύματος. Αποτελεί την απλούστερη μέθοδο κατασκευής αλλά η απόδοση των λέιζερ μπορεί να επηρεαστεί από την μη-ακτινοβολούσα επανασύνδεση στο εξωτερικό τοίχωμα.

ε) Επιλεκτική οξείδωση AIAs: Με οξείδωση ειδικού AIAs στρώματος περιορισμού που βρίσκεται στην ενεργό περιοχή δημιουργείται ένα μονωτικό στρώμα.

στ) Οξείδωση των DBR: Η ίδια μέθοδος με πριν εφαρμόζεται και για την οξείδωση των DBR. Με αυτή την τεχνική μπορεί επίσης να μειωθούν και τα φαινόμενα της μη-ακτινοβολούσας επανασύνδεσης.[26]

### Περιορισμός του φωτός

Οι κυριότερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό του φωτός στα VCSEL παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-6. Η βασική ιδέα είναι να αυξηθεί η επικάλυψη του οπτικού πεδίου με την ενεργό περιοχή.

α) Τύπου Fabry-Perot: Το συντονισμένο οπτικό πεδίο περιορίζεται από τους δύο ανακλαστήρες που σχηματίζουν το Fabry-Perot συντονιστή. Αν η διάμετρος του καθρέφτη γίνει πολύ μικρή οι απώλειες διάθλασης αυξάνονται.

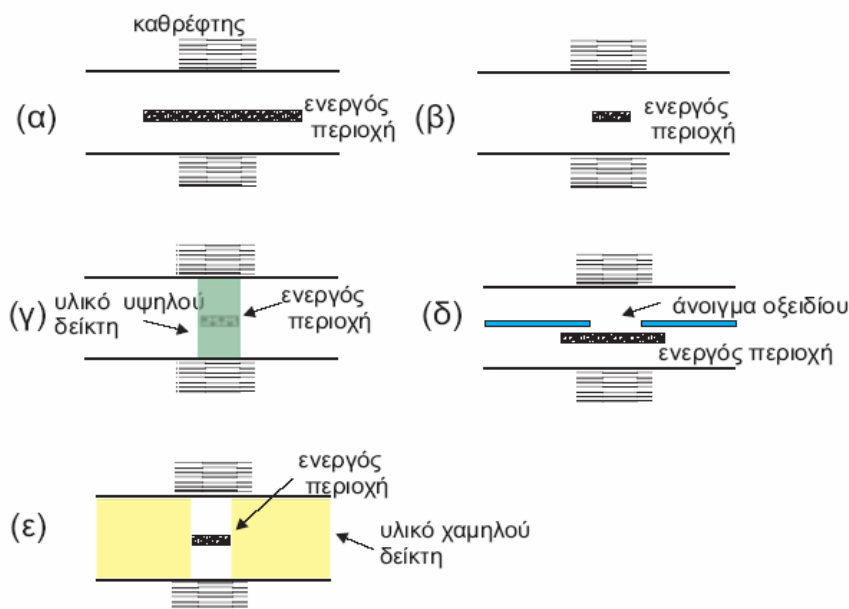
β) Τύπου gain-guide: περιορίζουμε το οπτικό πεδίο στην περιοχή όπου υπάρχει απολαβή. Σε υψηλότερα ρεύματα πόλωσης, εξαιτίας του φαινομένου της χωρικής

εξαφάνισης οπών «spatial hole burning», μπορεί να μεταβληθεί ο τρόπος ταλάντωσης.

γ) Τύπου καλυμμένης ετεροδομής (Buried Heterostructure, BH ): όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, με αυτή τη μέθοδο σχηματίζεται μία ιδανική index-guiding δομή.

δ) Επιλεκτική οξείδωση AIAs: Εξαιτίας της διαφοράς στους δείκτες διάθλασης που παρουσιάζουν το AIAs και τα οξειδωμένα στρώματα AIAs, μπορεί το οπτικό πεδίο να περιοριστεί.

ε) Τύπου anti-guiding: Η γειτονική περιοχή είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε να παρουσιάζει χαμηλότερο δείκτη διάθλασης. Αν και το ρεύμα κατωφλίου είναι αρκετά μεγάλο, αυτή η δομή είναι καλή για να παραμείνει ίδιος ο τρόπος ταλάντωσης ακόμα και σε μεγάλα ρεύματα οδήγησης.



Σχήμα 3-6: Δομές για περιορισμό φωτός

Οι σημαντικότερες παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την κατασκευή των λέιζερ επιφανειακής εκπομπής είναι :

- Ο σχεδιασμός της κοιλότητας συντονισμού
- Οι κατάλληλοι, πολλαπλών στρώσεων καταναμημένοι καθρέφτες DBR για να εξασφαλιστεί μεγάλη ανακλαστικότητα
- Οι οπτικές απώλειες από φαινόμενα όπως επανασύνδεση Auger, απορρόφηση ενδιάμεσης ζώνης, απώλειες διάχυσης και διάθλασης

- Η νόθευση p-τύπου για τη μείωση της ειδικής αντίστασης σε p-τύπου υλικά κατά τη λειτουργία συνεχούς κύματος και για υψηλή απόδοση
- Η απαγωγή θερμότητας για λειτουργία σε υψηλή θερμοκρασία και μεγάλη ισχύ
- Τα επίπεδα Καταστροφικής Οπτικής Βλάβης (Catastrophic Optic Damage, COD), ειδικά σε περιπτώσεις λέιζερ μεγάλης ισχύος [26]

### 3.2.4 Εφαρμογές

- Ιατρική: διόρθωση μυωπίας, ανάλυση βιολογικού ιστού
- Στρατιωτική χρήση: υπέρυθρος φωτισμός
- Οπτικές επικοινωνίες: μετάδοση δεδομένων με οπτικές ίνες, LANs, οπτικές διασυνδέσεις, κινητές διασυνδέσεις
- Computer Optics: συνδέσεις υπολογιστών, υψηλής ταχύτητας/παράλληλη μεταφορά δεδομένων
- Οπτικές μνήμες: CD, DVD, initializer
- Οπτοηλεκτρονικές δομές: εκτυπωτές, laser δείκτες, εξαρτήματα κινητών τηλεφώνων
- Επεξεργασία οπτικής πληροφορίας: οπτικοί επεξεργαστές, παράλληλοι επεξεργαστές
- Οπτικοί αισθητήρες: αισθητήρας οπτικών ινών, ανάγνωση barcode, κωδικοποιητές
- Οθόνες: φανοί πολλαπλής δέσμης, πηγές array light
- Φωτισμός: πηγές υψηλής απόδοσης, μικροδιατάξεις φωτισμού
- Μετάδοση αναλογικού ευρυζωνικού σήματος
- Απορρόφηση- φασματοσκοπία και άλλα. [26]

### 3.2.5 VCSEL 1550nm

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με μεγάλο μήκους κύματος VCSEL, συγκεκριμένα με VCSEL που λειτουργούν στα 1550nm.

Τα VCSEL που εκπέμπουν στα 1550nm είναι μία πολλά υποσχόμενη πηγή για οπτικές και τηλεπικοινωνιακές διασυνδέσεις, εξαιτίας των τεχνολογικά ελκυστικών ιδιοτήτων τους. Το χαμηλό κόστος παραγωγής, το πολύ χαμηλό ρεύμα κατωφλίου, το στενό φασματικό εύρος γραμμής, η σχεδόν μονορρυθμική λειτουργία τους αλλά και οι μεγαλύτερες δυνατότητες ενίσχυσης του σήματος στο συγκεκριμένο μήκος κύματος, είναι μερικές από τις ιδιότητες που έκαναν τους ερευνητές να στραφούν στα VCSEL αυτά. [27], [28]

### 3.3 Φωτοδίοδος

Φωτοδίοδος είναι μία οπτική πηγή η οποία βασίζεται στη αυθόρμητη εκπομπή, σε αντίθεση με το laser που, όπως αναφέραμε προηγουμένως, βασίζεται στην εξαναγκασμένη εκπομπή.

Η φωτοδίοδος μετατρέπει την οπτική ισχύ που προσπίπτει σε ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο ενισχύεται και επεξεργάζεται ώστε να ανακτηθεί η πληροφορία. Η φωτοδίοδος ανιχνεύει μόνο οπτική ισχύ σύμφωνα με τον τετραγωνικό νόμο και δεν μπορεί να ανακτήσει την πλήρη περιγραφή του οπτικού πεδίου.

$$I \propto P = |E * \exp[-j(\omega t + \varphi)]|^2$$

Η πληροφορία της φάσης χάνεται με δύο σημαντικές συνέπειες:

Τα σήματα που είναι διαμορφωμένα κατά φάση θα πρέπει πριν ανιχνευτούν να μετατραπούν σε σήματα διαμόρφωσης κατά πλάτος με αμιγώς οπτικό τρόπο (πχ συμβολόμετρο).

Και ο οπτικός θόρυβος (ο οποίος έχει τυχαία φάση) δεν μπορεί να αναγνωρισθεί και να διαχωρισθεί από το σήμα.

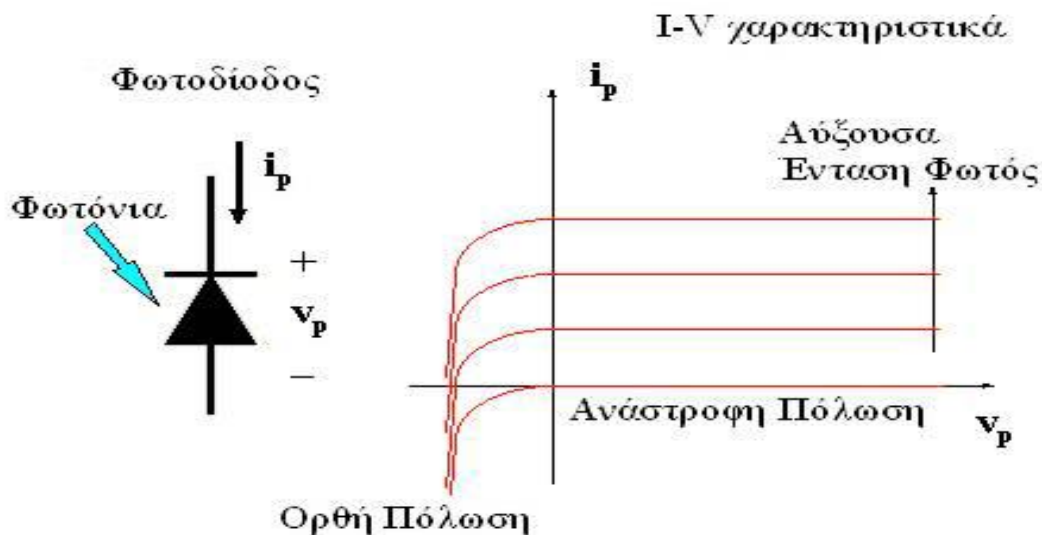
Στα σημερινά οπτικά δίκτυα, οι δύο πιο συνηθισμένοι οπτο-ηλεκτρονικοί δέκτες που χρησιμοποιούνται είναι η φωτοδίοδος τύπου P-N, φωτοδίοδος τύπου P-I-N και η φωτοδίοδος τύπου χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiode ή APD). Η βασικότερη διαφορά μεταξύ τους είναι ότι η δεύτερη προσφέρει κέρδος στο σήμα, ενώ η πρώτη όχι.

#### 3.3.1 Φωτοδίοδος P-N

Η πιο απλή μορφή φωτοδίοδου είναι μία επαφή P-N σε ανάστροφη πόλωση, την οποία έχουμε χρησιμοποιήσει και στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Καθώς αυξάνει η εφαρμοζόμενη τάση, η περιοχή απογύμνωσης διευρύνεται και η διαφορά δυναμικού στην επαφή αυξάνεται. Τα προσπίπτοντα φωτόνια στην επαφή δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, τα οποία επιταχύνονται προς τις άκρες της επαφής και, εν κατακλείδι, συνεισφέρουν σε φωτονικό ρεύμα (photocurrent) στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα.

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την χαρακτηριστική καμπύλη I-V για τη φωτοδίοδο.



Σχήμα 3-7: Χαρακτηριστική καμπύλη P-N φωτοδιόδου

Τα βασικότερα γνωρίσματα μιας P-N φωτοδιόδου είναι η κβαντική απόδοση, ο χρόνος απόκρισης και η περιοχή μήκους κύματος λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα:

- Κβαντική απόδοση

Η κβαντική απόδοση της φωτοδιόδου εκφράζεται ως ο αριθμός των φωτονίων που δημιουργούνται για κάθε ζεύγος ηλεκτρονίων οπών:

$$n = \left(\frac{I_p}{q}\right) \left(\frac{P_{opt}}{h\nu}\right)^{-1}$$

όπου  $P_{opt}$  : η ισχύς του οπτικού σήματος που προσπίπτει στην φωτοδίοδο

$I_p$  : το ρεύμα που δημιουργείται, με

$$I_p = \frac{P_{opt} e (1 - r)}{h\nu} (1 - e^{-ad})$$

$q$ : το φορτίο του ηλεκτρονίου

$h\nu$ : η ενέργεια του φωτονίου.

Η κβαντική απόδοση εξαρτάται από το συντελεστή απορρόφησης του υλικού και αυτός, με τη σειρά του, από το μήκος κύματος.

Κάθε είδος ημιαγωγού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας μήκους κύματος. Συγκεκριμένα, στις σημερινές οπτικές ζεύξεις, τα

υλικά που χρησιμοποιούνται είναι InGaAs και InGaAsP, όταν το μήκος κύματος λειτουργίας είναι στα 1.3μm και στα 1.55μm, ενώ Si για ζεύξεις στα 800nm.

Το φυσικό μέγεθος που συνήθως χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό φωτοδίοδων είναι η αποκρισμότητα (responsivity -  $\mathfrak{R}$ ), το οποίο εκφράζεται ως το πηλίκο του ηλεκτρο-οπτικού ρεύματος προς την οπτική ισχύ που προσπίπτει στη φωτοδίοδο:

$$\mathfrak{R} = \frac{I_p}{P_{in}} = \frac{en}{h\nu} = \frac{en\lambda}{hc} A/W$$

- Χρόνος απόκρισης (Device Time Response)

Ο χρόνος απόκρισης της φωτοδίοδου περιορίζεται από τρεις παράγοντες:

(α) Ο χρόνος που χρειάζονται οι φορείς για να διασχίσουν (drift time) την περιοχή απογύμνωσης λόγω του επιβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου (ανάστροφη πόλωση).

$$t_{drift} = \frac{w}{V_{drift}}$$

(β) Χρόνος διάχυσης (diffusion) φορέων έξω από την περιοχή απογύμνωσης

$$t_{drift} = \frac{d^2}{2D_c}$$

όπου  $D_c$  είναι σταθερά διάχυσης φορέων, η οποία φυσικά είναι διαφορετική για τα ηλεκτρόνια και τις οπές

(γ) Χρονική σταθερά λόγω χωρητικότητας της επαφής (time constant due to junction capacitance)

$$C_j = \frac{\epsilon_s}{w} A$$

όπου  $C_j$  : η χωρητικότητα της επαφής

$\epsilon_s$  : η ηλεκτρική επιδεκτικότητα (permittivity) του ημιαγώγιμου υλικού

$w$  : το μήκος της περιοχής απογύμνωσης

### Ανάλυση θορύβου

Στο το παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι όταν η οπτική ισχύς είναι μηδενική, το ρεύμα που δημιουργείται είναι και αυτό μηδενικό. Στην πραγματικότητα αυτό ισχύει κατά προσέγγιση, μιας και ένα πολύ μικρό ποσό ρεύματος διαχέεται από την

επαφή. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται ρεύμα σκότους (dark current) και είναι της τάξης των nA.

Εκτός από το ρεύμα σκότους, υπάρχει ο θερμικός θόρυβος (Thermal Noise). Ο θερμικός θόρυβος πηγάζει από την τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων, η οποία είναι πάντα παρούσα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Επιπλέον, υπάρχει ο θόρυβος βολής (Shot Noise) που προέρχεται από την τυχαία κατανομή των ηλεκτρονίων, ακόμα και αν η οπτική ισχύς είναι σταθερή. Οι τυπικές αποκλίσεις των θορύβων αυτών δίνονται παρακάτω:

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{4k_B T}{R} B_e$$

$$\sigma_{shot}^2 = 2eIB_e$$

Τέλος, δεν θα πρέπει να ξεχνάμε τυχόν θόρυβο από ηλεκτρικούς ενισχυτές σήματος. Αν για παράδειγμα μετά την φωτοδίοδο περιλαμβάνεται και ηλεκτρονικός ενισχυτής, όπως συμβαίνει συνήθως σε ένα οπτο-ηλεκτρικό δέκτη, τότε πρέπει να συμπεριληφθεί και η εικόνα θορύβου του ενισχυτή (noise figure), η οποία είναι ο λόγος του SNR στην είσοδο προς το SNR στην έξοδο του ενισχυτή (SNR=Signal-to-Noise-Ratio). Επομένως ο θερμικός θόρυβος του δείκτη γίνεται:

$$\sigma_{thermal}^2 = \frac{4k_B T}{R} F_n B_e$$

όπου  $F_n$ : η εικόνα θορύβου του ενισχυτή με τυπικές τιμές από 3dB έως 5dB

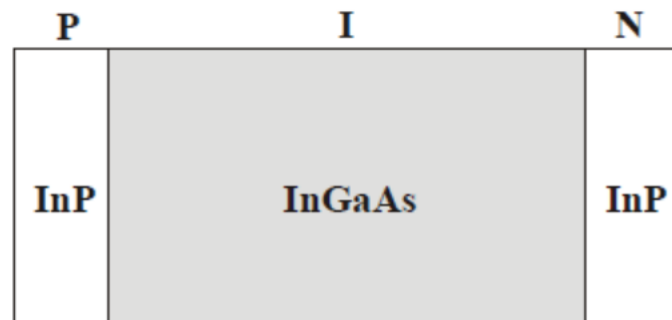
Πολύ χρήσιμο φυσικό μέγεθος είναι το Noise- Equivalent- Power (NEP). Το NEP εκφράζει την οπτική ισχύ ενός μήκους κύματος ή ενός συγκεκριμένου φασματικού εύρους που χρειάζεται μία φωτοδίοδος για να δημιουργήσει ρεύμα ίσο με το RMS ρεύμα θορύβου σε μοναδιαίο εύρος ζώνης. Οι μονάδες μέτρησης είναι pW/√Hz.

### 3.3.2 Φωτοδίοδος P-I-N

Η φωτοδίοδος PIN μοιάζει με την PN με τη διαφορά ότι ανάμεσα στην PN επαφή έχει εισαχθεί μία ενδογενής επίστρωση (intrinsic region). Σκοπός της εισαγωγής αυτής είναι να αυξηθεί η ενεργός περιοχή της συσκευής και να μεγιστοποιηθεί έτσι η απορρόφηση των προσπιπτόντων φωτονίων (αύξηση δηλαδή της αποδοτικότητας της συσκευής). Όσο αυξάνεται όμως αυτή η περιοχή, τόσο πιο πολύ χρόνο χρειάζονται τα ηλεκτρόνια και οι οπές να διαχυθούν στα ηλεκτρόδια. Επομένως, υπάρχει ένα ισοζύγιο μεταξύ απόδοσης και χρονικής απόκρισης της συσκευής.



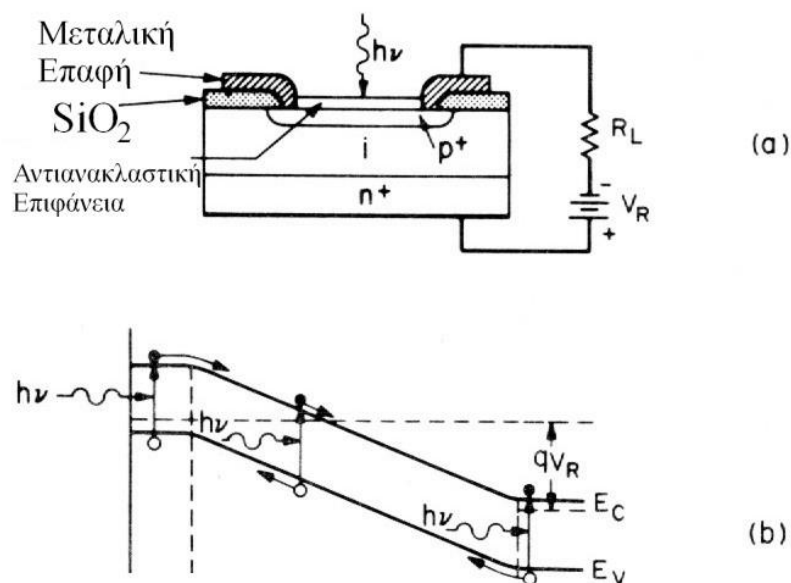
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται σε απλουστευμένη μορφή η δομή μιας PIN φωτοδιόδου:



Σχήμα 3-8: Διάγραμμα απλουστευμένης ετεροδομικής φωτοδιόδου

Στις φωτοδιόδους PIN, οι περιοχές P και N κατασκευάζονται πολύ λεπτές έτσι ώστε το μεγαλύτερο ποσοστό απορρόφησης να γίνεται στην ενδογενή περιοχή, μειώνοντας τους ανασυνδιασμούς στην επιφάνεια (surface recombination). Σήμερα, οι εμπορικά διαθέσιμες φωτοδιόδους, βασίζονται κατά κανόνα σε διπλή ετεροδομή, όπου οι περιοχές P και N είναι κατασκευασμένες από διαφορετικό υλικό, διάφανο στο μήκος κύματος λειτουργίας. Έτσι, όλη η απορρόφηση γίνεται στην ενδογενή περιοχή αυξάνοντας της απόδοση της συσκευής.

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το διάγραμμα λειτουργίας μίας PIN φωτοδιόδου (α) σε διατομή απεικονίζοντας τις επιστρώσεις και (β) το ενεργειακό διάγραμμα.



Σχήμα 3-9: Σχεδιάγραμμα λειτουργίας PIN φωτοδιόδου

### 3.3.3 Φωτοδίοδος Χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiode)

Το βασικότερο γνώρισμα της φωτοδιόδου PIN είναι το γεγονός ότι για κάθε προσπίπτον φωτόνιο, μόνο ένα ηλεκτρόνιο δημιουργείται. Οι φωτοδιόδοι αυτού του τύπου παρουσιάζουν κέρδος το οποίο προέρχεται από το φαινόμενο χιονοστιβάδας της επαφής pn. Όταν ένα φωτόνιο δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής, αυτό επιταχύνεται προς τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια, όπως και στην περίπτωση της PIN φωτοδιόδου. Στην περίπτωση όμως που το ηλεκτρόνιο «δει» ένα πολύ ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, μπορεί να αποκτήσει αρκετή ενέργεια ώστε να διεγείρει κι άλλα ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και αντίστοιχα η οπή, άλλες οπές από τη ζώνη αγωγιμότητας στη ζώνη σθένους. Αυτά τα δευτερεύοντα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών μπορούν να διεγείρουν και άλλα ζεύγη, αν έχουν αρκετή ενέργεια. Το φαινόμενο ονομάζεται πολλαπλασιασμός χιονοστιβάδας (avalanche photodiode) και είναι ο πρωταρχικός παράγοντας για τον οποίο παρουσιάζει κέρδος η συγκεκριμένη κατηγορία φωτοδίοδων.

Ο αριθμός των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών που θα δημιουργηθούν από ένα πρωταρχικό ηλεκτρόνιο είναι τυχαίος και η μέση τιμή αυτού του αριθμού ονομάζεται πολλαπλασιαστικό κέρδος (multiplicative gain) της φωτοδιόδου. Θεωρητικά, ο όρος αυτός μπορεί να αποκτήσει αρκετά μεγάλες τιμές. Στην περίπτωση αυτή όμως, η τυπική απόκλιση του ηλεκτρικού ρεύματος που δημιουργείται (photocurrent) αυξάνει με αποτέλεσμα να υποβαθμίζει την επίδοση της συσκευής ως προς τον θόρυβο. Αυτός είναι και ο βασικότερος λόγος που δε χρησιμοποιούνται πλέον στις οπτικές ζεύξεις. Αντίθετα το σήμα συνηθίζεται να ενισχύεται από ειδικούς ενισχυτές πολύ χαμηλού θορύβου (FET).

### 3.3.4 Φωτοδιόδοι Schottky

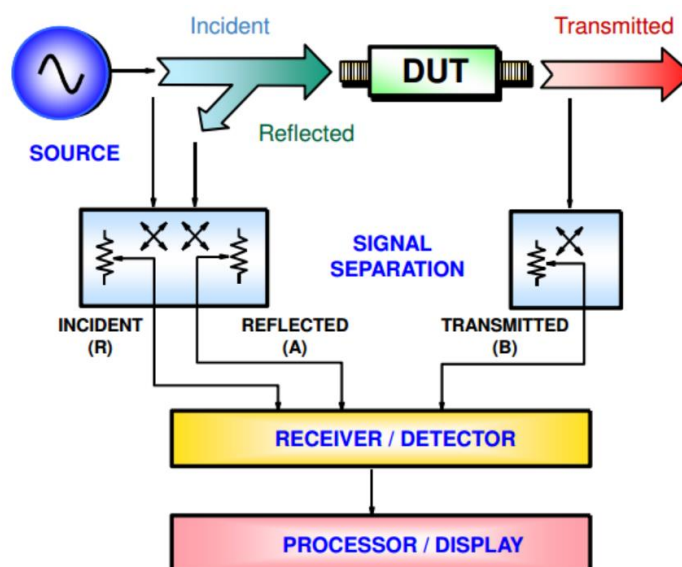
Στις φωτοδιόδους Schottky, στη θέση της P περιοχής τοποθετείται μία πολύ λεπτή μεταλλική επιφάνεια. Όπως και οι PIN φωτοδιόδοι, έτσι και οι Schottky χρησιμοποιούνται για υπέρ-υψηλές ταχύτητες διάδοσης δεδομένων, όπου υψηλό εύρος ζώνης είναι απαραίτητο. Ο χρόνος απόκρισης των φωτοδίοδων αυτού του τύπου είναι πολύ μικρός επειδή ο χρόνος διάχυσης των φορέων στο μέταλλο είναι επίσης μικρός. [29]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4.1 Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου (Vector Network Analyzer - VNA)

Ο διανυσματικός αναλυτής δικτύου (VNA) είναι ένα μετρητικό όργανο το οποίο ελέγχει την απόκριση RF εξαρτημάτων ή δικτύων σαν συνάρτηση της συχνότητας ενός συνεχούς εφαρμοζόμενου μη-διαμορφωμένου RF σήματος. Ο VNA μετράει την απόκριση του δικτύου ανά μία συχνότητα τη φορά, αλλά μεταβάλλει τη συχνότητα μέτρησης σε ένα εύρος συχνοτήτων πολύ γρήγορα, κάνοντας εκατοντάδες μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο. Ο όρος διανυσματικός αναφέρεται στο γεγονός ότι ο VNA εκτός από το πλάτος μετράει και τη φάση ενός RF σήματος. Συντίθεται από μία εσωτερική RF πηγή και πολλαπλούς δέκτες για τη μέτρηση των RF εξαρτημάτων. Η έξοδος στην οθόνη μπορεί να είναι είτε χαρακτηριστικές σε X-Y άξονες, είτε πολικές απεικονίσεις, είτε απεικονίσεις σε διάγραμμα Smith. Έχει σχεδιαστεί κυρίως για τη μέτρηση της ευθείας και ανάστροφης διάδοσης των σημάτων. Η κύρια λειτουργία του VNA είναι η μέτρηση της σύνθετης αντίστασης ενός κυκλώματος σε μια δεδομένη συχνότητα μέσω της οποίας πραγματοποιείται ο καθορισμός των s-parameters ενός διθύρου, καθώς επίσης μετρήσεις προσαρμογής, μετρήσεις φάσης, μετρήσεις καθυστέρησης ομάδας (group delay), και μετρήσεις ισχύος (ισχύς εξόδου συναρτήσει ισχύος εισόδου, 1dB compression point) [31].

Στο σχήμα 4-1 φαίνεται το block διάγραμμα του VNA κ στο σχήμα 4-2 ο VNA που χρησιμοποιήσαμε στο εργαστήριο:



Σχήμα 4-1: Block διάγραμμα Διανυσματικού Αναλυτή Δικτύου[32]



Σχήμα 4-2: Anritsu Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου

Για να μπορέσει να μετρηθεί το προσπίπτον, το ανακλώμενο και το διαδιδόμενο σήμα απαιτούνται τέσσερα τμήματα:

- Πηγή για διέγερση
- Εξαρτήματα διαχωρισμού σήματος
- Δείκτες, οι οποίοι μετατρέπουν τις υψηλές συχνότητες σε χαμηλές και ανιχνεύουν τα σήματα
- Επεξεργαστή και οθόνη για υπολογισμό και προβολή των αποτελεσμάτων

Πιο συγκεκριμένα:

#### Πηγή

Η πηγή σημάτων παρέχει τη διέγερση για το αυτοδιεγειρόμενο σύστημα του VNA. Μπορεί γίνει είτε σάρωση της συχνότητας της πηγής, είτε σάρωση του επιπέδου ισχύος της.

#### Διαχωρισμός σήματος

Το τμήμα διαχωρισμού σήματος επιτελεί τη σημαντικότερη λειτουργία. Το υλικό (hardware) του τμήματος αυτού είναι υπεύθυνο για δύο λειτουργίες. Η πρώτη αφορά τη μέτρηση του προσπίπτοντος σήματος που λειτουργεί ως σήμα αναφοράς. Αυτό μπορεί να γίνει με διαχωριστές (splitters) ή με κατευθυντικούς ζεύκτες (directional couplers). Η δεύτερη λειτουργία είναι ο διαχωρισμός των προσπιπτόντων και των ανακλώμενων διαδιδόμενων κυμάτων στην είσοδο της προς

μέτρηση συσκευής (Device Under Test - DUT). Και σε αυτή την περίπτωση είναι ιδανική η χρησιμοποίηση ζευκτών με μεγάλη κατευθυντικότητα, χαμηλές απώλειες και υψηλή ανάστροφη απομόνωση.

### Ανιχνευτές

Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι για την ανίχνευση των σημάτων στους αναλυτές δικτύου. Ο πρώτος είναι η χρησιμοποίηση διόδων ανίχνευσης, οι οποίες μετατρέπουν το RF σήμα σε ένα αντίστοιχο DC επίπεδο και ονομάζεται AC ανίχνευση. Η ανίχνευση της διόδου είναι βαθμωτή καθώς οι πληροφορίες φάσης της RF συνιστώσας χάνονται. Ο δεύτερος τρόπος είναι η χρησιμοποίηση συντονισμένου δέκτη (tuned receiver), ο οποίος χρησιμοποιεί έναν τοπικό ταλαντωτή και έναν μείκτη για να μετατρέψει το RF σήμα σε χαμηλότερη (μεσαία) συχνότητα (IF). Ο τοπικός ταλαντωτής κλειδώνει είτε στο RF είτε στο IF σήμα, έτσι ώστε ο αναλυτής δικτύου να είναι συντονισμένος πάντα στην παρουσία του RF σήματος στην είσοδό του. Το IF σήμα φιλτράρεται από ζωνοπερατό φίλτρο, το οποίο στενεύει το εύρος του δέκτη και βελτιώνει το δυναμικό εύρος. Οι σύγχρονοι αναλυτές δικτύου χρησιμοποιούν A-D μετατροπέα και ψηφιακή επεξεργασία σήματος για να εξάγουν τις πληροφορίες πλάτους και φάσης από το IF σήμα.

### Επεξεργαστής και οθόνη

Το τελευταίο στάδιο είναι το τμήμα επεξεργασίας και απεικόνισης. Σε αυτό το στάδιο τα δεδομένα της ανάκλασης και της διάδοσης μετατρέπονται σε τέτοια μορφή ώστε να είναι εύκολο να μεταφραστούν σε κατανοητά αποτελέσματα μετρήσεων. Οι περισσότεροι αναλυτές δικτύου διαθέτουν παρόμοια χαρακτηριστικά, όπως γραμμικές και λογαριθμικές σαρώσεις, γραμμικές και λογαριθμικές μορφές, πολικές απεικονίσεις, απεικονίσεις σε διάγραμμα Smith κτλ.[34]

## **4.2 Βαθμονόμηση του Διανυσματικού Αναλυτή Δικτύου (VNA Calibration)**

Σε κάθε εξοπλισμό υπάρχουν ατέλειες που οδηγούν σε λάθη. Τέτοιοι παράγοντες είναι συνήθως επαναλαμβανόμενοι και προβλέψιμοι σε σχέση με το χρόνο ή τη θερμοκρασία και μπορούν να απαλειφθούν σχετικά εύκολα από μελλοντικές μετρήσεις.

Αυτό ουσιαστικά που υλοποιείται είναι η μέτρηση του πλάτους και της απόκρισης φάσης διαφόρων συσκευών των οποίων τα χαρακτηριστικά είναι γνωστά, και η σύγκρισή τους με τις λαμβανόμενες μετρήσεις. Ρυθμίζεται - αντισταθμίζεται έτσι ο VNA ούτως ώστε οι λαμβανόμενες μετρήσεις όσο το δυνατόν να ταυτίζονται με τις δεδομένες, και έτσι ο VNA ώστε να «αντισταθμίζει» την μη ιδανική συμπεριφορά του (τόσο του ίδιου, όσο και των λοιπών εξαρτημάτων ή παραγόντων όπως για παράδειγμα: μη αμελητέο μήκος ομοαξονικών καλωδίων, μη καλή προσαρμογή των αντιστάσεων των γραμμών μεταφοράς κτλ).

Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι βαθμονόμησης, η επιλογή των οποίων εξαρτάται από παράγοντες όπως τα μέσα και ο εξοπλισμός ο οποίος διατίθεται, η επιθυμητή ακρίβεια, ο χρόνος πραγματοποίησής της και η προσπάθεια που καταβάλλεται.

#### **4.2.1 Τύποι Σφαλμάτων**

Στον VNA και σε όλες τις μετρητικές διατάξεις εμφανίζονται τρεις τύποι σφαλμάτων:

- Συστηματικά σφάλματα (Systematic errors)
- Τυχαία σφάλματα (Random errors)
- Σφάλματα που εμφανίζονται στην πορεία (Drift errors)

##### Συστηματικά σφάλματα

Συστηματικά είναι τα σφάλματα που οφείλονται σε ατέλειες του VNA και των ρυθμίσεων μετρήσεων. Είναι επαναλαμβανόμενα και μη-τυχαία και μπορούν να εντοπιστούν με τη διαδικασία του calibration και να απαλειφθούν μαθηματικά κατά τη διαδικασία των μετρήσεων. Τα συστηματικά σφάλματα που εμφανίζονται σε μετρήσεις δικτύων σχετίζονται με τη διαρροή του σήματος, τις ανακλάσεις του σήματος και την απόκριση συχνότητας. Υπάρχουν έξι τύποι συστηματικών σφαλμάτων:

- Σφάλματα που σχετίζονται με τη διαρροή του σήματος: η κατευθυντικότητα (directivity) και οι παρεμβολές (crosstalk)
- Σφάλματα που σχετίζονται με την ανάκλαση του σήματος: οι αστοχίες στην προσαρμογή της πηγής και στην προσαρμογή του φορτίου
- Σφάλματα που σχετίζονται με την απόκριση συχνότητας: Η ευθυγράμμιση ανάκλασης (reflection tracking) και η ευθυγράμμιση μετάδοσης (transmission tracking).

Σύμφωνα με το δίθυρο μοντέλο υπάρχουν 12 συνολικά παράγοντες που προκαλούν σφάλματα. Οι έξι προαναφερθέντες για την ευθεία κατεύθυνση και οι ίδιοι έξι για την αντίθετη[31].

### Τυχαία σφάλματα

Τα τυχαία σφάλματα δεν μπορούν να προβλεφθούν και κατά συνέπεια να εντοπιστούν και να απομακρυνθούν με τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Οι κυριότερες αιτίες αυτών των λαθών είναι ο θόρυβος του οργάνου και η επαναληψιμότητα των συνδέσεων.[32]

### Σφάλματα που εμφανίζονται στην πορεία

Τέτοια σφάλματα προκύπτουν όταν αλλάζει η συμπεριφορά του συστήματος παρά το γεγονός ότι έχει προηγηθεί βαθμονόμηση. Προκαλούνται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας και μπορούν να απαλειφθούν με νέα βαθμονόμηση.[32]

## **4.2.2 Τύποι Βαθμονόμησης**

Κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης γίνεται χαρακτηρισμός των παραγόντων που οδηγούν σε συστηματικά σφάλματα, μετρώντας γνωστά πρότυπα (standards). Οι μετρήσεις αυτές αποθηκεύονται στη μνήμη του αναλυτή και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα μοντέλα σφαλμάτων, αφαιρείται η επίδρασή τους από τις μελλοντικές μετρήσεις. Τα πρότυπα αυτά συνοδεύουν τον αναλυτή και είναι συνήθως ανοιχτά κυκλώματα (open), βραχυκυκλώματα (short), απλές ζεύξεις (through), γνωστά φορτία (loads) ή ακόμα και αυθαίρετες αντιστάσεις. Υπάρχουν διάφοροι τύποι βαθμονόμησης, οι οποίοι διακρίνονται ανάλογα με τους παράγοντες συστηματικών σφαλμάτων που αφαιρούν και τα γνωστά πρότυπα που χρειάζονται για να υλοποιηθούν. Οι κυριότεροι τύποι βαθμονόμησης περιγράφονται παρακάτω:

### Βαθμονόμηση Απόκρισης (Response Calibration)

Η βαθμονόμηση απόκρισης είναι απλή στην υλοποίηση, αλλά από τους δώδεκα παράγοντες συστηματικών λαθών διορθώνει μόνο την ευθυγράμμιση μετάδοσης (transmission tracking) και την ευθυγράμμιση ανάκλασης (reflection tracking), με αποτέλεσμα να μην οδηγεί σε μετρήσεις μεγάλης ακρίβειας. Για μετρήσεις στην κατεύθυνση της μετάδοσης γίνεται η σύνδεση ενός through μεταξύ των δύο θυρών

μέτρησης του αναλυτή δικτύου (πριν συνδεθεί η συσκευή που πρόκειται να μετρηθεί). Έτσι μετράται το πλάτος και η φάση της σύνδεσης του through και στη συνέχεια η επίδρασή τους αφαιρείται από τα δεδομένα που θα προκύψουν από τις μετρήσεις της DUT. Για μετρήσεις ανάκλασης το πρότυπο που συνδέεται είναι βραχυκύκλωμα (short) ή ανοικτοκύκλωμα (open). Είναι η απλούστερη και συντομότερη χρονικά διαδικασία βαθμονόμηση, αλλά ενδείκνυται μόνο για μετρήσεις που δεν απαιτείται ακρίβεια.[32]

### Μονόθυρη Βαθμονόμηση (One-Port Calibration)

Κατά τη διαδικασία της μονόθυρης βαθμονόμησης μπορούν να μετρηθούν και να απομακρυνθούν τρεις συστηματικοί παράγοντες λαθών (κατευθυντικότητα, προσαρμογή πηγής, ευθυγράμμιση ανάκλασης), μόνο όμως σε ανακλαστικές μετρήσεις (δηλαδή διορθώνονται μόνο οι παράμετροι ανάκλασης  $S_{11}$  ,  $S_{22}$ -αναλυτικά οι S-parameters σε επόμενη ενότητα). Για να εξάγουμε αυτούς τους παράγοντες καταστρώνουμε τρεις εξισώσεις με τρεις αγνώστους, μετρώντας τρία γνωστά πρότυπα βαθμονόμησης. Αυτά μπορεί να είναι ένα ανοικτοκύκλωμα, ένα βραχυκύκλωμα και ένα φορτίο (συνήθως ίσο με τη χαρακτηριστική αντίσταση του συστήματος μετρήσεων 50 ή 75Ω). Λύνοντας αυτές τις εξισώσεις εντοπίζονται οι παράγοντες λαθών και γίνεται δυνατό να εξαχθούν οι πραγματικές S-παράμετροι ανάκλασης της DUT.

Όταν μετρώνται δίθυρα εξαρτήματα, η πραγματοποίηση μονόθυρης βαθμονόμησης προϋποθέτει καλό τερματισμό της αξιοσημείωτης θύρας της DUT. Τότε η μονόθυρη βαθμονόμηση είναι αρκετά ακριβής. Αν η θύρα 2 της DUT είναι συνδεδεμένη στον αναλυτή δικτύου και η ανάστροφη απομόνωση είναι χαμηλή (πχ όταν έχουμε ζωνοπερατά φίλτρα ή καλώδια χαμηλών απωλειών) τότε η προϋπόθεση του καλού τερματισμού δεν ισχύει. Σε αυτή την περίπτωση η δίθυρη βαθμονόμηση δίνει πολύ καλύτερο αποτέλεσμα. Ένα παράδειγμα όπου η μονόθυρη βαθμονόμηση είναι αποδοτική είναι ο ενισχυτής (amplifier), όπου λόγω της ανάστροφης απομόνωσής του, η προσαρμογή φορτίου που παρουσιάζεται από τον αναλυτή δικτύου δεν επηρεάζει τις μετρήσεις της προσαρμογής εισόδου του.

### Πλήρης Δίθυρη Βαθμονόμηση (Full 2-Port Calibration)

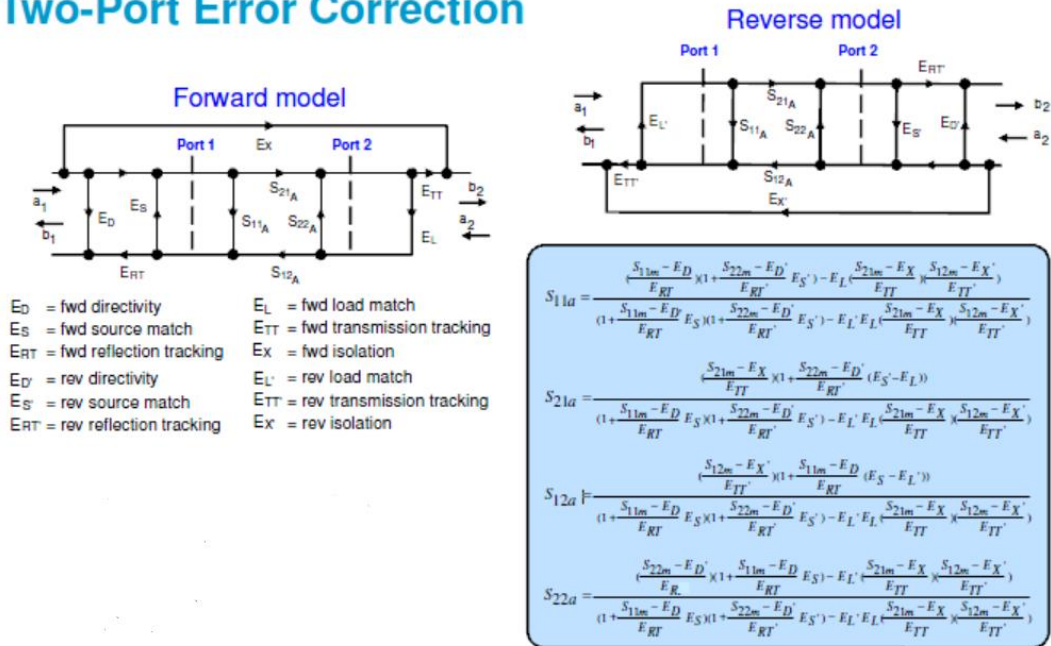
Με την πλήρη δίθυρη βαθμονόμηση επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ακρίβεια στις μετρήσεις δίθυρων εξαρτημάτων. Μετράει και τους 12 συστηματικούς παράγοντες σφαλμάτων. Συνήθως απαιτεί δώδεκα μετρήσεις πάνω σε τέσσερα γνωστά πρότυπα Sort- Open- Load- Through (γνωστή ως SOLT βαθμονόμηση). Για να μετρηθούν όλες οι S-παράμετροι πρέπει ο αναλυτής δικτύου να κάνει αρχικά ευθεία και στη



συνέχεια αντίθετη σάρωση. Η βαθμονόμηση αυτή είναι αποδοτική τόσο σε μετρήσεις μετάδοσης όσο και σε ανακλαστικές μετρήσεις.

Όταν πραγματοποιείται δίθυρη βαθμονόμηση μπορεί να παραληφθεί το μέρος της βαθμονόμησης του crosstalk. Γενικά η βαθμονόμηση του crosstalk προσθέτει θόρυβο στο μοντέλο σφαλμάτων, καθώς συνήθως οι μετρήσεις γίνονται κοντά στο κατώτερο όριο θορύβου του αναλυτή. Γι αυτό το λόγο πρέπει να πραγματοποιείται μόνο όταν είναι απαραίτητο.[33]

## Two-Port Error Correction



Σχήμα 4-3: Παράγοντες σφαλμάτων στην πλήρη δίθυρη βαθμονόμηση[32]

### Ενισχυμένη Βαθμονόμηση Απόκρισης

Η ενισχυμένη βαθμονόμηση απόκρισης συνδυάζει τη βαθμονόμηση απόκρισης με την μονόθυρη βαθμονόμηση για να μπορέσει να διορθώσει την προσαρμογή πηγής κατά τη διάρκεια μετρήσεων μετάδοσης, πράγμα το οποίο δεν μπορεί να πετύχει η απλή βαθμονόμηση απόκρισης. Απαιτεί τη μέτρηση των προτύπων SOLT για μετρήσεις μετάδοσης.

### TRL Calibration

Κατά την πραγματοποίηση της δίθυρης βαθμονόμησης, εκτός από την διαδεδομένη SOLT βαθμονόμηση, υπάρχει και η TRL (Through-Reflect-Line) βαθμονόμηση, η οποία έχει αναπτυχθεί για την πραγματοποίηση μικροκυματικών μετρήσεων με

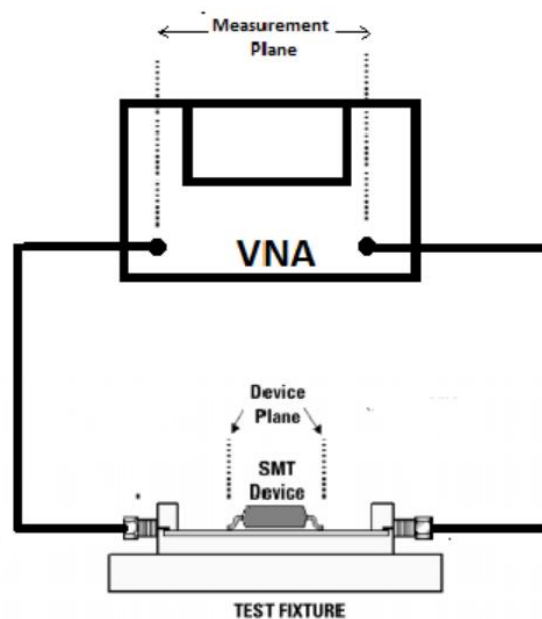
μεγάλη ακρίβεια σε μη-ομοαξονικά περιβάλλοντα, όπως κυματοδηγούς ή για την πραγματοποίηση μετρήσεων πάνω σε πλακέτα (on-wafer measurements). Η TRL βαθμονόμηση χρησιμοποιεί το ίδιο μοντέλο σφαλμάτων των 12 παραγόντων με τη SOLT, αλλά με διαφορετικά πρότυπα. Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματά της είναι ότι τα πρότυπα που χρησιμοποιεί είναι εύκολο να κατασκευαστούν στις μικροκυματικές συχνότητες, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι είναι δύσκολο να κατασκευαστούν καλά μη-ομοαξονικά πρότυπα ανοικτών κυκλωμάτων και φορτίων σε αυτές τις συχνότητες. Χρησιμοποιεί σαν πρότυπο μια γραμμή μετάδοσης (transmission line) με γνωστό μήκος και αντίσταση. Ο μόνος περιορισμός είναι ότι η αντίσταση και το ηλεκτρικό μήκος των προτύπων γραμμής πρέπει να είναι γνωστά, ενώ τα πρότυπα ανάκλασης μπορεί να είναι οποιεσδήποτε συσκευές υψηλής ανάκλασης (συνήθως ένα βραχυκύκλωμα ή ένα ανοικτοκύκλωμα) του οποίου η αντίσταση δεν απαιτείται να είναι καλά χαρακτηρισμένη, αλλά πρέπει να είναι η ίδια και για τις δύο θύρες του αναλυτή. Επειδή η TRL απαιτεί αναλυτή δικτύου με 4 δέκτες, σε αναλυτές με 3 δέκτες χρησιμοποιείται μία παραλλαγή της TRL, η οποία υποθέτει ότι η προσαρμογή πηγής και φορτίου της θύρας μέτρησης είναι ίσες (δηλαδή ότι υπάρχει συμμετρία αντίστασης στις μετρήσεις μετάδοσης και ανάκλασης). Άλλες παραλλαγές της TRL είναι η LRL (Line-Reflect-Line), η LRM (Line-Reflect-Match) και η TRM (Through-Reflect-Match).[31][34]

### On Wafer Calibration

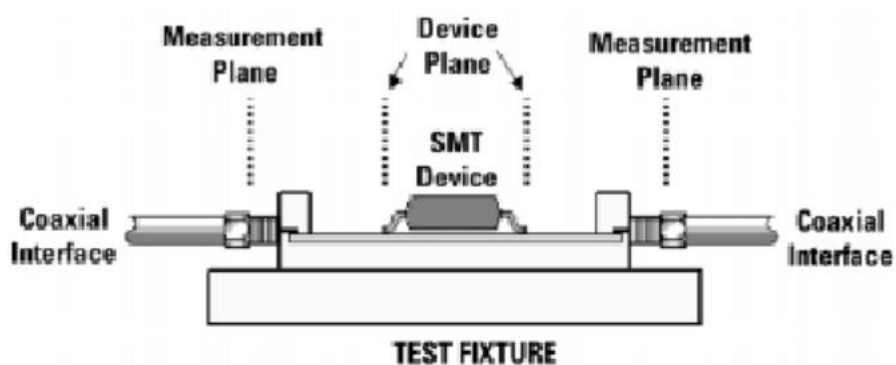
Οι on-wafer μετρήσεις είναι μία πολύ σημαντική κατηγορία μετρήσεων. Τα εξαρτήματα προς μέτρηση, καθώς επίσης και τα πρότυπα βαθμονόμησης βρίσκονται πάνω σε πλακέτα (on-wafer). Οι κυριότεροι τύποι βαθμονόμησης που χρησιμοποιούνται σε αυτή την περίπτωση είναι η SOLT, η LRL και η TRM. Η SOLT είναι η πλέον διαδεδομένη και βρίσκει εφαρμογή σε μετρήσεις σε υψηλές συχνότητες (μέχρι και τα 110GHz). Η LRL στηρίζεται σε γραμμές μετάδοσης γνωστού μήκους για το πρότυπο της αντίστασης, ενώ απαιτεί και ένα πρότυπο ανάκλασης όπως πχ ένα ανοικτό κύκλωμα. Απαιτεί επίσης δύο γραμμές μετάδοσης διαφορετικού μήκους. Η διαφορά του ηλεκτρικού μήκους των γραμμών πρέπει να είναι περιττό πολλαπλάσιο του  $\frac{1}{4}$  του μήκους κύματος  $\lambda$  ( $\lambda/4$ ), ενώ η βέλτιστη διαφορά φάσης που μπορεί να έχουν είναι  $90^\circ$ . Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της LRL είναι ότι αφού πραγματοποιηθεί μπορούν να μετρηθούν οι παράμετροι σκέδασης δίθυρων δικτύων με οποιοδήποτε συνδυασμό συνδέσεων. Τα πρότυπα της LRL μπορούν να κατασκευαστούν πάνω σε πλακέτα (on-wafer). Η LRM χρησιμοποιείται επίσης για μετρήσεις πάνω σε πλακέτα. Η προσαρμογή (match) πρέπει να είναι ένας τέλειος ευρυζωνικός τερματισμός. Όπως και στην LRL το πρότυπο της ανάκλασης πρέπει να είναι επαναχρησιμοποιούμενο.[31][34]

### 4.3 Βαθμονόμηση στο Εργαστήριο

Η διαδικασία της βαθμονόμησης είναι ουσιαστικά η διόρθωση των ατελειών και των ελαττωμάτων των μετρητικών διατάξεων και των εξαρτημάτων που παρεμβάλλονται μεταξύ των θυρών του αναλυτή δικτύου και της προς μέτρηση συσκευής (Device Under Test-DUT) (καλώδια, προσαρμογείς, κεφαλές). Αρχικά το επίπεδο των μετρήσεων (measurement plane) είναι στις θύρες του αναλυτή δικτύου. Μετά τη βαθμονόμηση το επίπεδο μετρήσεων βρίσκεται στις θύρες της DUT.

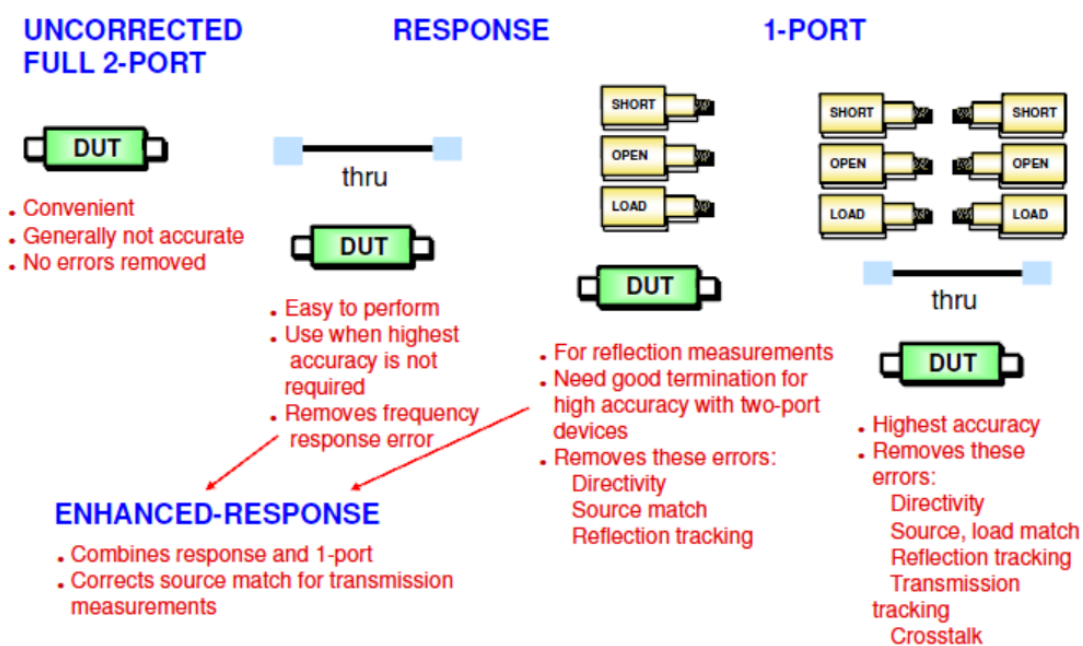


Σχήμα 4-4: Επίπεδο μετρήσεων πριν τη βαθμονόμηση



Σχήμα 4-5: Επίπεδο μετρήσεων μετά τη βαθμονόμηση

Στην πράξη η διαδικασία της βαθμονόμησης στους αναλυτές δικτύου είναι μία αυτοματοποιημένη διαδικασία. Υπάρχουν έτοιμα πρότυπα (φορτία, ανοικτά κυκλώματα, βραχυκυκλώματα, through κτλ) για κάθε περιβάλλον, τα οποία διατίθενται στο εμπόριο ομαδοποιημένα σαν calibration kit. Το calibration kit μπορεί να περιλαμβάνει είτε ομοαξονικά πρότυπα, είτε πρότυπα σε ολοκληρωμένη μορφή (on-chip) και συνοδεύεται από τα ιδανικά αποτελέσματα των μετρήσεων των προτύπων (calibration set), οι οποίες εισάγονται και αποθηκεύονται στην ενσωματωμένη μνήμη του αναλυτή δικτύου. Έτσι κάθε φορά που γίνεται βαθμονόμηση του αναλυτή δικτύου με ένα συγκεκριμένο calibration kit, ο αναλυτής με βάση τις μετρήσεις που έχει αποθηκευμένες και τα αποτελέσματα που μετράει στα πρότυπα, εκτελεί τις κατάλληλες μαθηματικές πράξεις και αφαιρεί μαθηματικά οτιδήποτε παρεμβάλλεται ανάμεσα στις θύρες και στη DUT. Ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται τα πρότυπα, καθώς και το εύρος των συχνοτήτων για το οποίο θα γίνει η βαθμονόμηση δίνεται μέσω απλών βημάτων από το λογισμικό του αναλυτή δικτύου.[34]

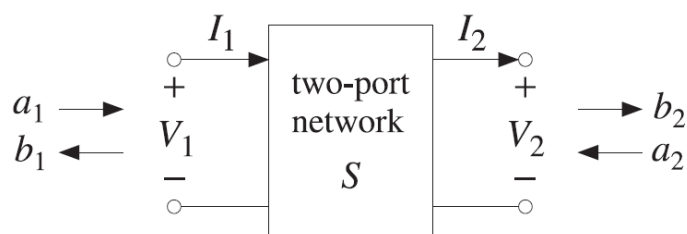


Σχήμα 4-6: Τύποι βαθμονόμησης[32]

## 4.4 Παράμετροι Διασποράς (Scattering Parameters, S-parameters)

### 4.4.1 Γενικά

Τα γραμμικά δίκτυα, είτε αυτά είναι μονόθυρα, είτε δίθυρα είτε περισσότερων θυρών, χαρακτηρίζονται από μια σειρά κυκλωματικών παραμέτρων οι οποίες μπορούν σε κάθε περίπτωση να αναπαρασταθούν μέσω των αντίστοιχων πινάκων. Έτσι στην περίπτωση ενός δίθυρου δικτύου - με το οποίο ασχολούμαστε στην παρούσα διπλωματική εργασία το δίθυρο - μπορεί να χαρακτηριστεί από τέσσερις συνολικά  $N \times N$  (με  $N=2$ ) τετραγωνικούς πίνακες: την μήτρα μεταφοράς (transfer matrix), την μήτρα αντίστασης (impedance matrix), την μήτρα αγωγιμότητας (admittance matrix) και τέλος, την μήτρα σκέδασης (scattering matrix).



Σχήμα 4-7: Δίθυρο δίκτυο

#### Μήτρα μεταφοράς

Η μήτρα μεταφοράς (transfer matrix) συνδέει την τάση και το ρεύμα της θύρας 1 με την τάση και το ρεύμα της θύρας 2.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Όπου  $T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$

#### Μήτρα αντίστασης

Η μήτρα αντίστασης (impedance matrix) δίνει την σχέση μεταξύ των δύο τάσεων της κάθε θύρας του δίθυρου και των αντίστοιχων ρευμάτων.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = Z \begin{bmatrix} I_1 \\ -I_2 \end{bmatrix}$$

Όπου  $Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$

#### Μήτρα αγωγιμότητας

Η μήτρα αγωγιμότητας είναι απλά ο αντίστροφος πίνακας της μήτρας αντίστασης

$$Y = Z^{-1}.$$

### Μήτρα σκέδασης

Η μήτρα σκέδασης συνδέει τα εξερχόμενα κύματα  $b_i$  ( $i=1,2$ ) με τα εισερχόμενα  $a_i$  ( $i=1,2$ ) που είναι παρόντα στις δύο θύρες του δικτύωματος.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

$$\text{Όπου } S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$$

Τα  $S_{ij}$  ( $i,j=1,2$ ) αναφέρονται ως s-parameters και είναι τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την DUT και τα οποία θα μετρούνται από τον διανυσματικό αναλυτή δικτύου (VNA).

#### **4.4.2 Πλεονεκτήματα S-parameters**

Οι S-parameters αποτελούν μια ομάδα παραμέτρων που συνδέει τα οδεύοντα κύματα τα οποία σκεδάζονται ή ανακλώνται όταν ένα n-θυρο δίκτυο εισέρχεται σε μία γραμμή μεταφοράς. Η ευκολία με την οποία οι scattering parameters μπορούν να μετρηθούν, τις καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμες για την περιγραφή των χαρακτηριστικών των ηλεκτρονικών και άλλων ενεργών (που απαιτείται τροφοδοσία για τη λειτουργία τους) συσκευών.

Η μέτρηση των S-παραμέτρων παρουσιάζει πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις άλλες παραμέτρους. Για τη μέτρηση των παραμέτρων που αναπαρίστανται από τις μήτρες T, Z και Y που αναφέρθηκαν προηγουμένως, είναι απαραίτητο οι είσοδοι και οι έξοδοι της εκάστοτε συσκευής προς μέτρηση (DUT) να ανοικτοκυκλώνονται και να βραχυκυκλώνονται διαδοχικά. Μια τέτοια ενέργεια μπορεί να αποδειχτεί ιδιαίτερα δύσκολη και χρονοβόρα ειδικά σε RF συχνότητες, λόγω της αυτεπαγωγής και της χωρητικότητας που δημιουργείται (λόγω υψηλής συχνότητας λειτουργίας) στον εκάστοτε αγωγό του κυκλώματος στον οποίο πρέπει να γίνει το ανοικτοκύκλωμα ή το βραχυκύκλωμα. Για να γίνει η μέτρηση αυτών των παραμέτρων, στις πλέον συνήθεις περιπτώσεις απαιτείται βραχυκυκλωμένο ή ανοικτοκυκλωμένο στέλεχος γραμμής μεταφοράς, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσαρμογή των φορτίων και θα πρέπει να προσαρμόζεται ξεχωριστά για κάθε αλλαγή της συχνότητας λειτουργίας του n-θύρου.

Από την άλλη πλευρά, κατά την μέτρηση των S-παραμέτρων το n-θυρο (συσκευή προς μέτρηση - DUT) παρεμβάλλεται μεταξύ μιας πηγής εναλλασσόμενης τάσης  $V_G$  και ενός φορτίου αντίστασης συνήθως  $50\Omega$  (ώστε η εμπέδηση του φορτίου να ταυτίζεται με αυτή των γραμμών μεταφοράς) μηδενίζοντας έτσι την πιθανότητα εμφάνισης ταλαντώσεων. Επιπλέον, τα οδεύοντα κύματα (είτε αυτά αναπαρίστανται από τάση, είτε από ρεύμα) δεν μεταβάλλονται κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς, δεδομένου ότι η γραμμή μεταφοράς είναι χωρίς απώλειες (lossless). Αυτό σημαίνει ότι οι S-parameters μιας DUT μπορούν να μετρηθούν με την βοήθεια ενός ηλεκτρονικού οργάνου (πχ Vector Network Analyzer) από κάποια απόσταση διαμέσου των γραμμών μεταφοράς, εφόσον οι τελευταίες δεν εισάγουν απώλειες στα οδεύοντα σήματα, δηλαδή είναι γραμμές μεταφοράς χαμηλών απωλειών (low-loss transmission lines)

Οι μεταβλητές  $a_i, b_i$ , όπου  $i=1,2$ , που αναπαριστούν τα οδεύοντα κύματα ορίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις. Όπως ακριβώς απεικονίζεται στο σχήμα 4-8, οι μεταβλητές  $V_i$  ( $i=1,2$ ) είναι οι τάσεις στην είσοδο ( $i=1$ ) και στην έξοδο ( $i=2$ ) του δίθυρου ενώ αντίστοιχα με  $I_i$  ( $i=1,2$ ) συμβολίζονται τα ρεύματα στις αντίστοιχες θύρες του κυκλώματος. Η μεταβλητή  $Z_0$  ονομάζεται χαρακτηριστική αντίσταση ή αντίσταση αναφοράς, και συμβολίζει μια μεταβλητή η οποία έχει μέγεθος πραγματικής αντίστασης ( $Z_0 \in \mathbb{R}$ ) και μετράται σε  $\Omega$ .

$$a_1 = \frac{V_1 + Z_0 I_1}{2\sqrt{Z_0}} \quad b_1 = \frac{V_1 - Z_0 I_1}{2\sqrt{Z_0}} \quad a_2 = \frac{V_2 - Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}} \quad b_2 = \frac{V_2 + Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}}$$

Παρόλο που οι ορισμοί στην θύρα 2 φαίνονται διαφορετικοί από αυτούς της θύρας 1, εντούτοις στην πραγματικότητα είναι ακριβώς οι ίδιοι αν τεθεί το εισερχόμενο ρεύμα  $I_2$  ως  $-I_2$ . Οι παρακάτω σχέσεις αποδεικνύουν τον ανωτέρω ισχυρισμό:

$$a_2 = \frac{V_2 - Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{V_2 + Z_0 (-I_2)}{2\sqrt{Z_0}} \quad \text{και} \quad b_2 = \frac{V_2 + Z_0 I_2}{2\sqrt{Z_0}} = \frac{V_2 - Z_0 (-I_2)}{2\sqrt{Z_0}}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτουν οι τάσεις και τα ρεύματα συναρτήσει των μεταβλητών  $a$  και  $b$ .

$$V_1 = \sqrt{Z_0}(a_1 + b_1)$$

$$I_1 = \frac{1}{\sqrt{Z_0}}(a_1 + b_1)$$

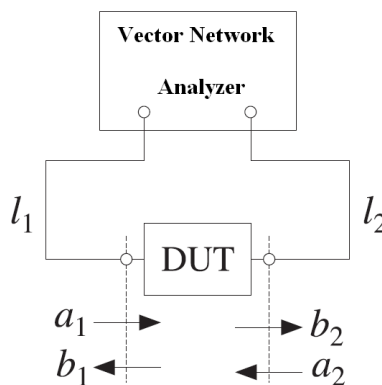
$$V_2 = \sqrt{Z_0}(a_2 + b_2)$$

$$I_2 = \frac{1}{\sqrt{Z_0}}(b_2 - a_2)$$

Η χαρακτηριστική αντίσταση  $Z_0$  της γραμμής μεταφοράς παίρνει συνήθως την τιμή των  $50\Omega$ , μιας και οι περισσότερες γραμμές μεταφοράς έχουν αντίσταση της τάξεως των  $50$  ή  $75\Omega$ .

#### 4.4.3 Μέτρηση των S-parameters μίας DUT με τη βοήθεια του VNA

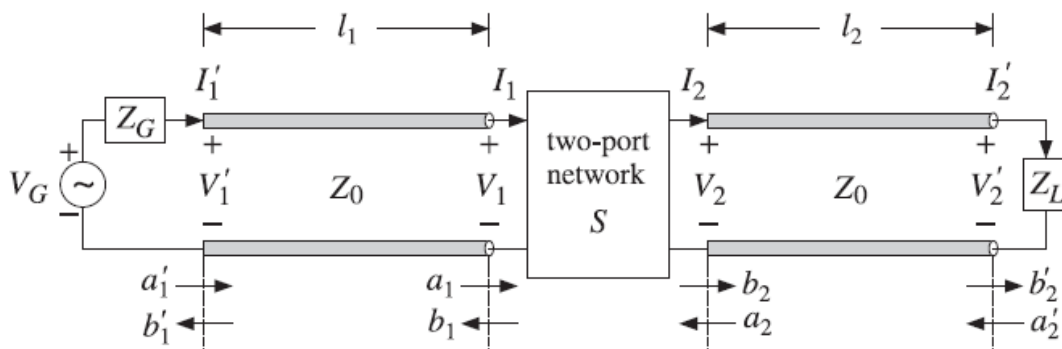
Η γενική συνδεσμολογία για τη μέτρηση των S-parameters φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4-8: συνδεσμολογία μέτρησης S-parameters(α)

Οι δύο ηλεκτρονικές συσκευές (DUT, VNA) συνδέονται διαμέσου δύο γραμμών μεταφοράς χαρακτηριστικής αντίστασης  $Z_0$  και μήκους  $l_1$  και  $l_2$  αντίστοιχα.

Ενώ στο επόμενο σχήμα αναπαρίσταται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η άνω συνδεσμολογία, όπου πλέον η πηγή τάσης  $V_G$  στην είσοδο 1 της DUT, καθώς και το φορτίο  $Z_L$  που συνδέεται με την θύρα 2, ορίζονται από τον αναλυτή δικτύου.



Σχήμα 4-9: Συνδεσμολογία μέτρησης S-parameters (β)



Παρατηρούμε ότι σύμφωνα με το σχήμα 4-10, η μεταβλητή  $a_1$  στην ουσία είναι το προσπίπτον κύμα στη θύρα 1, και η  $b_1$  το αντίστοιχο ανακλώμενο. Ομοίως, η μεταβλητή  $a_2$  συμβολίζει το προσπίπτον κύμα στη θύρα 2 και η  $b_2$  το αντίστοιχο ανακλώμενο.

Παρόλα αυτά, οι γραμμές μεταφοράς δεν έχουν αμελητέο μήκος. Γι αυτό εισάγονται απώλειες στο πλάτος του σήματος αλλά και στην φάση αυτού. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο vector network analyzer να μετρά τελικά τα προσπίπτοντα και τα ανακλώμενα κύματα  $a'_i$  και  $b'_i$  ( $i=1,2$ ) όπως αυτά παρουσιάζονται στους ακροδέκτες του, τα οποία είναι διαφορετικά από τα αντίστοιχα  $a_i$  και  $b_i$  ( $i=1,2$ ) όπως απεικονίζονται στο σχήμα 4-10.

Είναι απαραίτητο συνεπώς να βρεθούν οι σχέσεις οι οποίες συνδέουν τις μεταβλητές  $a'_i$  και  $b'_i$  με τις αντίστοιχες  $a_i$  και  $b_i$ .

Σύμφωνα με τη μικροκυματική θεωρία, αν υποθεθεί συχνότητα λειτουργίας  $f$  τότε το αντίστοιχο μήκος κύματος θα είναι  $\lambda = \frac{c}{f}$  όπου  $c$  η ταχύτητα του φωτός ( $c=3 \times 10^8$  m/sec).

Η διαφορά φάσης που εισάγει η γραμμή μεταφοράς μήκους  $l$  είναι  $e^{-j\delta}$  όπου  $\delta = \beta l$  Όπου  $\beta$  η σταθερά διάδοσης η οποία δίνεται από τον τύπο  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$

Θεωρώντας λοιπόν ότι οι γραμμές μεταφοράς είναι χωρίς απώλειες (lossless) και το πλάτος των κυματομορφών δεν μεταβάλλεται, οι σχέσεις που συνδέουν τις μεταβλητές  $a_i$  και  $b_i$  με τις  $a'_i$  και  $b'_i$  είναι:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-j\delta_1} & 0 \\ 0 & e^{j\delta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_1 \\ b'_1 \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-j\delta_2} & 0 \\ 0 & e^{j\delta_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_2 \\ b'_2 \end{bmatrix}$$

Όπου  $\delta_i = \beta l_i$  με  $i=1,2$ .

Σημειώνεται ότι - όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως - υπάρχουν μη γραμμικές απώλειες ως προς το πεδίο της συχνότητας και του πλάτους του εκάστοτε οδεύοντος κύματος και της φάσης. Παρόλα αυτά θεωρούνται αμελητέες και παραλείπονται στην παρακάτω ανάλυση.

Η μήτρα σκέδασης που μετράται τελικά είναι η:

$$S' = \begin{bmatrix} S'_{11} & S'_{12} \\ S'_{21} & S'_{22} \end{bmatrix}$$

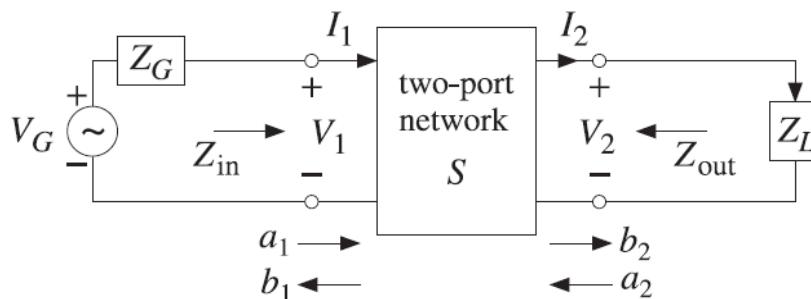
η οποία προκύπτει ακριβώς όπως αναφέρθηκε στην θεωρία για τις S-parameters με την διαφορά ότι αντί για τις μεταβλητές  $a_i$  και  $b_i$  ο VNA μετράει τις μεταβλητές  $a'_i$  και  $b'_i$ .

$$\begin{bmatrix} b'_1 \\ b'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S'_{11} & S'_{12} \\ S'_{21} & S'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_1 \\ a'_2 \end{bmatrix}$$

Τελικά προκύπτει η ζητούμενη μήτρα σκέδασης S:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} b'_1 \\ b'_2 \end{bmatrix} = DS' \begin{bmatrix} a'_1 \\ a'_2 \end{bmatrix} = DS'D \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad \text{συνεπώς } S = DS'D$$

Για να απλοποιήσουμε τη διαδικασία εύρεσης της μήτρας σκέδασης, μπορούμε – χωρίς βλάβη της γενικότητας- να αντικαταστήσουμε το κύκλωμα του σχήματος 4-10 με το ισοδύναμο κατά Thevenin κύκλωμα (σχήμα 4-11).



Σχήμα 4-10: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά Thevenin

Έτσι είναι πολύ πιο εύκολος ο υπολογισμός των S-parameters και συγκεκριμένα των  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  και, τέλος, του  $S_{22}$ .

#### 4.4.4 Μεθοδολογία εύρεσης S-parameters

Για την μέτρηση των s-parameters επιλέγεται το φορτίο  $Z_L$  το οποίο συνδέεται στην θύρα 2 και το οποίο πρέπει να είναι προσαρμοσμένο στην γραμμή μεταφοράς, δηλαδή πρέπει η σύνθετη αντίστασή του να είναι ίση με την χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς,  $Z_L = Z_0$ .

Θεωρώντας λοιπόν ότι υπάρχει προσαρμογή φορτίου στην έξοδο του διθύρου (θύρα 2) τότε δεν υπάρχει ανακλώμενο κύμα από το  $Z_L$  δηλαδή  $a_2=0$ , οπότε προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 = S_{11}a_1 \Rightarrow S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{Z_L=Z_0}$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 = S_{21}a_1 \Rightarrow S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{Z_L=Z_0}$$

Όπου  $S_{11}$  και  $S_{21}$  οι συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης αντίστοιχα. Τα υπόλοιπα δύο στοιχεία της μήτρας σκέδασης ( $S_{12}$  και  $S_{22}$ ) μπορούν να προκύψουν ακολουθώντας την ίδια διαδικασία αντιστρέφοντας όμως τη θέση της γεννήτριας με αυτήν του φορτίου.

Στην απλοποιημένη μορφή κυκλώματος που απεικονίζεται στο σχήμα 4-11, η πηγή  $V_G$  «βλέπει» σύνθετη αντίσταση εισόδου  $Z_{in}$  στην θύρα 1 του διθύρου ενώ το φορτίο αντίσταση εξόδου  $Z_{out}$  στην θύρα 2. Με αυτό το συλλογισμό η μήτρα αντίστασης γράφεται σε απλούστερη μορφή σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$V_1 = Z_{in}I_1$$

$$V_2 = Z_L I_2$$

και

$$b_1 = \Gamma_{in}a_1$$

$$a_2 = \Gamma_L b_2$$

Όπου  $\Gamma_{in}$  και  $\Gamma_L$  οι συντελεστές ανάκλασης στην θύρα 1 και στο φορτίο  $Z_L$  αντίστοιχα, και δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\Gamma_{in} = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}$$

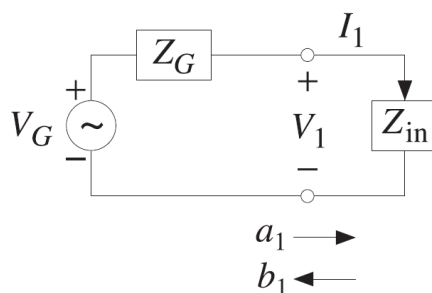
$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Με την ίδια λογική και αντιστρέφοντας τους ρόλους της γεννήτριας και του φορτίου, μπορούν να παραχθούν οι ανάλογοι συντελεστές ανάκλασης εξόδου των δύο θυρών. Προκύπτουν άρα οι κάτωθι εξισώσεις:

$$\Gamma_{out} = \frac{Z_{out} - Z_0}{Z_{out} + Z_0}$$

$$\Gamma_G = \frac{Z_G - Z_0}{Z_G + Z_0}$$

Αυτό που προκύπτει τελικά είναι ότι με τη βοήθεια των αντιστάσεων εισόδου και εξόδου μας δίνεται η δυνατότητα να αντικαθιστούμε το αρχικό κύκλωμα του σχήματος 4-11 με απλούστερα ισοδύναμα κυκλώματα. Για παράδειγμα ολόκληρο το δίθυρο καθώς και η αντίσταση φορτίου  $Z_L$  μπορούν να αντικατασταθούν με μία και μόνο σύνθετη αντίσταση εισόδου  $Z_{in}$  συνδεδεμένη στην θύρα 1. Η συγκεκριμένη αντικατάσταση απεικονίζεται στο σχήμα 4-12. [35],[36]

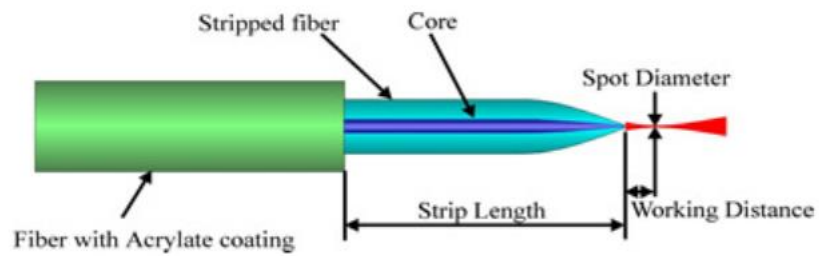


Σχήμα 4-11: Απλοποιημένο ισοδύναμο

#### 4.5 Probe Station

Το probe station είναι μία εργαστηριακή διάταξη πάνω στην οποία τοποθετούνται τα ολοκληρωμένα οπτικά κυκλώματα (chip) για την διεξαγωγή πειραμάτων. Περιλαμβάνει οπτικές ίνες εισόδου και εξόδου της οπτικής ισχύος, μία πλατφόρμα πάνω στην οποία τοποθετείται το προς μελέτη ολοκληρωμένο οπτικό κύκλωμα και μία IR camera για να είναι δυνατή η επισκόπηση των δομών που περιλαμβάνει το chip. Επιπλέον, περιλαμβάνει έναν ελεγκτή θερμοκρασίας (Temperature controller-Peltier) για τον έλεγχο της θερμοκρασίας της βάσης του chip. Η βάση του chip από πυρίτιο και λειτουργεί με βάση τις αρχές του θερμοηλεκτρικού φαινομένου και του φαινομένου Peltier για την απαγωγή της θερμότητας. Πιο συγκεκριμένα ρυθμίζοντας κατάλληλα, με ηλεκτρονικό τρόπο τον ελεγκτή αυτόν, διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία του υποστρώματος του chip παρά την μεταβαλλόμενη θερμοκρασία στα φύλλα χρυσού. Τέλος το probe station περιλαμβάνει μοχλούς για την κίνηση τόσο του chip όσο και των οπτικών ινών εισόδου και εξόδου κατά τους τρεις άξονες. Παρακάτω φαίνεται το probe station που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμά μας:

Στη διάταξη του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκε lensed οπτική ίνα στα 6,5μm. Η lensed οπτική ίνα προσφέρει το πλεονέκτημα του μεγαλύτερου εύρους (amplitude) με αποτέλεσμα να συλλέγει περισσότερο φως από το laser και να έχουμε λιγότερες απώλειες.



Σχήμα 4-12: Απεικόνιση lensed οπτικής ίνας

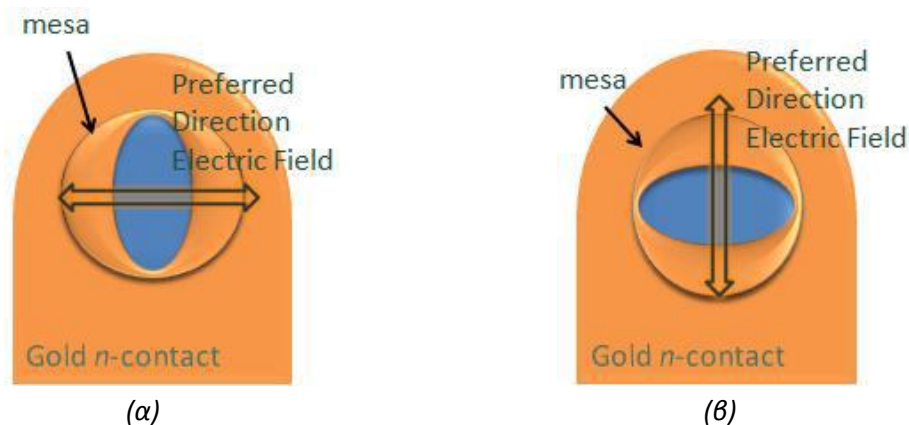


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Πειραματική Διαδικασία

#### 5.1 Rf χαρακτηρισμός

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε είχε σκοπό τη διεξαγωγή μετρήσεων που περιελάμβαναν LIV μετρήσεις για τις δύο πολωτικές καταστάσεις όπως επίσης και τον rf χαρακτηρισμό των δειγμάτων (VCSEL). Αξιολογήθηκαν διαφορετικοί τύποι VCSEL, ανάλογα με το μέγεθος του BTJ και του mesa. Τα συγκεκριμένα VCSEL κατασκευάστηκαν από το TUM (Technical University of Munich) και τα προμηθεύτηκε το Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος σε συνεργασία με το συγκεκριμένο Πανεπιστήμιο. Στο σχήμα 5-1 φαίνεται η σύμβαση η οποία ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και αφορά την πόλωση των αξόνων (οριζόντια ή κάθετη ανάλογα, με αναφορά το επίπεδο του VCSEL).



Σχήμα 5-1: Σύμβαση για την πόλωση των αξόνων (α) οριζόντια πόλωση (β) κάθετη πόλωση

Για τον rf χαρακτηρισμό χρησιμοποιήθηκε ο εξής εξοπλισμός. Ένας σταθμός οπτο-ηλεκτρονικών μετρήσεων (probe station), ένας διανυσματικός αναλυτής δικτύου (VNA) στα 40GHz και ένα οπτικό μικροσκόπιο.



Σχήμα 5-2: Η διάταξη της πλατφόρμας μετρήσεων που αναπτύχθηκε. Απεικονίζεται το probe station (δεξιά) καθώς και ο Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου VNA (αριστερά)

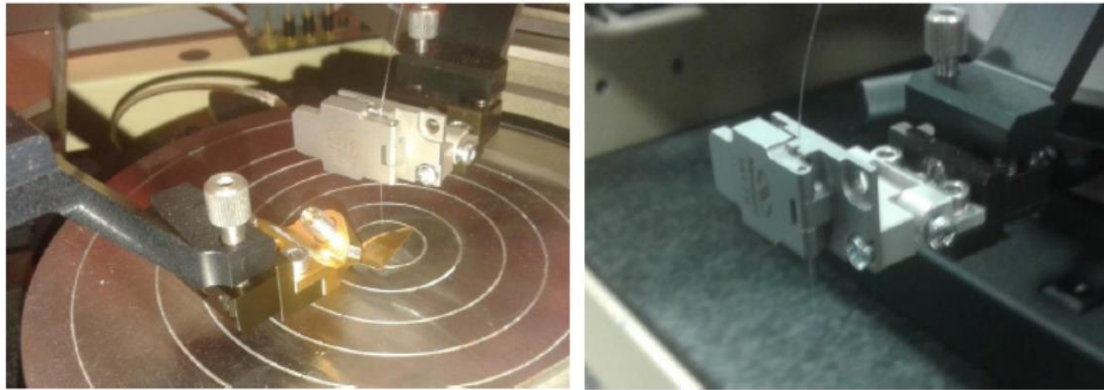
Επειδή ο κύριος στόχος του probe station είναι η μέτρηση των S-παραμέτρων (συντελεστές  $S_{11}$  και  $S_{12}$ ) των VCSEL, ήταν απαραίτητο να πραγματοποιηθούν μερικές τροποποιήσεις στο PM8 probe station, για να γίνει δυνατή η οπτοηλεκτρονική λειτουργία του. Οι τροποποιήσεις αυτές περιγράφονται παρακάτω μαζί με μια πιο λεπτομερή ανάλυση της πλατφόρμας.

Τα δείγματα VCSEL τοποθετούνται στην 8 ιντσών βάση του probe station και η πρόσβαση σε αυτά μπορεί να γίνει ηλεκτρικά μέσω μικροκυματικών ακροδεκτών (rf probe tips). Το rf probe tip συνδέεται στη θύρα 1 του 40GHz VNA μέσω ενός 40GHz ομοαξονικού καλωδίου. Επιπλέον το rf probe tip είναι μηχανικά προσδεμένο σε έναν χειροκίνητο μοχλό καθορισμού θέσης με υψηλή ακρίβεια (της τάξης των  $\mu\text{m}$ ) μέσω του βραχίονα του probe station. Η ακριβής ευθυγράμμιση του probe tip με το δείγμα (VCSEL) διευκολύνεται με τη βοήθεια ενός οπτικού μικροσκοπίου. Στην πλατφόρμα μετρήσεων που αναπτύξαμε το μικροσκόπιο είναι εφοδιασμένο με μία ποικιλία αντικειμενικών φακών και έτσι επιτυγχάνει μεγεθύνσεις από 10x μέχρι και 50x.

Το οπτικό σήμα συλλέγεται στην έξοδο του VCSEL μέσω μίας lensed οπτικής ίνας προσδεμένη σε έναν προσαρμοσμένο συγκρατητή (holder) (σχήμα 5-3(β)). Ο holder της ίνας τοποθετείται σε έναν υψηλής ακρίβειας μοχλό καθορισμού θέσης με τη βοήθεια του βραχίονα του probe και μίας κατάλληλης μηχανικής διεπαφής. Αυτή η τοποθέτηση επιτρέπει την πλευρική και κάθετη ρύθμιση της ίνας πάνω από το VCSEL, όπως επίσης και τη ρύθμιση της γωνίας της ίνας από την κάθετη θέση,

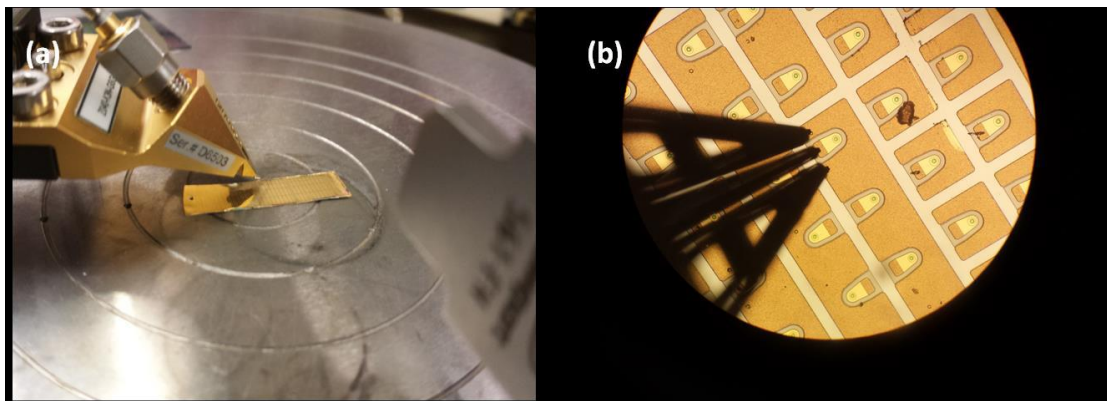


επιτρέποντας μετρήσεις και άλλων οπτικών δομών εκτός από VCSEL (πχ grating couplers). Το σήμα που έχει συλλεχθεί εισάγεται σε μία U2t φωτοδίοδο 50GHz, η οποία συνδέεται στην θύρα 2 του VNA έτσι ώστε να επιτρέπεται η μέτρηση της  $S_{21}$  παραμέτρου.



Σχήμα 5-3: Εστίαση (α) στο rf probe tip και (β) στη ρύθμιση του holder της οπτικής ίνας

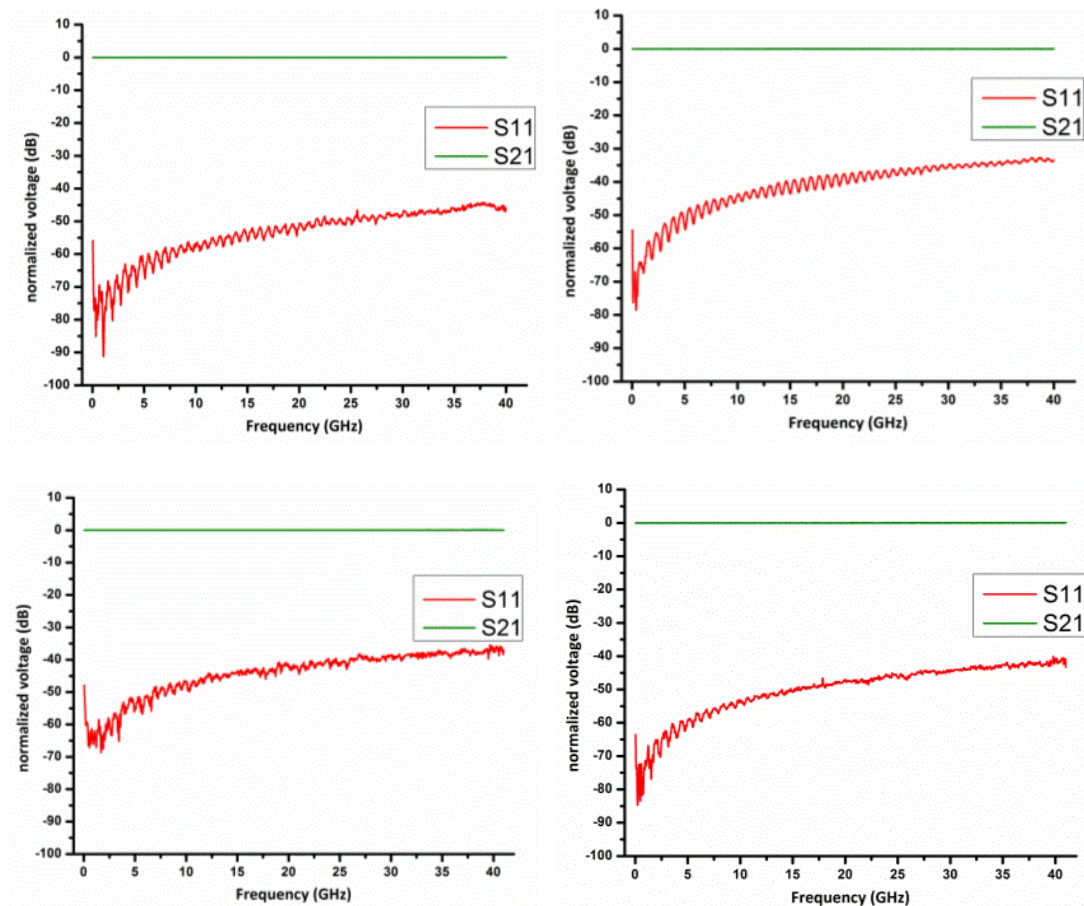
Το σχήμα 5-3(α) παρουσιάζει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το chip του VCSEL πάνω στην 8 ιντσών βάση με το rf probe tip και την ίνα στην κατάλληλη θέση. Το σχήμα 5-4(β) απεικονίζει το rf probe tip και το chip του VCSEL μέσω του μικροσκοπίου κατά τη διαδικασία ευθυγράμμισης του tip και των pads των προς εξέταση VCSEL.



Σχήμα 5-4: (α) θέτοντας σε επαφή το VCSEL chip με το GSG probe tip, (β) το rf probe tip και το VCSEL chip μέσα από το μικροσκόπιο

Για να μπορέσουμε να λάβουμε αξιόπιστες μετρήσεις των  $S$ -παραμέτρων (συντελεστές  $S_{11}$  και  $S_{12}$ ) είναι πολύ σημαντικό να διεξάγουμε με πολλή προσοχή τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιούμε τα σφάλματα που εισάγονται από το σύστημα μέτρησης, και αποσυσχετίζουμε τα χαρακτηριστικά των στοιχείων της μετρητικής διάταξης από αυτά της προς μέτρηση συσκευής. Τα κυριότερα σφάλματα μέτρησης αποδίδονται συνήθως σε ατέλειες στην κατευθυντικότητα των couplers μέσα στον VNA και σε λάθη που προκαλούνται λόγω ανακλάσεων ανάμεσα στη θύρα εκείνη του VNA που στέλνει το rf σήμα και

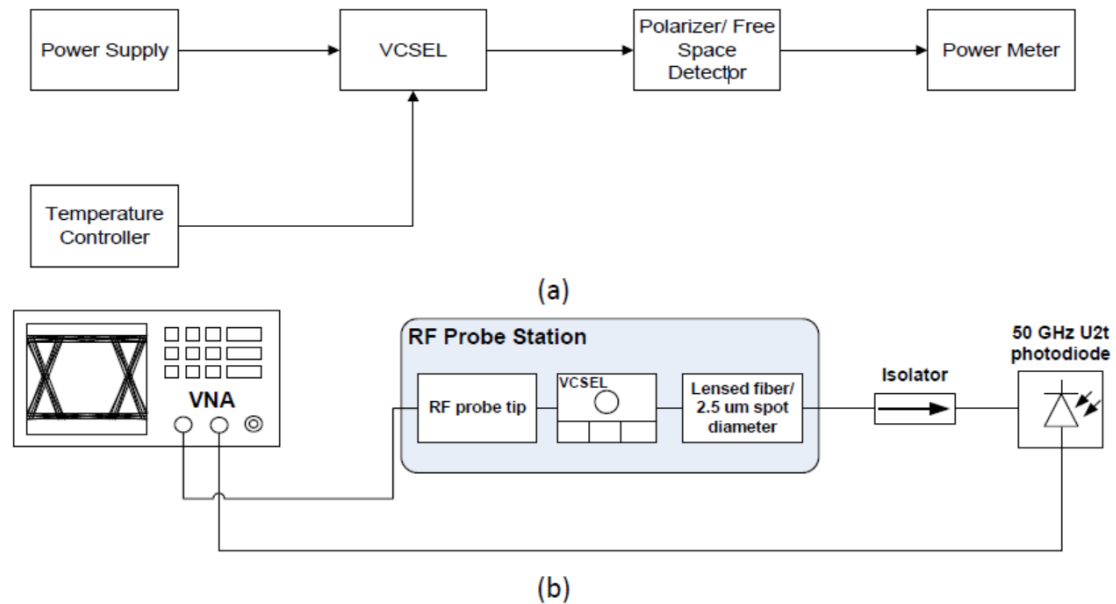
στο δείγμα (VCSEL). Επιπλέον τα rf καλώδια εισάγουν εξασθένηση, χρονική καθυστέρηση και μια αντίστοιχη μετατόπιση φάσης, επηρεάζοντας τις μετρήσεις του VNA. Η βαθμονόμηση του συστήματος βασίζεται σε μία τεχνική που ονομάζεται διανυσματική διόρθωση λαθών, κατά την οποία τα συστηματικά σφάλματα ελαχιστοποιούνται μέσα από τυποποιημένες διαδικασίες. Ο τύπος βαθμονόμησης που χρησιμοποιήσαμε στη διάταξη μας είναι η SOLT (Sort-Open-Load-Through) βαθμονόμηση. Αυτή η μέθοδος είναι η απλούστερη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οπτοηλεκτρονικές μετρήσεις και απαιτεί ένα πλήθος δομών αναφοράς, όπως βραχυκύκλωμα, ανοικτοκύκλωμα, ένα φορτίο (συνήθως 50 Ohm) και μία γραμμή μεταφοράς. Μετά τη βαθμονόμηση το επίπεδο αναφοράς των μετρήσεων έρχεται στην είσοδο του προς εξέταση VCSEL και όλα τα συστηματικά σφάλματα ελαχιστοποιούνται.



Σχήμα 5-5: Αποτελέσματα βαθμονόμησης SOLT που ελήφθησαν σε διαστήματα 1 ώρας. Σε όλες τις περιπτώσεις έχουμε απώλειες από την ανάκλαση κάτω από 30dB.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των LIV καμπυλών και των S-παραμέτρων των δειγμάτων, φαίνεται στο σχήμα 5-5. Η απόδοση της πολικότητας των VCSEL ελέγχθηκε μέσω ενός πολωτή ελευθέρου χώρου (free space

polarizer), ο οποίος τοποθετήθηκε πριν τον ανιχνευτή οπτικής ισχύος, έτσι ώστε να λάβουμε LIV μετρήσεις ξεχωριστά για κάθε άξονα πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση). Οι μετρήσεις των S-παραμέτρων ελήφθησαν μέσω της 40GHz οπτοηλεκτρονικής πλατφόρμας μετρήσεων που αναπτύχθηκε και περιγράφηκε παραπάνω και φαίνεται στο σχήμα 5-5(β).



Σχήμα 5-6: Πειραματική διάταξη (α) για τις LIV μετρήσεις και (β) για τις μετρήσεις των S-παραμέτρων

Οι μετρήσεις των LIV καμπυλών για τους δύο άξονες πόλωσης και οι μετρήσεις των S-παραμέτρων των δειγμάτων VCSEL για διάφορα BTJs και mesas φαίνονται στα παρακάτω σχήματα. Η οριζόντια και κάθετη πόλωση αναφέρεται ως TE και TM στα διαγράμματα. Στα διαγράμματα των LIV καμπυλών αναφέρεται επίσης ο λόγος σβέσης (extinction ratio) μεταξύ των δυο πολωτικών καταστάσεων του κάθε δείγματος. Στα διαγράμματα που παρουσιάζουν τις μετρήσεις της παραμέτρου  $S_{12}$  αναφέρεται και το 3dB εύρος ζώνης του κάθε VCSEL.

Σε αυτό το σημείο θα ήταν δόκιμο να γίνει αναφορά στις έννοιες που σχετίζονται με την πόλωση και το rf εύρος ζώνης.

### Πόλωση

Η πόλωση ορίζεται ως η κατεύθυνση της ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου της ακτίνας του laser. Στις περισσότερες περιπτώσεις η έξοδος ενός laser είναι πολωμένη γραμμικά, δηλαδή το ηλεκτρικό πεδίο ταλαντώνεται σε μία σταθερή κατεύθυνση, κάθετη στην κατεύθυνση διάδοσης της ακτίνας του laser. Υπάρχουν βέβαια και περιπτώσεις όπου η ακτίνα έχει διαφορετική πόλωση, περισσότερο ή

λιγότερο σταθερή, όπως για παράδειγμα ελλειπτική, η οποία μπορεί να μετατραπεί σε γραμμική μέσω του κατάλληλου συνδυασμού των waveplates. [37]

#### Λόγος σβέσης (Extinction Polarization Ratio - PER) μεταξύ πολωτικών καταστάσεων

Ο λόγος σβέσης μεταξύ δύο πολωτικών καταστάσεων υποδηλώνει την ποσότητα του φωτός η οποία μπορεί να αναμειχθεί μεταξύ των δύο αξόνων πόλωσης. Ο PER είναι ένας σημαντικός παράγοντας διότι αποτελεί έναν τρόπο μέτρησης της ικανότητας της ίνας να διατηρεί σταθερή την πόλωσή της.

Υπολογίζεται ως εξής:  $PER = 10 \log_{10} \left( \frac{P_y}{P_x} \right)$

όπου:  $P_y$  η πόλωση στον άξονα  $y$  και

$P_x$  η πόλωση στον άξονα  $x$

Η τιμή του PER εξαρτάται από το μήκος της ίνας και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Για παράδειγμα αν η ίνα υποβληθεί σε υψηλή μηχανική πίεση και κυρτώσεις μικρής διαμέτρου είναι πιθανό να διαταραχθεί η εσωτερική πίεση και σαν αποτέλεσμα να μειωθεί ο λόγος σβέσης μεταξύ των δύο πολωτικών καταστάσεων. [38]

#### Rf Εύρος ζώνης

Ως εύρος ζώνης ορίζεται η διαφορά μεταξύ της ανώτερης και της κατώτερης συχνότητας λειτουργίας ενός στοιχείου (εν προκειμένω VCSEL). Το 3dB εύρος ζώνης είναι το διάστημα των συχνοτήτων εκείνων, στις οποίες το σήμα έχει ισχύ μεγαλύτερη από το μισό της μέγιστης ισχύος.

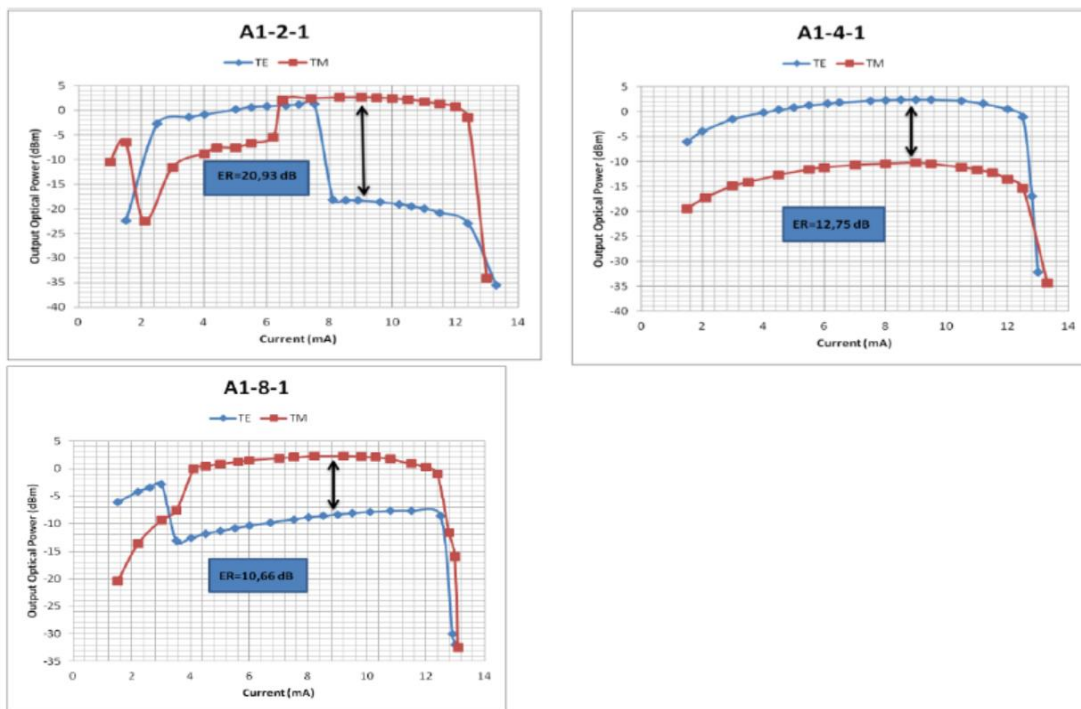
Οι μετρήσεις της παραμέτρου  $S_{12}$  και του αντίστοιχου 3dB εύρους ζώνης πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες τιμές ρεύματος τροφοδοσίας των VCSEL. Τα διαγράμματα αποτυπώνουν το 3dB εύρος ζώνης για την τιμή εκείνη του ρεύματος τροφοδοσίας για την οποία παρατηρήθηκε η υψηλότερη απόδοση των VCSEL. Ο τίτλος κάθε διαγράμματος περιγράφει τη θέση κάθε VCSEL στο χάρτη μετρήσεων (Σχήμα 5-7). Για παράδειγμα «A1-2-1» σημαίνει ότι το VCSEL είναι τύπου A1 και βρίσκεται στη δεύτερη στήλη και πρώτη σειρά του χάρτη. Τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται ανάλογα με το BTJ και mesa κάθε τύπου VCSEL.

	(20)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)			
Juxtaposante															d_mesa= 20 μm	d_BTJ= 3μm	(1)	(a)	A1				
															d_mesa= 24 μm	d_BTJ= 3μm	(3)	(a)	A2				
															d_mesa= 28 μm	d_BTJ= 3μm	(5)	(a)	A3				
															d_mesa= 20 μm	d_BTJ= 4μm	(7)	(a)	B1				
															d_mesa= 24 μm	d_BTJ= 4μm	(9)	(a)	B2				
															d_mesa= 28 μm	d_BTJ= 4μm	(11)	(a)	B3				
0				1	2	3	4							d_mesa= 20 μm	d_BTJ= 5μm	(13)	(a)	C1					
60				5	6	7	8																
0				9	10	11	12							d_mesa= 24 μm	d_BTJ= 5μm	(15)	(a)	C2					
30				13	14	15	16																
				17	18	19	20							d_mesa= 28 μm	d_BTJ= 5μm	(17)	(a)	C3					
				21	22	23	24																
X	*1			*1				*6	*3	*4	*3	*4	*3								(19)	(a)	D
□	*2			*2																	(20)	(b)	
	-		/	\	-		/	\	o	o													
																							Orientation
	(20)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)			

Σχήμα 5-7: Ο χάρτης των VCSEL που μετρήθηκαν

## 5.2 Αποτελέσματα - Διαγράμματα

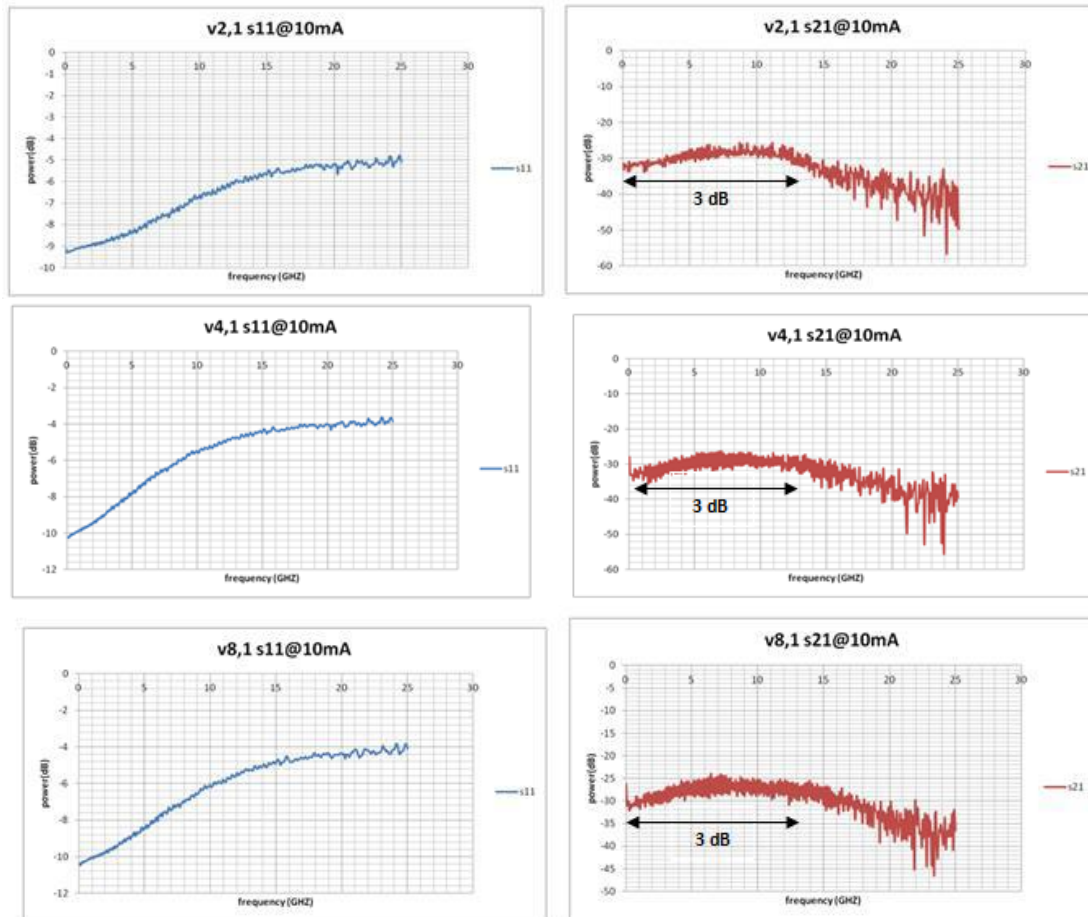
- Mesa: 20 μm BTJ: 3 μm



Σχήμα 5-8: οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγγεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου A1 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση)

Ο λόγος σβέσης μεταξύ των πολώσεων του VCSEL τύπου A1 παίρνει τιμές μεταξύ 10.66 και 20.93 dB. Στα VCSEL A1-2-1 και A1-8-1 παρατηρήθηκε αλλαγή του άξονα πόλωσης στα 6mA και 3.5mA αντίστοιχα.

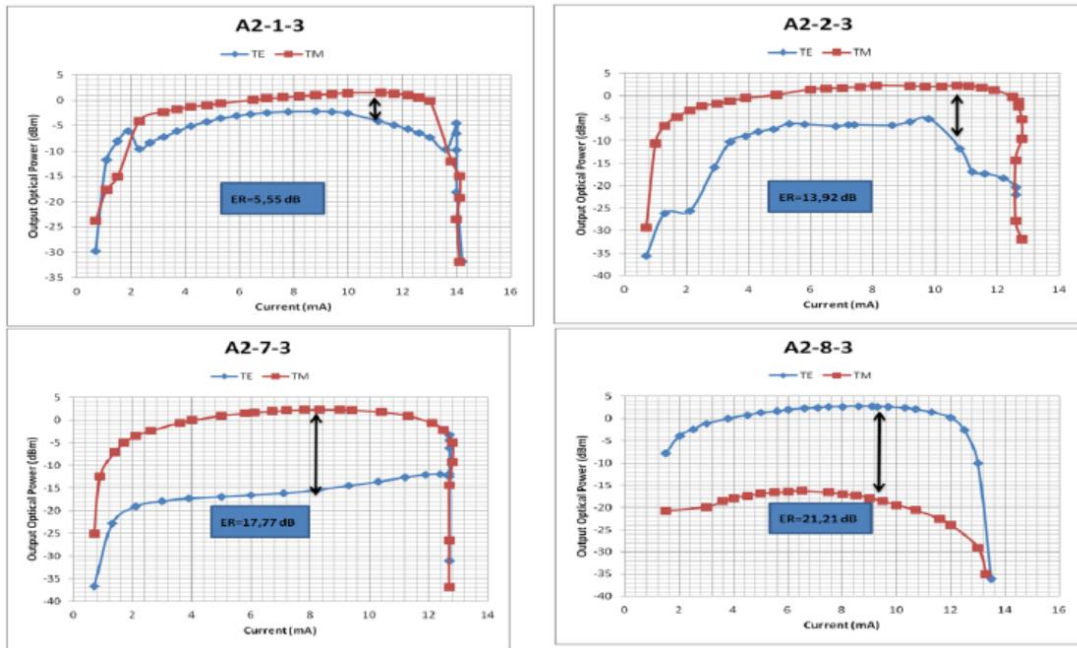
- S-parameters at I=10 mA



Σχήμα 5-9: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης για VCSEL τύπου A1

Τα VCSEL τύπου A1 παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, όσον αφορά το 3dB εύρος ζώνης, φτάνοντας τα 13GHz

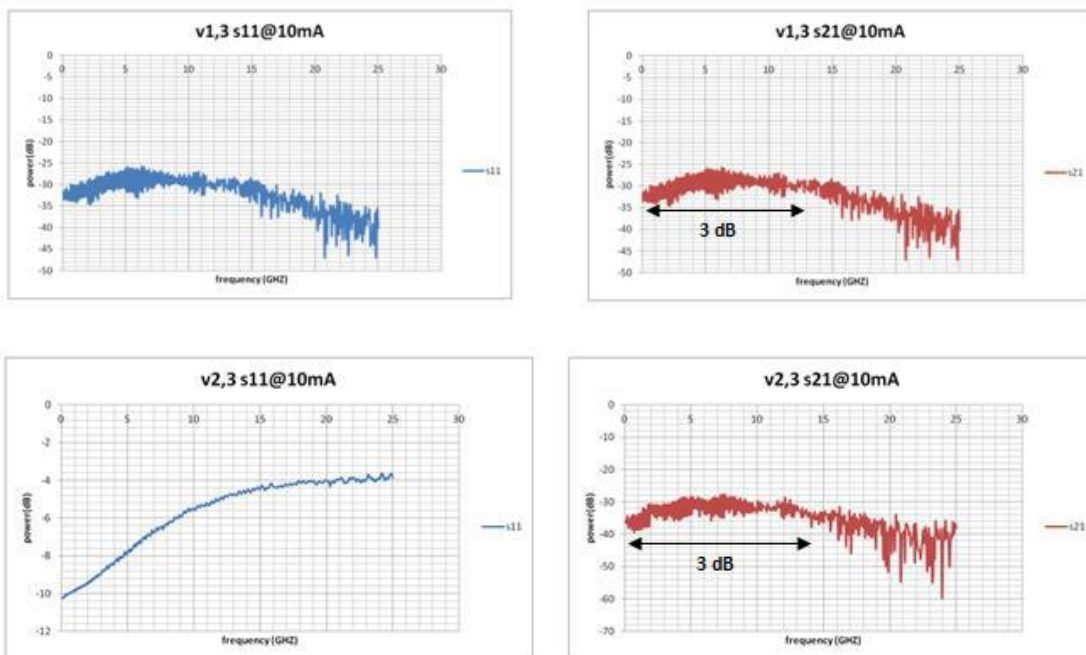
- Mesa: 24  $\mu\text{m}$  BTJ: 3  $\mu\text{m}$

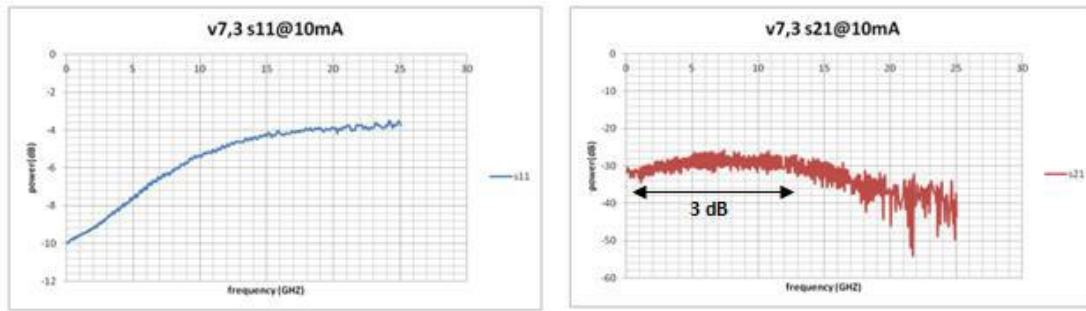


Σχήμα 5-10: Οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγγεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου A2 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση)

Ο λόγος σβέσης μεταξύ των πολώσεων στο VCSEL τύπου A2 μεταβάλλεται μεταξύ των τιμών 5.55 και 21.21 dB στο ρεύμα μέγιστης απόδοσης (rollover current).

- S-parameters at I=10mA

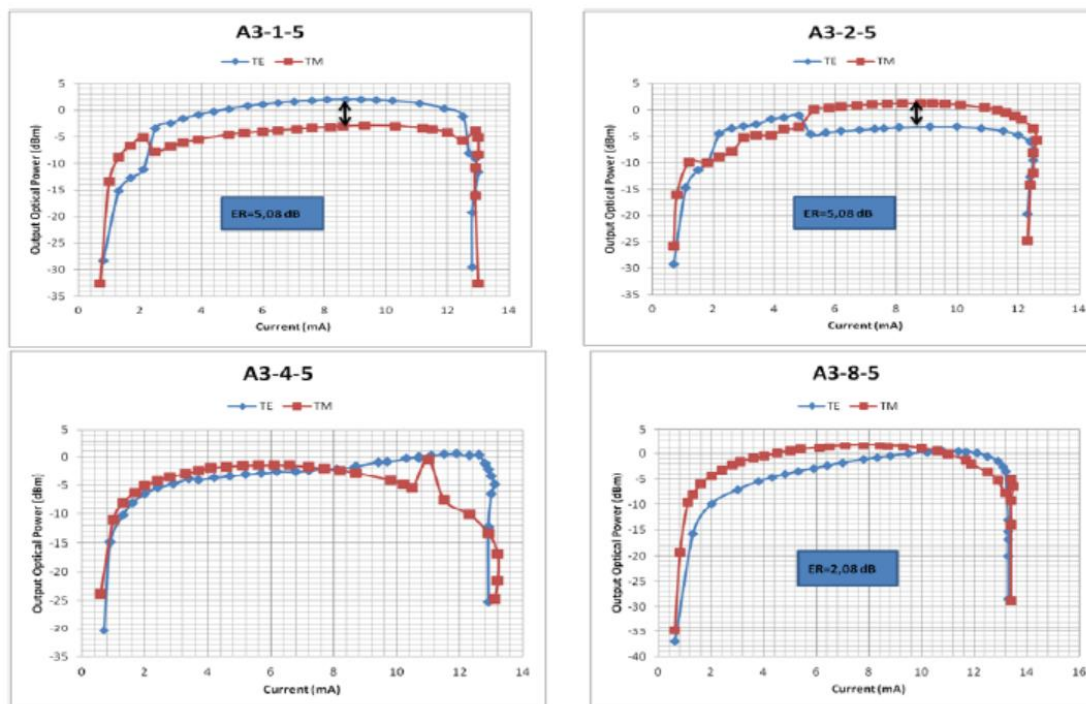




Σχήμα 5-11: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης για VCSEL τύπου A2

Το 3dB εύρος ζώνης του VCSEL τύπου A2 κυμαίνεται από 13 ως 14GHz.

- Mesa: 28 μm BTJ: 3 μm

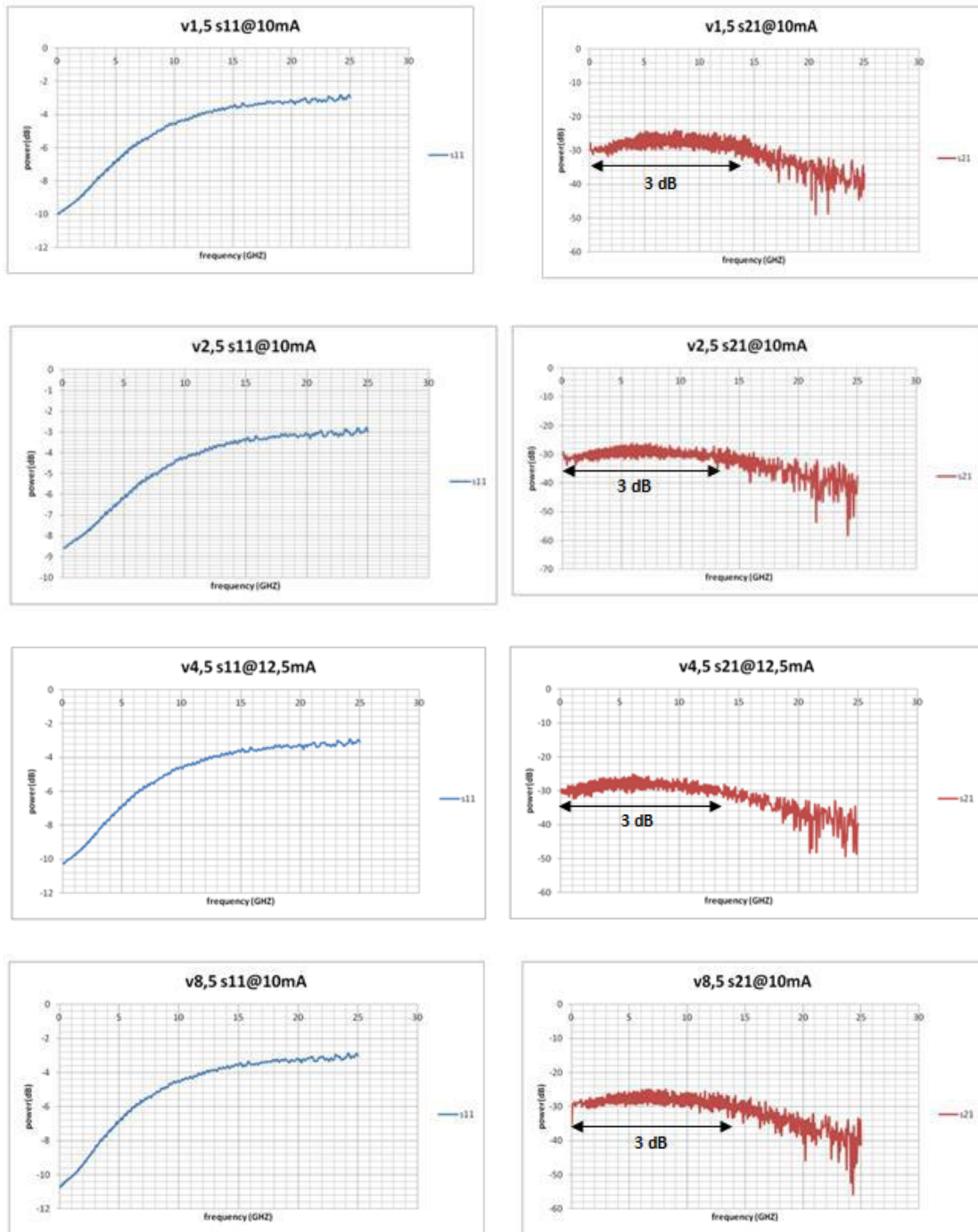


Σχήμα 5-12: Οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγχεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου A3 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση)

Παρατηρείται ότι τα VCSELs τύπου A3-4-5 και A3-8-5 παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά την οπτική ισχύ εξόδου και στους δύο άξονες πόλωσης. Τα υπόλοιπα VCSEL τύπου A3 έχουν τον ίδιο λόγος σβέσης μεταξύ των πολώσεων (5.08dB).



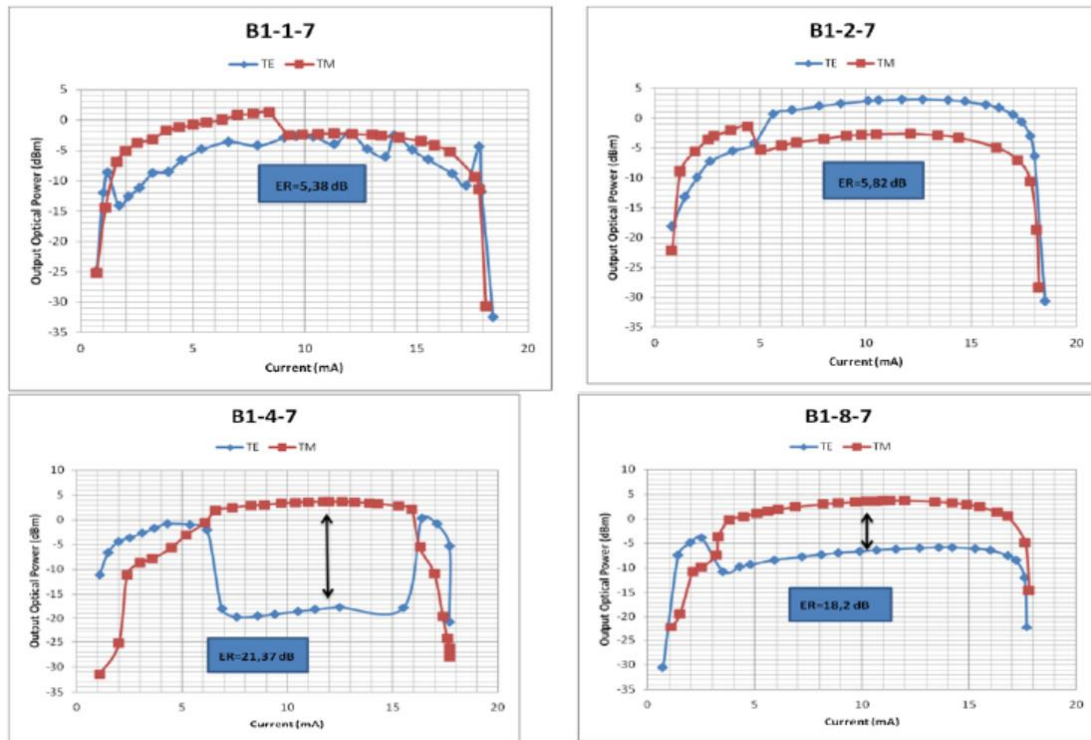
- S-parameters at I=10 mA



Σχήμα 5-13: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης του VCSEL τύπου A3

Το 3dB εύρος ζώνης του VCSEL τύπου 3 ήταν 14GHz.

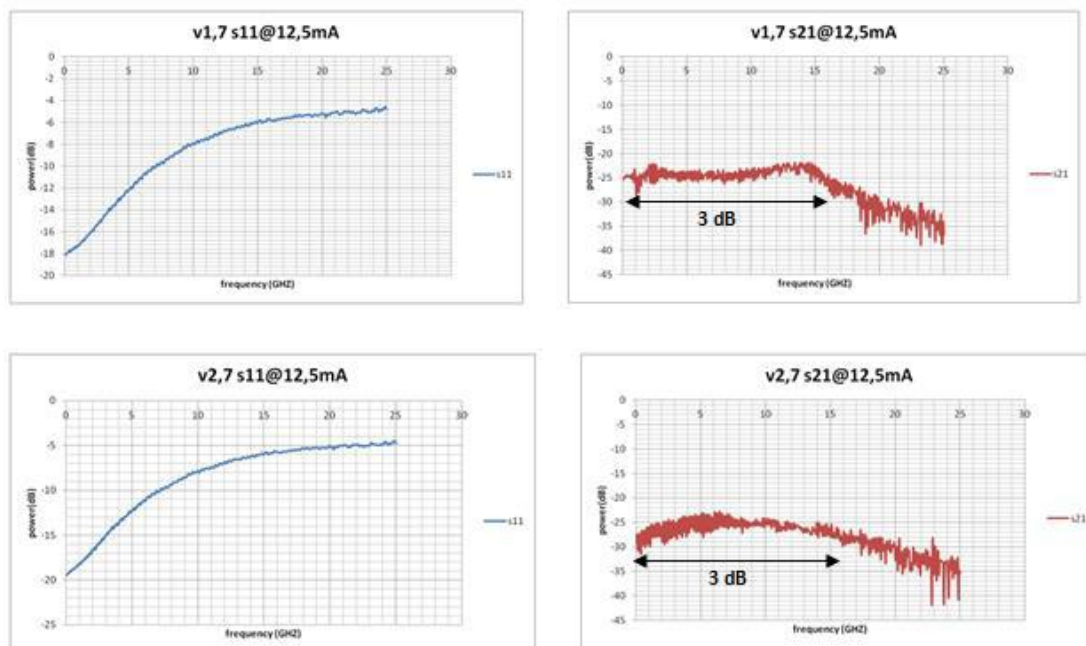
- Mesa: 20  $\mu\text{m}$  BTJ: 4  $\mu\text{m}$

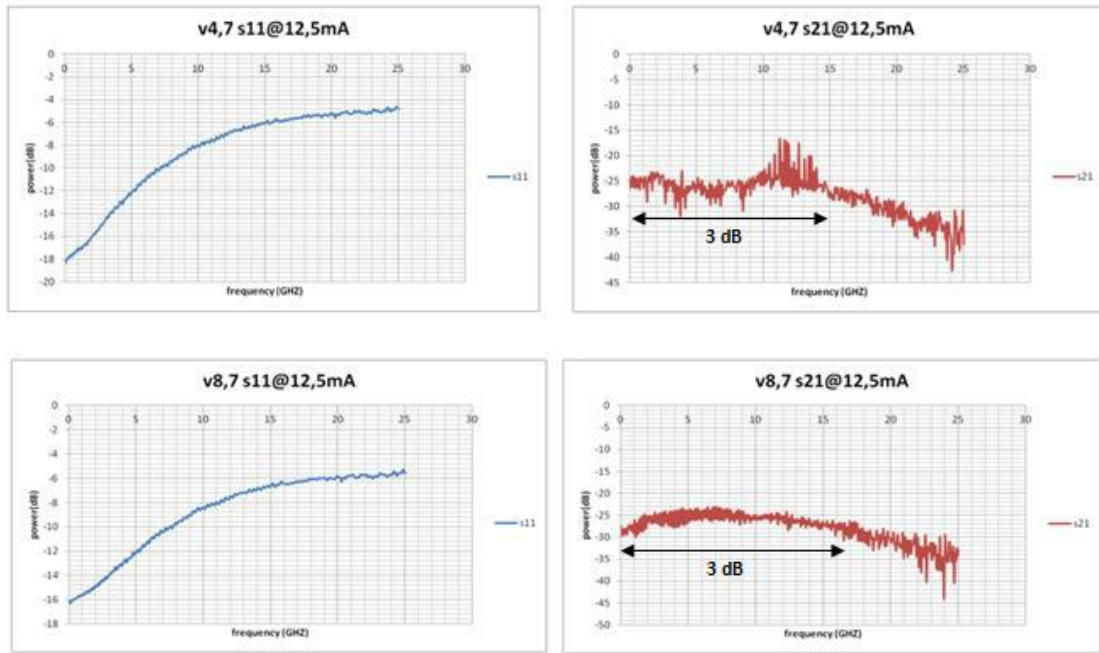


Σχήμα 5-14: Οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγχόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου B1 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση)

Ο λόγος σβέσης μεταξύ των πολώσεων για τα VCSEL τύπου B1 κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 5.38 και 21.37 dB. Όλα τα VCSEL τύπου B1 παρουσίασαν μετακίνηση του άξονα πόλωσης τους, αυξάνοντας το εγχόμενο ρεύμα.

- S-parameters at I=12.5 mA

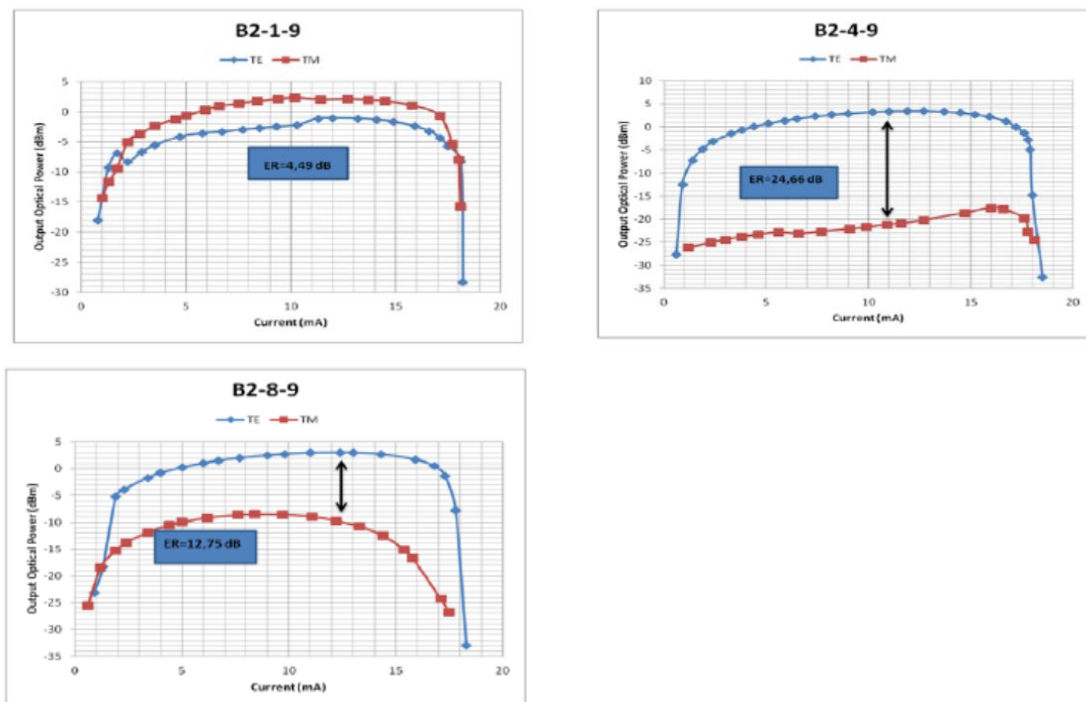




Σχήμα 5-15: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης του VCSEL τύπου B1

Το 3dB εύρος ζώνης του VCSEL τύπου B1 κυμαίνεται από 15 ως 17GHz.

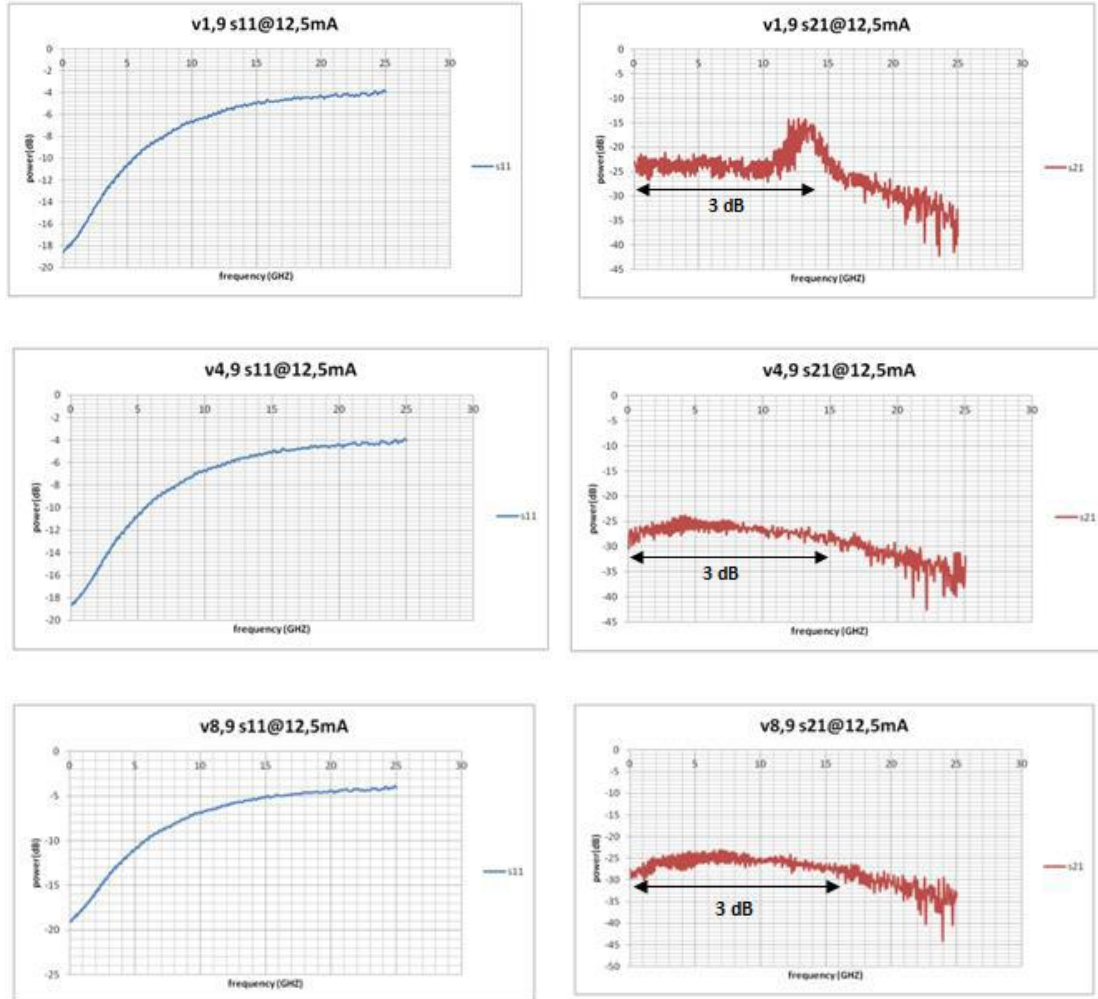
- Mesa: 24  $\mu\text{m}$  BTJ: 4  $\mu\text{m}$



Σχήμα 5-16: Οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγχεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου B2 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση)

Ο λόγος σβέσης μεταξύ των πολώσεων για τα VCSEL τύπου B2 κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 4.49 και 24.66 dB.

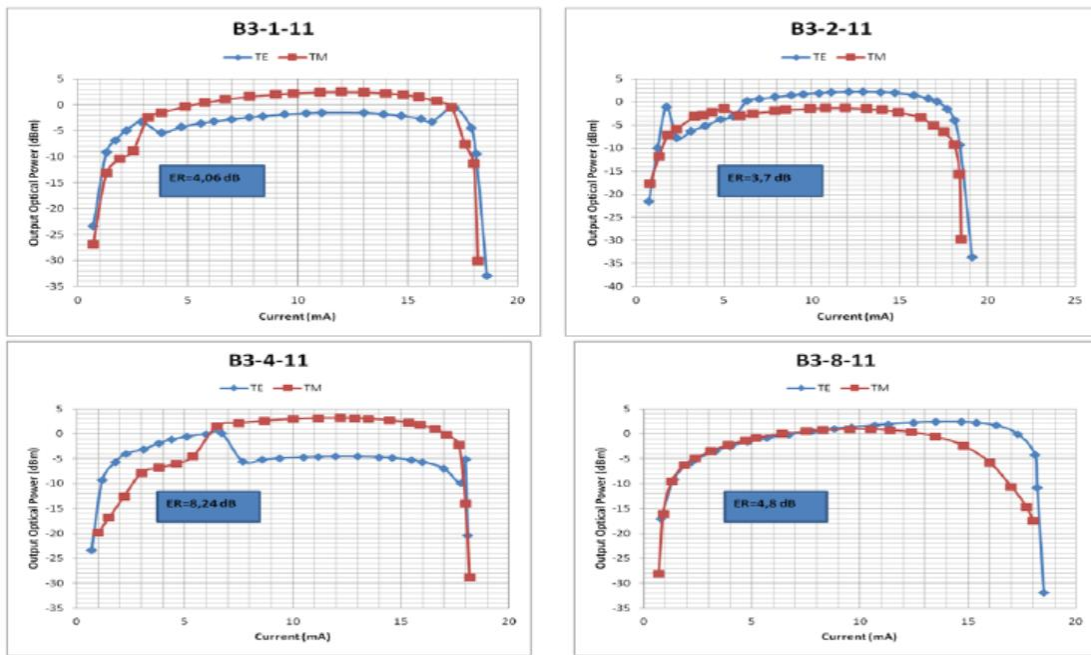
- S-parameters at I=12.5 mA



Σχήμα 5-17: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης του VCSEL τύπου B2

Το 3dB εύρος ζώνης του VCSEL τύπου B2 κυμαίνεται από 14 ως 16GHz.

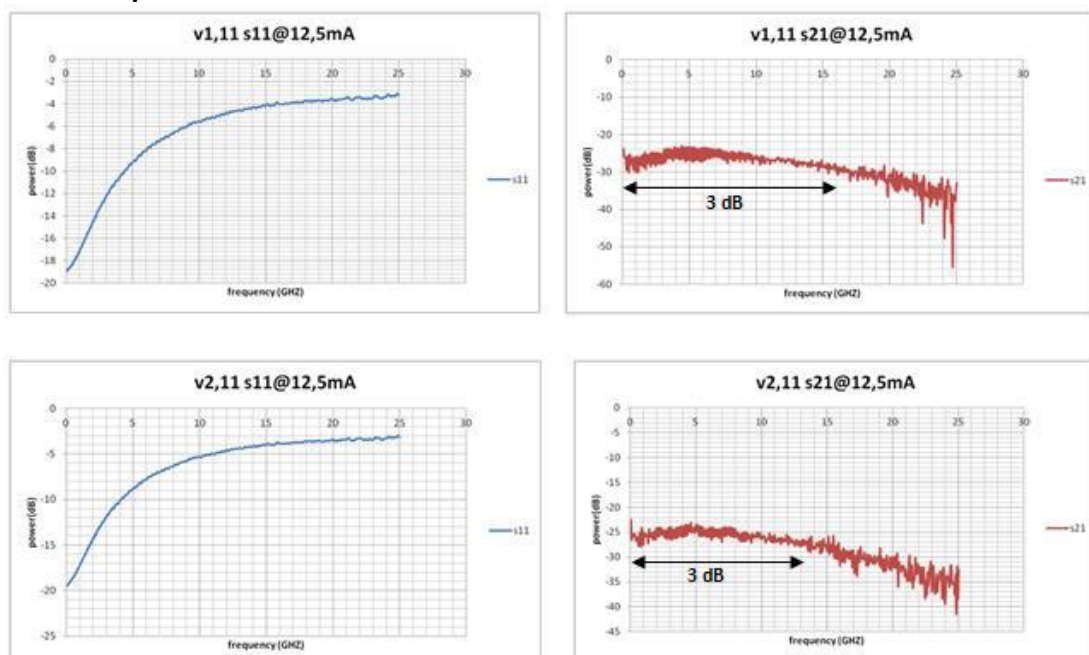
- Mesa: 28  $\mu\text{m}$  BTJ: 4  $\mu\text{m}$

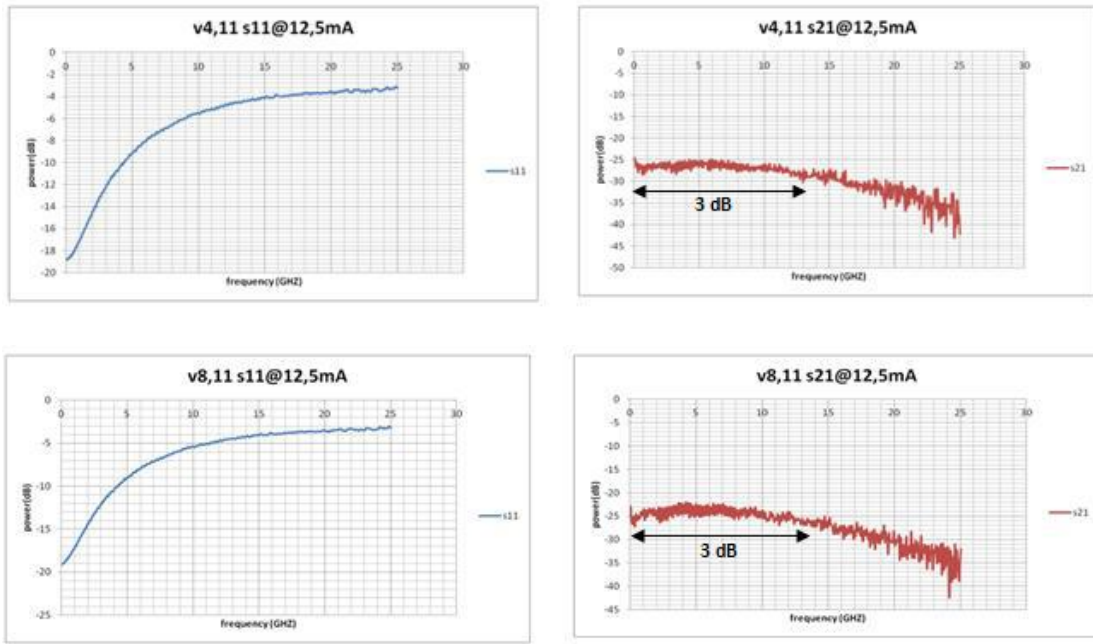


Σχήμα 5-18: Οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγχεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου B3 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση)

Το VCSEL τύπου B3 παρουσίασε χαμηλές επιδόσεις όσον αφορά το λόγο σβέσης μεταξύ των πολώσεων ο οποίος παίρνει τιμές μεταξύ των 3.7 και 8.24 dB. Σχεδόν όλα τα VCSEL τύπου B3 παρουσίασαν μία μετατόπιση στην πόλωση όταν αυξανόταν το εγχεόμενο ρεύμα.

- S-parameters at I=12.5 mA

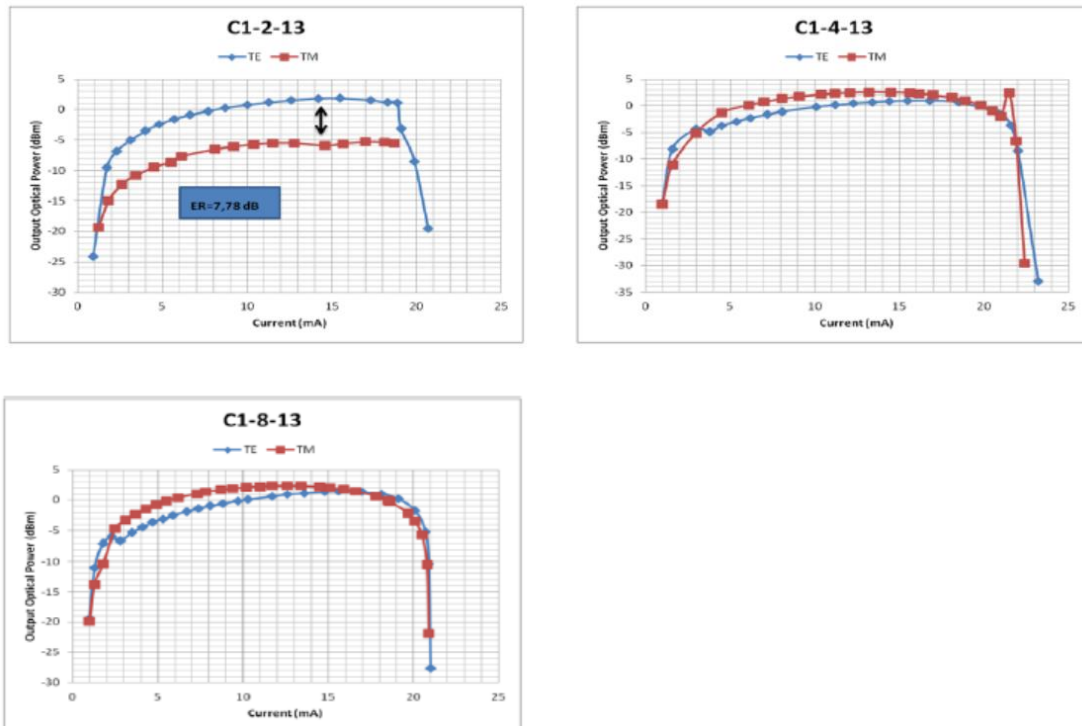




Σχήμα 5-19: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης του VCSEL τύπου B3

Το 3dB εύρος ζώνης του VCSEL τύπου B3 κυμαίνεται από 13 ως 16GHz.

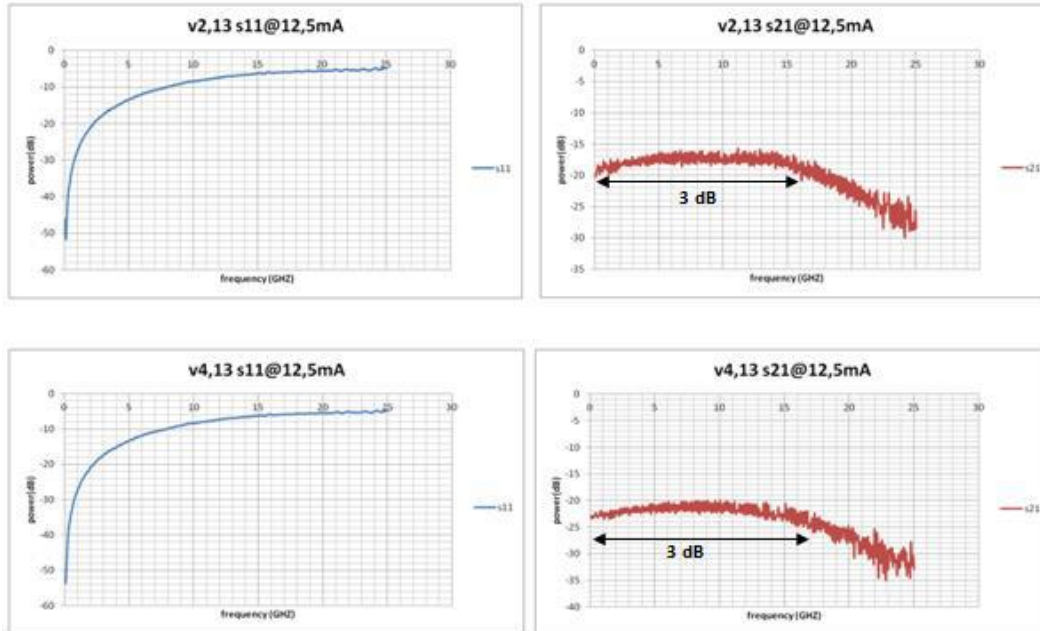
- Mesa: 20  $\mu\text{m}$  BTJ: 5  $\mu\text{m}$



Σχήμα 5-20: Οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγχεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου C1 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση)

Τα VCSEL C1-4-13 και C1-8-13 παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά την οπτική ισχύ εξόδου και στους δύο άξονες πόλωσης. Ο λόγος σβέσης μεταξύ των πολώσεων του VCSEL C1-2-13 ήταν 7.78 dB.

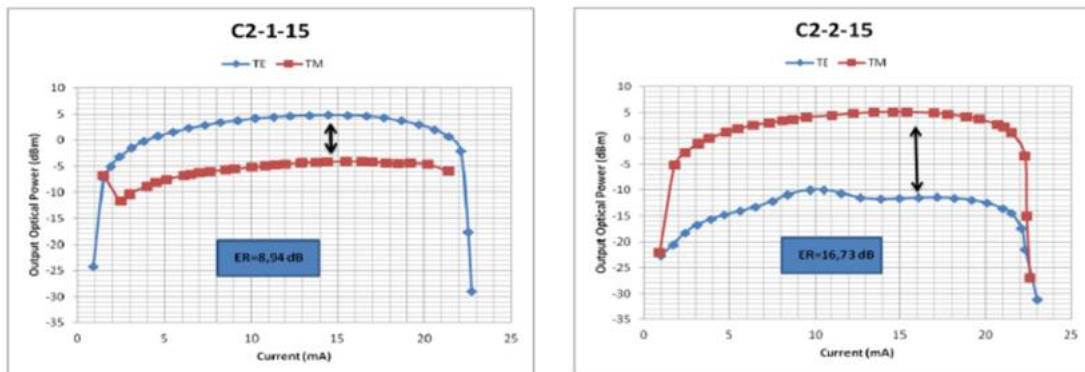
- **S-parameters at I=12.5 mA**

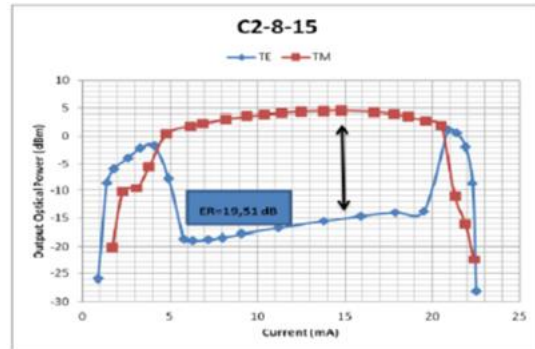
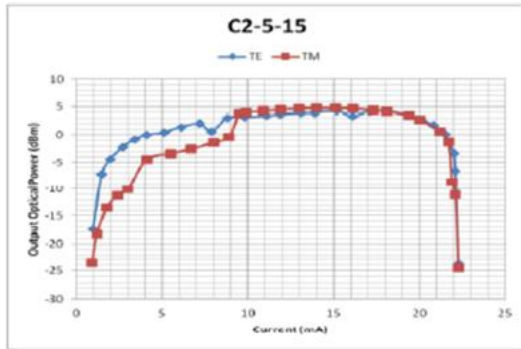


Σχήμα 5-21: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης του VCSEL τύπου C1

Το 3dB εύρος ζώνης του VCSEL τύπου C1 κυμαίνεται από 16 ως 17GHz.

- **Mesa: 24 μm BTJ: 5 μm**

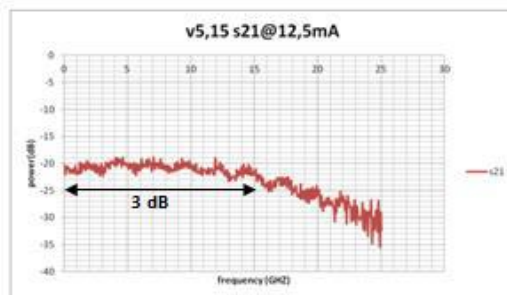
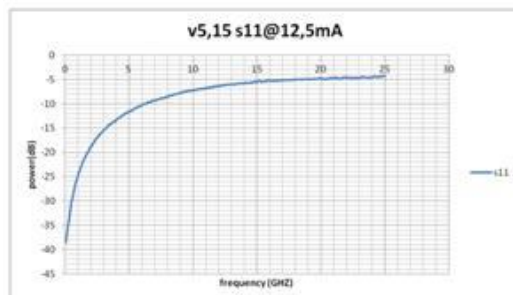
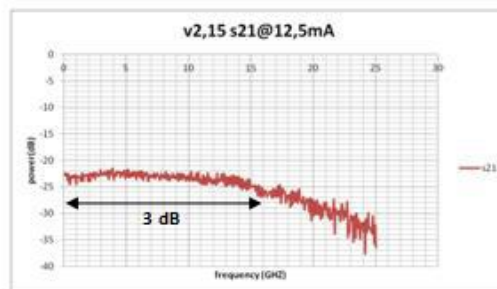
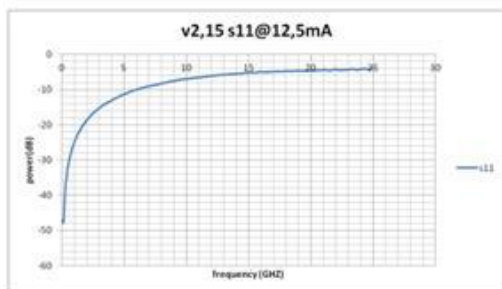
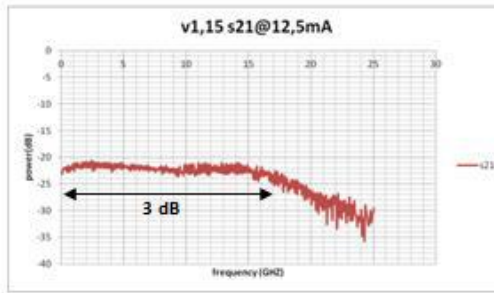
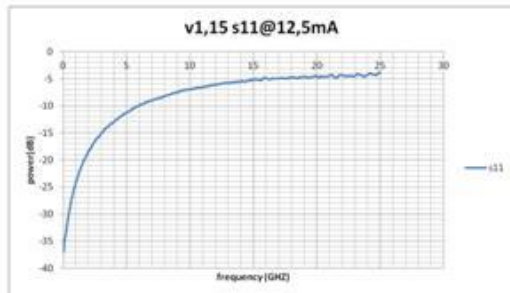




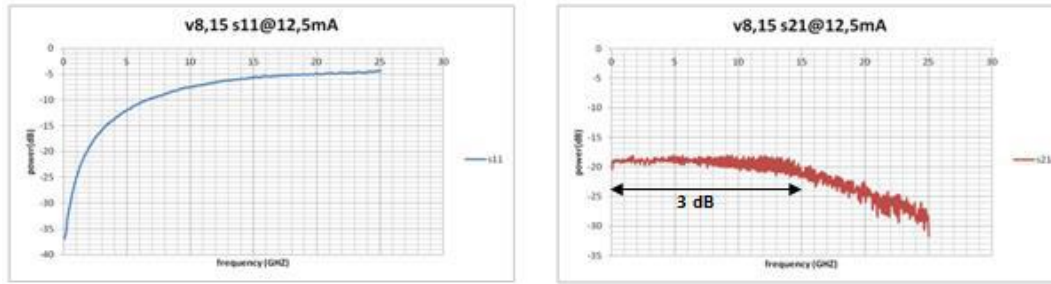
Σχήμα 5-22: Οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγγεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου C2 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση)

Ο λόγος σβέσης μεταξύ των πολώσεων του VCSEL τύπου C2 κυμαίνεται μεταξύ των 8.94 και 19.51dB. Το VCSEL τύπου C2-8-15 παρουσίασε αλλαγές στους άξονες πολικότητας όταν αυξανόταν το εγγεόμενο ρεύμα. Το VCSEL τύπου C2-5-15 παρουσίασε παρόμοια ισχύ εξόδου και στους δύο άξονες πόλωσης.

• **S-parameters at I=12.5 mA**



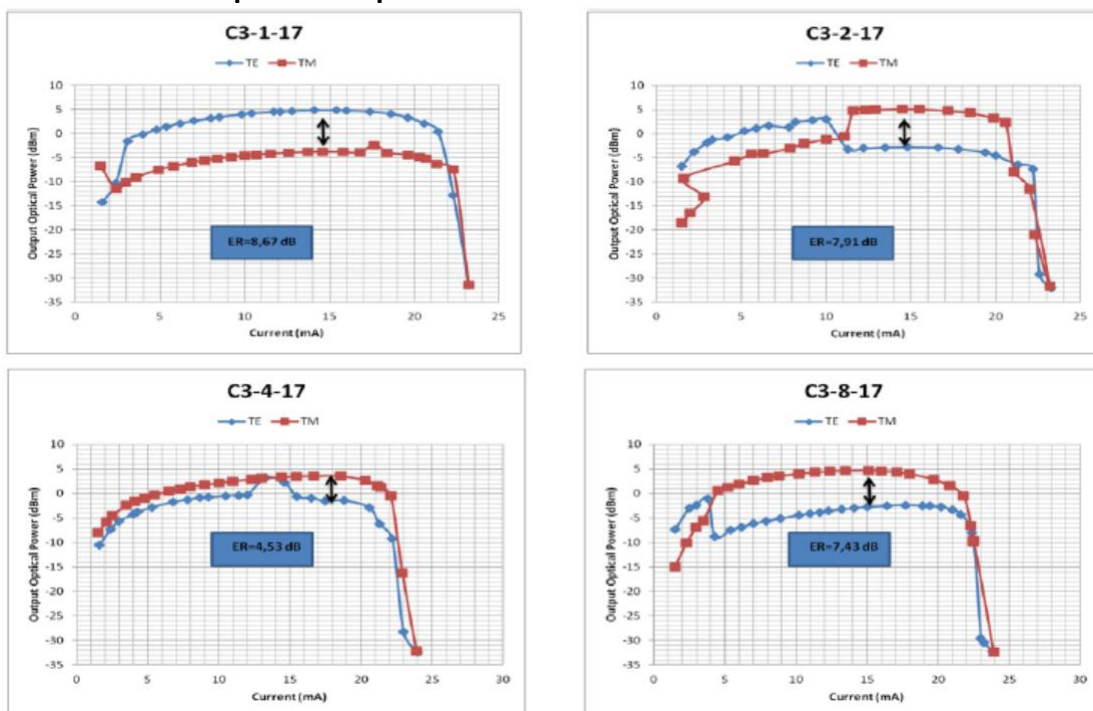




Σχήμα 5-23: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης του VCSEL τύπου C2

Το 3dB εύρος ζώνης του VCSEL τύπου C2 κυμαίνεται από 15 ως 17GHz.

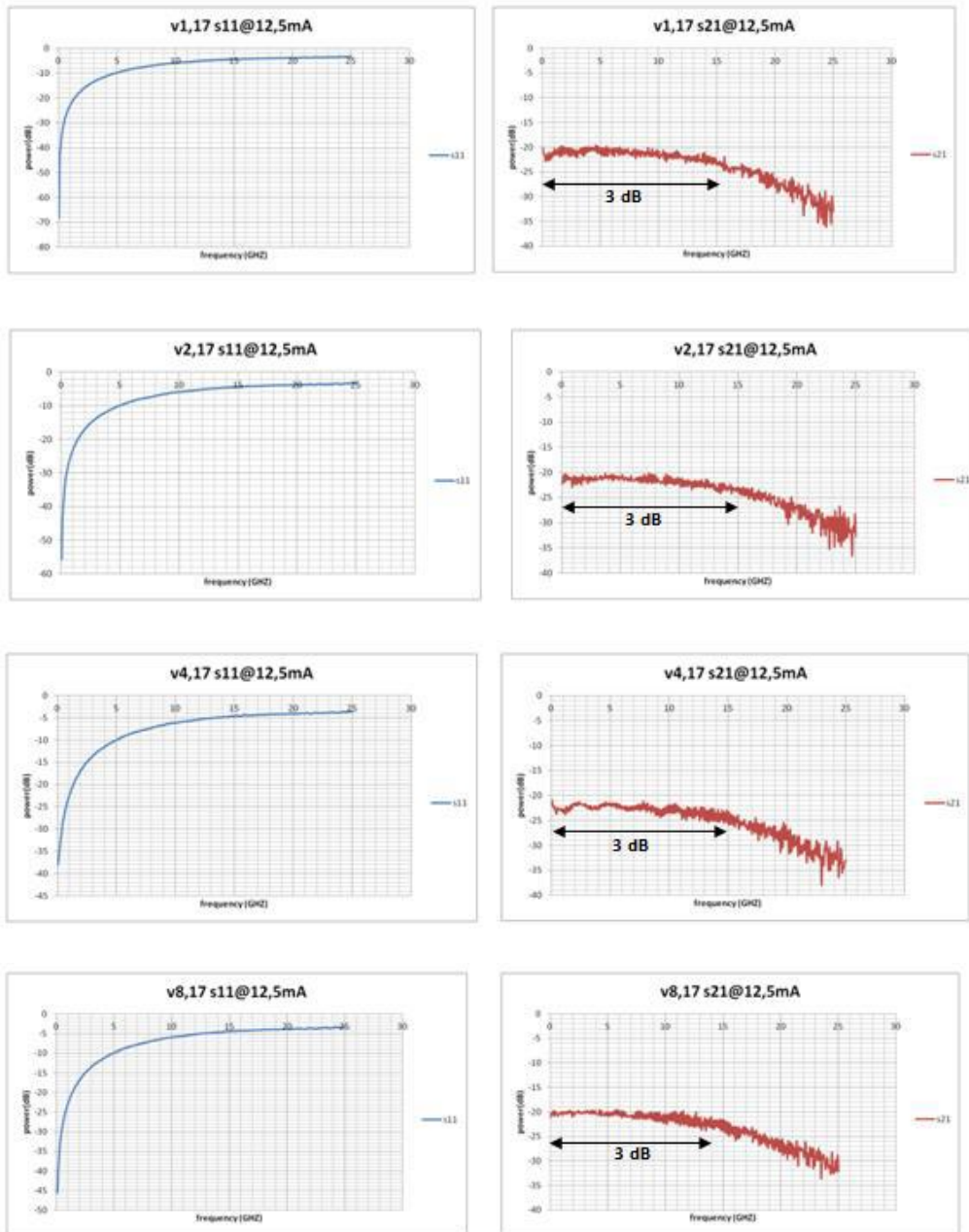
- Mesa: 28  $\mu\text{m}$  BTJ: 5  $\mu\text{m}$



Σχήμα 5-24: Οπτική ισχύς εξόδου έναντι εγχεόμενου ρεύματος στο VCSEL τύπου C3 και στους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση)

Ο λόγος σβέσης μεταξύ των πολώσεων του VCSEL τύπου C3 κυμαίνεται μεταξύ των 4.53 και 8.67dB. Το VCSEL τύπου C3-2-17 παρουσίασε αλλαγές στους άξονες πολικότητας όταν αυξανόταν το εγχεόμενο ρεύμα. Το VCSEL τύπου C3-4-17 παρουσίασε σχεδόν όμοια ισχύ εξόδου και στους δύο άξονες πόλωσης.

- S-parameters at I=12.5 mA



Σχήμα 5-25: Μετρήσεις ανάκλασης και διάδοσης του VCSEL τύπου C3

Το 3dB εύρος ζώνης του VCSEL τύπου C3 κυμαίνεται από 14 ως 15.5GHz.

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει το rollover current, την οπτική ισχύ εξόδου, το λόγο σβέσης μεταξύ των πολώσεων και το 3dB εύρος ζώνης των VCSEL που εξετάστηκαν.

VCSEL	Rollover Current (mA)	Output Optical Power (dBm)	Polarization extinction ratio (dB)	3-dB Bandwidth (GHz)
A1-2-1	9	2.63	20.93	13
A1-4-1	9	2.45	12.75	13
A1-8-1	9.2	2.33	10.66	13
A2-1-3	11.2	1.49	5.55	13
A2-2-3	10.7	2.22	13.92	14
A2-7-3	8.3	2.33	17.77	13
A2-8-3	8.6	2.76	21.12	-
A3-1-5	8.7	2.4	5.08	14
A3-2-5	8.8	1.25	5.08	13.5
A3-4-5	11.9	0.5	8.55	14
A3-8-5	8.4	1.7	2.08	14
B1-1-7	8.4	1.19	5.38	16
B1-2-7	12.7	3.15	5.82	16
B1-4-7	12	3.62	21.37	15
B1-8-7	12	3.63	18.2	17
B2-1-9	10.2	2.33	4.49	14
B2-4-9	11.9	3.41	24.66	15
B2-8-9	12.4	3.05	12.75	16
B3-1-11	12	2.48	4.06	16
B3-2-11	12.9	2.21	3.7	13.5
B3-4-11	12.2	3.17	8.24	13
B3-8-11	14.7	2.41	4.8	14
C1-2-13	15.5	1.84	7.78	16
C1-4-13	13.2	2.54	1.9	17
C1-8-13	12.6	2.38	1.39	-
C2-1-15	14.5	4.84	8.94	17
C2-2-15	14.6	5.13	16.73	16
C2-5-15	15.1	4.81	0.48	15
C2-8-15	14.8	4.51	19.51	15
C3-1-17	15.4	4.83	8.67	15.5
C3-2-17	14.5	5.09	7.91	15
C3-4-17	16.7	3.53	4.53	15
C3-8-17	15.1	4.64	7.43	14

Σχήμα 5-26: Rollover ρεύμα, οπτική ισχύς εξόδου, λόγος σβέσης μεταξύ των πολώσεων και 3dB εύρος ζώνης για τα 8QW VCSELS που χαρακτηρίστηκαν



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### VPI

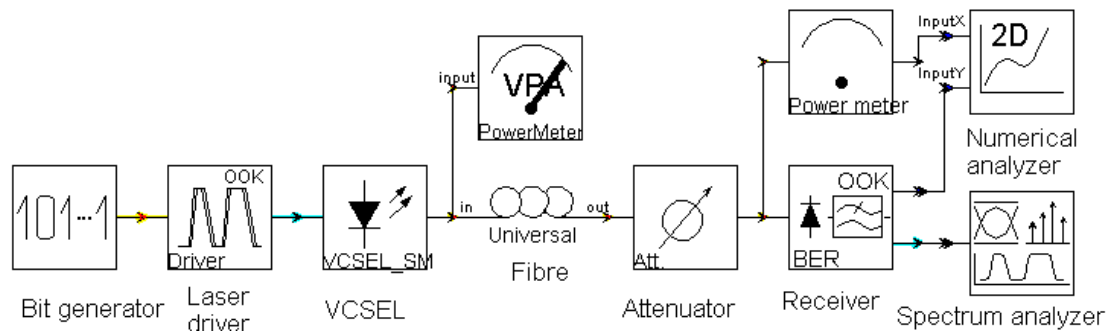
#### 6.1 Εισαγωγή

Το VPI (Virtual Photonics Integrated) είναι ένα πολύ ισχυρό εργαλείο, το οποίο επιτρέπει την προσομοίωση ενός μεγάλου εύρους οπτικών διατάξεων, προσφέροντας τη δυνατότητα δημιουργίας πολλαπλών μοντέλων για την προσομοίωση ενός δεδομένου σεναρίου μετάδοσης. Το VPI θέτει τα πρότυπα για το λογισμικό και τις υπηρεσίες που υποστηρίζουν τον από άκρη σε άκρη (end-to-end) σχεδιασμό φωτονικών διατάξεων. Περιλαμβάνει πολλά προϊόντα και εργαλεία: VPI Link Configurator, VPI Transmission Maker, VPI Component Maker και VPI Player.

Πιο συγκεκριμένα στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με το VPI Transmission Maker, το πιο διαδεδομένο και δυνατό εργαλείο της σειράς. Το VPI transmission Maker έχει τη δυνατότητα να επαληθεύει πλήρως τα σχέδια των συνδέσεων και να προσδιορίζει τεχνικές με τις οποίες θα μπορούσε να μειωθεί το κόστος κατασκευής τους ή να διερευνήσει νέες τεχνολογίες. Οι συνδέσεις μπορούν να εισαχθούν αυτόματα από το VPI Link Configurator για το λεπτομερή σχεδιασμό και βελτιστοποίηση της διάταξης. Το VPI Transmission Maker (στο εξής θα αναφέρεται ως VPI) χρησιμοποιείται επίσης για την αξιολόγηση και βελτιστοποίηση νέων εξαρτημάτων και υποσυστημάτων (πχ κωδικοποίηση, διαμόρφωση, διόρθωση των βλαβών).[39], [40]

Η γενική ιδέα της προσομοίωσης στο παρόν κεφάλαιο είναι η κατασκευή της διάταξης εκείνης με την οποία θα πραγματοποιηθεί η σύνδεση δύο Data Centers μέσω οπτικών διασυνδέσεων με τη χρήση laser κάθετης κοιλότητας (VCSEL). Τα VCSEL όπως αναφέρεται σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι ιδανικά για οπτικά δίκτυα επικοινωνιών μικρών αποστάσεων και υψηλής ταχύτητας. Με τη βοήθεια του VPI Transmission Maker έχουμε τη δυνατότητα να μοντελοποιήσουμε το δίκτυο αυτό και να αξιολογήσουμε τη συμπεριφορά του.

Η διάταξη που πραγματοποιήθηκε είναι η εξής:



Σχήμα 6-1: Διάταξη προσομοίωσης[41]

Πιο αναλυτικά η διάταξη αποτελείται από:

- Έναν Bit Generator, ο οποίος παράγει μία ψευδοτυχαία ακολουθία από 0 και 1.
- Έναν Laser Driver με on-off keying διαμόρφωση NRZ παλμών, ο οποίος διαμορφώνει το σήμα που θα οδηγήσει το laser. Επίσης το στοιχείο αυτό είναι χρήσιμο για την εξασθένιση, την πολυπλεξία και την αντιστάθμιση του ηλεκτρικού σήματος.
- Το VCSEL, στο οποίο εισαγάγαμε τις κατάλληλες παραμέτρους.
- Την οπτική ίνα (universal fiber). Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει μία μη γραμμική, μονορρυθμική ίνα (SMF).
- Έναν VPA Power meter, ο οποίος μετράει και παρουσιάζει την ολική οπτική ισχύ του σήματος εισόδου, συμπεριλαμβάνοντας όλα τα παραμετροποιημένα σήματα συμπεριλαμβανομένου και του θορύβου.
- Έναν Attenuator, ο οποίος εισάγει εξασθένιση στο οπτικό σήμα.
- Έναν Power meter, ο οποίος, όπως και ο VPA Power meter, υπολογίζει την ισχύ του οπτικού σήματος. Περιλαμβάνει επιλογές για τον περιορισμό του εύρους ζώνης, την πόλωση, τις μονάδες εξόδου και για τον εντοπισμό διαφορετικών τύπων σημάτων.
- Έναν δέκτη direct detection. Το στοιχείο αυτό αναπαριστά έναν πλήρη οπτικό δέκτη με δυνατότητα εκτίμησης του ρυθμού λανθασμένων bit.
- Έναν 2D αριθμητικό αναλυτή (numerical analyzer), ο οποίος έχοντας 2 θύρες εισόδου, δέχεται τα δεδομένα και τα παρουσιάζει σε μορφή διαγράμματος στους X/Y άξονες και σε αριθμητική μορφή σε ένα φύλλο εργασίας.
- Έναν αναλυτή φάσματος (spectrum analyzer) για την παρουσίαση και ανάλυση των ηλεκτρικών και οπτικών σημάτων.

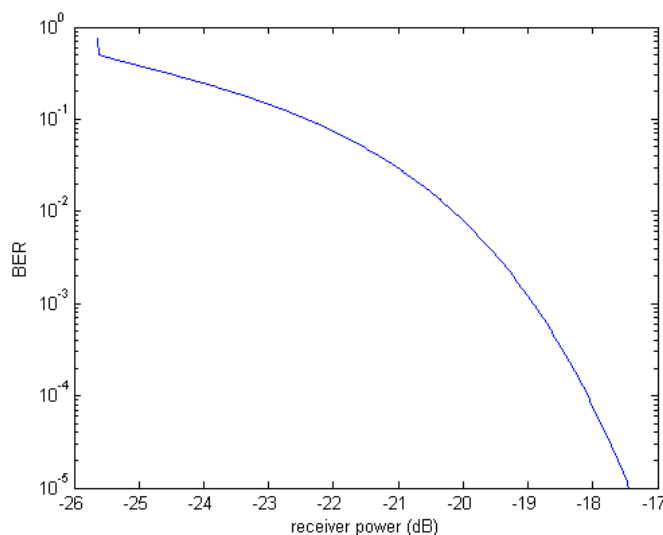
## 6.2 Στην πράξη

Στην προσομοίωσή η ισχύς του VCSEL θεωρήθηκε σταθερή στα 2.5dBm, ενώ οι μεταβλητές ήταν το μήκος της ίνας και ο ρυθμός μετάδοσης. Το VCSEL που χρησιμοποιήθηκε λειτουργεί στα 1550nm και το παραμετροποιήθηκε έτσι ώστε να έχει τα ίδια χαρακτηριστικά λειτουργίας με αυτά που χαρακτηρίστηκαν στο εργαστήριο. Στη συνέχεια ρυθμίστηκε κατάλληλα η εξασθένηση (attenuation) με σκοπό να υπολογιστεί το επιθυμητό εύρος ισχύος λήψης. Ο attenuator προσομοιώνει τις απώλειες που θα προκαλούσαν τα φαινόμενα υποβάθμισης του σήματος σε μία οπτική ίνα, όπως η Χρωματική Διασπορά ή και τα Μη-Γραμμικά Φαινόμενα Kerr. Ανάλογα με το πόσο μεγάλη είναι η επίδραση αυτών των φαινομένων τόσο μεγαλύτερη είναι η εξασθένηση που προστίθεται μέσω του attenuator. Το VCSEL διαμορφώθηκε σε ρυθμό μετάδοσης 10Gb/s και 26Gb/s από μία NRZ (Non-Return-to-Zero) ψευδοτυχαία δυαδική ακολουθία (Pseudo-Random Binary Sequence - PRBS) και οδηγήθηκε μέσω της ίνας που περιγράφηκε παραπάνω. Το μήκος της ίνας πήρε τις τιμές 1km και 2km.

### Αποτελέσματα- Διαγράμματα

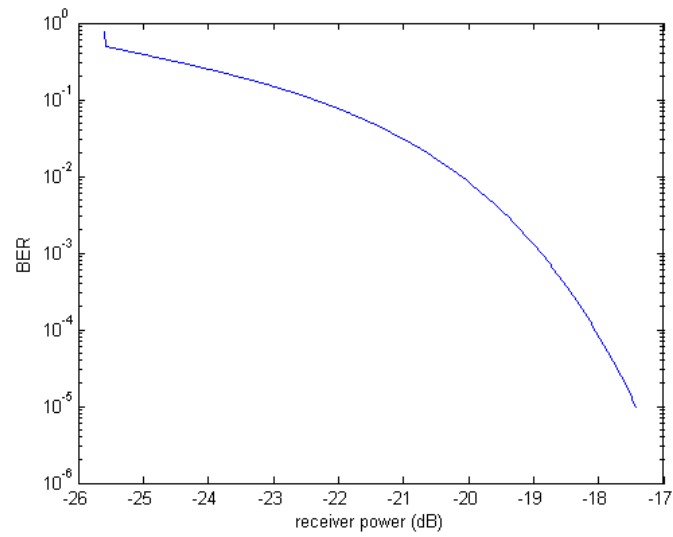
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα που απεικονίζουν το ρυθμό λανθασμένου bit (Bit Error Ratio - BER) ως προς την ισχύ που λαμβάνει ο δέκτης.

- **Ρυθμός Μετάδοσης 10Gb/s – Μήκος ίνας 1km**



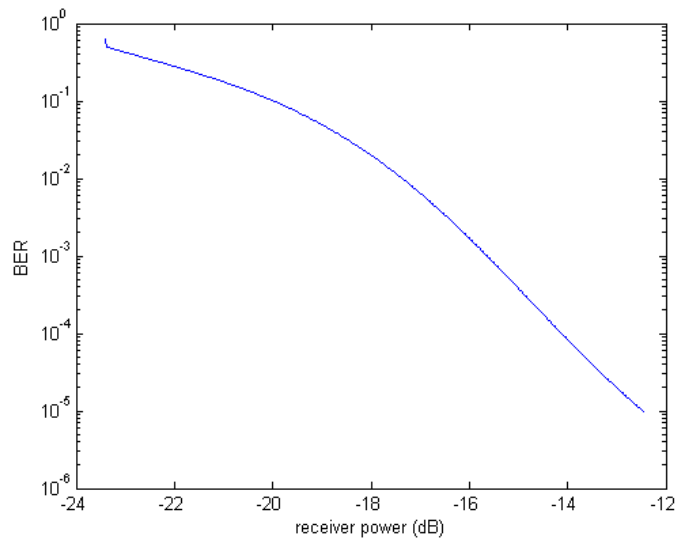
Σχήμα 6-2: Διάγραμμα BER ως προς την ισχύ στο δέκτη (10G 1km)

- Ρυθμός Μετάδοσης 10Gb/s – Μήκος ίνας 2km



Σχήμα 6-3: Διάγραμμα BER ως προς την ισχύ στο δέκτη (10G 2km)

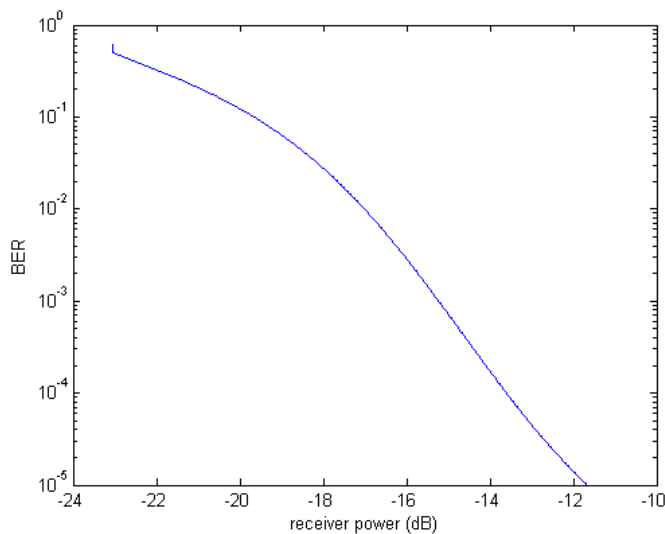
- Ρυθμός Μετάδοσης 26Gb/s – Μήκος ίνας 1km



Σχήμα 6-4: Διάγραμμα BER ως προς την ισχύ στο δέκτη (26G 1km)



- Ρυθμός Μετάδοσης 26Gb/s – Μήκος ίνας 2km



Σχήμα 6-5: Διάγραμμα BER ως προς την ισχύ στο δέκτη (26G 2km)

### 6.3 Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα διαγράμματα προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Και στις 4 περιπτώσεις μειώνεται ο ρυθμός λανθασμένου bit (BER) καθώς η ισχύς στο δέκτη αυξάνεται. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας ότι το  $10^{-3}$  είναι αποδεκτή τιμή για το BER (ανώτερο όριο όπου η κωδικοποίηση τύπου FEC μπορεί να διορθώσει τα λάθη κατά τη μετάδοση) παρατηρούμε ότι για ρυθμό μετάδοσης 10 Gb/s η ελάχιστη ισχύς στην οποία το BER βρίσκεται σε αποδεκτά όρια τιμών ( $<10^{-3}$ ) είναι τα -19 dB. Τιμή που είναι παρόμοια και στα 2 μήκη της ίνας. Αντίθετα για μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης (26 Gb/s) έχουμε σημαντική μεταβολή στην τιμή της ισχύος. Η ελάχιστη τιμή της ισχύος στην οποία έχουμε αποδεκτό BER βρίσκεται στα -16dB για μήκος ίνας 1km, τιμή σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή των 10 Gb/s. Μάλιστα όταν αυξάνεται το μήκος της ίνας στα 2km, αυξάνεται ακόμα περισσότερο το όριο της ισχύος στο δέκτη, η οποία φτάνει τα -15dB.

Συμπεραίνουμε δηλαδή ότι καθώς αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης, απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς για να βρίσκεται το BER μέσα στα αποδεκτά όρια τιμών. Η απόσταση επίσης παίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο, αφού μεγαλύτερο μήκος ίνας σημαίνει χειροτέρευση του BER. Τέλος, όσο μικρότερη είναι η ισχύς στο δέκτη τόσο απομακρύνεται το BER από τις αποδεκτές τιμές του.

Για να επιτευχθεί καλύτερη επίδοση της ζεύξης είναι σημαντικό καταρχάς να ελεγχθεί η ποιότητα των στοιχείων της. Οι ατέλειες κατά την κατασκευή ενός VCSEL για παράδειγμα, ή η εισαγωγή θορύβου από άλλα στοιχεία της διάταξης οδηγεί σε υποβάθμιση της ποιότητας μετάδοσης και συνεπώς χειροτέρευση του BER. Η αύξηση της ισχύος είναι ένας ακόμα παράγοντας που θα μπορούσε να συντελέσει στην ελάττωση του BER, όπως επίσης και η μείωση του εύρους ζώνης (εισάγεται λιγότερος θόρυβος στη διάταξη). Είναι σημαντικό όμως να επιτυγχάνεται μία χρυσή τομή ανάμεσα στην αύξηση της ισχύος και στο μικρό BER, αφού αυξημένη ισχύς σημαίνει κόστος. Ένας παρόμοιος συμβιβασμός θα πρέπει να γίνει και στη μείωση του εύρους ζώνης, αφού μια τέτοια μείωση θα επηρέαζε τη ροή των δεδομένων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### Συμπεράσματα

#### 7.1 Σύνοψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η πειραματική μελέτη και ο χαρακτηρισμός ταχύρυθμων VCSEL, καθώς και η αξιολόγηση της συμπεριφοράς αυτών σαν κομμάτι μίας μεγαλύτερης τελικής διάταξης οπτικών διασυνδέσεων. Παράλληλα έγινε εκτενής αναφορά στη λειτουργία και τη χρήση του Διανυσματικού Αναλυτή Δικτύου (VNA), που αποτελεί ένα πολύ σημαντικό και χρήσιμο μετρητικό εργαλείο. Στα δύο πρώτα κεφάλαια πραγματοποιείται η εισαγωγή του αναγνώστη στο γενικότερο θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά τις τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις της σημερινής εποχής και τη μορφή και λειτουργία των laser. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται διεξοδικά τα χαρακτηριστικά, η λειτουργία και οι ιδιότητες των VCSEL, ενώ το τέταρτο κεφάλαιο αφιερώνεται στα μετρητικά όργανα της διάταξης με έμφαση στον VNA και τη βαθμονόμηση αυτού, και στις S-parameters. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο και στο έκτο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

#### 7.2 Συμπεράσματα

Το μετρητικό κομμάτι της εργασίας χωρίζεται στις LIV μετρήσεις, τον rf χαρακτηρισμό και την προσομοίωση στο VPI.

Όσον αφορά τις LIV μετρήσεις, παρατηρούμε ότι το chip του VCSEL παρουσιάζει γενικότερα μία καλή συμπεριφορά. Ο λόγος σβέσης μεταξύ των πολώσεων βρίσκεται σε αρκετά ικανοποιητικά επίπεδα. Παράλληλα ικανοποιητικές ήταν και οι μετρήσεις της οπτικής ισχύος εξόδου. Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν πολύ μεγάλες αποκλίσεις - από 0.5 ως 5.13dBm - τιμές που συμφωνούν με τις προβλεπόμενες.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα που προκύπτουν από τον rf χαρακτηρισμό επιβεβαιώνεται και εδώ η σωστή λειτουργία του chip. Το 3dB εύρος ζώνης, δεν παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις. Κατά μέσο όρο βρίσκεται στα 15 -16 GHz. Είναι πολύ σημαντικό να τονιστεί επίσης ότι παρατηρήθηκαν ελάχιστες ανακλάσεις του σήματος.

Στο VPI όπως αναφέρεται και παραπάνω παρατηρείται ότι, όπως αναμενόταν, η ελάχιστη τιμή ισχύος στην οποία το BER βρίσκεται μέσα σε αποδεκτά όρια, αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο ρυθμός μετάδοσης και το μήκος της ίνας. Αυτό σημαίνει για μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης ή μεγαλύτερη απόσταση αυξάνεται ο ρυθμός λανθασμένων bit (BER) και απαιτείται περισσότερη ισχύς για τη μείωσή του σε επίπεδα τα οποία είναι διαχειρίσιμα.

### **7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο τα VCSEL αποτελούν μία πολλά υποσχόμενη πηγή, με πολλές ενδιαφέρουσες ιδιότητες και δυνατότητες, σε οπτικά δίκτυα μικρών όμως αποστάσεων και υψηλών ταχυτήτων. Ανοίγεται έτσι ο δρόμος για την ανάπτυξη διατάξεων οπτικών διασυνδέσεων, οι οποίες θα χρησιμοποιούν τα VCSEL ως κύριο στοιχείο και θα ερευνήσουν τη δυνατότητα να οδηγηθεί ένα VCSEL σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

Για παράδειγμα μία μελλοντική μελέτη θα μπορούσε να εντάξει τις δομές αυτές – VCSEL και Φωτοδίοδο – σε μία ευρύτερη διάταξη με σκοπό να μελετηθεί η δυνατότητα πολυπλεξίας WDM, με σκοπό να καταλήξουμε σε μεγαλύτερα σχήματα διαμόρφωσης και μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης ούτως ώστε να μπορέσουν τα VCSEL ενταχθούν σε συστήματα μεγαλύτερων αποστάσεων.

Επίσης δίνεται η ευκαιρία για τη θερμική μελέτη της απόδοσης των VCSEL, σε θερμοκρασία η οποία μπορεί να φτάσει τους 80-90°C, συνθήκες δηλαδή οι οποίες επικρατούν σε ένα τυπικό κέντρο πληροφορίας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ- ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] *Towards a Bright Future*, Strategic Research agenda in Photonics, Photonics 21, Απρίλιος 2006, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στην ιστοσελίδα με διεύθυνση: [http://www.photonics21.org/download/sra\\_april.pdf](http://www.photonics21.org/download/sra_april.pdf)

[2] URL: <http://www.internetworldstats.com/stats.htm>

[3] Cisco VNI 2012, <http://www.cisco.com>

[4] Παρασκευάς Γ. Μπακόπουλος, *Ευρυζωνικά φωτονικά συστήματα παραγωγής και επεξεργασίας σήματος με ισχυρά μη-γραμμικές οπτικές ίνες, με εφαρμογή σε τηλεπικοινωνίες και βιοϊατρική απεικόνιση*, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2010

[5] Jacco L.Pleumeekers, Peter W. Evans, Wel Chen, Richard P. Schneider Jr, Radha Nagarajan, *A new Era in Optical integration*, Μάρτιος 2009, διαθέσιμο στο διαδίκτυο στην ιστοσελίδα με διεύθυνση:

[http://www.osa-opn.org/home/articles/volume\\_20/issue\\_3/features/a\\_new\\_era\\_in\\_optical\\_integration/#.U7M0iJR\\_uuI](http://www.osa-opn.org/home/articles/volume_20/issue_3/features/a_new_era_in_optical_integration/#.U7M0iJR_uuI)

[6] URL: <http://cgi.di.uoa.gr/~std05149/Welcome.html>

[7] Dr. Alfredo Viglienzoni, *Photonic Integration in Optical Transport*, 3<sup>rd</sup> European Photonic Integration Forum, Eindhoven, Ιούνιος 2011, διαθέσιμο στην ιστοσελίδα με διεύθυνση:

[http://www.jeppix.eu/document\\_store/Presentatie\\_2\\_Dr.\\_Alfredo\\_Viglienzoni.pdf](http://www.jeppix.eu/document_store/Presentatie_2_Dr._Alfredo_Viglienzoni.pdf)

[8] URL:

<http://www.unisystems.gr/el/quick-links/item/349-data-center-%CF%84%CE%B7%CF%82-uni-systems.html>

[9] TCO Certified: Technology for you & the planet, διαθέσιμο στην ιστοσελίδα με διεύθυνση: <http://www.tcodevelopment.com/>

[10] S Gupta, *Computing with Green Responsibility*, in International Conference and Workshop on Emerging Trends in Technology (ICWET 2010) – TCET, Mumbai, India

[11] URL: [http://www.epset.gr/el/Nisrt/GreenIT#Πρασινη\\_Πληροφορική\\_και\\_ΕΠΣΕΤ](http://www.epset.gr/el/Nisrt/GreenIT#Πρασινη_Πληροφορική_και_ΕΠΣΕΤ)

[12] URL: <http://www.netweek.gr/default.asp?pid=9&la=1&arId=25639&pg=1&ss=>

- [13] Silfvast W. T., *Lasers. Fundamentals of Photonics* (course 1 of 8). University of Central Florida. Orlando, Florida.
- [14] History of Lasers. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο στην ιστοσελίδα με διεύθυνση: <http://www.worldoflasers.com/laserhistory.htm>
- [15] Στασινοπούλου Β., Ταμπαθάνη Ν., Χριστογιάννη Μ., *Το Laser και οι Εφαρμογές του*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2005
- [16] A Brief History of Lasers. Διαθέσιμο στο διαδίκτυο στην ιστοσελίδα: <http://www.kigre.com/files/historylasers.pdf>
- [17] Orazio Svelto, David Hanna, *Principles of Lasers*, Springer
- [18] Ηρακλής Αβραμόπουλος, *Φωτονική Τεχνολογία για τηλεπικοινωνίες*, ΕΜΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
- [19] Walter Koechner, Michael Bass, *Solid state Lasers: a graduate text*, Springer
- [20] William T. Silfvast, *Laser Fundamentals*, Cambridge
- [21] E. Siegman, *Lasers*, University Science Book, 1<sup>st</sup> Edition, California, 1896
- [22] I . P. Kaminow and T. Li , *Optical fiber telecommunications IVA Components*, Academic Press Inc. , NY, 2002
- [23] M. Zirngibl et al ., *An 18 Channel Multifrequency Laser*, IEEE Photonics Technology Letters , Vol . 8, No. 7, pp.870-872 , July 1996
- [24] K. Iga, *Surface -Emitting Laser - Its Birth and Generation of New Optoelectronics Field*, IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics , Vol . 6, No. 6, pp. 1201-1215, Nov. /Dec. 2000
- [25] Ray T. Chen, Chulchae Choi, *Optical Interconnects*, USA, 2007
- [26] Μινόγλου Κυριακή, *Οπτικοηλεκτρονικά κυκλώματα υψηλής πυκνότητας ολοκλήρωσης για υψίρρυθμα φωτονικά μικροσυστήματα*, Διδακτορική Διατριβή, ΕΚΠΑ, Αθήνα, Μάρτιος 2007
- [27] Christopher Chase, Yi Rao, Werner Hofmann, and Connie J. Chang-Hasnain, *1550nm high contrast grating VCSEL*, University of California, Berkeley, USA, July 2010
- [28] Asier VillafrancaF, Javier Lasobras and Ignacio Garcés, *Characterization of 1.55 μm VCSELs using high-resolution and highdynamic range measurements of the CW optical spectrum*, University of Zaragoza, Spain, 2005

- [29] Ευστράτιος Κεχαγιάς, *Εργαστηριακές Σημειώσεις για την λειτουργία των Φωτοδίοδων*, Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών, ΕΜΠ, Αθήνα
- [30] Joseph T. Verdeyen, *Laser Electronics*, Third Edition, USA, 1995
- [31] Agilent Technologies, *Advanced Calibration Techniques for Vector Network Analyzers*, 2006
- [32] Agilent Technologies, *Network Analysis Back to Basics*
- [33] Anritsu, *Understanding VNA Calibration*
- [34] Αμανατιάδης Βασίλειος, *Μετρήσεις σε πολύ υψηλές Συχνότητες*, Διπλωματική εργασία, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη 2012
- [35] Νικόλαος Ουζούνογλου, *Εισαγωγή στα Μικροκύματα*, Αθήνα, 1994
- [36] Sophocles J. Orfanidis, *Electromagnetic Waves & Antennas* – chapter 12, June 2004
- [37] RP Photonics Encyclopedia, *Polarization of Laser Emission*, Διαθέσιμο στο διαδίκτυο στην ιστοσελίδα:  
[http://www.rp-photonics.com/polarization\\_of\\_laser\\_emission.html](http://www.rp-photonics.com/polarization_of_laser_emission.html)
- [38] Fibercore, Fiberpaedia, *Polarization Extinction Ratio, PER*, Διαθέσιμο στο διαδίκτυο στην ιστοσελίδα:  
<http://www.fibercore.com/expertise/fiberpaedia/polarization-extinction-ratio-per>
- [39] Miguel Garcia, Hugo Coll, Diana Bri, Jaime I. Loret, *Software Tools and Simulators in the Education of Engineering of Telecommunications*, Polytechnic University of Valencia, Spain, July 2008
- [40] Eduardo Heras Miguel, *Fiber Based Orthogonal Frequency Division Multiplexing Transmission Systems*, Master Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, October 2010
- [41] E. K. Rotich Kipnoo, H. Kourouma, D. Waswa, A. W. R. Leitch, T. B. Gibbon, *Analysis of VCSEL Transmission for the Square Kilometre Array (SKA) in South Africa*, Nelson Mandela Metropolitan University, South Africa