



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεόδωρος Μ. Μπέλλος

**Επιβλέπων :** Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεόδωρος Μ. Μπέλλος

**Επιβλέπων :** Κωνσταντίνος Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....  
Ον/μο Μέλος Δ.Ε.Π  
Ιδιότητα Μέλους Δ.Ε.Π

.....  
Ον/μο Μέλος Δ.Ε.Π  
Ιδιότητα Μέλους Δ.Ε.Π

.....  
Ον/μο Μέλος Δ.Ε.Π  
Ιδιότητα Μέλους Δ.Ε.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2012

.....  
Θεόδωρος Μ. Μπέλλος

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

Copyright © Θεόδωρος Μ. Μπέλλος

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

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών(CPV) και του ρόλου που μπορούν να παίξουν στην παραγωγή πράσινης, φθηνής ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα. Αρχικά, γίνεται μία σύντομη ιστορική αναδρομή στην ιστορία της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, και στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η τεχνολογία των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών δίνοντας έμφαση στις διαφορές τους με τα συμβατικά κύτταρα σιλικόνης. Έπειτα, παρουσιάζονται οι πιο σημαντικές κατασκευαστικές διαδικασίες(LPE και MOCVD) καθώς και επίκαιρα ζητήματα που αφορούν τις διαδικασίες αυτές. Ειδικό βάρος δίνεται στις τρέχουσες και μελλοντικές δυνατότητες εμπορικής ανάπτυξης των CPV: Παρουσιάζονται σενάρια μελλοντικής υλοποίησης της τεχνολογίας των CPV, καθώς και το τι έχει γίνει μέχρι σήμερα. Αναδεικνύεται ειδικά ο ρόλος των πολυενωτικών ηλιακών κελιών(multi-junction solar cells) σαν καταλύτης στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να ανταγωνιστεί ευθέως τις συμβατικές πηγές(άνθρακας, πυρηνικά καύσιμα). Στο τέλος, αναφέρονται συνοπτικά διάφορες πραγματικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.

Θεόδωρος Μπέλλος  
Αθήνα, 2012

## Λέξεις κλειδιά

Συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά(CPV), προσέγγιση LED, εκφυλισμός, επανασύνδεση, κόστη BOS, φακοί Φρεσνελ, δυαξονική παρακολούθηση, δίδυμο ηλιακό κελί, πολλαπλό ηλιακό κελί, πολυενωτικό ηλιακό κελί, μονολιθική κατασκευή, κατασκευή στίβας, LPE, MOCVD

## **Abstract**

This diploma thesis is about Concentrated Photovoltaics (CPV) and the major role they could play in generating solar power on an industrial-size scale. Initially, a small introduction about photovoltaics in general is made, and consequently CPV technology is explained in detail. Special emphasis is given on its differences with conventional silicon cells. Afterwards, the most important and promising manufacturing processes and techniques are presented (such as LPE and MOCVD) and current challenges and difficulties concerning those techniques are pointed out. Its current and future economic prospects are laid down, especially in comparison to conventional solar cells. Also, we explain in detail why multi-junction solar cell technology is an enabler for low cost power generation using concentrated photovoltaic systems. Finally, several current, large scale applications are presented.

Theodoros Bellos

Athens, 2012

## **Key words**

Concentrated Photovoltaics (CPV), LED, degradation, recombination, B(ase)O(f)S(ystem) costs, fresnel lenses, two axis tracking, single junction cell, tandem solar cell, multi-junction solar cell, monolithic and stacked manufacturing, LPE (liquid phase epitaxy), MOCVD (metal-organic chemical vapor phase epitaxy)

## **Zusammenfassung**

Diese Diplomarbeit ist über Konzentrierte Photovoltaik(CPV) und die wichtige Rolle, die sie spielen könnte, bei der Herstellung von Solarenergie in großem Umfang. Am Anfang kommt eine kleine Einführung in die Photovoltaik als Ganzes und anschließend wird die CPV technology in größerem Detail herangeführt. Dabei werden die Unterschiede zu den herkömmlichen Silikon Solarzellen unterstrichen. Im Anschluss werden dann die wichtigsten Herstellungsprozesse und Techniken präsentiert(so wie LPE und MOCVD) sowohl auch die aktuellen Herausforderungen und Probleme, die mit diesen Techniken zu tun haben. Das momentane und zukünftige finanzielle Ausnutzungspotenzial wird ebenfalls untersucht, vor allem im direkten Vergleich zu gewöhnlichen Solarzellen. Es wird ausführlich begründet, warum Mehrfachsolarzellen(multi-junction solar cells) in Konzentratortransistorsystemen zu preiswerter und konkurrenzfähiger Energieproduktion führen können. Zum Schluss werden noch aktuelle große CPV Anwendungen vorgestellt.

Theodoros Bellos

Athen, 2012

## **Stichwörter**

Konzentrierte Photovoltaik(CPV), LED, Degradierung, Rekombination, BOS Kosten, Fresnel Linsen, zwei achsiges Tracking, Zwillingsolarzelle, Mehrfachsolarzelle, Monolithisches und Stapel Produktionsverfahren, Flüssigphasenepitaxie, Metallorganische chemische Gasphasenabscheidung(MOCVD)

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο Διδάκτωρα κ. Σταύρο Αναγνωστάτο, για την ευχέρεια που μου έδωσε στο ζήτημα της επιλογής της διπλωματικής. Ο διάλογος μαζί του με βοήθησε και με “ξελάσπωσε” αρκετές φορές και σε ακαδημαϊκό και σε προσωπικό επίπεδο. Τους γονείς μου Μαρία και Μιχάλη, που μου κατέστησαν δυνατές τις σπουδές μου, για την αμέριστη στήριξη και αγάπη που μου έδωσαν.

Τον αδερφό μου Βασίλη, για τις πολύτιμες συμβουλές του και την υπομονή που έδειξε στην ανάγνωση της τελικής μορφή του κειμένου αυτού.

Τους συμφοιτητές μου Γεώργιο Παπαδόπουλο και Μιχάλη Κεραμίδα, για την φιλία τους και τα ωραία χρόνια που περάσαμε μαζί.

Τέλος, τον καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Καραγιαννόπουλο για τα αξέχαστα μαθήματά του στο Ηλεκτρολογικό Σχέδιο καθώς και για το γεγονός ότι κατέστησε δυνατή την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής.

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Abstract.....	5
Zusammenfassung.....	6
Ευχαριστίες.....	7
1. Εισαγωγή στα CPV.....	10
1.1. Εισαγωγή.....	10
1.2. Η ανάγκη για CPV.....	11
1.3. Προκλήσεις στα CPV.....	13
1.4. Σενάριο μαζικής παραγωγής.....	14
2. III-V ετεροδομές σε φωτοβολταϊκά.....	16
2.1. Εισαγωγή.....	16
2.2. Πρώιμη ιστορία των III-V ετεροδομών.....	16
2.3. Ηλιακή Συγκέντρωση: Αποδοτικότητα και οικονομία.....	18
2.4. Συγκεντρωτικά III-V ετεροδομικά ηλιακά κελιά.....	19
2.4.1. AlGaAs/GaAs κελιά μονής σύνδεσης(single junction).....	19
2.4.2. Δίδυμα(dual junction) ηλιακά κελιά.....	23
2.4.2.1. Επιλογή εύρους απορρόφησης.....	23
2.4.2.2. Ταίριασμα κρυστάλλου.....	23
2.4.2.3. Βελτιστοποίηση κελιού.....	24
2.4.2.3.1. Ταίριασμα ρεύματος.....	24
2.4.2.3.2. Παραγωγή ισχύος.....	24
2.4.2.3.3. Συγκεντρωτές.....	25
2.4.2.4. Κατασκευή δίδυμων συγκεντρωτικών ηλιακών κελιών.....	26
2.4.3. Τρόπος υλοποίησης.....	27
2.4.4. Τρισυνδετικά ηλιακά κελιά.....	28
3. Πολυσυνδετικά κελιά στη πράξη.....	32
3.1. Πολυσυνδετικά κελιά κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.....	32
3.1.1. Μη ενιαία ακτινοβολία.....	32
3.1.2. Τροποποίηση και διαβίβαση ηλιακού φάσματος από το συγκεντρωτή.....	34
3.1.3. Ισοστάθμιση ρεύματος και ηλιακό φάσμα.....	34
3.1.4. Σειριακή αντίσταση.....	35
3.2. Η προσέγγιση LED στα ηλιακά κύτταρα.....	37
3.2.1. Συσχετίσεις μεταξύ III-V MJCs και LEDs.....	37
3.2.2. Εντοπισμός του βέλτιστου μεγέθους.....	38
3.2.3. Ενθυλάκωση και συνδεσμολογία.....	39
3.2.4. Απαγωγή θερμότητας.....	39
3.2.5. Κατασκευή Ηλιακών κυττάρων με τη χρήση οπτοηλεκτρονικής τεχνολογίας.....	40
3.3. Ανάλυση κόστους.....	41
4. Εφαρμογές.....	45
4.1. Αποπικ Φωτοβολταϊκό Σύστημα υψηλής συγκέντρωσης.....	45
4.1.1. Γενικά για την Αποπικ.....	45
4.1.2. Περιγραφή συστήματος.....	47
4.1.3. Εγκατάσταση και λειτουργία.....	49
4.1.4. Συντήρηση.....	50
4.1.5. Απόδοση και κόστος συστήματος.....	52
4.2. Σύστημα FLATCON της Concentrix Solar.....	54
4.2.1 Γενικά για την Concentrix Solar.....	54
4.2.2 Περιγραφή του συστήματος.....	54



4.3.2. Απόδοση και κόστος συστήματος.....	56
<u>Βιβλιογραφία.....</u>	<u>60</u>

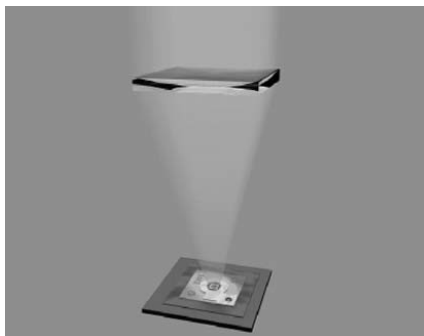
# 1. Εισαγωγή στα CPV

## 1.1. Εισαγωγή

Στην εισαγωγή αυτή θα δοθεί μια σύνοψη της ιστορίας των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών και μετά θα γίνει επισκόπηση του παρόντος καθώς του μέλλοντος αυτής της τεχνολογίας. Η επισκόπηση θα λάβει ιδιαίτερα υπόψη της και τις προκλήσεις που υπάρχουν αυτή τη στιγμή όσον αφορά τα κατασκευαστικά ζητήματα καθώς και τη διαθεσιμότητα πρώτων υλών. Από την επιτυχή αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων θα εξαρτηθεί η καθιέρωση των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών στο να παράγουν ένα σημαντικό μέρος του παγκόσμιου ηλεκτρισμού.

Η γενική ιδέα πίσω από έναν φωτοβολταϊκό συγκεντρωτή είναι η χρήση οπτικών μέσων προκειμένου να επιτευχθεί εστίαση του ηλιακού φωτός σε ένα μικρό ηλιακό στοιχείο-αποδέκτη (εικ. 1.1). Με αυτό τον τρόπο, η επιφάνεια του στοιχείου του συγκεντρωτή μπορεί να μειωθεί ανάλογα με το λόγο συγκέντρωσης. Ταυτόχρονα, η ένταση του ήλιου πάνω στο κύτταρο αυξάνεται κατά το ίδιο μέγεθος. Με άλλα λόγια, σε φωτοβολταϊκούς συγκεντρωτές η επιφάνεια των στοιχείων τους αντικαθίσταται από φακούς ή κατοπτρικές επιφάνειες και η απόδοση αλλά και η τιμή και των δύο καθορίζει την τελική διαμόρφωση της εγκατάστασης. Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα μεσαίου και μεγάλου μεγέθους απαιτούν ακριβή παρακολούθηση (“tracking”) του ήλιου ώστε να διατηρείται η βέλτιστη εστίαση του ηλιακού φωτός κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτό προσθέτει κόστος και αυξάνει τη περιπλοκότητα του συστήματος αλλά και την ανάγκη συντήρησης κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Για συστήματα με μικρούς συλλέκτες, ή συστήματα μικρής συγκέντρωσης ( $c < 200x$ ) στους συλλέκτες, είναι εφικτή η παθητική ψύξη μέσω του περιβάλλοντος αέρα.

Η τεχνολογία συγκέντρωσης έχει πλέον 30 χρόνια ανάπτυξης πίσω της. Σε αυτό το χρονικό διάστημα υπήρξε καμμία ή σχεδόν καμμία βιομηχανική ή εμπορική εφαρμογή. Μελέτη πάνω σε αυτή την τεχνολογία γινόταν μεμονωμένα σε λίγα επίλεκτα πανεπιστήμια, κυρίως στο πλαίσιο της χρήσης της σε διαστημικούς σταθμούς. Επίγειες εφαρμογές γίνονταν σε αμελητέα κλίμακα. Ωστόσο, αυτό πρόκειται να αλλάξει ριζικά. Οι παράγοντες που θα συνεισφέρουν σε αυτό είναι οι νόμοι ακριβής έγχυσης ρεύματος στο δίκτυο που έχουν θεσπιστεί σε πολλές ηλιόλουστες χώρες (ανάμεσά τους και η Ελλάδα) καθώς και οι υψηλότεροι συντελεστές απόδοσης (μέχρι αυτή τη στιγμή που γράφεται αυτό το κείμενο η υψηλότερη απόδοση που έχει επιτευχθεί είναι 43,5%, σε αντίθεση με 28,3% που έχουν οι κοινοί συλλέκτες πυριτίου 3ης γενιάς. Όπως θα φανεί σε λίγο ωστόσο, το περιθώριο βελτίωσης της πρώτης τεχνολογίας ανέρχεται δυνητικά σε δεκάδες ποσοστιαίες μονάδες, σε αντίθεση με τη δεύτερη, η οποία σε λίγο θα φτάσει το θεωρητικό της μέγιστο) που έχουν πλέον τα III-V κελιά πολλαπλής συνένωσης.



**Εικ. 1.1.** Η αρχή λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συγκέντρωσης κάνοντας χρήση οπτικών φακών Fresnel.

## **1.2. Η ανάγκη για CPV**

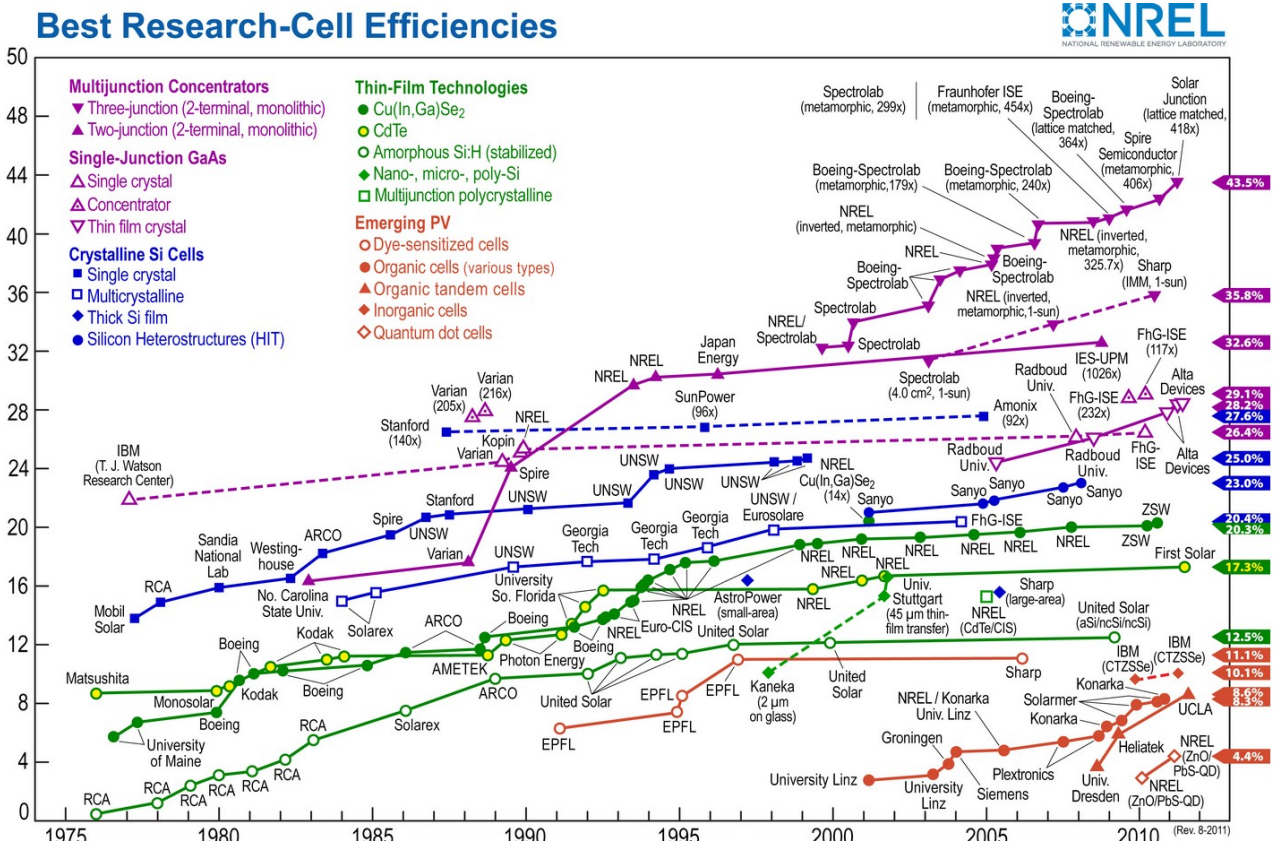
Μια ματιά στον πίνακα 1.3. στην επόμενη σελίδα φανερώνει τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά ως την καλύτερη και επικρατούσα φωτοβολταϊκή τεχνολογία από πλευράς απόδοσης. Παρατηρούμε ότι διαφέρει πάνω από 15 ποσοστιαίες μονάδες από την δεύτερη αποδοτικότερη τεχνολογία.

Ο πίνακας 1.2. στην επόμενη σελίδα παρουσιάζει ένα μοντέλο των αγορών και των τιμών για φωτοβολταϊκή τεχνολογία για το πρώτο μισό του 21ου αιώνα. Το μοντέλο συνδυάζει την καμπύλη εκμάθησης, που χαρακτηρίζει τη μείωση των τιμών κάθε φορά που η συνολική παραγωγή φωτοβολταϊκών διπλασιάζεται, με την ελαστικότητα της ζήτησης – η οποία είναι η διαφορική παράγωγος της αγοράς σε σχέση με την τιμή. Οι κάθετες ασυμπτωτικές δείχνουν ότι το κόστος του ηλεκτρισμού που παράγεται από τα ΦΒ ισούται με αυτό του υπάρχοντος φορτίου, ωστόσο αξ σημειωθεί ότι προυποθέτουν άπειρη ζήτηση και ως τούτου είναι εν μέρει ενδεικτικές του ζητήματος. Ωστόσο, αυτό το μοντέλο μας δείχνει ότι η υπάρχουσα φωτοβολταϊκή τεχνολογία μπορεί μεν να υπάρχει σε πολύ μεγάλες αγορές, ωστόσο δεν έχει επαρκή διείσδυση ώστε να εξασφαλίσει οικονομική βιωσιμότητα. Ο λόγος είναι η αργή καμπύλη εκμάθησης των φωτοβολταϊκών. Το ίδιο μοντέλο προβλέπει γρηγορότερη καμπύλη εκμάθησης για συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά. Η αιτία είναι στοιχειώδης και εντοπίζεται στο γεγονός ότι η απόδοση των τωρινών φωτοβολταϊκών κυττάρων είναι περιορισμένη για θεωρητικούς θεμελιώδους λόγους στη μέγιστη θεωρητική τιμή των 40%. Αυτό καθιστά κάθε μικρή αύξηση της απόδοσης στην πράξη πολύ δύσκολη και συνεπώς μειώνει την ταχύτητα εκμάθησης. Για παράδειγμα: Για κάθε διπλασιασμό του όγκου παραγωγής στα CPV και στα συμβατικά κελιά σιλικόνης αντίστοιχα, έστω ότι στα πρώτα έχουμε αύξηση της μέγιστης απόδοσης κατά 4%, ενώ στα δεύτερα κατά 1%. Η ταχύτητα εκμάθησης των CPV τότε θα είναι τετραπλάσια από αυτή των συμβατικών κελιών.

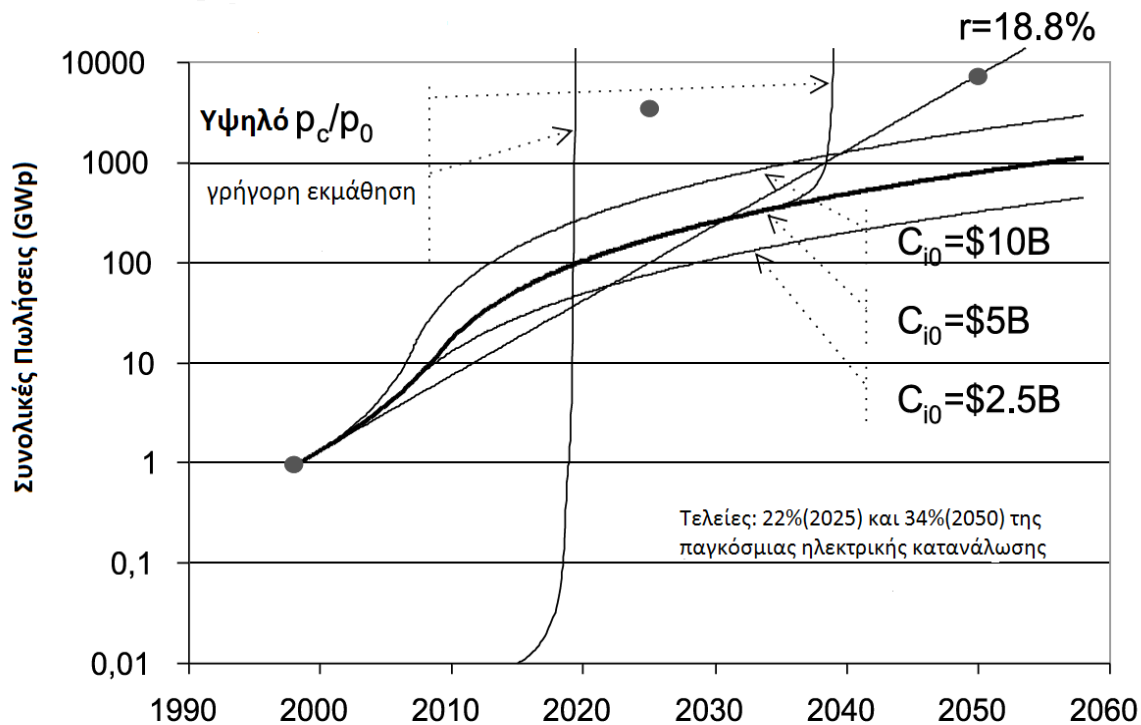
Ο θεμελιώδης λόγος βρίσκεται στο γεγονός ότι ένα ηλιακό κύτταρο είναι ένα διεπίπεδο στοιχείο που μετατρέπει αποτελεσματικά σε ενέργεια τα φωτόνια με παρόμοια ενέργεια του ενεργειακού διάκενου του στοιχείου. Απορροφά δηλαδή εκείνο το μέρος του φάσματος που έχει το ίδιο ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού. Η υπόλοιπη προσπίπτουσα ακτινοβολία δεν αξιοποιείται. Αν λοιπόν, αντί για μία δίοδο χρησιμοποιούσαμε δύο ή τρεις, η μία επάνω στην άλλη, από τις οποίες η καθεμία θα είχε διαφορετικό ενεργειακό διάκενο η βελτίωση θα ήταν προφανής. Η «επόμενη»

διόδος, εκμεταλλεύεται τα «διαφυγόντα ενεργειακά κέρδη» της προηγούμενης και η αξιοποίηση του ηλιακού φάσματος είναι αποτελεσματικότερη. Με χρήση δύο στρωμάτων παράγονται τα γνωστά ως tandem cells (“δίδυμα” κελιά), ενώ με χρήση τριών φωτοδίοδων τα triple-junction cells (κελιά τριπλής συνένωσης). Τα ανώτερα στρώματα θα λέγαμε πως παίζουν τον ρόλο φίλτρων για τα κατώτερα, και μάλιστα βαθυπερατών.

Το όριο που προκύπτει από τη διεπίπεδη φύση των ηλιακών κυττάρων αναφέρεται ως όριο SQ. Όπως αναφέρθηκε, τα στοιχεία πολλαπλής συνένωσης διαφεύγουν αυτού του ορίου, αφού κάτω από τις ίδιες συνθήκες που έχουμε 40% βέλτιστη απόδοση για στοιχεία ενός ημιαγωγού, η δική τους απόδοση φτάνει το 86%. Άρα, η λύση έγκειται στη χρήση ηλιακών μετατροπών που δεν υπόκεινται στο όριο SQ. Αυτό θα οδηγούσε σε πολύ ταχύτερες καμπύλες εκμάθησης, και σε περίπτωση εισόδου στην αγορά, οι μετατροπείς αυτές να είναι πιο φτηνοί από κοινούς μετατροπείς διόδου και να επιταχύνουν τη διεξόδυση του ηλιακού ηλεκτρισμού στην αγορά.



Εικ. 1.3. Διαχρονική εξέλιξη της απόδοσης για διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών



**Εικ. 1.2.** Διάφορες ΦΒ εγκαταστάσεις για τρεις διαφορετικές διαθεσιμότητες κεφαλαίου. Οι ετικέτες PV installations for  $C_{i0} = \$10B$ ,  $5B$  and  $2.5 B$  αντιπροσωπεύουν το 0.1, 0.05 and 0.025% του ΑΕΠ των εκβιομηχανισμένων χωρών. Η καμπύλη με την ετικέτα *Υψηλό  $\rho_c/\rho_0$*  αντιπροσωπεύει την περίπτωση όπου το κόστος παραγωγής είναι στα \$ 0.7/Wp (στις υπόλοιπες περιπτώσεις είναι \$ 0.35/Wp). Η καμπύλη υψηλής μάθησης έχει παράγοντα εκμάθησης 0,68 (για τις υπόλοιπες περιπτώσεις είναι 0,8253)

### 1.3. Προκλήσεις στα CPV

Τα CPVs έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις, προκειμένου να συμφέρει η χρήση τους από άποψη κόστους:

Απαιτούν πολύ υψηλές συγκεντρώσεις ηλιακής ακτινοβολίας π.χ. Με την προσθήκη φακού πάνω από τα κύτταρα, και, σε αντίθεση με κύτταρα πυριτίου, στα οποία η συγκέντρωση δεν μπορεί να πάει πάνω από τους 300 ήλιους(δηλαδή συγκέντρωση 300) τα πολυσυνδετικά ηλιακά κύτταρα λειτουργούν με μεγάλη απόδοση στους 1000 ήλιους. Αυτό επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

Με την τοποθέτηση οπτικών, μεγενθυντικών μέσων πάνω από το κύτταρο

Τα οπτικά μέσα τα διέπουν θεμελιώδεις φυσικοί περιορισμοί που μειώνουν τη γωνιακή αποδοχή, όσο αυξάνεται η συγκέντρωση. Γωνιακή αποδοχή είναι η γωνία υπό την οποία οι ακτίνες του ήλιου που διέρχονται από το οπτικό μέσο, εισέρχονται στο κύτταρο. Πρέπει να καλύπτει τουλάχιστον την εμφανή ημι-διάμετρο του ήλιου

(0,26). Ωστόσο, και μεγαλύτερες τιμές είναι αποδεκτές γιατί χαλαρώνουν τις απαιτήσεις στην κατασκευή και στο tracking, μειώνοντας όμως ταυτόχρονα την απόδοση και ενδεχομένως αυξάνοντας την τιμή του συστήματος. Η χρησιμότητα επιτυγχάνεται στον συμβιβασμό μεταξύ ακρίβειας του οπτικού μέσου και των υπόλοιπων παραμέτρων του συστήματος. Σαν τεχνικό ζήτημα για τους συγκεντρωτές μεγάλης γωνιακής αποδοχής παραμένει μέχρι σήμερα η επίτευξη ομογενούς και ταυτόχρονου φωτισμού όλου του κυττάρου.

Συστήματα παρακολούθησης (tracking) του ήλιου, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη γωνία απορρόφησης.

Το σύστημα παρακολούθησης του ήλιου αποτελεί ένα σημαντικό μέρος του κόστους BOS. Τα συστήματα παρακολούθησης δεν πάσχουν από έλλειψη αξιοπιστίας, όπως είναι ευρέως διαδεδομένο (π.χ. Λόγω της ύπαρξης ανιχνευτών, σερβοκινητήρων στο σύστημα παρακολούθησης κτλ) Στην Ισπανία μέχρι στιγμής έχουν εγκατασταθεί εκατοντάδες MW σε ηλιακές φάρμες που έχουν συστήματα tracking και δεν έχουν αναφερθεί προβλήματα μέχρι στιγμής. Η τεχνολογία επομένως, με την οποία υλοποιούνται, είναι αξιόπιστη. Αντίθετα, η πρόκληση έγκειται, στο να προσαρμοστούν οι τωρινές τεχνικές παρακολούθησης ώστε πέρα από την αντιμετώπιση των δυνάμεων της βαρύτητας και του ανέμου, να μην υπερβαίνουν την ανώτατη καμπή που προβλέπεται από τα οπτικά μέσα και τα ηλεκτρονικά ισχύος του συστήματος.

Η απόδοση του κυττάρου στα CPV πρέπει να είναι υψηλή για διάφορους λόγους.

- Πρώτον, οι συγκεντρωτές συλλέγουν μόνο άμεση ακτινοβολία. Η ακτινοβολία διάχυσης π.χ. δεν αξιοποιείται.
- Δεύτερον, ο συγκεντρωτής αυτός καθ' αυτός έχει συντελεστή απόδοσης μικρότερου του ενός. Αν υποθέσουμε ότι το ποσοστό της άμεσης ακτινοβολίας είναι 80%, όπως είναι σε μία χώρα με καλό κλίμα, και επίσης υποθέσουμε την αποδοτικότητα του οπτικού μέσου και αυτή στα 80%, τότε το συγκεντρωτικό κύτταρο δέχεται μόνο το 64% της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Αν λάβουμε τώρα υπόψη ότι τα τελευταία συμβατικά πάνελα από πυρίτιο έχουν απόδοση 20%, συμπεραίνουμε ότι η ελάχιστη δυνατή απόδοτικότητα στα συγκεντρωτικά στοιχεία είναι τουλάχιστον 31,25%. Μέχρι στιγμής, η μέγιστη αποδοτικότητα που έχει επιτευχθεί κάτω από κανονικές συνθήκες είναι 43,5%, με ξεκάθαρα περιθώρια βελτίωσης. Επομένως, τα CPVs μπορούν κάλλιστα να ανταγωνιστούν και να ξεπεράσουν τα πάνελα πυριτίου.

#### **1.4. Σενάριο μαζικής παραγωγής**

Στο κομμάτι αυτό παρατίθεται ένα σενάριο που πραγματεύεται την διαθεσιμότητα πρώτων υλών καθώς και τη κατασκευαστική δυναμική ώστε τωρινές τεχνολογίες CPV να επεκταθούν και να εφαρμοστούν σε μαζική παραγωγή. Το σενάριο αυτό επινοήθηκε το 2006, και από τότε έχουν επεισέρθει πολλές αλλαγές, όλες τους ευνοϊκές ως προς τα CPVs. Το σενάριο θα αναφερθεί ρητά ολόκληρο, ακολουθούμενο από τις εξελίξεις που έκαναν να παρωχηθεί η κάθε παράμετρος.

- Η διεξόδυση των ΦΒ ώστε να επιτευχθεί 20% της παγκόσμιας ηλεκτροδότησης μέχρι το 2025 πρέπει να είναι χονδρικά 100 GW το χρόνο. Μια τέτοια παραγωγή, με την παραδοχή ότι τα πανέλα λειτουργούν με 40% απόδοση, θα απαιτήσει αύξηση της παραγωγής ατσαλιού για τα πλαίσια κατά περίπου 2% ενώ της παραγωγής γυαλιού κατά 10%. Αυτό συνεχίζει να ισχύει ακόμα, μιας και η τεχνολογία αυτή είναι οικονομική και δοκιμασμένη. Η αποκλειστική κατασκευή των φακών πάνω σε υπόστρωμα PMMA θα απαιτούσε μιάμιση φορές την συνολική παγκοσμια παραγωγή ακρυλίου(που είναι παράγωγο του πετρελαίου, οπότε είναι ασύμφορο και απο οικονομική αλλά και από περιβαλλοντική άποψη). Ωστόσο, κατα τη τελευταία πενταετία όλο και περισσότεροι κατασκευαστές χρησιμοποιούν πολυμερή λεπτού φιλμ(thin film) πάνω σε γυαλί, που είναι μια καλή λύση.
- Η παραγωγή των 100 GW ετησίως προϋποθέτει τη λειτουργία κυττάρων ισχύος 100 MW σε συνθήκες ενός ήλιου με ενίσχυση 1000x κάτω από το συγκεντρωτικά μέσο. Για πολυσυνδεδετικά κύτταρα κατασκευασμένα σε υπόστρωμα γερμανίου απαιτούνται 25 εκατομμύρια πλακίδια των 100 τετρ. Χιλιοστών. Αυτό αντιστοιχεί σε 3,75 φορές την παρούσα παγκόσμια ετήσια παραγωγή γερμανίου για χρήση σε ηλεκτρονικές διατάξεις. Ας σημειωθεί εδώ ότι το κόστος του γερμανίου είναι υψηλό και καθιστά το προϊόν λιγότερα εμπορικά ανταγωνιστικό. Επίσης, το κράμα πυριτίου-γερμανίου παρουσιάζει αστάθεια στην ενεργειακή του συμπεριφορά. Και σε αυτή την περίπτωση την τελευταία εφταετία σημειώθηκε μέσω μια σειρά τεχνολογικών καινοτομιών μια “μετανάστευση” προς σιλικονούχα υποστρώματα, καθιστώντας τα MJ ηλιακά κύτταρα πιο ελκυστικά
- Η ανάγκη για το μέταλλο γάλλιο(Ga) στη σύνθεση των MJ κυττάρων δεν επηρεάζει σημαντικά την συνολική παραγωγή του.
- Τα πολυσυνδεδετικά ηλιακά κύτταρα συντίθενται σε έναν ειδικό αντιδραστήρα χημικής επιταξίας. Υποτίθοντας ότι ο αντιδραστήρας μπορεί να χωρέσει έως 12 πλακίδια και ότι έχει εφτά κύκλους εργασίας τη μέρα, θα χρειαστούν 815 αντιδραστήρες για να παραχθούν τα 25 εκατομμύρια πλακίδια.
- Σχετικά με τη συναρμολόγηση, κάνοντας την υπόθεση εργασίας ότι τα κύτταρα είναι ενός τετραγωνικού χιλιοστού για μεγέθυνση τύπου 1000x, τότε πρέπει να επεξεργαστούν και να διασυνδεθούν περίπου 250 δισεκατομμύρια κύτταρα κάθε χρόνο. Ο τωρινός εξοπλισμός κατασκευής ηλεκτρονικών τσιπ δεν επιτρέπει πάνω από 3 τσιπ το δευτερόλεπτο κάνοντας 1982 τον αριθμό των μηχανών σύνδεσης για τη συναρμολόγηση των κυττάρων. Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας προφανώς χρειάζεται περισσότερος εξοπλισμός ωστόσο στόχος είναι να δοθεί μια εικόνα του μεγέθους του εξοπλισμού που απαιτείται.
- Για τους παρακολουθητές, υποθέτοντας τράκερς των 50m<sup>2</sup> (20kW με απόδοση 40%) ο αριθμός τους πρέπει να είναι γύρω στους 5 εκατομμύρια το χρόνο.

Για να δημιουργηθεί μια συγκρίσιμη εικόνα, πρέπει όλα τα προαναφερθείσα μεγέθη να παρατεθούν με αυτά από την βιομηχανία αυτοκινήτου. Η βιομηχανία αυτή παράγει παγκοσμίως 60 εκατομμύρια αμάξια το χρόνο. Κάθε αμάξι έχει 30 με 60 χιλιάδες

κομμάτια, οπότε η βιομηχανία αυτή διαχειρίζεται και επεξεργάζεται 1800 με 3600 δισεκατομμύρια κομμάτια το χρόνο. Ένα συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό πανέλο του 0,1 kW(με 250 κύτταρα) δεν θα περιέχει από 1500 κομμάτια. Συνεπώς, για να επιτευχθεί ο αρχικός σκοπός των 100 GW ετησίως από CPVs, θα πρέπει να συναρμολογηθούν 1500 δισεκατομμύρια κομμάτια.

Το νούμερο αυτό είναι της ίδιας τάξης μεγέθους και μόνο κατα λίγο μικρότερο από αυτό της παγκόσμιας βιομηχανίας αυτοκινήτου! Δεν πρόκειται για διόλου ευκαταφρόνητο μέγεθος, ειδικά αν αναλογιστεί κανείς τη τεράστια σημασία που παίζει το αυτοκίνητο στη ζωή μας, καθώς και την ηλικία αυτής της βιομηχανίας. Σαφώς η εφαρμογή μίας τεχνολογίας που θα λάβει παρόμοιες διαστάσεις, δεν είναι εύκολο εγχείρημα ούτε από τεχνικής ούτε από πολιτικής ούτε από κοινωνικής άποψης. Οι μηχανικοί θα κληθούν να λύσουν μια σειρά από αλληπάλληλων τεχνικών προβλημάτων, οι πολιτικοί να προωθήσουν μια ακόμα σχετικά ακριβή τεχνολογία, ενώ οι κοινωνίες πρέπει επιτέλους να αποδεχτούν μια και καλή την αναγκαιότητα για μια πιο φιλική στάση ως προς το περιβάλλον και τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

## **2. III-V ετεροδομές σε φωτοβολταϊκά**

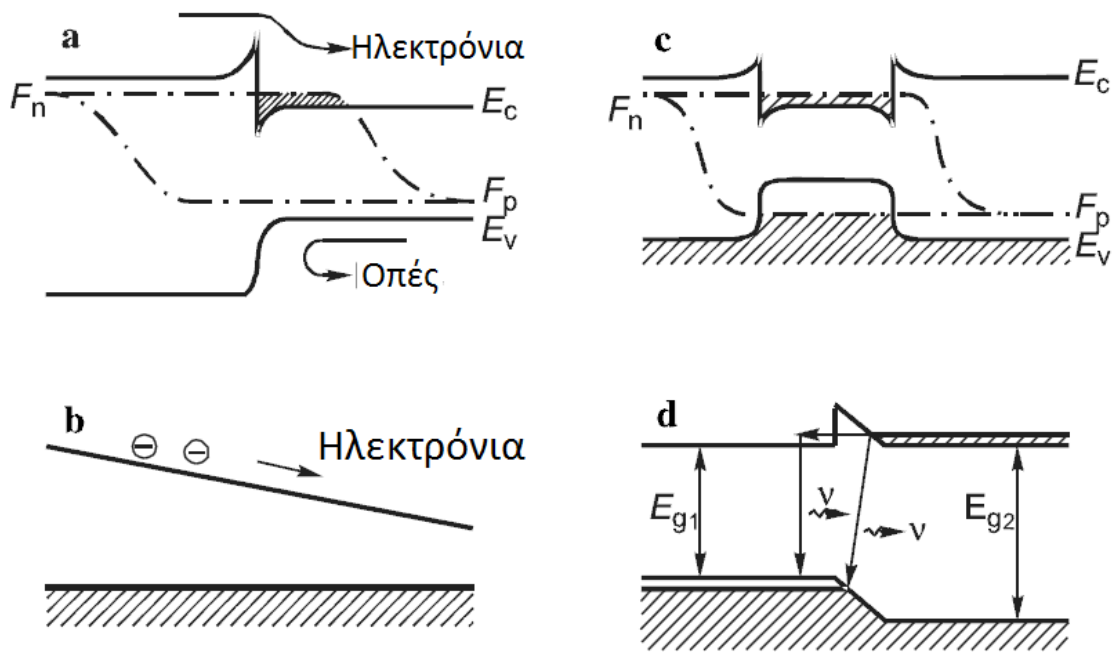
### **2.1. Εισαγωγή**

Η πρόοδος των ηλιακών κυττάρων έχει συσχετιστεί με την ανάπτυξη ημιαγωγικών ετεροδομών, δηλαδή η βασική αρχή κατασκευής σύγχρονων ηλιακών κυττάρων ξεκινά από την σύνθεση δομών με διαφορετικά, αλλά παραπλήσια χαρακτηριστικά. Στο κεφάλαιο αυτό θα δούμε ότι τα υλικά τύπου III-V έχουν ωριμάσει αρκετά ώστε να αποτελέσουν την τεχνική βάση για βιομηχανική παραγωγή ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας.

### **2.2. Πρώιμη ιστορία των III-V ετεροδομών**

Η ιδέα χρήσης ετεροδομών σε ημιαγωγικές διατάξεις υπήρξε ήδη από την αυγή της ηλεκτρονικής, με τον W. Shockley και A.I. Gubanov να κάνουν πρωτοπορικά βήματα πάνω σε αυτόν τον τομέα. Την εποχή αυτή ήταν που ανακαλύφθηκαν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ημιαγωγικών ετεροδομών: 1) υπερέγχυση φορέων 2) οπτικός περιορισμός και 3) ηλεκτρονικός περιορισμός. Τα κύρια φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε μονές και διπλές κλασικές ετεροδομές φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.





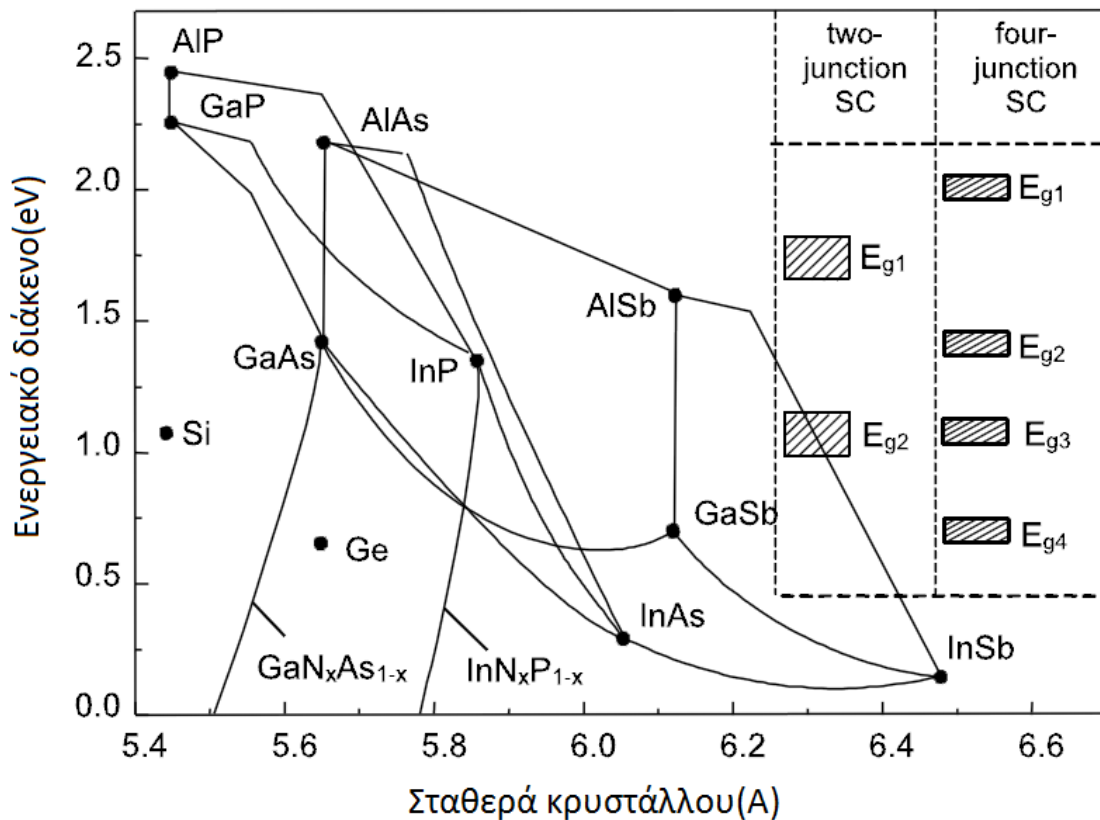
**Εικ. 2.1.** Κύρια φυσικά φαινόμενα σε κλασικές ετεροδομές. α) έγχυση μιας πλευράς και υπερέγχυση. β) διάχυση σε ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο. γ) ηλεκτρονιακός και οπτικός περιορισμός. δ) διαγώνιο φαινόμενο σήραγγας μέσω ετεροδομής

Τα υλικά που είναι κατάλληλα για τέτοιου είδους δομές, πρέπει να έχουν μια σειρά από θερμικές, ηλεκτρικές και κρυσταλλοχημικές ιδιότητες και στο GaAs με τη μικρή ενεργή του μάζα, το μεγάλο ενεργειακό διάκενο, την κατάλληλη επανασύνδεση ακτινοβολίας, καθώς και την υψηλή κινητικότητα των φορέων στον κάτω άκρο της ζώνης αγωγιμότητας βρέθηκε ο ιδανικός υποψήφιος.

Περαιτέρω μελέτες και η ανάπτυξη της τεχνικής της ρευστής επιταξίας (LPE) είχαν ως αποτέλεσμα την κατασκευή των πρώτων AlGaAs ετεροδομών με κρυσταλλικό ταίριασμα. Απο εκεί και πέρα, η πρόοδος στο πεδίο των ημιαγώγιμων ετεροδομών υπήρξε ραγδαία, με μία σημαντική εφεύρεση να διαδέχεται την άλλη:

- LED υψηλής απόδοσης
- ετεροδομικά ηλιακά κύτταρα
- ετεροδομικά διπολικά τρανζίστορ
- ετεροδομομικοί p-n-p-n διακόπτες

Η ανάγκη για κάλυψη όσου μεγαλύτερου εύρους του ενεργειακού φάσματος, έδειξε ότι έπρεπε να αναζητηθούν νέες ετεροδομές κρυσταλλικού ταίριασματος. Σε αυτή την αναζήτηση ήταν πολύτιμη η χαρτογράφηση των III-V ετεροδομών, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Εικ. 2.2.** Ενεργειακό διάκενο  $E_g$  συναρτήσει της σταθεράς κρυστάλλου για Si, Ge, και III-V κράματων καθώς και τα στερεά διαλύματά τους.

### 2.3. Ηλιακή Συγκέντρωση: Αποδοτικότητα και οικονομία

Η μετατροπή συγκεντρωμένου ηλιακού φωτός δίνει τη δυνατότητα περαιτέρω αύξησης της αποδοσης των ηλιακών κελιών. Το παραγόμενο ρεύμα αυξάνει γραμμικά με την ένταση του φωτός και η τάση εξόδου αυξάνει λογαριθμικά αντίστοιχα. Επομένως, η ένταση του φωτός αυξάνεται υπεργραμμικά με τη συγκέντρωση της ακτινοβολίας, και άρα αυξάνεται η συνολική απόδοση της φωτοβολταϊκής μετατροπής. Συγκεκριμένα, για πολυσυνδεδετικά κελιά, η μέγιστη θεωρητική απόδοση είναι στο 87%, που είναι πολύ κοντά στην απόδοση του κύκλου Carnot(93%). Συνεπώς, τα πολυσυνδεδετικά φωτοκύτταρα, πέρα του ότι μέχρι στιγμής επιδεικνύουν τις υψηλότερες αποδόσεις ανάμεσα σε όλα τα είδη φ/β κυττάρων, καθώς και πολύ χώρο για αύξηση αυτής της απόδοσης, δείχνουν ότι έχουν επίσης τις καλύτερες “εγγενείς” προδιαγραφές.

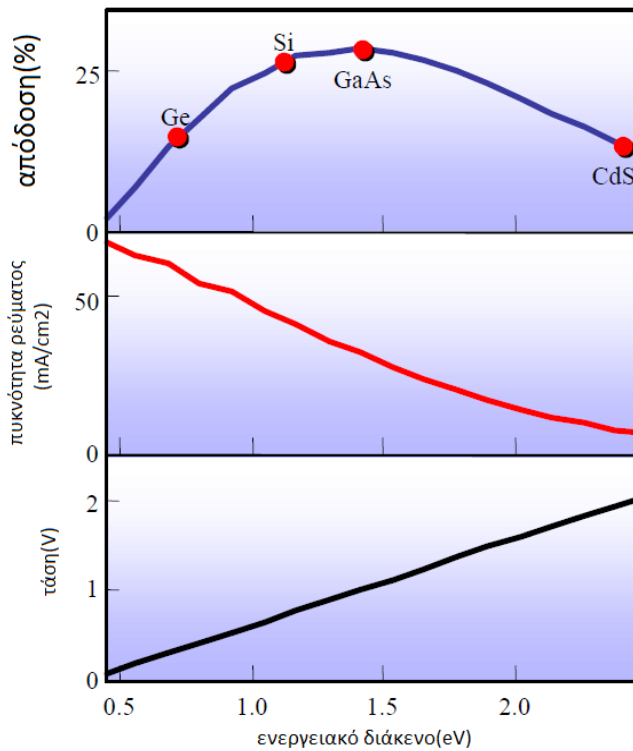
Στην πράξη, αύξηση αυτής της απόδοσης της φωτοβολταϊκής μετατροπής μπορεί να γίνει αν ένα υψηλότερο ρεύμα δεν προκαλεί αισθητή πτώση τάση κατά μήκος της εσωτερικής αντίστασης ενός φωτοκυττάρου. Αυτός είναι και ο λόγος που το κύριο πρόβλημα στα συγκεντρωτικά φωτοκύτταρα είναι η δραστική μείωση των εσωτερικών ωμικών απωλειών. Η προοπτικές αύξησης της απόδοσης είναι μεγάλες. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι κατά την τελευταία δεκαετία, κατά μέσο όρο

επιτυγχάνεται 0,4% αύξηση της απόδοσης. Ωστόσο, το πραγματικό στοίχημα στα συγκεντρωτικά φωτοκύτταρα είναι η μείωση των ημιαγωγικών υλικών που χρειάζονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με το λόγο της ηλιακής συκέντρωσης. Μόνο δηλαδή αν το κόστος του φωτοκύτταρου πέσει λόγω χρήσης λιγότερων υλικών θα έχει δημιουργηθεί η οικονομική βάση για την εδραίωση των III-V ετεροδομών.

## **2.4. Συγκεντρωτικά III-V ετεροδομικά ηλιακά κελιά**

### **2.4.1. AlGaAs/GaAs κελιά μονής σύνδεσης(single junction)**

Ο στόχος του φ/β κυττάρου είναι η μεγιστοποίηση της εξερχόμενης ισχύος βελτιστοποιώντας τους συμβιβασμούς μεταξύ τάσης και ρεύματος. Για τη μεγιστοποίηση του ρεύματος πρέπει να απορροφηθούν όσα περισσότερα φωτόνια από το φάσμα του ηλιακού φωτός γίνεται. Ένα μικρό εύρος μπορεί να επιλεγεί για αυτό το σκοπό, ώστε φωτόνια με χαμηλότερη ενέργεια να διεγείρουν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας. Ωστόσο, το μικρό εύρος έχει ως εγγενές αποτέλεσμα και μικρότερη τάση. Επιπλέον, τα φωτόνια με υψηλότερες ενέργειες θα απώλεσουν ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας τους ως θερμικές απώλειες, αφού ο το φ/β κελί απορροφά ακριβώς μόνο το εύρος ενέργειας που αντιστοιχεί στο ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, από τον οποίον αποτελείται. Εναλλακτικά, ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει υψηλότερο εύρος(κάνοντας νόθευση ή επιλέγοντας άλλον ημιαγωγό) αλλά αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να μην απορροφηθούν τα φωτόνια που έχουν χαμηλότερη ενέργεια από αυτό, ήτοι θα έχουμε χαμηλότερο ρεύμα. Στο σχεδιασμό συμβατικών κελιών μονής σύνδεσης, τα δύο αντιμαχόμενα αυτά φαινόμενα εξισορροπούνται επιλέγοντας ως βέλτιστο εύρος το μέσο του ενεργειακού φάσματος. Στην πράξη, χρησιμοποιούνται πλακίδια σιλικόνης υψηλής ποιότητας με εύρος 1,1 eV, και GaAs, με εύρος 1,4 eV. Όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα όμως, τέτοιες κατασκευές έχουν τον εγγενή περιορισμό της μειωμένης απόδοσης. Συγκεκριμένα, οι μέγιστη τιμή για συκέντρωση ενός ήλιου(1x) είναι στα 25%

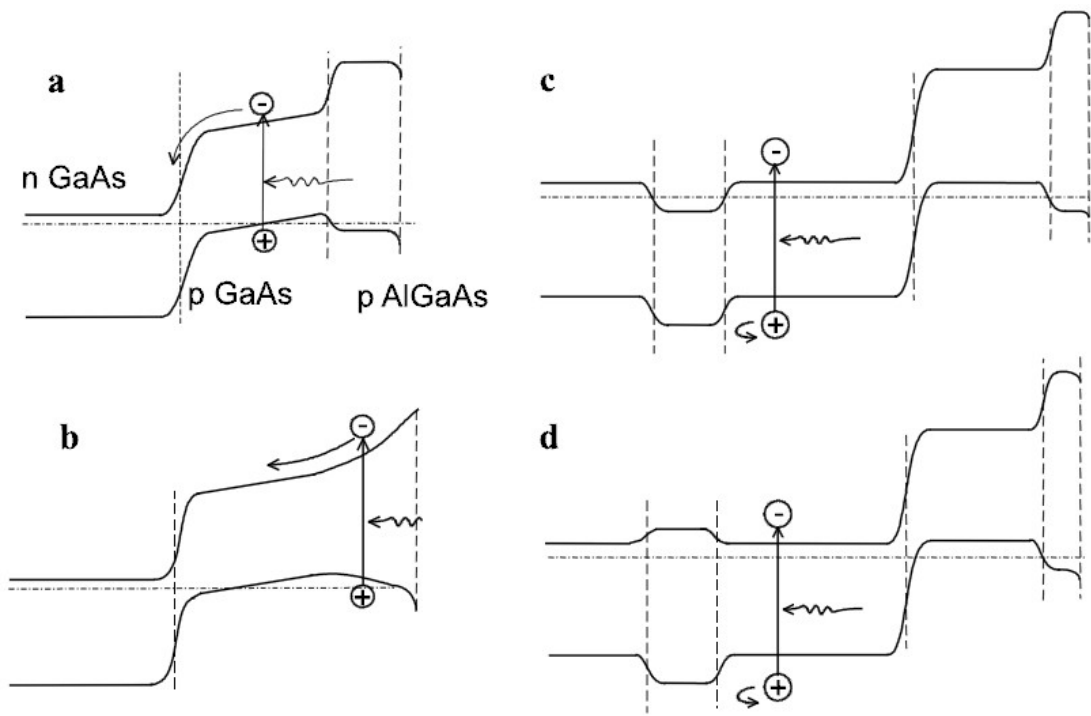


**Εικ. 2.3. Ιδανικό εύρος για ηλιακό κελί μονής σύνδεσης**

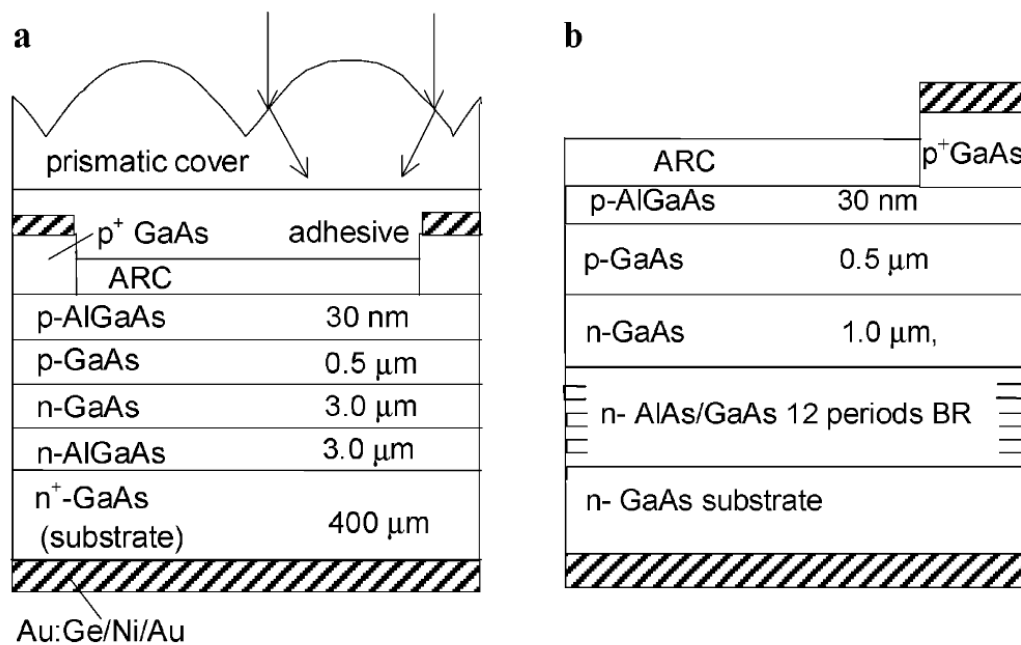
Το πυρίτιο και το GaAs εκπληρώνουν στο έπακρο τις απαιτήσεις για κατασκευή ηλιακών κυττάρων. Ο εκάστοτε συνδυασμός τους με μία απλή p-n δίοδο δίνει ένα ηλιακό κύτταρο που λειτουργεί σχεδόν στο έπακρο της μέγιστης φυσικής του απόδοσης. Το πυρίτιο υπάρχει σε αφθονία στη φύση, είναι μη τοξικό, και έχει σχετικά χαμηλή τιμή. Αυτοί οι παράγοντες καθώς και η εντατική ανάπτυξη της βιομηχανίας ημιαγωγών έχουν αναδείξει τον εξαιρετικά σημαντικό ρόλο των φωτοκυττάρων από πυρίτιο. Παρά τις αξιόλογες προσπάθειες που έχουν γίνει για ανάπτυξη και κατασκευή ηλιακών πάνελ λεπτού φιλμ, το πυρίτιο παραμένει το κύριο υλικό στη κατασκευή πάνελ.

Η ανάπτυξη των τεχνικών LPE και MOCVD προκάλεσαν μεγάλη βελτίωση στη σύνθεση των κελιών αυτών. Δύο ήταν οι κύριες και σημαντικότερες βελτιώσεις:

- Βελτιστοποιήθηκε το “παράθυρο” μεγάλου εύρους του AlGaAs και το πάχος του έγινε συγκρίσιμο με αυτό των νανοσκοπικών ενεργών περιοχών σε ετερολείζερ. Το στρώμα αυτό είναι το τρίτο στοιχείο στην αντικατοπτρική επίστρωση του φωτοκυττάρου, όπως φαίνεται στην εικόνα δ.
- Εξασφαλίστηκε ο οπτικός περιορισμός των φορέων και από τις δύο πλευρές εντός της ζώνης απορρόφησης φωτός, προσθέτοντας ένα στρώμα στο πίσω μέρος της p-n ένωσης. Έτσι μειώθηκαν οι απώλειες επανασύνδεσης στους φορείς πριν την απορρόφησή τους από την p-n ένωση.



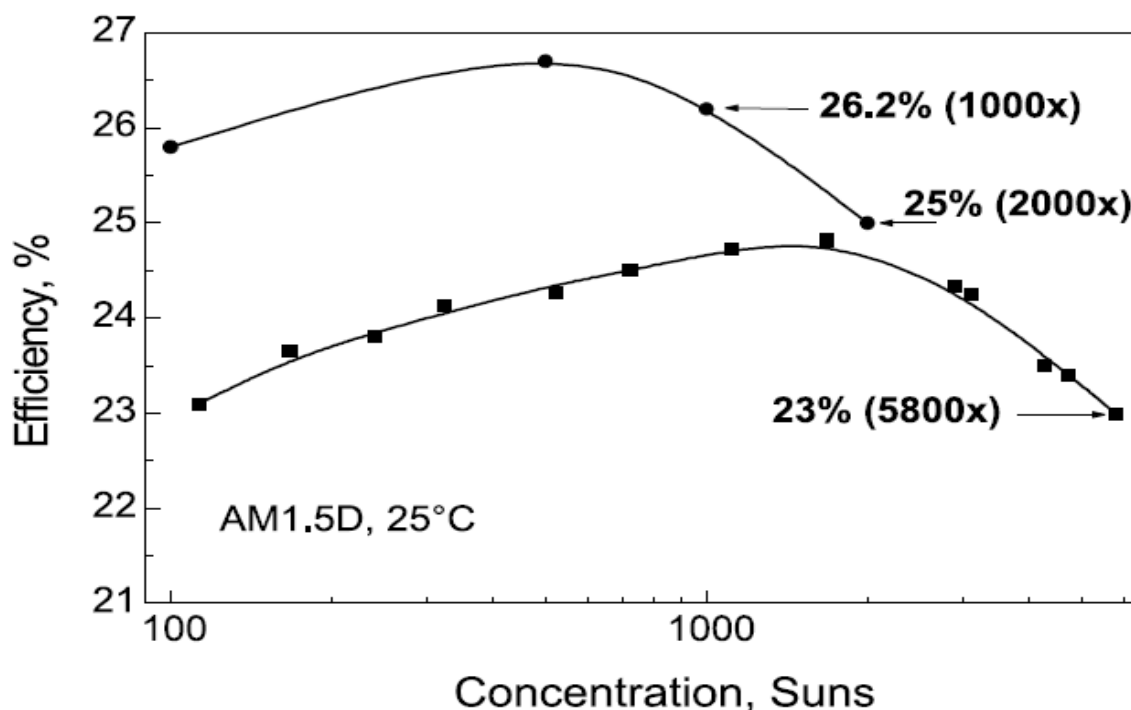
**Εικ. 2.4.** Διάγραμμα ζωνών p-AlGaAs-p-n-GaAs ηλιακών κυττάρων: α) το στρώμα p-GaAs με ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο παράγεται με Zn διάχυση σε βάση n-GaAs κατά την κατασκευή ενός στρώματος p-AlGaAs μεγάλου εύρους. β) δομή βαθμωτού ενεργειακού διάκενου με υψηλό ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο γ) δομή με δυνητικό πίσω φράγμα που έγινε με ισχυρή έγχυση n<sup>+</sup>-GaAs στρώματος. δ) δομή με μεγάλο διάκενο



**Εικ. 2.5.** Σχηματικά διαγράμματα κελιών AlGaAs /GaAs μόνης σύνδεσης πολλαπλών στρωμάτων. α) Σύνθεση με τη μέθοδο LPE. β) Σύνθεση με τη μέθοδο MOCVD. Η συγκεκριμένη δομή έχει ενσωματωμένο καθρέυτη τύπου Bragg, ο οποίος αποτελείται

απο 12 ζεύγη στρωμάτων AlAs(72 nm)/GaAs(59 nm). Η απορρόφηση είναι στα  $\lambda=850$  nm με συντελεστή ανάκλασης 96% και έχει ως αποτέλεσμα να περνάει η διπλή ποσότητα φωτός μεγάλου κύματος. Ο καθρέφτης είναι τέτοιος ώστε το φως μεγάλου μήκους κύματος που δεν απορροφάται κατά την πρώτη διέλευση από αυτή την περιοχή, να ανακλάται και να απορροφάται κατά τη δεύτερη διέλευση. Αυτό μειώνει το πάχος του n στρώματος στη βάση στα 1-1,5  $\mu\text{m}$  χωρίς να έχουμε απώλεια ρεύματος.

Στο παρακάτω σχήμα παρατίθενται οι αποδόσεις που επιτυγχάνονται σε AlGaAs/GaAs κύτταρα τα οποία έχουν γίνει με τη μέθοδο LPE. Συγκριτικά, το μέγιστο ρεκόρ που έχει σημειωθεί μέχρι σήμερα για παρόμοια μονοσυνδεδετικά κύτταρα, με μέθοδο κατασκευής τη MOCVD όμως, είναι 27,6%.



Εικ. 2.6. Απόδοση AlGaAs/GaAs κυττάρων μονής σύνδεσης κατασκευασμένων με LPE, σε συνάρτηση με την ηλιακή συγκέντρωση

## 2.4.2. Δίδυμα(dual junction) ηλιακά κελιά

Πολυσυνδεδετικά κελιά είναι ο συνδυασμός διάφορων ημιαγωγικών υλικών με στόχο την απορρόφηση μεγαλύτερου εύρους ηλιακού φωτός, χωρίς να επηρεαστεί η απόδοση ή θερμική απώλεια.

### 2.4.2.1. Επιλογή εύρους απορρόφησης.

Ας θεωρήσουμε το ηλιακό φάσμα διαχωρισμένο με τη χρήση ενός πρίσματος. Σε αυτή την περίπτωση, θα μπορούσαμε για βέλτιστη απορρόφηση να επιλέξουμε διαφορετικά ημιαγωγικά υλικά για κάθε “όμαδα” συχνοτήτων(. Μία τέτοια διάταξη είναι εφικτή θεωρητικά, αλλά η μηχανική του υλοποίηση είναι προβληματική. Μια πιο βιώσιμη λύση είναι τοποθέτηση, ή στίβαξη, πολλαπλών στρωμάτων ημιαγωγών με διαδοχικά μικρότερα ενεργειακά κενά, ο ένας πάνω στον άλλον. Τα άνω στρώματα απορροφούν φωτόνια υψηλότερης ενέργειας ενώ αφήνουν να τα διαπεράσουν φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας, τα οποία και απορροφούνται από τα χαμηλότερα στρώματα. Θεωρητικά, μπορούν να στοιβαχτούν πολλά στρώματα με αυτό τον τρόπο. Αυτό είναι το κύριο χαρακτηριστικό των πολυσυνδεδετικών κελιών.

Κράματα μετάλλου στοιχείων του χημικού γκρούπ 3 και 5 του περιοδικού πίνακα, καθώς και χημικές ενώσεις αυτών ενδείκνυνται ιδιαίτερα για την κατασκευή πολυσυνδεδετικών κελιών. Ινδικό Φωσφίδιο (InP), αντιμονικό Γάλλιο(GaSb), καθώς και το πιο διαδεδομένο αρσενικούχο Γάλλιο(GaAs) είναι παραδείγματα των λεγόμενων III-V υλικών. Με την προσεκτική και επιλεκτική επεξεργασία των ουσιών αυτών, πετυχαίνουμε ένα μεγάλο εύρος ενεργειακών ζωνών. Η υλοποίηση αυτή καθ' αυτή πραγματοποιείται με κάποιους περιορισμούς που έχουν να κάνουν με τη σταθερά του κρυστάλλου όπως θα δούμε παρακάτω. Για παράδειγμα, ερευνητές του NREL, κατάφεραν και κατασκεύασαν έναν τρισυνδεδετικό (triple-junction) κελί GaInP<sub>2</sub> με ενεργειακό διάκενο 1,85 eV και με κρυσταλλική σταθερά(lattice constant) 5,65Å. Εφ'όσον θέλαμε υλικό με χαμηλότερο εύρος, θα χρησιμοποιούσαμε λιγότερο Γάλλιο(Ga) και περισσότερο Ίνδιο(In) ώστε να έχουμε 1,3 eV, με ταυτόχρονη αλλαγή, ωστόσο και της κρυσταλλικής σταθεράς.

### 2.4.2.2.Ταίριασμα κρυστάλλου

Σε μία μονολιθική, πολυσυνδεδετική δομή, πρέπει να υπάρχει οπτική διαφάνεια και μέγιστη αγωγιμότητα ρεύματος μεταξύ του πρώτου και τελευταίου στοιχείου. Αυτό είναι εφικτό μόνο αν όλα τα στρώματα έχουν παρόμοια κρυσταλλική δομή. Η **κρυσταλλική σταθερά**, είναι μέγεθος μέτρησης της απόστασης μεταξύ των ατόμων σε μία κρυσταλλική δομή, και είναι ισχυρός δείκτης χαρακτηρισμού της ολικής κρυσταλλικής διάταξης. Η ιδανική κατάσταση στην κατασκευή της πολυσυνδεδετικής δομής είναι το ταίριασμα των κρυσταλλικών σταθερών του κάθε στρώματος ημιαγωγού(νοθευμένου και μη). Γιατί είναι τόσο σημαντικό αυτό το ταίριασμα; Αναντιστοιχία στο ταίριασμα δημιουργεί αμορφίες και ασυνέχειες στον κρύσταλλο, προκαλώντας κέντρα επανασύνδεσης. Η επανασύνδεση έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια φορέων μειονότητας(π.χ. Ηλεκτρόνια επανέρχονται στη ζώνη σθένους από τη ζώνη

αγωγιμότητας) με αποτέλεσμα να μειώνεται η ποιότητα του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Τέτοια φαινόμενα αυξάνουν την τάση ανοιχτοκυκλώματος, την πυκνότητα του ρεύματος βραχυκύκλωσης, και επηρεάζουν το συντελεστή γεμίματος που επηρεάζει την ισορροπία μεταξύ τάσης και ρεύματος για αποτελεσματική παραγωγή ισχύος.

Για να δοθεί μία ιδέα του πόσο σημαντικό είναι το κρυσταλλικό ταίριασμα, σύμφωνα με έρευνες του NREL, κακό ταίριασμα της τάξης του 0.01% δημιουργεί ήδη σημαντικό εκφυλισμό στο φ/β στοιχείο. Για αυτό το λόγο, γίνονται μεγάλες προσπάθειες για επιλογή υλικών που όχι μόνο έχουν ιδεατά ενεργειακά κενά, αλλά ίδιες κρυσταλλικές σταθερές. Τέτοιου είδους υλικά είναι τα GaInP, GaAs, και Ge.

### **2.4.2.3. Βελτιστοποίηση κελιού**

Ένας άλλος παράγοντας που παίζει σημαντικό ρόλο στην αποδοτικότητα ενός μονολιθικού (δηλαδή ενιαία χαραγμένου), σειριακού, και δίθυρου (input-output) στοιχείου είναι όλα τα υποκελιά να παράγουν το ίδιο ρεύμα, δηλαδή να έχουν τον ίδιο ρυθμό απορρόφησης φωτονίων.

#### **2.4.2.3.1. Ταίριασμα ρεύματος**

Λόγω του γεγονότος ότι τα υποκελιά σε ένα φ/β κύτταρο, είναι συνδεδεμένα σειριακά, το ρεύμα εξόδου ενός πολυσυνδεδεμένου στοιχείου ισούται με το με μικρότερο ρεύμα που παράγεται σε κάθε ξεχωριστό τμήμα του. Γι αυτό το λόγο, είναι επιθυμητό, τα παραγόμενα φωτορεύματα να είναι παντού ίδια. Το ρεύμα που παράγεται από ένα τμήμα εξαρτάται κυρίως από τον αριθμό των φωτονίων που υπερβαίνουν το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού από τον οποίον αποτελείται (άρα, μπορούν να απορροφηθούν) αλλά και από την εγγενή απορροφητικότητα του υλικού. Αν τα φωτόνια με υψηλότερη ενέργεια είναι σε πληθώρα, το υλικό πρέπει να έχει ένα ελάχιστο πάχος για να μπορέσει να τα συλλέξει. Παρομοίως, αν η απορροφητικότητα του υλικού είναι σχετικά υψηλή, τα φωτόνια πρέπει να διασχίσουν λιγότερο υλικό πριν απορροφηθούν.

Πρακτικά, για τα κύτταρα GaInP/GaAs/Ge αυτό σημαίνει ότι το στρώμα του Ge πρέπει να είναι σχετικά χονδρό επειδή έχει μικρότερη απορροφητικότητα.

#### **2.4.2.3.2. Παραγωγή ισχύος**

Ο στόχος στην σχεδίαση των φωτοβολταϊκών παραμένει η μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου. Τα πολυσυνδεδεμένα κελιά έχουν μεν μειωμένο ρεύμα, ωστόσο κάθε στρώμα παράγει μία τάση η οποία δρα αθροιστικά στην τάση εξόδου. Έτσι τα πολυσυνδεδεμένα κελιά έχουν υψηλότερη τάση εξόδου από ένα κελί μονής σύνδεσης (single-junction), με αποτέλεσμα η συνολική ισχύς να είναι μεγαλύτερη. Για τον ίδιο λόγο, έχει και μειωμένες απώλειες. Ως γνωστόν, οι θερμικές απώλειες είναι ανάλογες με το τετράγωνο του ρεύματος, οπότε μειώνονται σημαντικά με τη μείωση του ρεύματος. Οι απώλειες αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές σε συγκεντρωτικά συστήματα, στα οποία τα παραγόμενα ρεύματα είναι ανάλογα με τα επίπεδα



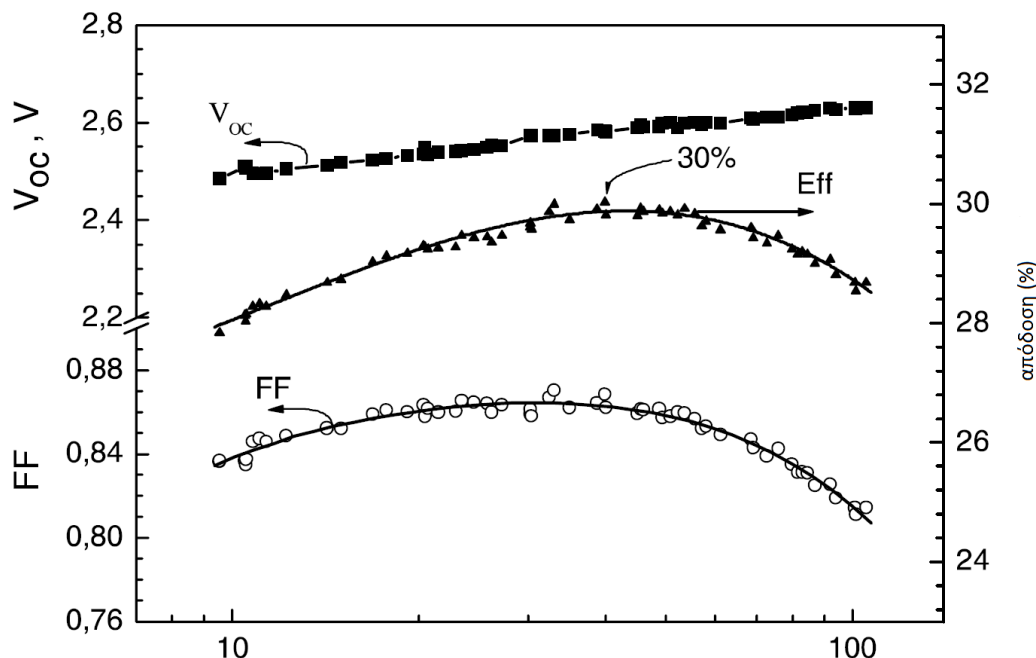
συγκέντρωσης. Άρα μία εγγενής και εξαιρετικά πολύτιμη ιδιότητα των πολυσυνδετικών δομών είναι ότι μειώνουν το ρεύμα και αυξάνουν την τάση προκαλώντας συνολικά κέρδος, και όχι απώλεια ισχύος.#

### 2.4.2.3.3. Συγκεντρωτές

Οι συγκεντρωτές αποτελούν ένα ζωτικό μέρος των επίγειων εφαρμογών φωτοβολταϊκών συστημάτων που κάνουν χρήση πολυσυνδετικών κελιών. Από τη στιγμή που ένα τέτοιο κελί έχει αρκετά αυξημένο κόστος σε σχέση με ένα κοινό κελί πυριτίου, και είναι όμως σε θέση να αξιοποιήσει ηλιακό φως που έχει συγκεντρωθεί κατά εκατοντάδες έως χιλιάδες φορές (με επακόλουθη αύξηση της απόδοσης προφανώς), είναι λογικό να επιδιώκεται η χρήση τους.

Συστήματα συγκεντρωτών είναι ακριβά και εξαιρετικά πολύπλοκα. Όσο αυξάνεται η επιτευχτέα συγκέντρωση τόσο αυξάνεται και το κόστος των φακών και των πλαισίων στήριξης. Περισσότερα γι αυτούς στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Το εργαστήριο NREL των Η.Π.Α. Ήταν τα πρώτα που δημιούργησαν σε μονολιθική δομή κελί διπλής ένωσης: χρησιμοποιώντας υπόστρωμα από Γερμάνιο και τεχνική MOCVD ανέπτυξαν δομές πολλαπλών στρωμάτων παρόμοιας κρυσταλλικής σταθεράς, στα οποία το άνω φωτοκύτταρο έχει μία p-n ένωση σε στερεό διάλυμα και το κάτω φωτοκύτταρο σε διάλυμα GaAs. Η απόδοση ήταν της τάξης του 30.2% για συγκέντρωση 30 – 50x.



Εικ. 2.7. Απόδοση, τάση ανοιχτοκύκλωσης  $V_{OC}$  και συντελεστή πλήρωσης FF ενός δίδυμου κελιού GaInP/GaAs ως προς τη συγκέντρωση

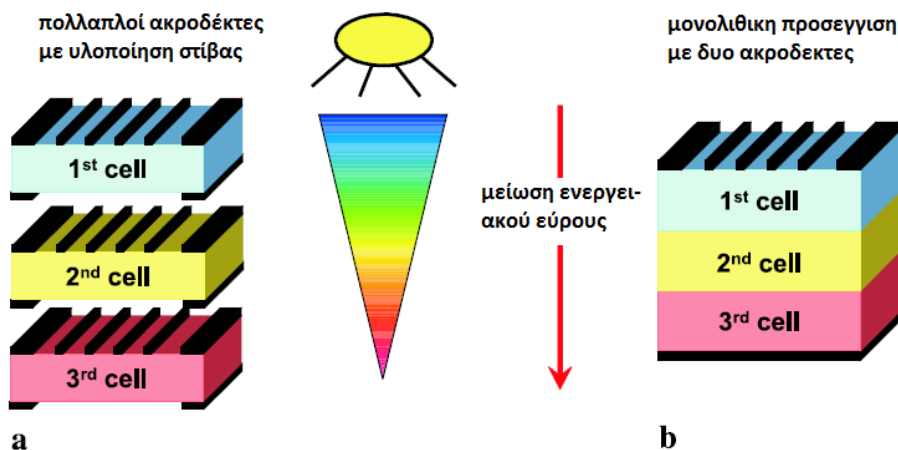
#### 2.4.2.4. Κατασκευή δίδυμων συγκεντρωτικών ηλιακών κελιών

Ένα μονολιθικό δίδυμο ηλιακό κύτταρο είναι μια πολυστρωματική δομή που αποτελείται από μία ποικιλία III-V σύνθετων ημιαγωγικών υλικών. Οι πολύ σημαντικές ζώνες απορρόφησης μπορούν να τροποποιηθούν αλλάζοντας τη σύνθεση σε τριαδικά ή τετραδικά κράματα όπως  $Ga_xIn_{1-x}P$  ή  $(Al_xGa_{1-x})_yIn_{1-y}As$ . ΔΗ σταθερά κρυστάλλου παίζει και αυτή πολύ σημαντικό ρόλο, αφού η ανάπτυξη κρυστάλλων υψηλής ποιότητας, απαιτεί συνήθως υλικά με παρόμοια κρυσταλλική δομή, κάτι που περιορίζει τον αριθμό των υποψήφιων υλικών. Η πιο πετυχημένη δομή τριπλής ένωσης είναι το  $Ga_{0.5}In_{0.5}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge$  μστο οποίο σημειώνεται 100% κρυσταλλική ταύτιση μεταξύ των επι μέρους υλικών του. Πέρα από τις φωτοενεργές p-n μενώσεις, η δομή περιλαμβάνει επιπρόσθετα στρώματα με διαφορετική σύνθεση το καθένα, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα. Εξυπηρετούν πολλαπλές λειτουργίες όπως προστατευτικά στρώματα παθητικοποίησης, στρώματα που λειτουργούν ως φράγματα σε εσωτερικές διαδικασίες διάχυσης, ή ως στοιχεία σε ενσωματωμένες δίοδους σύραγγας. Ένα τυπικό κελί τριπλής σύνδεσης έχει πάνω από 20 ξεχωριστά στρώματα με πάχη μεταξύ 10 nm και αρκετών μm, και επίπεδα νόθευσης που κυμαίνονται μεταξύ  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  και  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Υπάρχουν μια σειρά από τεχνικές επιταξικής σύνθεσης, με τις οποίες κατασκευάζονται III-V ημιαγωγοί. Οι υπάρχουσες είναι οι

- επιταξία ρευστής φάσης. (LPE: liquid phase epitaxy)
- επιταξία μοριακής δέσμης. (MBE: molecular beam epitaxy)
- επιταξία μεταλλο-οργανικής κατάστασης ατμού. (MOVPE: metal-organic vapour phase epitaxy)

Απο αυτές η MOVPE έχει επικρατήσει μιας και συνδυάζει υψηλή ποιότητα και ανάπτυξη κρυστάλλου καθώς και εύκολη σχετικά εφαρμογή. Η κατασκευή παρουσιάζει όπως θα δούμε παρακάτω αρκετές ομοιότητες με την παραγωγή διόδων LED και υπάρχουν ήδη εμπορικοί αντιδραστήρες που μπορούν να παράγουν μαζικά πολυσυνδεδετικά κελιά(π.χ. Εταιρείες Aixtron και Veeco).

### 2.4.3. Τρόπος υλοποίησης

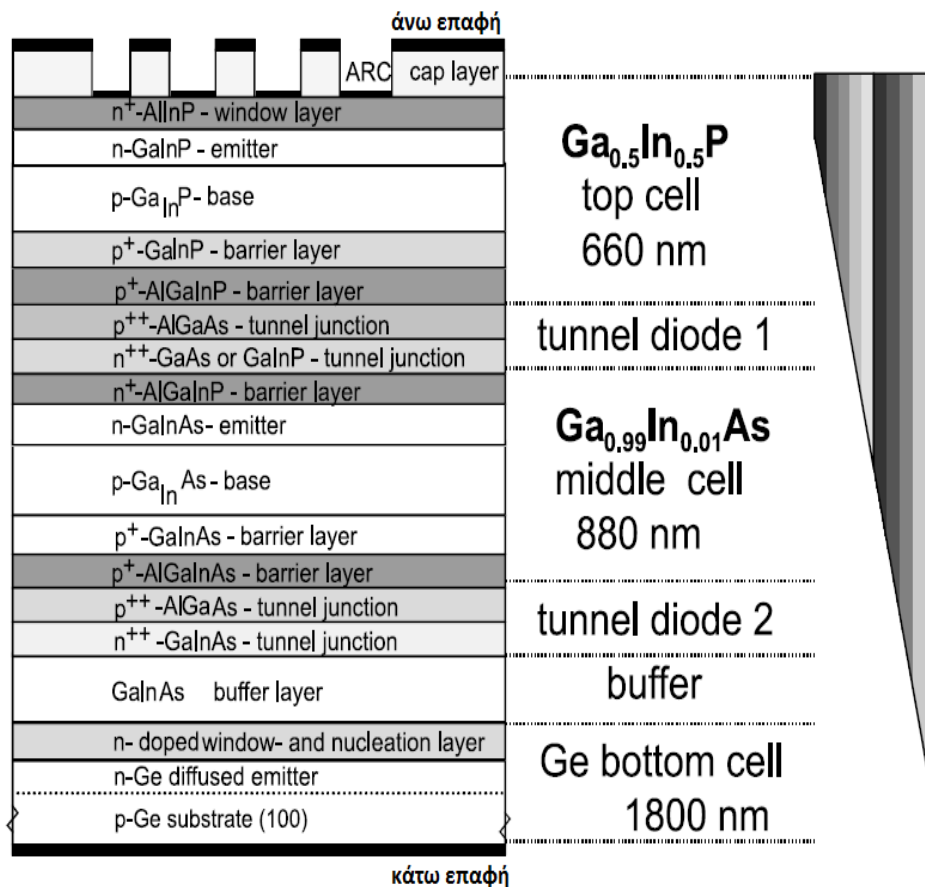


**Εικ. 2.8. Δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για πολυσυνδετικά ηλιακά κελιά. α) υλοποίηση στίβας: κελιά μόνης σύνδεσης απο διαφορετικά ημιαγώγιμα υλικά κατασκευάζονται και στιβάζονται το ένα πάνω στο άλλο. Έχουμε έτσι πολλαπλούς ακροδέκτες που πρέπει να συνδυαστούν μεταξύ τους με τον κατάλληλο τρόπο. β) Μονολιθική προσέγγιση: ημιαγώγιμα υλικά με διαφορετικό εύρος απορρόφησης το καθένα συντίθενται επιταξικά το ένα πάνω στο άλλο. Η εσωτερική σειριακή σύνδεση των στρωμάτων επιτυγχάνεται μέσω διόδων σήραγγας.**

Δύο είναι οι τεχνολογικές υλοποιήσεις δυαδικών και πολυσυνδετικών κελιών: Είτε με κατασκευή στίβας (εικ12312 α), όπου ηλιακά κελιά με διαφορετικό εύρος απορρόφησης κατασκευάζονται το καθένα με το ξεχωριστό υπόστρωμά του και μετά συνενώνονται. Κάθε ηλιακό κελί έχει το δικό του θετικό και αρνητικό ακροδέκτη και μπορεί να προστεθεί ξεχωριστά στους άλλους. Στην μονολιθική προσέγγιση (23p43 β) τα διαφορετικά υλικά συντίθενται πάνω σε κοινό υπόστρωμα και συνδέονται σειριακά μέσω διακλαδικών διόδων σύραγγας. Έτσι στο τέλος η δομή που προκύπτει έχει μόνο δύο ακροδέκτες, όπως σε ένα συμβατικό ηλιακό κελί μόνης σύνδεσης. Ωστόσο, επειδή η σύνδεση είναι σειριακή, το ρεύμα του κελιού έχει την τιμή του χαμηλότερου ρεύματος των υποκελιών. Για να εξασφαλιστεί καλή λειτουργία λοιπόν, πρέπει τα υλικά και η γενικότερη δομή να επιλεγθούν με τέτοιο κριτήριο ώστε να παράγουν αν όχι ίδιο, τότε παραπλήσιο ρεύμα.

Η ύπαρξη μόνο ενός υποστρώματος στη μονολιθική χάραξη της δίνει σαφές οικονομικό προβάδισμα σε σχέση με την υλοποίηση στίβας μιας και το κόστος του υποστρώματος αποτελεί ένα σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους του κελιού. Επίσης, η υλοποίηση στίβας απαιτεί αυστηρή οπτική ευθυγράμμιση των υποκελιών, κάτι που αυξάνει κατα πολύ την πολυπλοκότητα και το κόστος της κατασκευής. Το γεγονός ότι η υλοποίηση στίβας δίνει ελαφρώς μεγαλύτερες αποδόσεις δεν αντισταθμίζει (μέχρι τώρα τουλάχιστον) τις κατασκευαστικές δυσκολίες, και στη διπλωματική αυτή, ασχολούμαστε μόνο με CPV κελιά μονολιθικής χάραξης.

## 2.4.4. Τρισυνδετικά ηλιακά κελιά



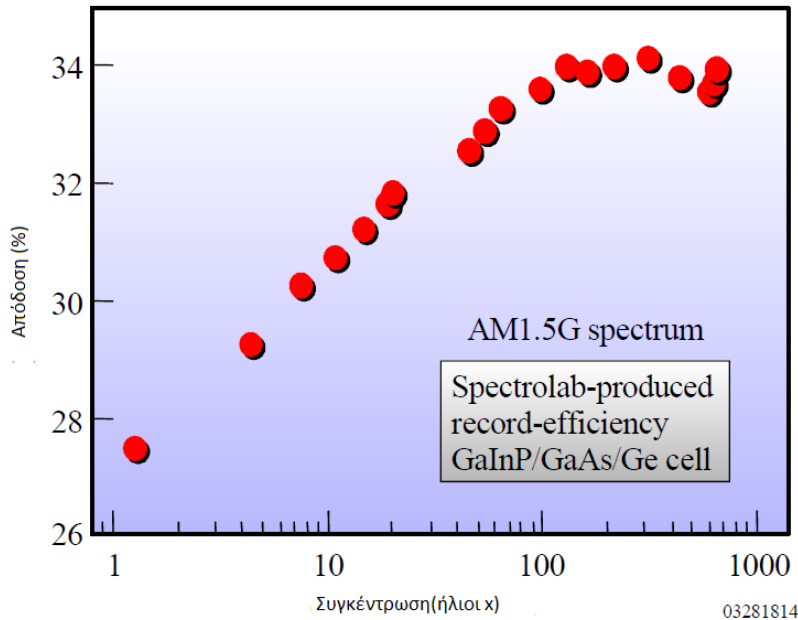
**Εικ. 2.9.** Τυπική δομή ενός μονολιθικού ηλιακού κελιού τριπλής ένωσης. Κάθε ενεργό υποκελί έχει τουλάχιστον ένα στρώμα που περιέχει τις εξής επιφάνειες: παράθυρο, εκπομπός, βάση και πίσω μέρος. Μεταξύ των υποκελιών, έχουμε λεπτά στρώματα υψηλής νόθευσης που δρουν ως δίοδοι σύραγγας και συνδέουν σειριακά τα υποκελιά.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.11., τα στρώματα GaInP, GaAs, και Ge του τρισυνδετικού ηλιακού κελιού (εικ 2.9), επιλέχθηκαν για τη συνολική ικανότητά τους να καλύπτουν με το ενεργειακό διάκενό τους όλο το φάσμα του ηλιακού φωτός. Το GaInP, με εύρος 1,85 eV, απορροφά τα φωτόνια στο υπεριώδες και ορατό μέρος του ηλιακού φάσματος. Το GaAs ( $E_g = 1.42$  eV) απορροφά οριακά το υπέρυθρο φώς, ενώ το Ge απορροφά όλα τα υπόλοιπα φωτόνια που είναι πάνω από 0,67 eV.

Άλλο ένα κριτήριο επιλογής ήταν το γεγονός, ότι αυτοί οι τρεις ημιαγωγοί έχουν ταιριαστή κρυσταλλική δομή. Ας σημειωθεί ότι εναλλακτικά του GaInP μπορούμε να πάρουμε το  $Al_{0.37}Ga_{0.63}As$ , μιας και έχει παρόμοια κρυσταλλική δομή και ενεργειακό διάκενο, αλλά λόγω υψηλής ευαισθησίας στο οξυγόνο και ευπάθειας στο νερό αποφεύγεται η χρήση του.

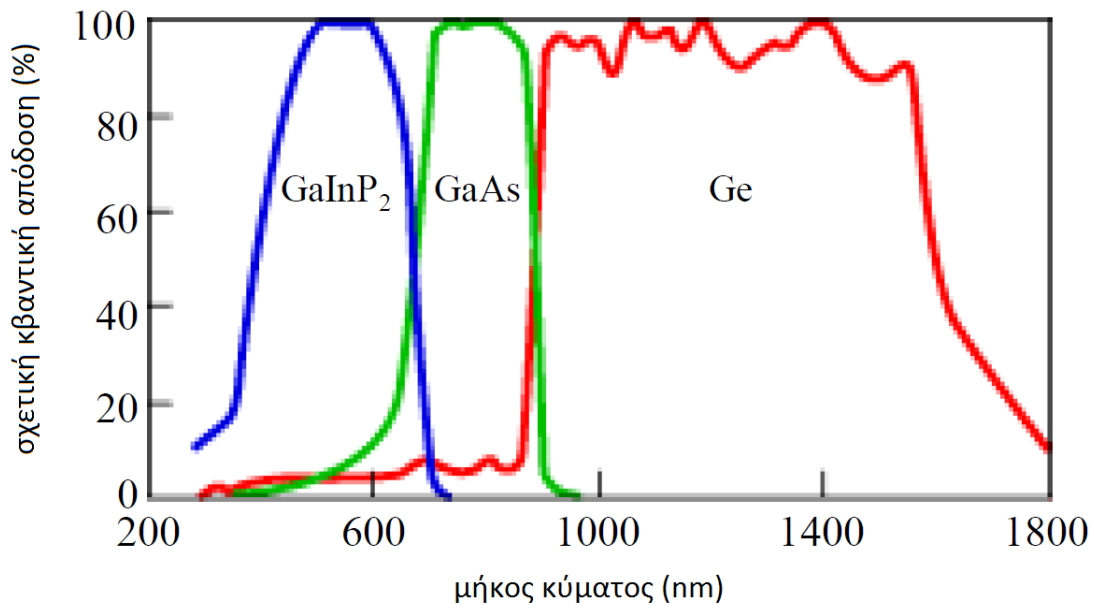
Το κελί GaInP/GaAs/Ge χαράζεται μονολιθικά, δηλαδή κάθε ένα από τα συνολικά 20

μονολιθικά ημιαγώγιμα στρώματα, σχηματίζονται *in situ*. Η εναλλακτική μέθοδος είναι η μηχανική στίβαξη των στρωμάτων που έχουν σχηματιστεί ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Οι αποδόσεις που επιτυγχάνονται είναι παρόμοιες, αλλά είναι τεχνικά πιο περίπλοκες και για αυτό προτιμάται η μονολιθική χάραξη.



**Εικ.2.10.**  
Απόδοση  
συναρτήσει της  
συγκέντρωσης  
για ηλιακό κελί  
GaInP/GaAs/Ge

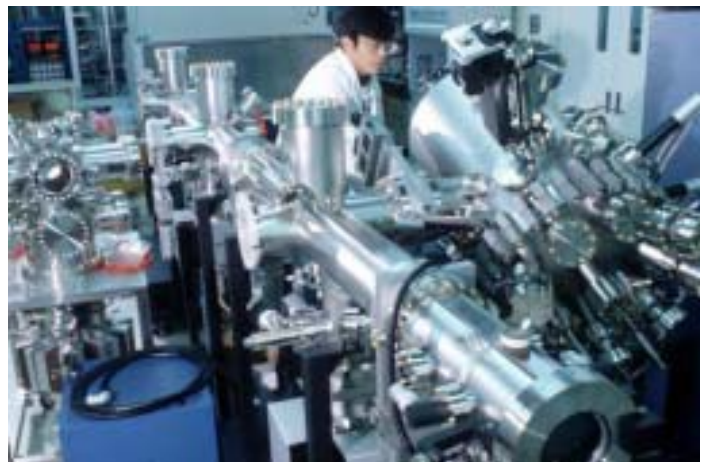
Η μέθοδος η οποία εξασφαλίζει υψηλή καθαρότητα του κρυστάλλου κατά τη χάραξη ονομάζεται **μεταλλο-οργανική χημική εναπόθεση ατμών {metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD)}**. Η άλλη μέθοδος ονομάζεται **επιταξία μοριακής δέσμης {molecular-beam epitaxy (MBE)}**, και αν και σαν μέθοδος έχει λιγότερα βλαβερά παράγωγα, προτιμάται η πρώτη γιατί με αυτή μπορεί να γίνει πιο γρήγορα και εύκολα κατασκευή σε βιομηχανική κλίμακα.



**Εικ. 2.11** Κβαντική απόδοση κάθε στρώματος του τρισυνδετικού ηλιακού κύτταρου GaInP/GaAs/Ge



**Εικ.** Σύστημα μεταλλο-οργανικής χημικής εναπόθεσης ατμών(MOCVD)



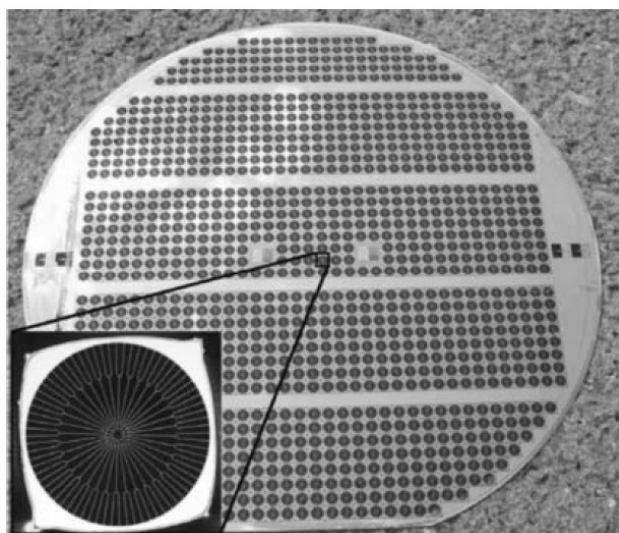
**Εικ.** Σύστημα επιταξίας μοριακής δέσμης(MBE)

Σε ένα ηλιακό κελί, ο μέσος χρόνος ζωής των φορέων μειονότητας είναι μια σημαντική παράμετρος που εξασφαλίζει την καλή λειτουργία του. Αυτή η παράμετρος επηρεάζεται από την επανασύνδεση των φορέων ή μέσα στον κρύσταλλο, ή πάνω στις διεπαφές. Η παράμετρος αυτή έχει σχέση και με τους κρυστάλλους που δομούνται με τη MOVPE αλλά και με την καθαρότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται για αυτήν. Τα υλικά αυτά είναι συνήθως υδρίδια, όπως η αρσίνη και η φωσφίνη, καθώς και μεταλλο-οργανικά στοιχεία, όπως τριμεθυλικό γάλλιο, τριμεθυλικό αλουμίνιο, ή τριμεθυλικό ίνδιο. Η ποιότητα αυτών των συστατικών έχει βελτιωθεί πλέον σε τέτοιο σημείο, που η τελική ποιότητα του κρυστάλλου εξαρτάται από τις συνθήκες ανάπτυξης αυτές καθ' αυτές. Αυτή τη στιγμή γίνεται έρευνα πάνω στη βελτιστοποίηση των παραμέτρων ανάπτυξης της MOVPE:

- θερμοκρασία
- πίεση
- επίπεδα νόθευσης
- ακολουθία αλλαγής διεπαφών μεταξύ των διαφορετικών υλικών

Αυτοί οι παράμετροι επηρεάζουν την τελική καθαρότητα του κρυστάλλου, άρα και το μέσο χρόνο ζωής των φορέων μειονότητας και άρα την τελική απόδοση του ηλιακού κελιού.

Αφότου αναπτυχθεί η στρωματική δομή μέσω της MOVPE, τα ηλιακά κελιά υφίστανται μια σειρά από πρόσθετες διεργασίες, όπως φωτολιθογραφία, εξαέρωση μεταλλικών φιλμ, και προσθήκη διηλεκτρικών αντικατοπτρικών μανδύων. Οι εργασίες αυτές λαμβάνουν μέρος σε αποστειρωμένο περιβάλλον και είναι παρόμοιες με αυτές που εφαρμόζονται σε οπτοηλεκτρονικές συσκευές, όπως στα LED. Ο σχεδιασμός της μάσκας για το μεταλλικό πλαίσιο της άνω επαφής των κυττάρων πρέπει να γίνει προσεκτικά και με βέλτιστο τρόπο ώστε να αποφευχθούν απώλειες λόγω επισκίασης και σειριακής αντίστασης (τα ηλιακά κελιά έχουν πυκνότητες της τάξης των αρκετών A/cm<sup>2</sup> οπότε είναι πολύ σημαντικό οι απώλειες αυτές να κρατιούνται χαμηλές). Οι παράγοντες που παίζουν ρόλο στη βελτιστοποίηση αυτή είναι η πυκνότητα ρεύματος που υπάρχει στο κύτταρο, η αντίσταση του στρώματος-εκπομπού, η άνω επαφή και το μέταλλο αυτό καθ' αυτό. Ένα τυπικό τελικό δείγμα τέτοιου πλακιδίου φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



**Εικ. 2.12. Πλακίδιο διαμέτρου 10 cm με 1150 GaInP/GaInAs/Ge ηλιακά κελιά τριπλής σύνδεσης(διάμετρος 2mm) ανεπτυγμένα πάνω σε υπόστρωμα Ge με τη μέθοδο MOVPE.**

## **3. Πολυσυνδεδετικά κελιά στη πράξη**

### **3.1. Πολυσυνδεδετικά κελιά κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας**

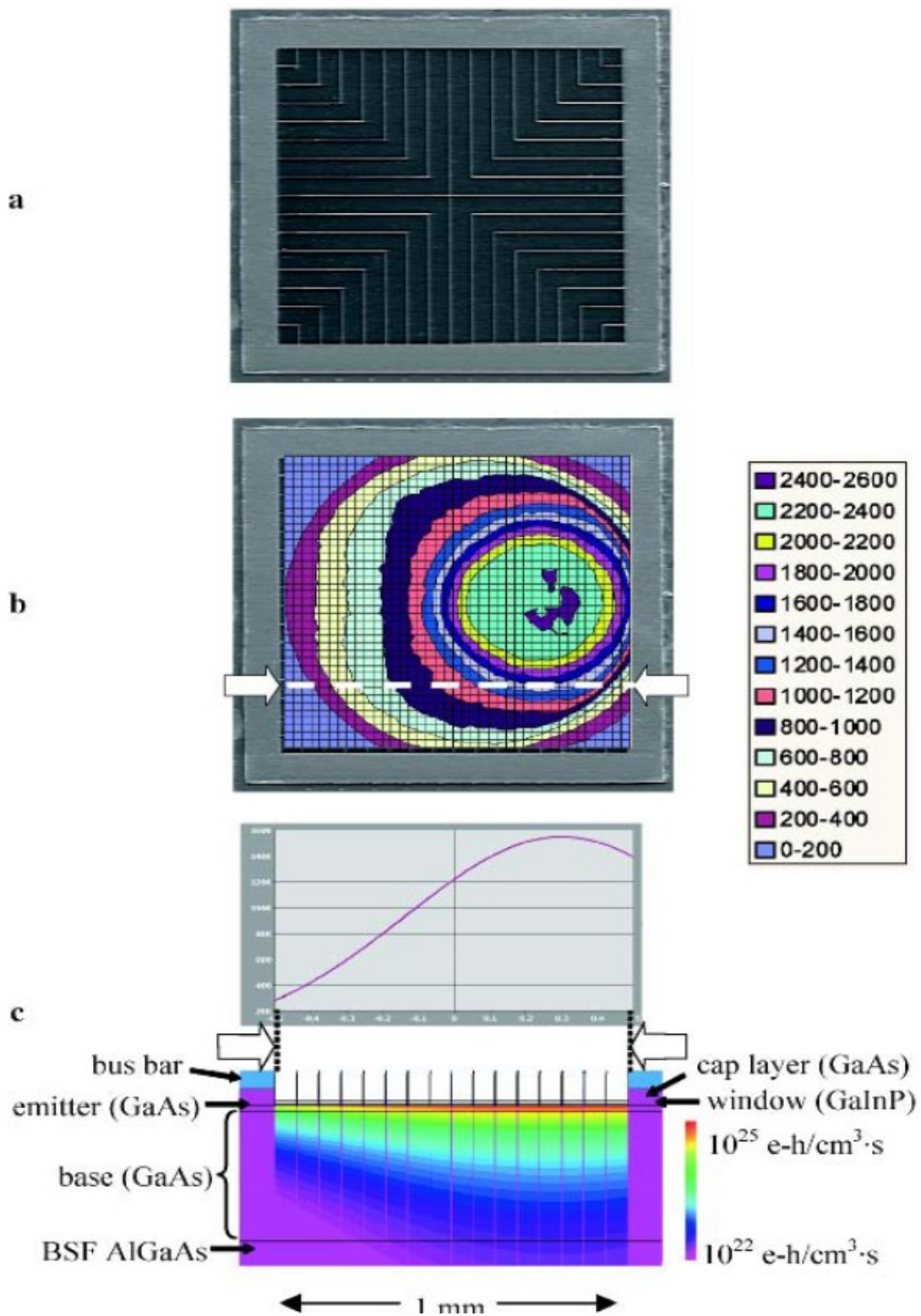
Στα πολυσυνδεδετικά ηλιακά κελιά, σε πραγματικές συνθήκες εφαρμογής, πρέπει να ληφθούν υπ'όψη οι εξής σημαντικοί παράγοντες που περιορίζουν τη λειτουργία και το βαθμό απόδοσής τους: μη ενιαία ακτινοβολήση, τροποποίηση ηλιακού φάσματος από το συγκεντρωτή, Ισοστάθμιση ρεύματος και ηλιακό φάσμα, σειριακή αντίσταση

#### **3.1.1. Μη ενιαία ακτινοβολήση**

Ένας πραγματικός οπτικός συγκεντρωτής δεν προκαλεί ενιαία ακτινοβολήση στο ηλιακό κελί. Ο λόγος συγκέντρωσής(π.χ. 500x) του είναι ο μέσος όρος της ακτινοβολήσης πάνω στο κελί. Το κλειδί για να γίνει σωστή αντιστοίχιση του συγκεντρωτή στο κατάλληλο κελί έγκειται στη καταγραφή του προφίλ ακτινοβολήσής του. Στην παρακάτω φωτογραφία ακολουθεί η καταγραφή της ακτινοβολίας σε ένα κελί GaAs με το συγκεντρωτή TIR-R που έχει μέση συγκέντρωση 1000 ήλιους. Βλέπουμε αμέσως ότι σημειώνονται συγκεντρώσεις από 200 μέχρι 2400 ήλιους. Το κελί θα πρέπει να είναι φτιαγμένο έτσι ώστε να αντέχει και τις μέγιστη δυνατή ηλιακή ένταση.

Ειδική φροντίδα πρέπει να δοθεί στις ενώσεις σύραγγας, όσον αφορά τη μη ενιαία ακτινοβολήση, μιας και πρέπει να λειτουργούν κάτω από μία συγκεκριμένη συγκέντρωση. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι πολυσυνδεδετικά κελιά πρέπει να έχουν ενώσεις σύραγγας με μέγιστες πυκνότητες ρεύματος σύραγγας υψηλότερες από την πυκνότητα ρεύματος ανοιχτοκύκλωσης που έχουμε στη μέγιστη συγκέντρωση που προκαλούν οι συγκεντρωτές.

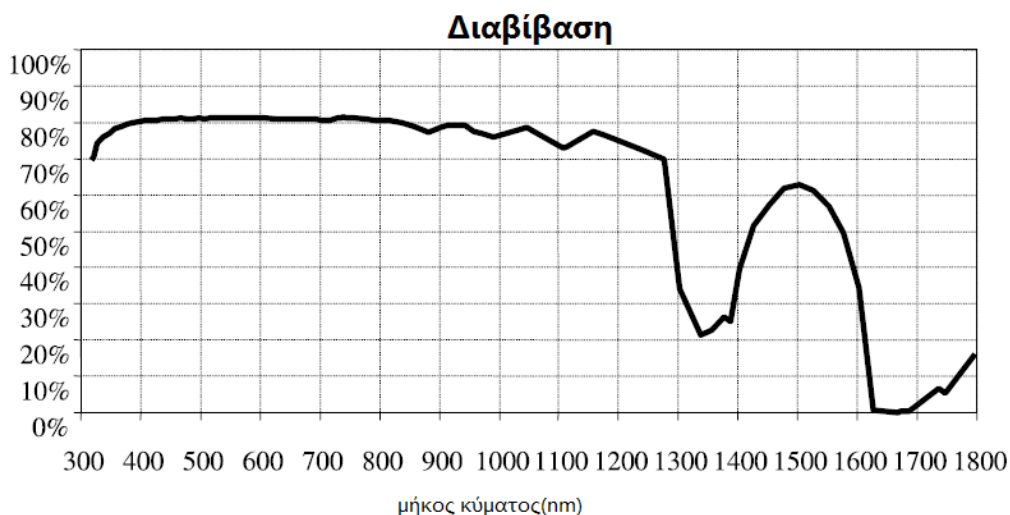




Εικ. 3.1. α) Φωτογραφία του κελιού GaAs, πλάτους 1mm<sup>2</sup>. β) προφίλ ακτινοβολήσης γ) παραγωγή ρεύματος στο κελί και προφίλ ακτινοβολήσης ανάλογα με τις περιοχές του κελιού.

### 3.1.2. Τροποποίηση και διαβίβαση ηλιακού φάσματος από το συγκεντρωτή

Στη εικόνα που ακολουθεί βλέπουμε τη διαβίβαση του ηλιακού φάσματος, όπως τη κάνει ένας διαδομένος συγκεντρωτής. Για κελιά μέχρι διπλής ένωσης είναι επαρκής αφού το κύριο εύρος λειτουργίας τους είναι μέχρι τα 900 nm, ωστόσο στα κελιά τριπλής ένωσης δημιουργείται πρόβλημα: ενώ με αυτόν τον συγκεντρωτή σε κελί GaInP/GaAs έχουμε αταίριασμα ρεύματος μόνο της τάξης του 0,2%, σε κελί GaInP/GaAs/Ge η διαφορά γίνεται 10%.



Εικ. 3.2 Μεταβίβαση φάσματος από το συγκεντρωτή TIR-R.

### 3.1.3. Ισοστάθμιση ρεύματος και ηλιακό φάσμα

Η ισοστάθμιση ρεύματος στα πολυενωτικά κύτταρα σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία και τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει αυτή (αυξομειώμενη ένταση ανάλογα με τη θερμοκρασία, διακυμάνσεις λόγω συγκεντρωτή) αποτελεί σύνθετο αντικείμενο μελέτης. Οι εξής παράγοντες πρέπει να ληφθούν υπόψη στη μελέτη αυτή:

- ακριβής γνώση προφίλ ακτινοβολίας του συγκεντρωτή
- η βέλτιστη αντιστοίχιση του πολυενωτικού κυττάρου στον συγκεντρωτή αυτό (π.χ. Ύπαρξη τεκμηριωμένης μελέτης συμπεριφοράς του κελιού με αυτόν το συγκεντρωτή)
- κατασκευή κ πολλαπλών μοντέλων κελιών ίδιου τύπου, αλλά ελαφρώς διαφορετικής σύστασης και δυνατότητα πρόσβασης και μελέτης του κάθε κελιού
- καταγραφή της ετήσιας ενέργειας που παράγει το κάθε κελί.

Στο IES της Μαδρίτης έχουν γίνει ήδη δοκιμές και μελέτες που βασίζονται σε αυτό το πρωτόκολλο, με τη διάταξη που ακολουθεί στην παρακάτω εικόνα.

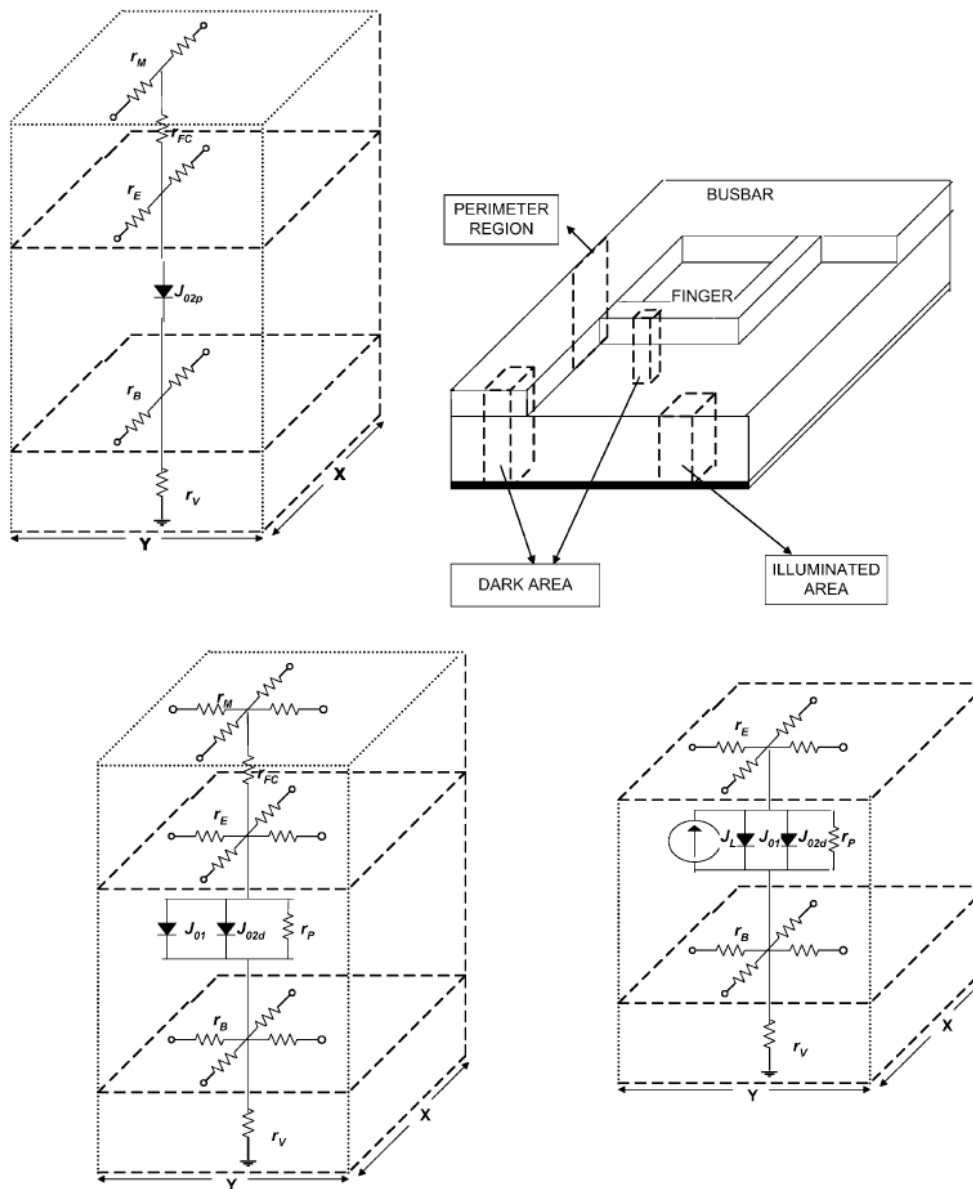


**Εικ. 3.3. Δυναμικό σύστημα παρακολούθησης στο IES πάνω στο οποίο τοποθετούνται πληθώρα διαφορετικών CPV για μέτρηση ετήσιας ηλεκτρικής παραγωγής καθώς και αξιοπιστίας κάτω από πραγματικές συνθήκες σε πραγματικό χρόνο.**

Πρέπει να τονιστεί ότι λόγω της τροποποίησης του ηλιακού φάσματος εξ αιτίας του συγκεντρωτή καθώς και λόγω του γεγονότος ότι το ηλιακό φάσμα αλλάζει στη διάρκεια της ημέρας και του χρόνου, καθίσταται μέχρι στιγμής ιδιαίτερα δύσκολη η τεχνική υλοποίηση πολυενωτικών κελίων τετραπλής, πενταπλής ή εξαπλής σύνδεσης επειδή τα κελιά αυτά απαιτούν πολύ σφιχτό ταίριασμα ρευμάτων. Ενδεχόμενες μελλοντικές βελτιώσεις στην τεχνολογία των συγκεντρωτών αναμένεται να κάνουν την υλοποίηση πιο εύκολη.

### **3.1.4 Σειριακή αντίσταση**

Η αντίσταση σειράς είναι με διαφορά η πιο σημαντική παράμετρος στην επίτευξη υψηλών αποδόσεων σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις. Η μελέτη της γίνεται με χρήση ενός τρισδιάστατου μοντέλου, που “σπάει” το πολυσυνδετικό κελί σε τρία στοιχειώδη μέρη: α) το μέρος που φωτίζεται β) το μέρος που δεν φωτίζεται γ) και την περιμετρική περιοχή. Το μοντέλο απεικονίζεται αμέσως πιο κάτω.

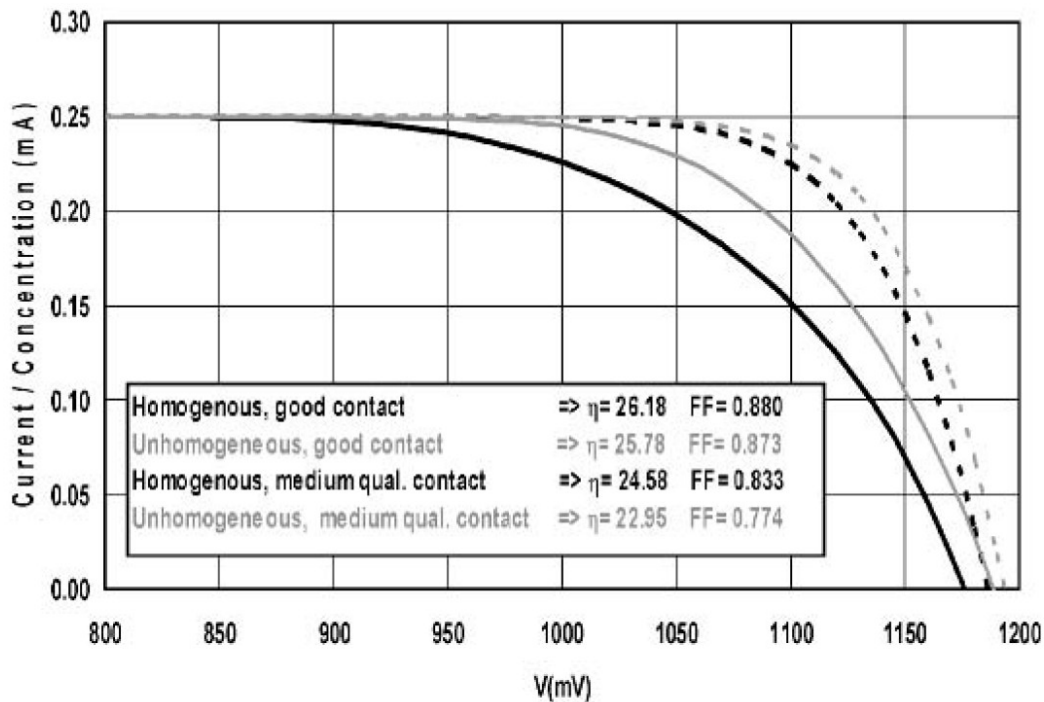


**Εικ. 3.4. Καταναμημένο τρισδιάστατο μοντέλο με τα τρία στοιχειώδη μέρη του.**

Το μοντέλο αυτό δίνει πανομοιότυπα αποτελέσματα με πειραματικά δεδομένα για σημαντικά μεγέθη όπως τον συντελεστή πλήρωσης, την τάση ανοιχτοκυκλώματος και την απόδοση κελιών GaAs που λειτουργούν σε συγκεντρώσεις 1-3000, δίνοντας έτσι τις απώλειες σειράς. Επίσης, βοηθά και στο σχεδιασμό του βέλτιστου μπροστινού μεταλλικού πλαισίου που μπαίνει πάνω στις επαφές.

Η επόμενη εικόνα δείχνει τη θεωρητική I-V καμπύλη ενός κελιού GaAs μόνης σύνδεσης. Το κελί υφίσταται δύο είδη ακτινοβολίας, α) ομογενή ακτίνα 1000x, β) ανομοιόμορφη γραμμική ακτίνα 0-4000x με μέσο όρο 1000x. Και στις δύο περιπτώσεις έχουμε δύο μπροστινές επαφές διαφορετικής ποιότητας, έστω “καλής” η μία και “κανονικής” η άλλη. Οι υπόλοιπες συνθήκες είναι πανομοιότυπες(εσωτερική δομή ημιαγωγού, σχήμα και λόγος σκίασης του μπροστινού μεταλλικού πλαισίου είναι ίδια). Η ανομοιόμορφη ακτινοβολία προκαλεί μείωση του συντελεστή πλήρωσης, καθώς και ελαφριά μείωση της τάσης

ανοιχτοκύκλωσης. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η ανομοιομορφη ακτινοβοληση είναι παρόμοια με την αύξηση της σειριακής αντίστασης του κελιού. Όσο χειρότερη η ποιότητα της μπροστινής επαφής, τόσο μεγαλύτερη η μείωση στο συντελεστή πλήρωσης και στην τάση ανοιχτοκυκλώσεως.



**Εικ. 3.5.** Θεωρητική καμπύλη I-V ακτινοβολησης κελιού GaAs μονής σύνδεσης. Έχουμε δύο περιπτώσεις ακτινοβολησης: μία ομογενη στα 1000χ και μία ανομοιογενή με 1000χ μέσο όρο. Προσθετικά, θεωρούμε σε κάθε περίπτωση την ύπαρξη μπροστινής επαφής “καλής” και “κανονικής” ποιότητας.

### 3.2. Η προσέγγιση LED στα ηλιακά κύτταρα

Μέχρι στιγμής, οι δύο πιο εξελιγμένες εταιρείες στο χώρο των φωτοβολταϊκών είναι η Amonix/Guascor Foton στις Η.Π.Α. Και Ισπανία καθώς και η Solar Szstems Pty στην Αυστραλία. Και οι δύο εταιρείες κάνουν χρήση III-V πολυενωτικών κυττάρων που λειτουργούν στους χίλιους ήλιους ως δίοδοι εκπομπής φωτός(LED). Ο στόχος τους είναι το κόστος παραγωγής να φτάσει τα  $\$ 2/W_p$ , κάνοντας χρήση της λεγόμενης “Προσέγγισης LED”, δηλαδή της κατασκευής CPV με παρόμοιο τρόπο αυτής των LED.

#### 3.2.1. Συσχετίσεις μεταξύ III-V MJs και LEDs

Οι ομοιότητες μεταξύ III-V MJs και LEDs είναι οι εξής:

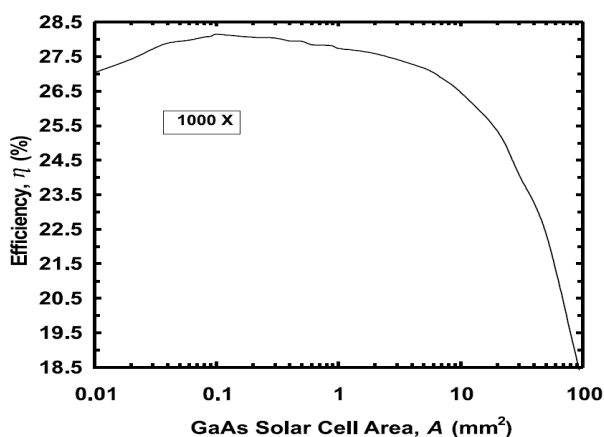
- Ανάγκη για καλή ποιότητα κρυστάλλου στα III-V ημιαγώγιμα στρώματα
- Ενθουλάκωση για προστασία απο περιβαλλοντικές επιδράσεις
- Αντικατοπτρική επίστρωση και παθητικοποίηση

- Αυτοματοποιημένη οπτική επιθεώρηση
- Θερμο-μηχανική μοντελοποίηση
- Δόμηση του πλακιδίου και απαγκίστρωση του υποστρώματος

Γενικά, το πιο κοινό χαρακτηριστικό των III-V MJsC και LED είναι η p-n ένωση. Τα στρώματά τους πρέπει επίσης να επιτρέπουν τη διέλευση του φωτός. Το αποτύπωμα της φωτοεκπομπής του κελιού μας δίνει πληροφορίες σχετικά με αντίσταση σειράς, βλάβες στους ημιαγωγούς, περιμετρική επανασύνδεση κτλ.

### 3.2.2. Εντοπισμός του βέλτιστου μεγέθους

Η περιμετρική επανασύνδεση και η σειριακή αντίσταση είναι δύο παράγοντες που προκαλούν και οι δύο απώλειες στο ηλιακό κελί(όσο μεγαλύτερο το κελί, τόσο περισσότερες οι απώλειες σειράς, και όσο μικρότερο, τόσο μεγαλύτερες οι απώλειες λόγω περιμετρική επανασύνδεσης). Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, η βέλτιστη απόδοση δίνεται για εμβαδό 0,01 mm<sup>2</sup>. Εδώ φαίνεται πάλι πόσο αποφευκτέες είναι οι απώλειες σειράς αφού βλέπουμε πως για εμβαδόν από 10 mm<sup>2</sup> και πάνω έχουμε σχεδόν κατακόρυφη πτώση της απόδοσης. Βέβαια, σε πολυσυνδετικά κύτταρα θα έχουμε χαμηλότερα ρεύματα οπότε οι καταστρεπτικές απώλειες σειράς εμφανίζονται σε μεγαλύτερα εμβαδά.

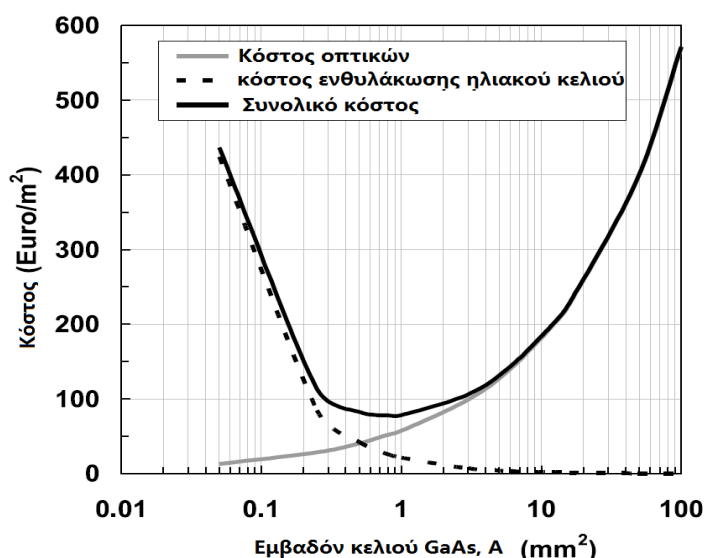


**Εικ. 3.6. Υπολογισμός της απόδοσης ενός κελιού GaAs σε συνάρτηση με το εμβαδόν του για συγκέντρωση 1000.**

Προκειμένου να γίνει η σωστή επιλογή εμβαδού, πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες. Απο το διάγραμμα βλέπουμε ότι μέχρι 6 mm<sup>2</sup> έχουμε βέλτιστη απόδοση(διαφορά από το μέγιστο μικρότερη του 1%). Επίσης, τα LEDs κατασκευάζονται με διάμετρο 1 mm<sup>2</sup>, οπότε για αυτό το εμβαδόν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπτοηλεκτρονικές τεχνικές, οι οποίες έχουν τελειοποιηθεί και έχουν βαθμό επιτυχίας 95-98% στην κατασκευή, ενώ για εμβαδό χαμηλότερο του 1 mm<sup>2</sup> έχουμε βαθμό επιτυχίας 90-95%.

### 3.2.3. Ενθυλάκωση και συνδεσμολογία

Σε μία διαδικασία πλαστικής έγχυσης για μία συστοιχία συγκεντρωτών, το πιο ακριβό κομμάτι είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η έγχυση, και είναι αναλογικός ως προς το μέγεθος του κελιού. Για μία δεδομένη συγκέντρωση και ένα πανέλο με σταθερή ονομαστική ισχύ εξόδου, καθώς το εμβαδόν του κελιού μειώνεται, μειώνεται το κόστος των συγκεντρωτών, ωστόσο αυξάνεται ο αριθμός και των κελιών που χωρούν στο πανέλο και άρα και ο αριθμός των ξεχωριστών χειρισμών που πρέπει να γίνουν σε αυτό (συνδεσμολογία, διασυνδέσεις κτλ). Ωστόσο, αυτό το ζήτημα είναι πλήρως διερευνημένο χάρη και πάλι σε εφαρμογές της οπτοηλεκτρονικής πάνω στη κατασκευή μικρών ημιαγωγίμων διατάξεων (ένωσης καλωδίων, κυβισμός, “pick and place“, κτλ). Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, το βέλτιστο μέγεθος όταν λαμβάνουμε υπόψη μας και το κόστος των οπτικών και της συνδεσμολόγησης είναι γύρω στα  $1 \text{ mm}^2$ .



Εικ. 3.7. Υπολογισμός συνολικού κόστους για κελί GaAs στους 1000 ήλιους. Το κόστος των συγκεντρωτών και η ενθυλάκωση βασίστηκαν σε αντίστοιχες διαδικασίες στα LED

### 3.2.4. Απαγωγή θερμότητας

Ας δούμε τώρα τι σημαίνει λειτουργία στους 1000 ήλιους. Έχουμε

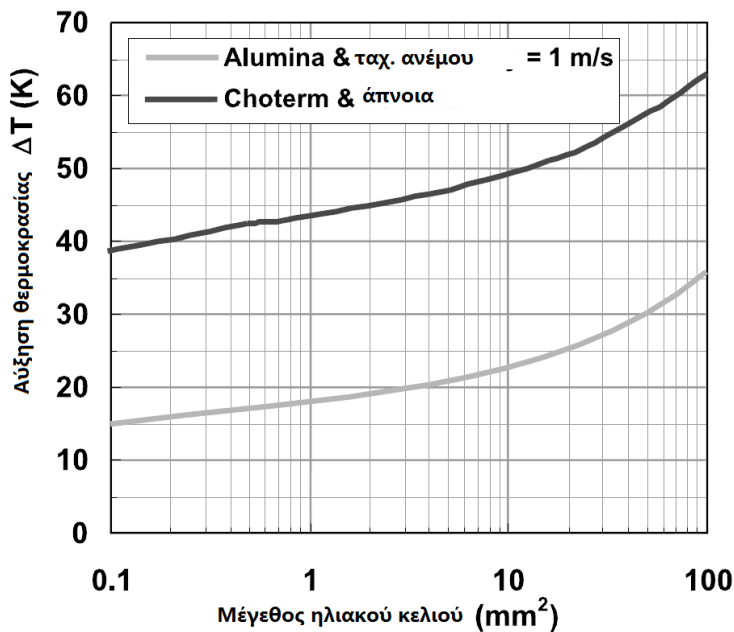
- 1 MW            m<sup>2</sup>
- 100 W          cm<sup>2</sup>
- 1 W             mm<sup>2</sup>

Η πρώτη εντύπωση μας λέει ότι θα χρειαστεί εκτεταμένη ενεργή ψύξη, λόγω υπέρογκης αύξησης θερμοκρασίας. Ωστόσο, όπως θα φανεί, αν ακολουθηθεί η προσέγγιση LED, αυτό δεν είναι αναγκαίο.

Για το μοντέλο που θα εφαρμοστεί, θα υποθέσουμε τρισυνδεδετικό ηλιακό κελί με βαθμό απόδοσης 35%. Για κελί  $1 \text{ mm}^2$  αυτό σημαίνει ότι έχουμε 350 mW ηλεκτρικής ενέργειας και 650 mW θερμότητα. Τέτοιες εκπομπές σημειώνονται και στις διόδους LED χωρίς να χρειάζεται ενεργή ψύξη. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από ένα MJC συγκολλημένο σε μία χάλκινη κατασκευή κωνικού

σχήματος. Ο κώνος συνδέεται μέσω ενός ηλεκτρικά μονωμένου υλικού που είναι καλός θερμικός αγωγός πάνω σε ψύκτρα με πτερύγια.

Το καλό σενάριο προβλέπει αέρα μικρής ταχύτητας και υλικό με καλή θερμική αγωγιμότητα  $\kappa = 0.375 \text{ Wcm}^{-2}\text{K}^{-1}$  ενώ το απαισιόδοξο σενάριο προβλέπει άπνοια και υλικό με μέτρια θερμική αγωγιμότητα  $\kappa = 0.015 \text{ Wcm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Για αρχική θερμοκρασία έχουν υποθεθεί 300 K και γεωγραφικό πλάτος 40°. Παρατηρούμε ότι στο καλό σενάριο για κελί  $1 \text{ mm}^2$  έχουμε αύξηση μόλις 18 βαθμών C.



**Εικ. 3.8. Αύξηση θερμοκρασίας στο ηλιακό κελί ως συνάρτηση του μεγέθους του.**

**Συγκέντρωση: 1000 ήλιοι**

**Απόδοση MJC: 35%**

### 3.2.5. Κατασκευή Ηλιακών κυττάρων με τη χρήση οπτοηλεκτρονικής τεχνολογίας

Συνολικά, η μεταφορά και προσαρμογή από την κατασκευή LEDs σε κατασκευή III-V κυττάρων συνοψίζεται στα εξής βήματα:

- Δόμηση της ημιαγώγιμης κατασκευής με τη μέθοδο MOVPE.
- Χρήση φωτολιθογραφίας για τον προσδιορισμό του άνω πλαισίου
- Θερμική εξάτμιση για τις άνω και κάτω μεταλλικές επαφές
- Εναπόθεση ARC.
- Διάφορες διαδικασίες συνδεσμολόγησης και ενθυλάκωσης

Ως αποτέλεσμα, η τιμή των MJCs είναι παρόμοια με αυτή των LEDs. Το κόστος ενός τρισυνδετικού κελιού που κατασκευάζεται με τη προσέγγιση LED του  $1 \text{ mm}^2$  κοστίζει ~ 15 λεπτά.



### 3.3. Ανάλυση κόστους

Στην κατασκευή III-V συγκεντρωτικών συστημάτων μείζον θέμα παραμένει η εύρεση της ιδανικής συγκέντρωσης. Σε πολύ χαμηλές τιμές έχουμε χαμηλότερη απόδοση, ωστόσο και λιγότερη καταπόνηση του κυττάρου, ενώ για υψηλές τιμές έχουμε δυνητικά μεγάλη αύξηση της απόδοσης αλλά και αυξημένη πιθανότητα για εμφάνιση βλαβών(σκοτεινίασμα, βραχυκυκλώματα, ακόμα και θραύση του κελιού). Ωστόσο, οι λόγοι για υλοποίηση III-V πολυσυνδετικών κελιών σε υψηλές συγκεντρώσεις(>800x) είναι σημαντικοί:

- Υπάρχουν ήδη εκτεταμένες εφαρμογές συμβατικών κελιών σιλικόνης απόδοσης 25% που λειτουργούν σε εύρος 250-400x και είναι αρκετές τάξεις μεγέθους πιο φθηνές. Για να είναι ανταγωνιστικά λοιπόν τα πολυσυνδετικά κύτταρα, δεν φτάνει μόνο η υψηλότερη απόδοσή τους, αλλά πρέπει ταυτόχρονα να λειτουργούν σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Σε κάθε περίπτωση, τα πολυσυνδετικά υπερτερούν των απλών κελιών σιλικόνης.  
Αυτό θα φανεί εύκολα από το παρακάτω παράδειγμα. Έστω ένα σύστημα 100 kW με κελιά σιλικόνης 24% στα 500x. Η συμβατική τιμή για μία τέτοια εγκατάσταση ΧΩΡΙΣ να λάβουμε καν υπόψη την τιμή των κελιών είναι στα 400.000 \$, άρα το κόστος είναι 4 \$/W. Για ένα τέτοιο σύστημα τα κελιά καταλαμβάνουν 8333 cm<sup>2</sup> (50 W/cm<sup>2</sup> στους 500 ήλιους και 24% απόδοση, 8333\*50 W= 100 kW).  
Αν στην ίδια έκταση βάλουμε πολυσυνδετικά κελιά με τρέχον συμβατικό κόστος 10 \$/cm<sup>2</sup>, θα έχουμε πρόσθετο κόστος στην εγκατάσταση 83.333 ευρώ αλλά και αύξηση της εγκατάστασης από τα 100 kW στα 145 kW, δίνοντας τελικό κόστος 3.33 \$/W, άρα έχουμε μείωση του κόστους κατά 17% χωρίς να έχουμε λάβει καν υπόψη το αρχικό κόστος των συμβατικών κυττάρων.
- Έχει αποκτηθεί μεγάλη εμπειρία στο πεδίο πολυσυνδετικών κελιών σε υψηλές θερμοκρασίες, χάρη σε προγράμματα που έχουν χρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Το INFLATCOM (“INDustrialization of ultra-FLAT Concentrator Module of high efficiency”) το 1996 έθεσε για πρώτη φορά σαν στόχο την κατασκευή ενός πλήρους εμπορικά εκμεταλλεύσιμου φωτοβολταϊκού συστήματος των 10 MW. Μετέπειτα ακολούθησε το HAMLET (“High-efficiency III-V based solar cells under concentrated sunlight: Advanced concepts for Mass production and Low-cost photovoltaic Electricity”). Και στα δύο προέκυψαν στην πορεία πρόσθετα κόστη τα οποία ανέβασαν την τελική κόστος άνα Watt, ωστόσο και από τα δύο προέκυψε το πόρισμα ότι το κλειδί για πραγματική αντιστάθμιση του κόστους έγκειται στη λειτουργία με μεγάλη συγκέντρωση.

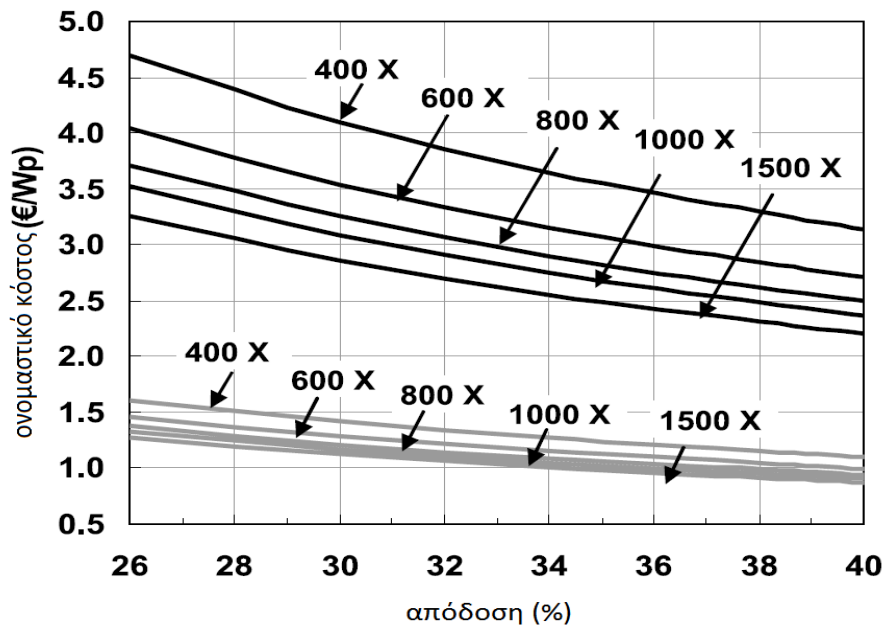
Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στην παρακάτω εικόνα. Βλέπουμε ότι ειδικά για συνολική παραγωγή κάτω των 10 MW, η συγκέντρωση παίζει τεράστιο ρόλο στο τελικό κόστος του φ/β εργοστασίου. Για παράδειγμα, η τελική τιμή μίας εγκατάστασης που λειτουργεί στους 400x είναι κατά 1 Ευρώ/W υψηλότερη από μία στους 1000x, ανεξάρτητα από

την απόδοση των κελιών της τελευταίας.

Επίσης, είναι ξεκάθαρη η πτώση στην τελική τιμή καθώς αυξάνεται η παραγωγή και λειτουργούν οι καμπύλες εκμάθησης (εισέρχονται περισσότερες εταιρείες στην παραγωγή και βελτιώνονται οι τεχνικές κατασκευής, άρα πέφτει η γενική τιμή). Το κύριο συμπέρασμα είναι ότι τρεις σημαντικότεροι παράγοντες, με φθίνουσα σειρά, που καθορίζουν την τιμή είναι οι εξής:

- Εκμάθηση
- Συγκέντρωση
- Απόδοση

Η απόδοση δηλαδή σε καμία περίπτωση δεν αποτελεί πανάκεια και θα πρέπει να γίνεται προσεκτικός συνδυασμός μεταξύ απόδοσης και συγκέντρωσης.

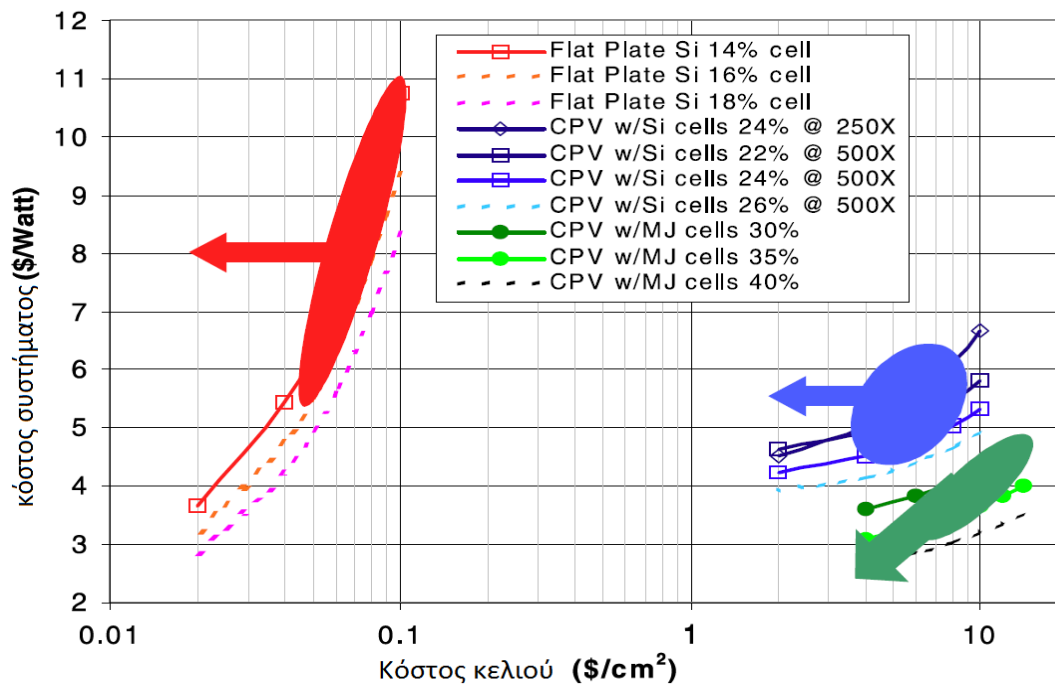


**Εικ. 3.9. Ονομαστικό κόστος ενός ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού πάρκου με πολυσυνδεδετικά κελιά κατασκευασμένα με την προσέγγιση LED. Οι συγκεντρώσεις είναι από 400-1500x. Απεικονίζονται δύο διαφορετικά σενάρια: α) μαύρες καμπύλες είναι για συνολική παραγωγή 10 MW, β) γκρι καμπύλες είναι για συνολική παραγωγή 1000 MW. Στις γκρι επεισέρχεται ο παράγοντας εκμάθησης.**

Η εύρεση τρόπων μείωσης του κόστους των πολυσυνδεδετικών κελιών είναι εξαιρετικά σημαντική, όπως φαίνεται στην εικόνα .....όπου έχουμε τα συγκριτικά κόστη για τρεις διαφορετικές τεχνολογίες:

- επίπεδα πάνελα σιλικόνης
- CPV με κελιά σιλικόνης
- CPV με πολυσυνδεδετικά κελιά

Βλέπουμε ότι μόνο στα CPV με πολυσυνδεδετικά κελιά η μείωση του ολικού κόστους του συστήματος πρέπει να γίνει με ταυτόχρονη αύξηση της απόδοσης και μείωσης του κόστους του κελιού.

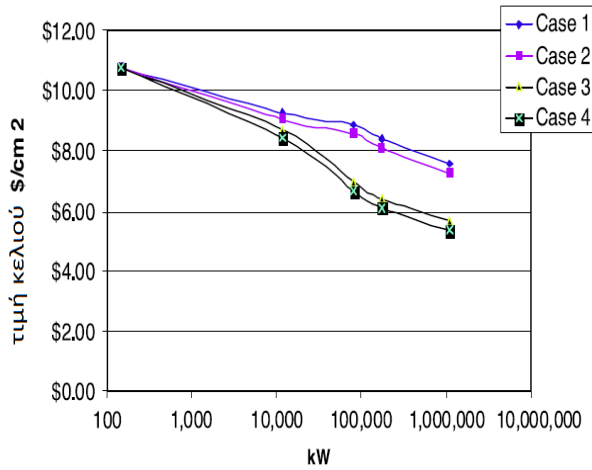


**Εικ. 3.10. Επιπτώσεις απόδοσης κελιού και κόστος κελιού στο συνολικό κόστος του συστήματος.**

Για να δούμε πως μπορεί να γίνει αυτό, ας δούμε πως παράγεται ένα πολυσυνδεδετικό κελί. Το κόστος του προκύπτει από το άθροισμα των εξής τεσσάρων στοιχείων:

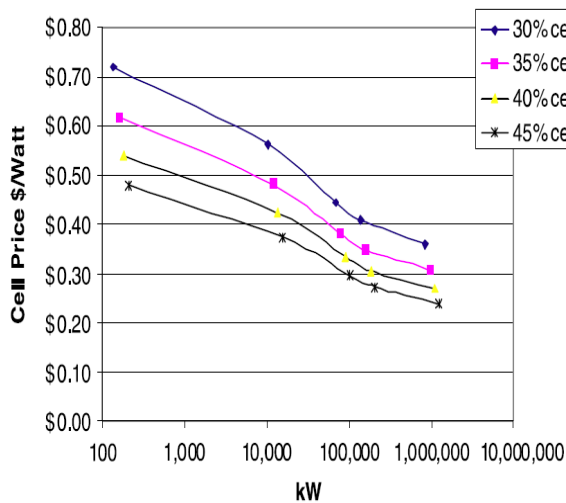
- κόστος πλακιδίου Ge
- κόστος δόμησης του κελιού σε αντιδραστήρες MOVPE
- ολοκλήρωση της κατασκευής με μία σειρά από τεχνικές(εναπόθεση αντικατοπτρικού στρώματος, τεμαχισμός του πλακιδιού Ge για να προκύψουν τα κελιά κτλ)
- έλεγχος καλής λειτουργίας

Για να αναλυθεί το κόστος του κάθε στοιχείου είναι απαραίτητη η γνώση κάποιων παραγόντων, όπως η ποιότητα του Γερμανίου που χρησιμοποιείται, το μέγεθος των κελιών(αυτό καθορίζει πόσα κελιά πρέπει να ελεγχθούν στο τέλος και πόσες τομές πρέπει να γίνουν για να διαχωριστούν τα κελιά από το πλακίδιο Ge) ή ο όγκος και η απόδοση της παραγωγής. Η εικόνα ασδφ παρουσιάζει την προβλεπόμενη τιμή ενός κελιού 1 cm<sup>2</sup> για διαφορετικά σενάρια. Το σενάριο 1 είναι η αναφορά μας όπου δεν λαμβάνουν χώρα οποιεδήποτε δραστηριότητες για μείωση κόστους. Το σενάριο 2 προβλέπει τη χρήση φθηνότερου Ge καθώς και αυξημένη μάθηση λόγω μεγαλύτερης παραγωγής. Το σενάριο 3 προβλέπει και αυτό αυξημένη μάθηση καθώς και πλήρως αυτοματοποιημένους ελέγχους καλής λειτουργίας. Τέλος, το σενάριο 4 περιέχει όλες τις βελτιωτικές δράσεις.



**Εικ. 3.11.**  
**Προβλεπόμενη**  
**τιμή κελιού για**  
**διαφορετικούς**  
**όγκους**  
**παραγωγής και**  
**συνθηκών**

Ένας άλλος τρόπος θεώρησης του προβλεπόμενου κόστους είναι να εκφραστεί η τιμή ως δολλάρια/W. Σε αυτή την περίπτωση, το επίπεδο συγκέντρωσης και η απόδοση του κελιού πρέπει να είναι δεδομένες. Στην εικόνα σδ βλέπουμε την προβλεπόμενη τιμή κελιού σε δολλάρια ανά βατ, με την υπόθεση ότι έχουμε 50 W/cm<sup>2</sup>. Τα δεδομένα δίνονται για διαφορετικές αποδόσεις και λαμβάνουν χώρα με τις προϋποθέσεις του σεναρίου 4, της προηγούμενης εικόνας..



**Εικ. 3.12.**  
**Προβλεπόμενη**  
**τιμή κελιού για**  
**διαφορετικούς**  
**όγκους**  
**παραγωγής και**  
**αποδόσεις**

## 4. Εφαρμογές

### 4.1. Amonix Φωτοβολταϊκό Σύστημα υψηλής συγκέντρωσης

#### 4.1.1. Γενικά για την Amonix

Η εταιρεία Amonix Incorporated (Torrance, Calif.) ιδρύθηκε το 1989 και υλοποιεί εμπορικά ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα υψηλής συγκέντρωσης(HCPV) χρησιμοποιώντας κελιά σιλικόνης υψηλής απόδοσης. Η Amonix είναι μέχρι στιγμής η εταιρεία που κατέχει το παγκόσμιο ρεκόρ απόδοσης στα τυπικά κελιά σιλικόνης που μπαίνουν σε επίπεδα πάνελ και είναι 27.6%. Από το 2006 και μετά, άρχισε να ενσωματώνει και πολυσυνδεδετικά κελιά στα συστήματά της.

Μέχρι σήμερα, έχει εγκαταστήσει 19 MW HCPV σε εγκαταστάσεις εντός του sun belt στην Βόρεια Αφρική, Ισπανία και Ηνωμένες Πολιτείες. Οι εγκαταστάσεις εκπληρούν μία πληθώρα λειτουργιών όπως:

- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για έγχυση στο δίκτυο ηλεκτροδότησης της χώρας. (εικ. 5.1.)
- Ηλεκτροδότηση χωριών και απομακρυσμένων οικισμών.(εικ. 5.2.)
- Αντληση νερού. (εικ. 5.3.)
- Τροφοδότηση εργοστασίων (εικ. 5.4.)



**Εικ. 4.1. Πέντε HCPV συστήματα των 35 kW εγχύουν απευθείας ηλεκτρικό ρεύμα στο ηλεκτρικό δίκτυο της Αριζόνας**



**Εικ. 4.2. Τροφοδότηση χωριού με ηλεκτρικό ρεύμα στην Αφρική**



**Εικ. 4.3. Άντληση νερού πάλι σε χωριό της Βορειας Αφρικής**

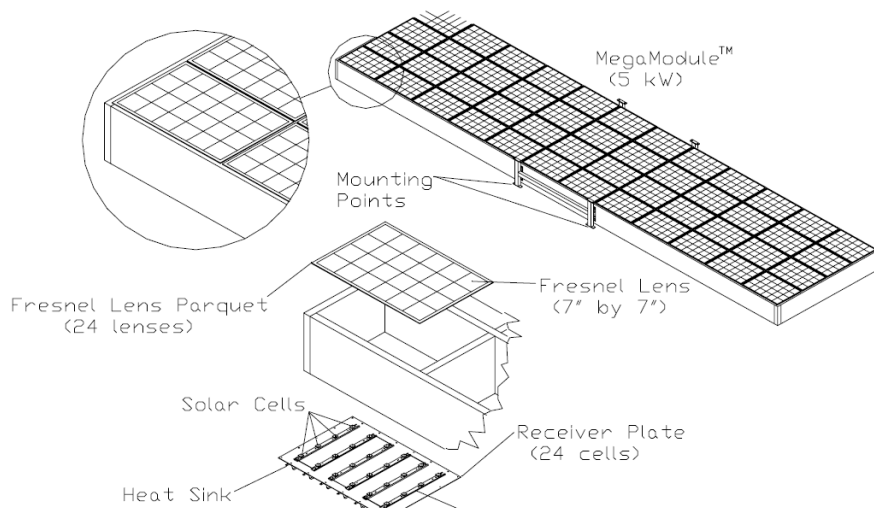


**Εικ. 4.4. Συμπληρωματική δράση σε εργαστάσιο αφαλάτωσης στην Ισπανία**

#### 4.1.2. Περιγραφή συστήματος

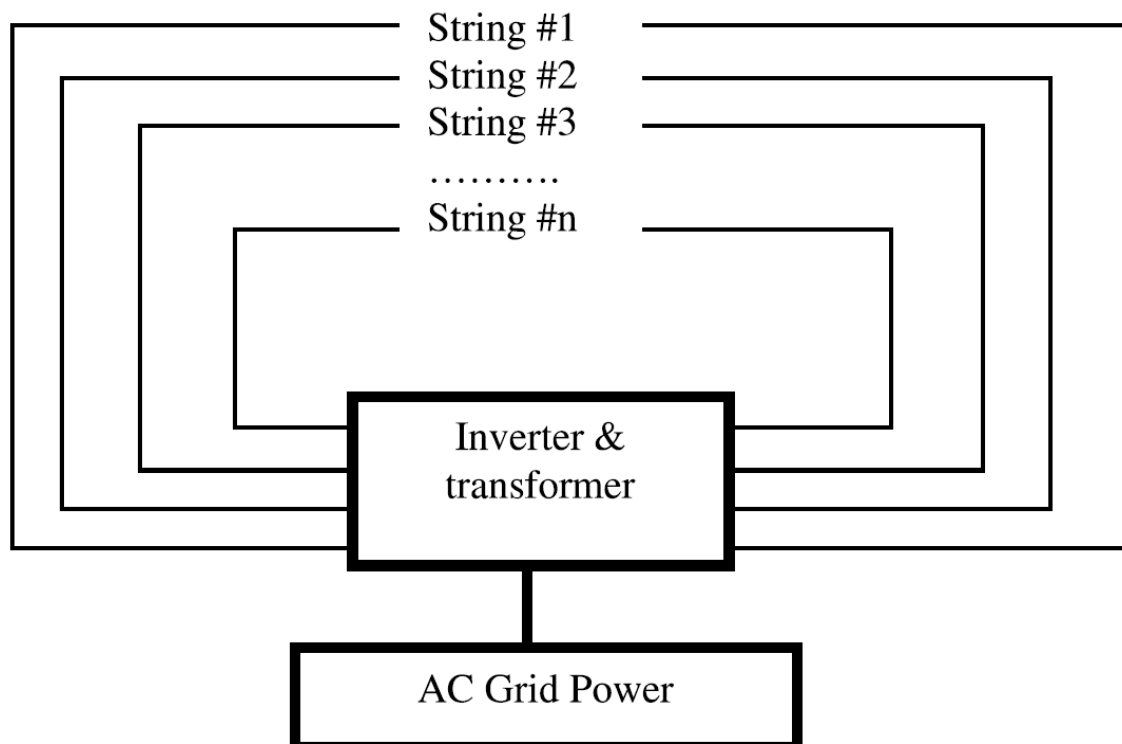
Τα συστήματα HCPV της AMONIX αποτελούνται από πέντα υποσυστήματα:

- **Megamodule:** Δομή που στεγάζει και στηρίζει τα ηλιακά κύτταρα, τους συγκεντρωτές, και όλες τις ηλεκτρολογικές συνδέσεις. Ένα σύστημα μπορεί να έχει έως 7 megamodules. Οι φακοί που χρησιμοποιούνται είναι τύπου Fresnel και συγκεντρώνουν το φως που προσπίπτει σε αυτές σε ένα σημείο κεντρικά από κάτω τους, όπου μπαίνει και το ηλιακό κελί. Ένα megamodule απεικονίζεται στην πιο κάτω εικόνα.
- **Υποσύστημα οδήγησης:** Σύστημα που καθιστά δυνατή την σωστή περιστροφή και τοποθέτηση του megamodule απέναντι στον ήλιο. Περιλαμβάνει τρεις γραμμικούς υδραυλικούς κινητήρες (έναν για ανυψωτική κίνηση, οι υπόλοιποι για αζιμουθιακή κίνηση). Είναι αξιόπιστο και αντέχει ταχύτητες ανέμων έως και 40 m/sec, ενώ είναι σε θέση να παρακολουθεί τον ήλιο για ταχύτητες ανέμου έως και 13 m/sec. Έχει δύο είδη λειτουργίας, τον χαμηλής ταχύτητας για παρακολούθηση του ήλιου και τον υψηλής ταχύτητας που ενεργοποιείται όταν υπάρχουν πολύ δυνατοί άνεμοι (>40m/sec) που τοποθετεί το megamodule κάθετα προς το έδαφος για προστασία
- **Ηλεκτρονικά ελέγχου παρακολούθησης ανοιχτού βρόχου:** παρακολουθούν τη θέση του ήλιου και τοποθετούν το megamodule στη σωστή γωνία θέασης. Επίσης διαθέτουν ανεμόμετρα, για κάθετη τοποθέτηση του megamodule σε υψηλές ταχύτητες ανέμου. Επίσης, κάνουν το ίδιο πράγμα όταν πέφτει η νύχτα, και το πρωί, όταν ο ήλιος φτάσει μια συγκεκριμένη γωνία, φέρουν το megamodule σε θέση λειτουργίας. Απο κει και πέρα, μόλις η ακτινοβολία είναι αρκετή για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ο αντιστροφείας αυτόματα συνδέεται με το δίκτυο και ξεκινάει η έγχυση ισχύος. Σε περίπτωση σκίασης λόγω συννεφιάς ο αντιστροφείας αποσυνδέεται από το δίκτυο, αλλά το σύστημα συνεχίζει την παρακολούθηση του ήλιου. Όταν σταματήσει η σκίαση, ο αντιστροφείας επανασυνδέεται με το δίκτυο εντός ολίγων λεπτών.
- **Υδραυλικό υποσύστημα:** ενεργοποιεί και απενεργοποιεί τις υδραυλικές αντλίες των κινητήρων.
- **Αντιστροφείς:** μετατροπή DC/AC και έγχυση στο δίκτυο.



**Εικ. 4.5.** Ένα megamodule αποτελείται από φακούς, πλάκες υποδοχής των κελιών και ενός στήλου στήριξης

Η καλωδίωση για την παραγωγή ισχύος στο σύστημα HCPV της Amonix φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



**Εικ. 4.6.** καλωδίωση για την παραγωγή ισχύος στο HCPV



Κάθε megamodule είναι χωρισμένο σε δύο καλωδιακές ακολουθίες. Κάθε ακολουθία αποτελείται από 576 κελία, σειριακά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Για πρόσθετη αξιοπιστία, οι ακολουθίες σε κάθε πάνελ είναι συνδεδεμένες παράλληλα μεταξύ τους, ώστε αν υπάρξει πρόβλημα με μια ακολουθία, να μην επηρεαστούν οι άλλες. Επιπλέον, κάθε ξεχωριστό κελί είναι παράλληλα συνδεδεμένο με μία δίοδο διαφυγής, ώστε ένα “κακό” κελί να μην επηρεάζει τη λειτουργία της υπόλοιπης ακολουθίας, στην περίπτωση που πάθει βλάβη. Αν αυτό οντως συμβεί, αποσυνδέεται αυτόματα μέσω της διόδου και έχουμε σαν αρνητικό μόνο την πτώση τάσης για αυτό το κελί και απώλεια περίπου 10 W.

Συνολικά, όλα αυτά τα χαρακτηριστικά ενισχύουν σημαντικά την αξιοπιστία του συστήματος. Μόνο βλάβη στον αντιστροφέα, τον μετασχηματιστή ή στο σύστημα ελέγχου μπορούν να βγάλουν το σύστημα εντελώς εκτός δικτύου. Όλες οι υπόλοιπες βλάβες απλά προκαλούν ελαφρώς μειωμένη παραγωγή ισχύος.

#### 4.1.3. Εγκατάσταση και λειτουργία

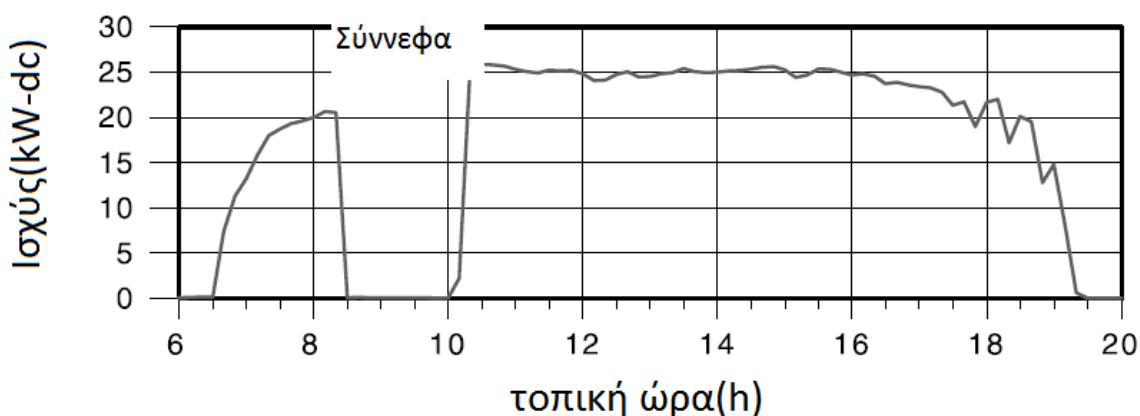
Ο στήλος στήριξης του συστήματος HCPV μπαίνει μέσα σε μια τρύπα από σκυρόδεμα, διαμέτρους 1 μέτρου και βάθους 5,5 μέτρων. Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζονται το τρυπάνι που δημιουργεί την τρύπα καθώς και το τελικό αποτέλεσμα. Αφού μπει το στήριγμα και σταθεροποιηθεί με τσιμέντο, τοποθετείται και η σωλήνας κίνησης μέσω ενός γερανού που έχει συνδεθεί μαζί του με μάντες. Έπειτα, έως και και τρία megamodules τη φορά μεταφέρονται στην εγκατάσταση μέσω φορτηγού. Το πρώτο μέρος μπαίνει κεντρικά στο σωλήνα κίνησης, και μετέπειτα τα υπόλοιπα(μέχρι 7) μπαίνουν εκατέρωθεν του πρώτου μέρους. Οι διαδικασίες αυτές απεικονίζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικ. 4.7. Εγκατάσταση συστήματος HCPV

Όσον αφορά τη λειτουργία, το σύστημα της Amonix είναι σχεδιασμένο για λειτουργία χωρίς επιτήρηση ανεξάρτητα αν οι εφαρμογές είναι εντός ή εκτός δικτύου. Όταν ο ήλιος το πρωί φτάσει μία συγκεκριμένη γωνία ανύψωσης, το σύστημα μεταφέρεται αυτόματα από την κάθετη θέση σε θέση παρακολούθησης. Όταν η άμεση κανονική ακτινοβολία(DNI, direct normal irradiance) είναι πάνω από 400W/m<sup>2</sup>, ξεκινά η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μέχρι τη δύση του ηλίου. Καθ'ολη τη μέρα, το σύστημα παρακολούθησης φροντίζει το megamodule να παρακολουθεί πιστά την πορεία του ήλιου και διατηρεί σε κάθε στιγμή τη σωστή γωνία θέασης ως προς αυτόν, ακόμα και σε περίπτωση συννεφιάς.

Ακολουθεί ένα παράδειγμα μίας τυπικής μέρας σε ένα τέτοιο σύστημα. Βλέπουμε, ότι η παραγωγή ξεκινά το πρωί με την ανατολή του ήλιου και διακόπτεται για δύο ώρες λόγω συννεφιάς. Παρατηρούμε ότι η σύνδεση με το δίκτυο και η έγχυση ισχύος είναι άμεση, με το που φύγουν τα σύννεφα. Η παραγωγή μένει στα 25 kW-dc και παρατηρούμε ότι προς το τέλος της μέρας ελαφρά συννεφιά προκαλεί διακύμανση στην παραγόμενη ισχύ.



**Εικ. 4.8. Παραγόμενη ισχύος ενός συστήματος HCPV κατά τη διάρκεια μίας μέρας**

#### 4.1.4 Συντήρηση

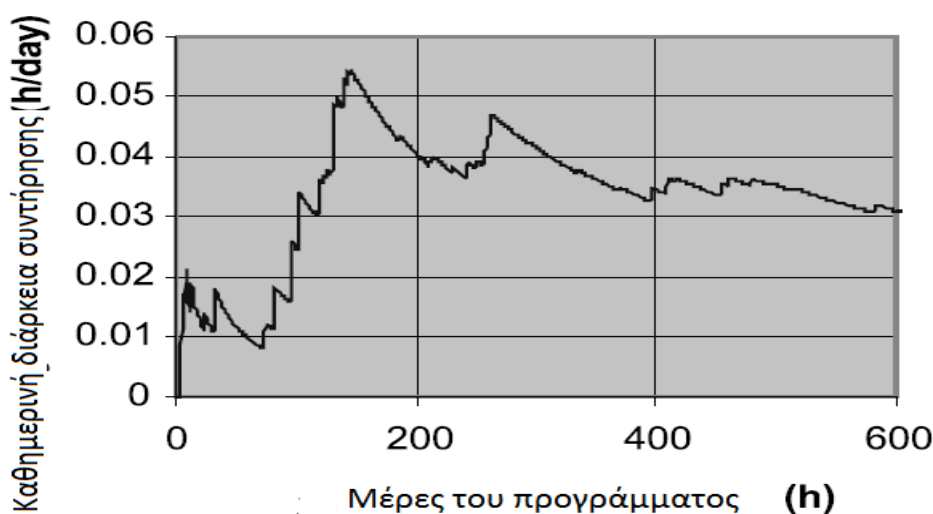
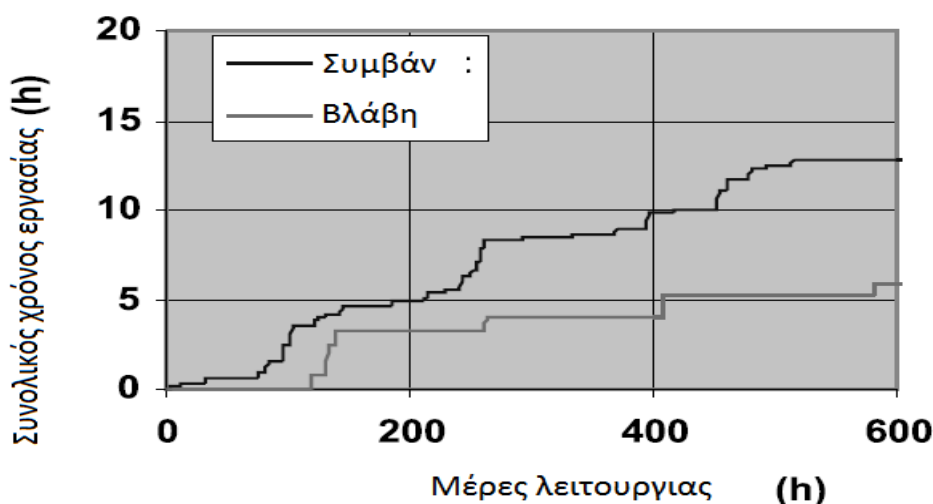
Κάθε megamodule του HCPV συστήματος της Amonix διαθέτει 48 αφαιρέσιμες πλάκες φωτοβολταϊκών κελιών. Σε περίπτωση εκφυλισμού ή βλάβης, κάθε πλάκα μπορεί να ελεγχθεί γρήγορα εξετάζοντας την τάση ανοιχτοκύκλωσής της. Για να γίνει αυτό, το σύστημα δεν χρειάζεται καν να απομακρυνθεί από τον ήλιο- απλά το σύστημα φτάνει να μην επικεντρώνεται πλέον στον ήλιο( ήδη απόκλιση 10 μοίρες είναι αρκετή). Με το που βρεθεί το κελί που έχει υποστεί βλάβη, η αλλαγή μπορεί να γίνει γρήγορα επι τόπου. Το κελί που έχει τη βλάβη μπορεί μετά να επισκευαστεί στο εργοστάσιο, αφού όλη του η παραγωγή είναι πλήρως τμηματοποιημένη. Φτάνει μόνο να αλλαχθεί το στοιχείο του κελιού που δεν λειτουργεί πλέον.

Το σύστημα HCPV χρησιμοποιεί υδραυλικό σύστημα χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων και η πλειοψηφία των συστατικών μερών του μπορεί να αλλαχθεί χωρίς να είναι αναγκαία κάποια σημαντική αποσυναρμολόγηση του συστήματος. Οι υδραυλικοί κινητήρες, οι βαλβίδες, τα μηχανικά στηρίγματα και όλα τα ρουλεμάν(εκτός από αυτό που είναι για την αζιμούθια περιστροφή) μπορούν να αλλαχθούν χωρίς να μετακινηθεί ο σωλήνας κίνησης. Μόνο εάν υπάρξει βλάβη στο σωλήνα κίνησης, πρέπει να έρθει γερανός για να ξεκινήσει η επισκευή.

Τα ηλεκτρονικά ισχύος, οι αντλίες ελέγχου, ο αντιστροφάας, η διεπαφή του δικτύου και ο μετασχηματιστής είναι όλα συστατικά του συστήματος και είναι τοποθετημένα στο ισόγειο για εύκολη πρόσβαση και συντήρηση.

Οι περιοδικές εργασίες συντήρησης είναι λίγες, και περιλαμβάνουν το πλύσιμο των φακών(για βέλτιστη λειτουργία συστήματος. Η συχνότητά τους εξαρτάται από το πόσο συχνά βρέχει και πόση σκόνη υπάρχει εκεί), λίπανση των ρουλεμάν(μία φορά κάθε δύο χρόνια), και αλλαγή του υδραυλικού υγρού(κάθε δύο χρόνια) και φίλτρου(κάθε χρόνο). Τα συστήματα αυτά γενικά είναι αξιόπιστα, και βλάβες όπως διαρροή υδραυλικού υγρού είναι σπάνιες και ανιχνεύονται από το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου.

Στις εικόνες που ακολουθούν, απεικονίζονται οι χρόνοι εργασίας του προσωπικού της εγκατάστασης για διάφορα συμβάντα και βλάβες.

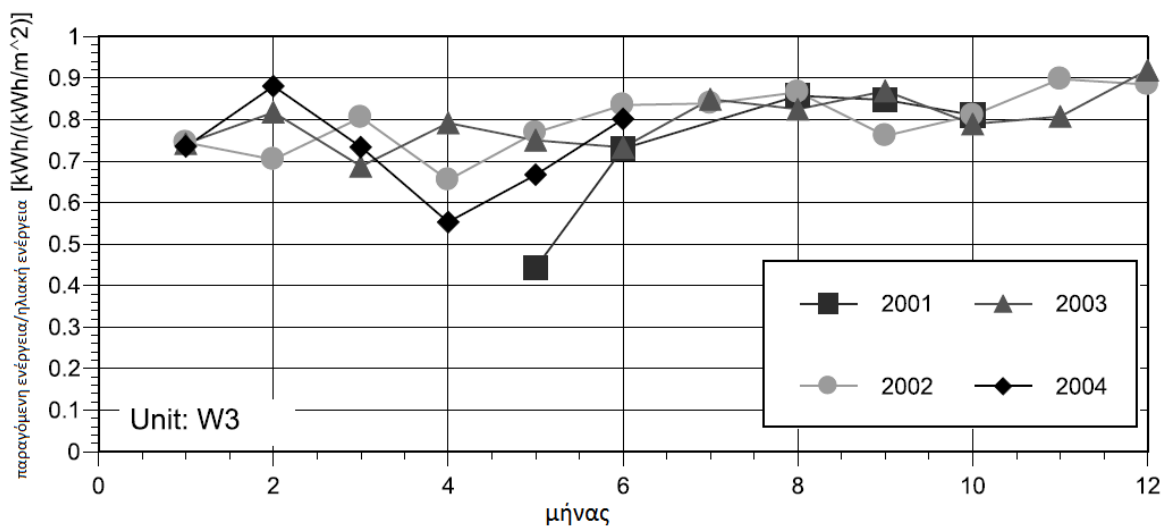


#### 4.1.5. Απόδοση και κόστος συστήματος

Ο δείκτης αξιολόγησης της απόδοσης ενός HCPV συστήματος ονομάζεται μηνιαίος συντελεστής ενεργειακής απόδοσης(MPEF):

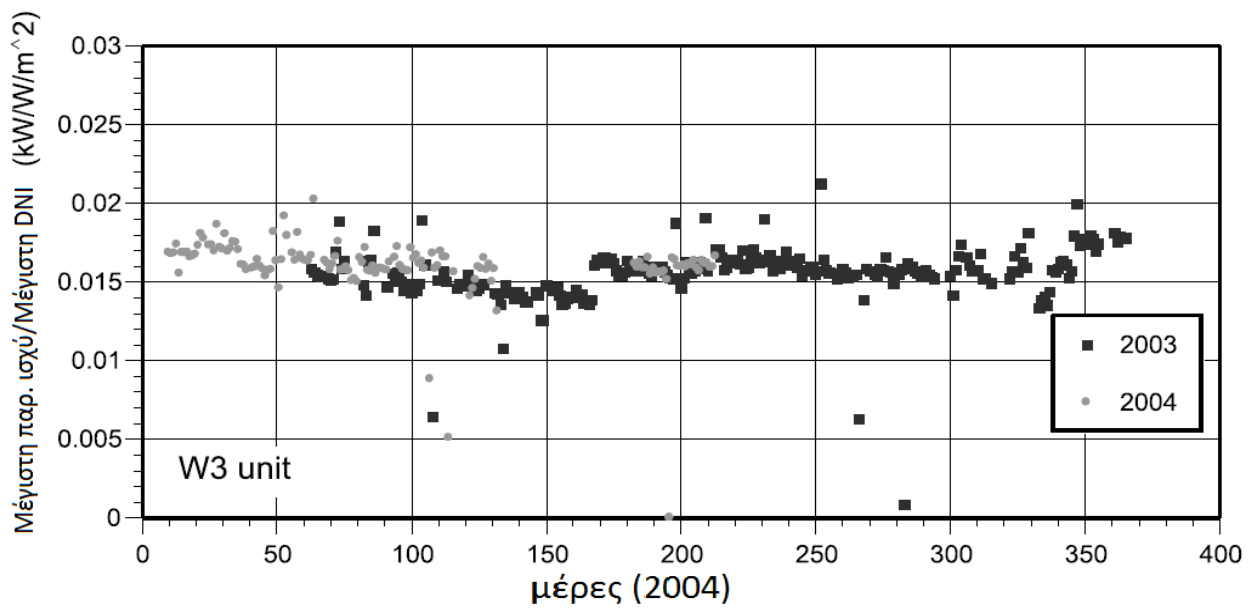
$$MPEF = \frac{\text{μηνιαία παραγωγή ενέργειας από το σύστημα}}{\text{Συνολική άμεση ενέργεια ακτινοβολήσης * ονομαστική ισχύς συστήματος}}$$

Ο MPEF για το σύστημα W3 της Amonix φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



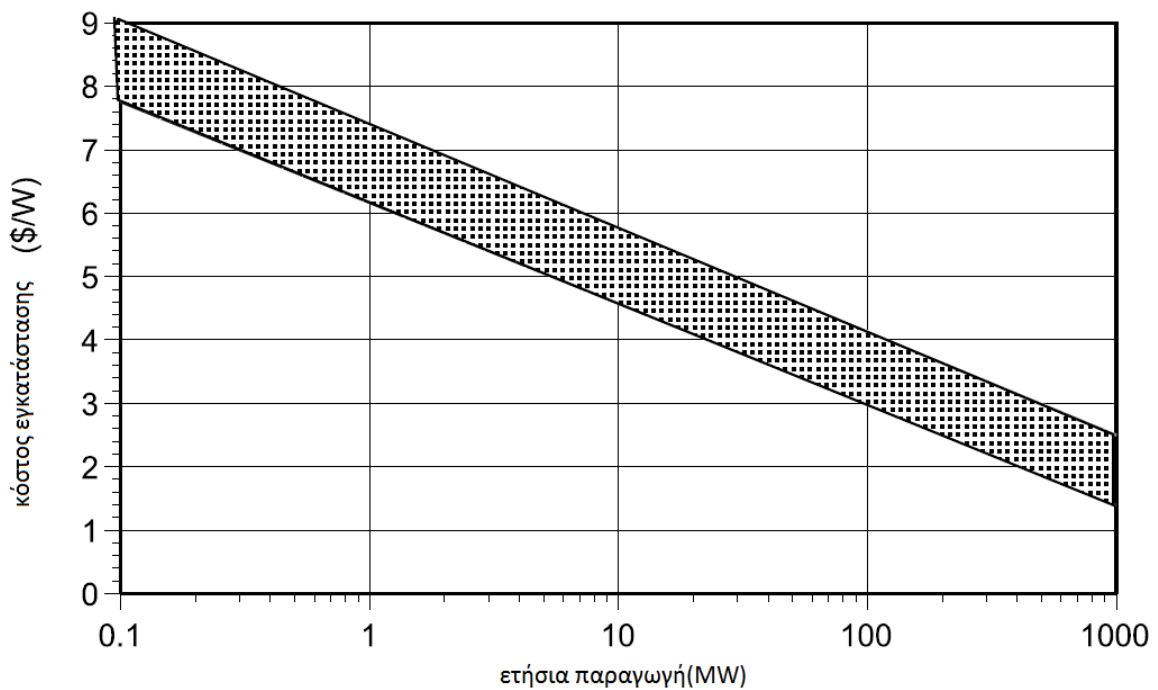
Εικ. 4.9. Μηνιαίος συντελεστής ενεργειακής απόδοσης μονάδας W3.

Επίσης, αυτό που μετράται είναι και η απόδοση της μέγιστης ισχύς σε ένα σύστημα. Στην ακόλουθη εικόνα απεικονίζεται το πηλίκο της μέγιστης ισχύος εξόδου, προς τη άμεση κανονική ακτινοβολία(DNI) για το έτος 2004.



**Εικ. 4.10. Καθημερινή μέγιστη ισχύς εξόδου ως προς την DNI**

Το κόστος κατασκευής αυτή τη στιγμή στα συστήματα της Amonix είναι 8 δολλάρια/Βατ με εγκατάσταση καινούργιας ισχύς 500 kW ανά έτος. Καθώς αυξάνεται η παραγωγή, το κόστος ανα βατ αναμένεται να πέσει σημαντικά. Αυτό φαίνεται και στην επόμενη εικόνα.



**Εικ. 4.11. Εκτίμηση κόστους του συστήματος**

## 4.2. Σύστημα FLATCON της Concentrix Solar

### 4.2.1 Γενικά για την Concentrix Solar

Η εταιρεία Concentrix Solar(Freiburg, Germany) ιδρύθηκε το 1993. Σε αντίθεση με την Amonix, “πόνταρε” απ'ευθείας σε πολυσυνδεδετικά κελιά στην κατασκευή των συστημάτων της. Οι συγκεντρωτές της είναι όπως και στην Amonix φακοί Fresnel. Τα κελιά της ξεκίνησαν ως κύτταρα απλής σύνδεσης, έπειτα έγινε χρήση δίδυμων κυττάρων, και πλέον χρησιμοποιεί αποκλειστικά τρισυνδεδετικά κελιά. Με κάθε προσθήκη και καινούργια στρώματος σημειώθηκε και η ανάλογη αύξηση στην απόδοση. Είναι κάτοχος πολλών ευρεσιτεχνιών στο χώρο των CPVs και έχει μακροχρόνια στενή συνεργασία με τα ινστιτούτα Fraunhofer ISE(Freiburg, Γερμανία) και Ioffe(Πετρούπολη, Ρωσία).

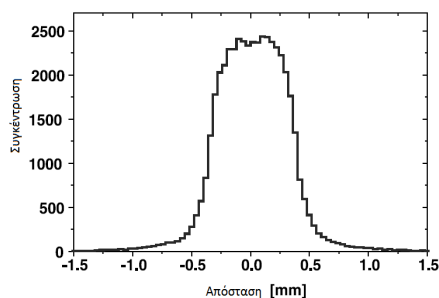
Η γενική ιδέα πίσω από το σύστημα FLATCON είναι η εξής:

- Χρήση μικρού ηλιακού κελιού. Αυτό επιτρέπει παθητική ψύξη αφού η θερμότητα παράγεται σε πολύ μικρή περιοχή και η απαγωγή της είναι εύκολη και φθηνή. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, γιατί επιτρέπει τη λειτουργία και παθητική ψύξη σε πολύ υψηλές συγκέντρώσεις(>1000x). Επίσης, έχουμε χαμηλά ρεύματα, άρα και μικρότερες ωμικές απώλειες. Τέλος, το σύστημα FLATCON χρησιμοποιεί παρόμοιες μεθόδους κατασκευής που βρίσκουν εκτεταμένη εφαρμογή στην κατασκευή LEDs, άρα η χρήση τους είναι και πιο οικονομική.
- Η χρήση μικρού μήκους εστίασης στους φακούς Fresnel κάνει τη χρήση και παραγωγή τους εύκολη. Επίσης, διευκολύνεται έτσι η μεταφορά του πάνελ και η τοποθέτηση του σε σύστημα παρακολούθησης.

### 4.2.2 Περιγραφή του συστήματος

- **Οπτικά**

Η σχεδίαση του κελιού και του συγκεντρωτή είναι αλληλένδετα πράγματα. Το κελί στο σύστημα FLATCON πρέπει να προσαρμόζεται στις προδιαγραφές του συγκεντρωτή και ανάποδα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χρήση φακών Fresnel δημιουργεί μία σχεδόν γκαουσιανή κατανομή ακτινοβολίας με συγκέντρωση 2500x στο κέντρο του κελιού(βλ. Εικ. 5.12.).



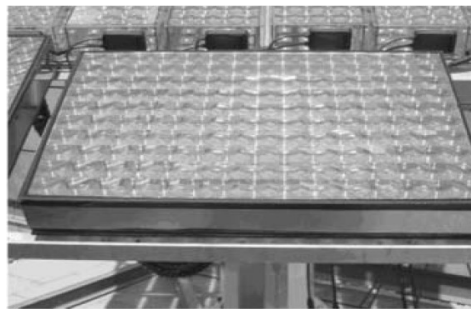
**Εικ. 4.12. Συγκέντρωση ως προς την απόσταση από το κέντρο του κελιού. Μέσος γεωμετρικός συντ. Συγκέντρωσής είναι 500. Μέγιστη συγκέντρωσή είναι 2500 στο κέντρο του κελιού**

Τα πάνελ Fresnel είναι εύκολα και φθηνά στην κατασκευή τους. Ωστόσο, πρέπει να έχουν όσο μεγαλύτερη ομοιομορφία(δηλαδή υψηλή οπτική απόδοση) ώστε να εξασφαλίζουν στα κελιά που βρίσκονται από κάτω τους(και τα οποία είναι σειριακά συνδεδεμένα) ίδιες συνθήκες λειτουργίας. Η οπτική απόδοση βελτιώνεται συνεχώς και μέχρι στιγμής έχουμε φτάσει μέγιστο ποσοστό 91% οπτικής απόδοσης.

- Ανάπτυξη κελιού και στοιχείου FLATCON

Από το 2005 και μετά η Concentrix χρησιμοποιεί αποκλειστικά τρισυνδετικά κελιά  $Ga_{0.35}In_{0.65}P/Ga_{0.83}In_{0.17}As/Ge$  με αταίριασμα κρυστάλλου. Ο σχεδιασμός είναι έτσι ώστε κάθε υπόστρωμα να παράγει το ακριβώς ίδιο ρεύμα με τα άλλα. Ωστόσο, για να αποτραπεί ζημιά στον κρύσταλλο λόγω του μη ταιριάσματος, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη buffer μεταξύ των υποστρωμάτων.

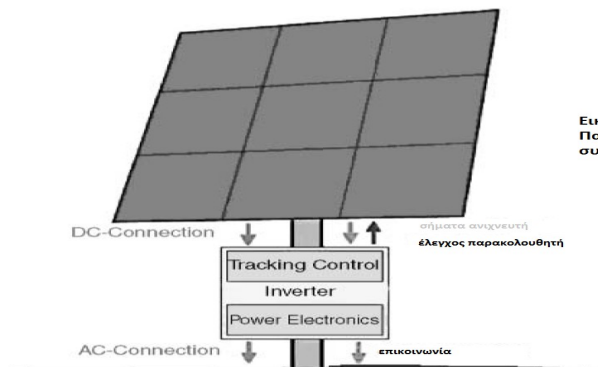
Τα στοιχεία FLATCON αποτελούνται από ένα μεταλλικό πλαίσιο που συνδέει μηχανικά την πάνω γυάλινη πλάκα με τους φακούς στην κάτω γυάλινη πλάκα με τα κελιά που είναι πάνω της. Έχουν γίνει εκτεταμένα τεστ πάνω σε αυτό το μοντέλο που τεκμηριώνουν την καταλληλότητά του για χρήση σε ανοιχτούς χώρους κάτω από πραγματικές συνθήκες.



**Εικ. 4.13.**  
**Πλαίσιο**  
**FLATCON**

- Σύστημα παρακολούθησης

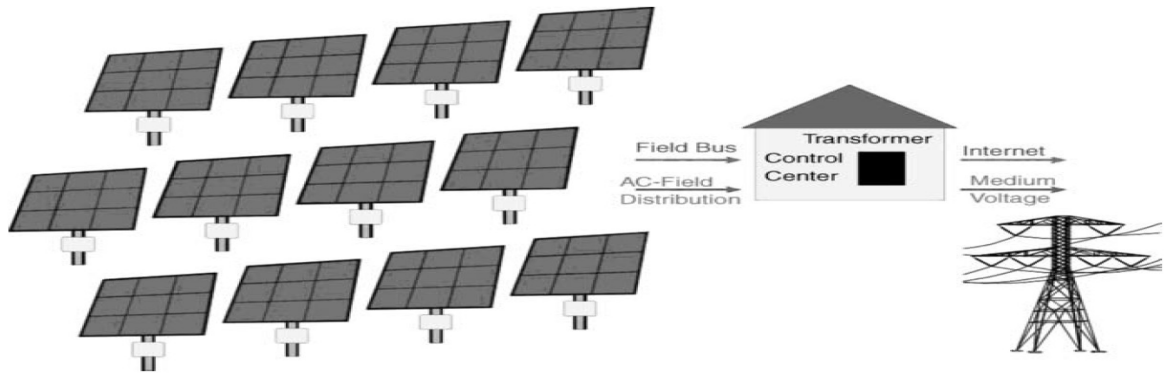
Στα συστήματα FLATCON ένας ειδικό αντιστροφέας αναλαμβάνει και τον έλεγχο της παρακολούθησης(βλέπε την εικόνα 5.15). Οι αντιστροφείς συνδέεται με τον κεντρικό υπολογιστή της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, ο οποίος με τη σειρά του είναι συνδεδεμένος με το ιντερνετ, καθιστώντας έτσι την παρακολούθηση από μακριά.



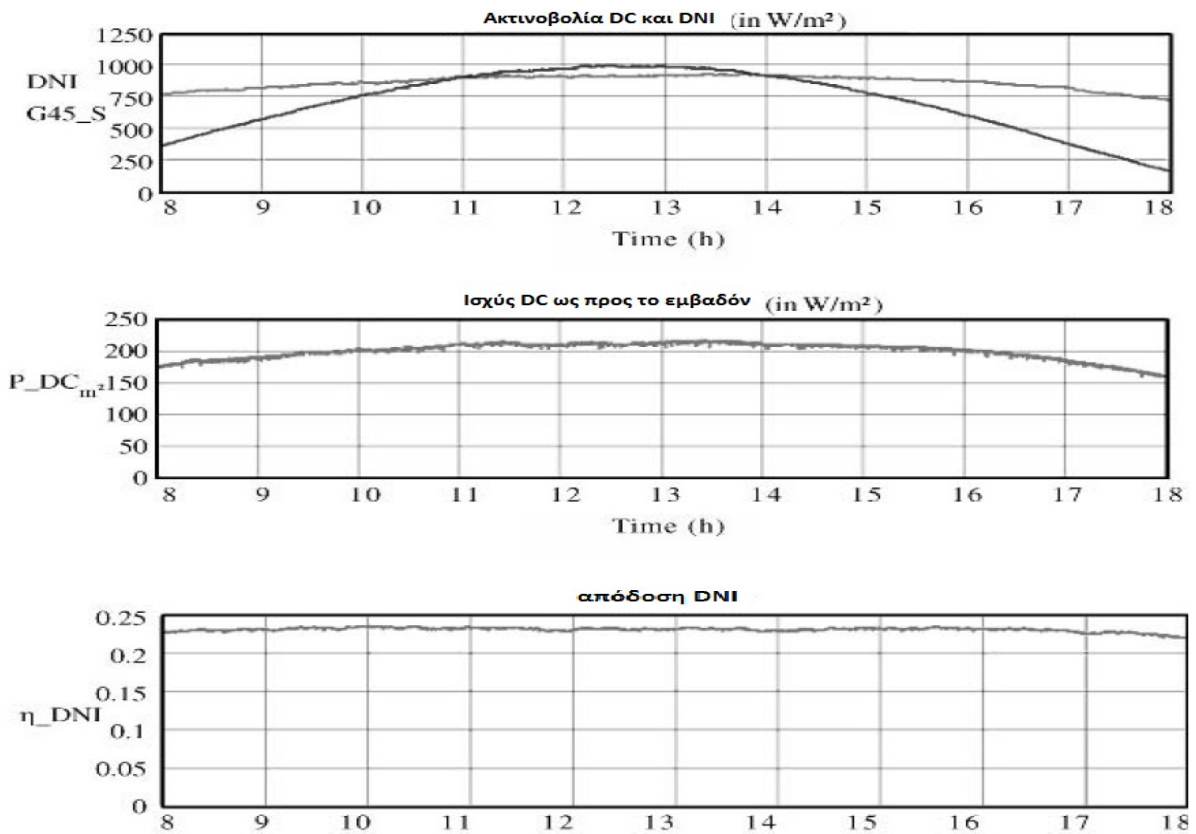
**Εικ. 5.14.**  
**Παρακολουθητής**  
**συστήματος FLATCON**

### 4.2.3. Απόδοση και κόστος συστήματος

Παρακάτω απεικονίζεται το τυπικό διάγραμμα ενός εργοστασίου FLATCON.



Η απόδοση των τρισυνδετικών κελιών που χρησιμοποιούνται στο σύστημα FLATCON είναι υψηλή. Παρατίθενται χαρακτηριστικές γραφικές παραστάσεις



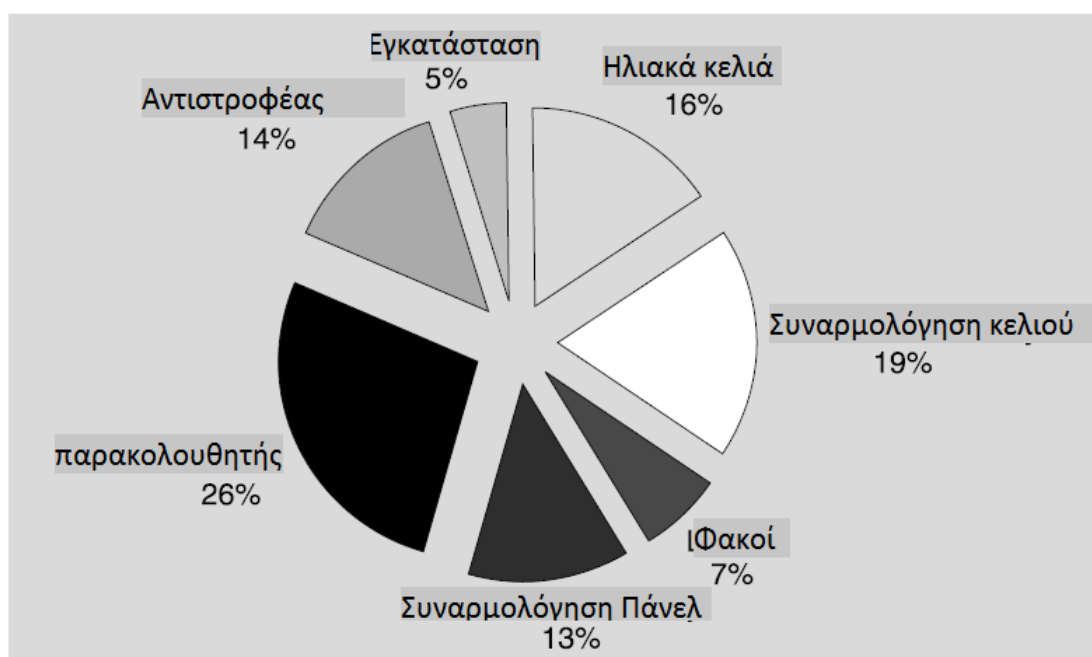
**Εικ. 4.17. Πειραματικά αποτελέσματα για CPV σύστημα με πάνελ FLATCON εξοπλισμένα με τρισυνδετικά ηλιακά κελιά. Πανω: Μέτρηση DNI και παγκόσμια ακτινοβολίας σε εγκατάσταση με νότιο προσανατολισμό και κλίση 45 μοιρών. Κέντρο: DC ισχύς εξόδου ενός CPV συστήματος. Κάτω: Απόδοση συστήματος κατά τη διάρκεια της ημέρας.**



Για κάθε καινούργια φωτοβολταϊκή τεχνολογία, χαμηλό κόστος παραγωγής εξασφαλίζεται μόνο όταν υπάρχει μεγάλη παραγωγή, ενώ υψηλές πωλήσεις εξασφαλίζονται μόνο με ανταγωνιστικές τιμές. Το πρόβλημα της “κότας και του αυγού” δεν αφορά την τεχνολογία των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών όμως αφού αυτά μπορούν να εκμεταλλευτούν το γεγονός ότι πολλές τεχνικές κατασκευής έχουν εδραιωθεί ήδη σε άλλα τεχνολογικά πεδία: Για παράδειγμα, τα ΙΙΙ-V διαστημικά ηλιακά κελιά είναι όμοια μαζί τους και οι τεχνικές παραγωγής για τοποθέτηση και ηλεκτρική σύνδεση των κελιών υπάρχουν ήδη προ πολλού. Η προσέγγιση LED δίνει τη δυνατότητα υιοθέτησης ολόκληρων κατασκευαστικών διαδικασιών. Για αυτό το λόγο η εκτίμηση κόστους στα FLATCON είναι πολλά υποσχόμενη ακόμα και για σχετικά χαμηλή παραγωγή. Ο επόμενος πίνακας δείχνει μια τέτοια εκτίμηση κόστους για ένα σύστημα με τεχνολογία FLATCON.

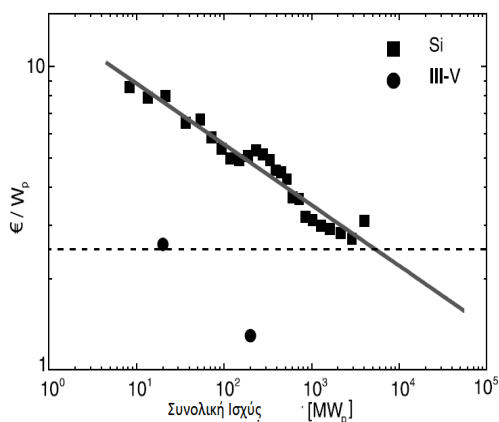
**Πίνακας. 4.1. Ανάλυση κόστους βασισμένη σε ετήσιες παραγωγές των 20 και 200 MW**

Στοιχείο παραγωγής	20 MW (€/W)	200 MW (€/W)
Ηλιακά κελιά	0.46	0.17
Συναρμολόγηση ηλ. κελιών	0.41	0.20
Φακοί	0.16	0.07
Συναρμολόγηση Πάνελ	0.24	0.14
Παρακολουθητής	0.45	0.29
Κόστος Παρακολουθητή και Πάνελ	1.72	0.87
Αντιστροφέας Ισχύος	0.33	0.15
Εγκατάσταση	0.07	0.05
Ηλ. Ισχύος/BOS	0.40	0.20



#### Εικ. 4.17. Σχετικά κόστη παραγωγής για ετήσια παραγωγή 200 MW

Το κύριο συμπέρασμα αυτής της ανάλυσης κόστους είναι ότι σε μία γραμμή παραγωγής με ετήσια παραγωγή 20 MW ισχύος, το κόστος του πανέλου είναι 1,27 Ευρώ/W και για παραγωγή 200 MW στα 0.58 Ευρώ/W που είναι σχεδόν 4 φορές πιο φθηνό από την αντίστοιχη πρόβλεψη της Amonix.

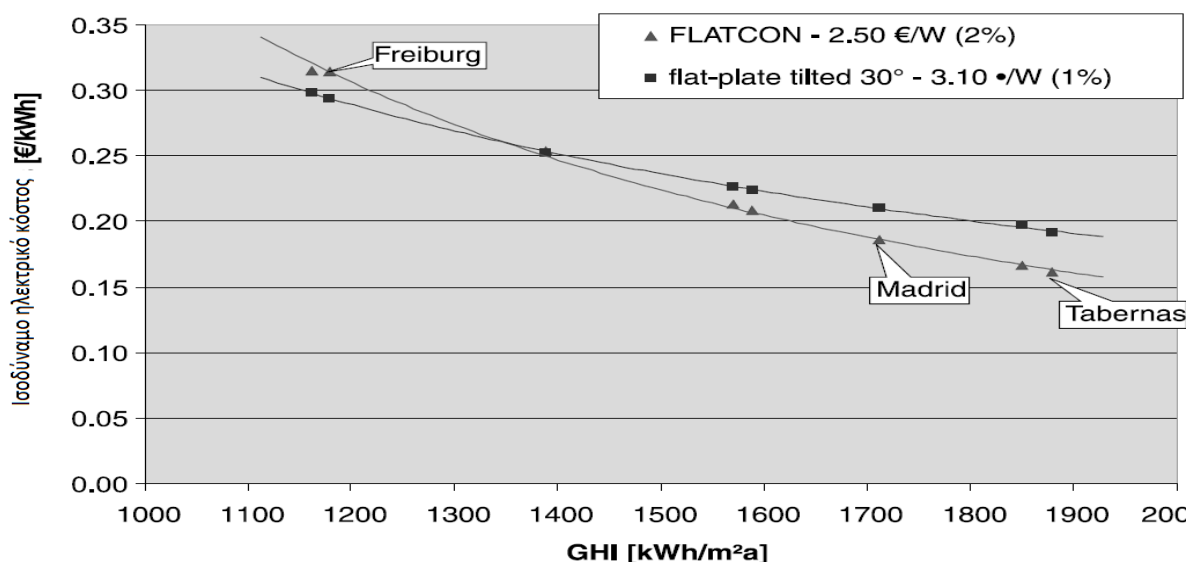


Εικ.4.18. Καμπύλη κόστους για συμβατικά φβ πανέλα και για συγκεντρωτικά πανέλα, μαζί με το tracking.

Αν προσθέσουμε στα παραπάνω νούμερα και το κόστος για τον συγκεντρωτή, οι τιμές που προκύπτουν (1,72 Ευρώ/W για 20 MW και 0.87 Ευρώ/W για 200 MW ) μπορούν να συγκριθούν με επίπεδα πάνελ σιλικόνης. Η καμπύλη κόστους για επίπεδα πάνελ σιλικόνης είναι γνωστή και δίνεται στην παρακάτω εικόνα. Για να μπορεί να γίνει έγκυρη σύγκριση μαζί της θεωρήσαμε ανατίμηση 50% του κόστους του συστήματος Flatcon για περεταίρω περιθώριο κέρθους και λοιπά έμμεσα κόστη, όπως δαπάνες για έρευνα και διαχείριση του συστήματος. Κάθε καινούργια τεχνολογία έχει τη δική της καμπύλη κόστους(βλ. Εικ. 4.18) Με την προϋπόθεση ότι τα CPV θα έχουν υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης, η τεχνολογία αυτή είναι πολύ ενδιαφέρουσα από οικονομική άποψη σε χώρες με υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας. Αυτό απεικονίζεται στον πίνακα 4.19. όπου γίνεται σύγκριση των δύο τεχνολογιών και σε σχέση με το ισοδύναμο ηλεκτρικό κόστος. Έχουν ληφθεί υπόψη όλοι οι πιθανοί παράγοντες:

- NPV της αρχικής επένδυσης στο φωτοβολταϊκό εργοστάσιο
- έξοδα λειτουργίας και συντήρησης
- ετήσια παραγωγής ισχύος

Για το σύστημα FLATCON το 2010 ισχύει 2,5 Ευρώ/W ενώ η αντίστοιχη τιμή για ένα επίπεδο φωτοβολταϊκό πάνελ είναι 3,1 Ευρώ/W. Θεωρούμε τώρα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας για το σύστημα FLATCON διπλάσια από το κοινό φ/β σύστημα, της τάξης του 2% της αρχικής επένδυσης.



**Εικ. 4.19. Σύγκριση του LEC μεταξύ φβ συστημάτων επίπεδης πλάκας με σταθερή κλίση 30 και συστημάτων FLATCON για το έτος 2010.**

Βλέπουμε ότι για πόλεις στην κεντρική Ευρώπη, όπως το Παρίσι, το Μόναχο, ή το Φραιμπουργκ, το σύστημα επίπεδης πλάκας είναι ανώτερο, όμως σε χώρες με περισσότερη ηλιοφάνεια το σύστημα FLATCON υπερτερεί καθαρά: έχουμε 15% λιγότερο ισοδύναμο ηλεκτρικό κόστος για Ισπανία και Ελλάδα, ενώ 20% για περιοχές όπως η Αριζόνα και η Βόρεια Αφρική.

## Βιβλιογραφία

1. PV Antonio L. Luque Viacheslav M. Andreev Concentrator Photovoltaics, Springer Series 2006
2. PV FAQs, Does the world have enough materials for PV to help to address climate change? DOE/GO-102005–2113, June 2005
3. G. Sala, I. Antón, J.C. Arboiro, A. Luque, E. Cambor, E. Mera, M. Gasson, M. Cendagorta, P. Valera, M.P. Friend, J. Monedero, S. Gonzalez, F. Dobson, I. Luque. Proc 16th EC Photovoltaic Solar Energy Conference (James and James, London 2000), 2072
4. W. Shockley. Circuit Element Utilizing Semiconductor Material. U.S. Patent 2269347, 25 September 1951
5. Zh.I. Alferov, V.B. Khalfin, R.F. Kazarinov. A characteristic feature of injection into heterojunctions. Fiz Tverd Tela, 8, pp 3102–3105, 1966 [Sov Phys Solid State, 8, p. 2480, 1967]
6. V.M. Andreev, V.A. Grilikhes, V.D. Rumyantsev. Photovoltaic conversion of concentrated sunlight. Wiley, Chichester (1997)
7. M.Z. Shvarts, P.Y. Gazaryan, V.P. Khvostikov, V.M. Lantratov, N.K. Timoshina. InGaP/GaAs–GaSb and InGaP/GaAs/Ge–InGaAsSb hybrid monolithic/stacked tandem concentrator solar cells. Proc 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, 2006
8. J.M. Olson, T. Gessert, M.M. Al-Jassim, GaInP/GaAs: a current- and lattice-matched tandem cell with a high theoretical efficiency, Proc 18th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, Nevada, 1985, pp. 552–555
9. T. Glatfelter, J. Burdick, A method for determining the conversion efficiency of multiple-cell photovoltaic devices, Proc 19th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, Louisiana, 1987, pp. 1187–1193
10. A.W. Bett et al. FLATCON concentrator PV-technology ready for the market. Proc 20th European PVSEC 114–117 (2005)
11. C. Algora. The importance of the very high concentration in 3rd generation solar cells. Chapter 6 of the book “Third generation photovoltaics for high efficiency through full spectrum utilization”. Ed. A. Martv and A. Luque, Institute of Physics Publishing (Bristol, UK), 2004
12. Universidad Politecnica de Madrid (C. Algora). High efficiency photovoltaic converter for high light intensities manufactured with optoelectronic technology. EP1278248A1 and US2002/0170592A1

13. C. Algora, V. Dvaz. Design and optimization of very high power density monochromatic GaAs photovoltaic cells. *IEEE Trans Electron Devices* 45 (9), pp. 2047–2054 (1998)
14. SunLab–NREL/Sandia, <http://www.energylan.sandia.gov/sunlab/overview.htm>
15. Stolte WJ, Engineering and economic evaluation of central-station photovoltaic power plants, Electrical Power Research Institute, TR-101255, Research Projects 3166-01: 3273–03, December 1992
16. McDonnell FL, High power density photovoltaics, *Renewable Energy World*, September to October 2002
17. J. Luther, A. Luque, A.W. Bett, F. Dimroth, H. Lerchenmóller, G. Sala, C. Algora, Concentration photovoltaics for highest efficiencies and cost reduction, Proc 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, 2005, pp. 1953–1957
18. A.W. Bett, G. Siefer, C. Baur, S. van Riesen, G. Peharz, H. Lerchenmüller, F. Dimroth, FLATCON concentrator PV-technology ready for the market, Proc 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, 2005, pp. 114–117
19. A.W. Bett, C. Baur, F. Dimroth, G. Lange, M.Meusel, S. van Riesen, G. Siefer, V.M. Andreev, V.D. Romyantsev, N.A. Sadchikov, FLATCON-modules: technology and characterisation, Proc 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, 2003, pp. 634–637