

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ

Διπλωματική Εργασία

<u>Μελέτη Απόδοσης Φωτοβολταϊκών</u> Στοιχείων Υψηλής Συγκέντρωσης

Καλλιόπη Σεληνιωτάκη



Εξεταστική Επιτροπή

Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος, Καθηγητής Π. Κ. (Επιβλέπων)

Κουτρούλης Ευτύχιος, Επίκουρος Καθηγητής Π. Κ.

Αντώνιος Τσικαλάκης Διδάσκων Π.Δ. 407/80

Χανιά, 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Εισαγω	γή – Φωτοβολταϊκά Συστήματα	7		
	1.1 Γενικά περί των ΑΠΕ				
	1.1.1	Το ενεργειακό πρόβλημα	7		
	1.1.2	Η ανάπτυξη των ΑΠΕ στην Ελλάδα	10		
	1.1.3	Το φαινόμενο του θερμοκηπίου	12		
	1.2 Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο				
	121	Γενικά	14		
	122	Ημανωνοί	18		
	123	Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο	20		
	124	Η απορρόφηση ακτινοβολίας στα φ/β πλαίσια	22		
	125	Η απορροφήση αποτορείματος	25		
	126	Τα ηλεκτοικά γαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιγείων	27		
	127	Ο Συντελεστής Πλήοωσης (Fill Factor)	28		
	128	Τα ηλεκτοικά ναρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοινείων-δεύτερη			
	ποοσένη		30		
	129	Παράγοντες που επηράζουν την απόδοση (σ/β στοιχείων	32		
	1 2 10	Παραγονίας που επηραξούν την απουσση φ/ρ στοιχείων	35		
	1 2 11	τύποι αωτοβολταϊκών στοινείων	38		
2	0.2.11 Φωτοβο	λταϊκά στοινεία υμαλής συνκέντοωσης (HCPV)			
4	21 Fic	savovn			
	2.1 Eu	ννάγωγη			
	2.2 П 2.3 По	or) hosic ota CPV			
	2.5 Hp 2.4 Sev	$i\alpha_{010} \perp \alpha_{1}^{\prime} \nu c_{1}^{\prime} \vee \dots$	 51		
3	III_V ev	ώσεις σε φωτοβολταϊκά			
5	31 Fic	σανονή			
	3.1 Eu	αγωγη	56		
	3.2 Πλ 3.3 Σιχ	ακη 20γκεντρωση. Αποσοτικότητα και σικονομια			
	3.3 20	AlGaAs / GaAs κελιά μονής σύνδεσης (single junction)	57		
	337	Λ (δυμα (dual junction) ηλιακά κύτταρα	61		
	333	Κατασκειή δίδυμων συνκεντοφτικών ηλιακών κελιών (dual junction cell	(c) 65		
	3.3.3	Τρόπος ηλοποίησης	66 IS		
	3.J. To	τροπος υποποιησης	68		
Λ	- Лоди с и	νδετικά κελιά στη ποάξη	08		
+	<i>1</i> 1 Πο	νθετικά κελιά στη πραζη	73		
	4.1 110	Μη ευμαία ακτινοβόληση	73		
	4.1.1	Τοοποποίηση και διαβίβαση ηλιακού φάσματος	75		
	4.1.2	Τροποποιηση και σιαριραση ηλιακού φασματός	75		
	4.1.3	Γουστασμιση ρεσματός και ηλιακό φασμα	75		
	4.1.4 12 Ца	Ζειριακή αντιστασή	70		
	4.2 117	τροσεγγιση LED στα ηλιακά κοτταρά	79		
	4.2.1	200χ ειισεις μεταξύ III- ν IVIJCS και LEDS			
	4.2.2	Εντοπισμός του ρεκτιστου μεγεύους	80 		
	4.2.3	Δπαγκωνή Αρομόπητας	01		
	4.2.4	Απαγωγή θερμοτητάς	05 		
5	4.2.3	κατασκεση πλακων κυτταρων με τη χρηση υπτσηλεκτρονικής Συνκουτοφτικών Συστημάτων	04 0 <i>5</i>		
3	- Οπική 5.1 ΤΑ	2υγκεντρωτικών 200τηματών	03		
	5.1 IU 5.2 Tá	ποι σαρακολούθησης του ήλιου (Solar Trackers)	0.0 00		
5.2 Γ UNOT REPURENT OUT (50) IN (SOLAT TRACKETS)			00		
	$5.5 \ 0\pi$	ικη των συγκεντρωτικών μεσών	90 01		
	5.5.1	Duotku			

	5.3.2	2 Ανάκλαση και διάθλαση	96
	5.4	Διαθλαστικοί φακοί Fresnel	97
	5.5	Οπτικός Συγκεντρωτής για ένα HCPV Σύστημα	100
6	Από	δοση HCPV	102
	6.1	Απόδοση κελιού (cell)	
	6.3	Απόδοση Συστήματος	105
	6.4	Σύγκριση αποδόσεων διαφορετικών τεχνολογιών	106
	6.5	Πρόβλεψη απόδοσης	107
7	Μελ	έτη Κόστους ΗCPV	109
	7.1	Συναρτήσεις κόστους	109
	7.2	Συνάρτηση Κόστους Κελιού (cell)	112
	7.2.1	Κόστος HCPV cell	112
	7.2.2	2 Υπολογισμός απαιτούμενης επιφάνειας για παραγωγή ισχύος 1KW	113
	7.2.3	Κόστος και απαιτούμενη επιφάνεια για πολυκρυσταλλικά κελιά	113
	7.2.4	Σύγκριση Κόστους CPV cells – Polycrystalline silicon cells	114
	7.2.5	5 Σύγκριση απαιτούμενης επιφάνειας CPV cells – Polycrystalline silico	n cells
			114
	7.3	Μια ματιά στο μέλλον	115
	7.3.1	Μείωση Κόστους	115
	7.3.2	2. Προβλεπόμενη τιμή CPV cell	117
8	Συμα	τεράσματα	119
	8.1	Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα CPV και Συμπεράσματα	119
	8.2	Μελλοντικές Επεκτάσεις	123
	Βιβλιογραφία		119

Στους γονείς μου,

Μιχάλη και Άννα

Περίληψη

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) μπορούν να προσφέρουν εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας. Μία μορφή ΑΠΕ είναι και η ηλιακή ενέργεια. Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και παρουσίαση φωτοβολταϊκών στοιχείων υψηλής συγκέντρωσης HCPV.

Πρόκειται για μια καινοτόμο εργασία στην οποία, αφού καλύπτεται αρχικά το θεωρητικό κομμάτι των φωτοβολταϊκών συστημάτων ακολουθεί αναλυτική μελέτη που αφορά τα HCPV. Παρουσιάζεται η τεχνολογία κατασκευής και υλοποίησης Multijunction cells τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως σε ένα HCPV σύστημα. Επίσης, αναλύονται τα οπτικά μέσα συγκεντρωτικών συστημάτων και μέσων ανίχνευσης Trackers.

Στη συνέχεια, ορίζεται η απόδοση HCPV cell, μονάδας και συστήματος. Γίνεται μια σύγκριση της απόδοσης MJ cells και των συμβατικών κελιών. Ακολουθεί μελέτη κόστους για δοσμένη παραγόμενη ισχύ και συγκρίνουμε το κόστος κελιών για τη συγκεκριμένη παραγόμενη ισχύ.

Τα HCPV είναι μια αναπτυσσόμενη τεχνολογία αναμένεται να αυξηθεί κι άλλο η απόδοση κελιού από 43.5% που είναι σήμερα μέχρι και 50% στα επόμενα 2 χρόνια.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον κ. Κωνσταντίνο Καλαϊτζάκη, Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ο οποίος είχε την επίβλεψη της παρούσας εργασίας, για τον χρόνο που διέθεσε, για την επιστημονική καθοδήγηση του και την υπομονή του. Επίσης, για τις πολύτιμες και εποικοδομητικές συμβουλές του που με κατεύθυναν σ' ένα σωστό τρόπο σκέψης πάνω απ' όλα και μου προσέφεραν σημαντικά εφόδια για την μετέπειτα ζωή μου. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ευτύχιο Κουτρούλη και τον κ. Αντώνιο Τσικαλάκη Διδάσκων Π.Δ. 407/80 , μέλη της τριμελούς επιτροπής μου για την παρουσία τους και τις χρήσιμες παρατηρήσεις τους.

Θεωρώ πολύ σημαντικό να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Μιχάλη και Άννα γιατί χωρίς αυτούς δεν θα είχα τη δυνατότητα να βρίσκομαι τώρα εδώ. Τους ευχαριστώ για την στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια που είναι δίπλα μου και μου συμπαραστέκονται με αγάπη και σύνεση σε όλα τα επίπεδα. Με την αγάπη τους, τη φροντίδα τους αλλά κυρίως με τις αρχές που μου έδωσαν έμαθα να παλεύω για να επιτυγχάνω τους στόχους μου, να πραγματοποιώ τα όνειρά μου και να γίνομαι καλύτερος άνθρωπος. Δεν μπορώ να μην αναφερθώ στα αδέρφια μου, Χρύσα, Βαγγελιώ και Βαγγέλη για την υποστήριξη και την αγάπη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου αλλά και την παρότρυνση και το θαυμασμό τους προς εμένα να επιτύχω τα καλύτερα.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω το Νίκο Καντιδάκη για την πολύτιμη βοήθειά του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής, καθώς και την υποστήριξή του σε αυτή τη σημαντική χρονική περίοδο της ζωής μου.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους και τις φίλες μου που είναι δίπλα μου και με στηρίζουν. Θα ήταν μεγάλη μου παράλειψη αν δεν ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τη φίλη μου Χρυσίδα Ρουσσάκη για την ψυχολογική της υποστήριξη, για τις συμβουλές της και τη βοήθεια που μου παρείχε κατά τη συγγραφή του κειμένου.

1 Εισαγωγή – Φωτοβολταϊκά Συστήματα

1.1 Γενικά περί των ΑΠΕ

1.1.1 Το ενεργειακό πρόβλημα

Από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα, όταν άρχισαν οι εφαρμογές του ηλεκτρισμού, μέχρι τις αρχές της 10ετίας του '70, παρατηρείται διεθνώς μία συνεχής συγκέντρωση της παραγωγής σε συνεχώς μεγαλύτερους «Σταθμούς Παραγωγής» και παράλληλα ανάπτυξη των δικτύων Μεταφοράς και Διανομής με συνεχώς μεγαλύτερες τάσεις, λόγω της ραγδαίας αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συνέβη και στην χώρα μας με την ανάπτυξη του Εθνικού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), η οποία κατά την περίοδο 1956-63 (περίπου) εξαγόρασε τις 300 περίπου ηλεκτρικές εταιρείες που προμήθευαν τότε την ηλεκτρική ενέργεια με μικρά τοπικά δίκτυα. Όμως, με αφορμή τις «πετρελαϊκές κρίσεις» της 10ετίας του '70, άρχισε να γίνεται διεθνώς συνείδηση η ανάγκη καλύτερης αξιοποίησης της ενέργειας, αφενός μεν για να αξιοποιούνται καλύτερα οι διατιθέμενοι ενεργειακοί πόροι, αφετέρου δε για να περιορίζεται η ρύπανση του περιβάλλοντος. Άρχισε τότε σε διεθνές επίπεδο η αναζήτηση Εναλλακτικών Πηγών Ενέργειας, σε αντιστάθμισμα των Συμβατικών Πηγών, όπως είναι το κάρβουνο και το πετρέλαιο, καθώς και της πυρηνικής ενέργειας, η οποία βεβαίως παρουσιάζει τα γνωστά προβλήματα. Παράλληλα άρχισε μία προσπάθεια για την εξοικονόμηση και γενικότερα την καλύτερη και αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας.

Οι παραπάνω παράγοντες συνέβαλαν αποφασιστικά αφενός μεν στην ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), αφετέρου δε στην ανάπτυξη συστημάτων Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ). Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται οι ενεργειακές πηγές (ο ήλιος, το νερό, ο άνεμος, η βιομάζα, κλπ.), οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον. Είναι οι πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, σχεδόν αποκλειστικά, μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, οπότε και στράφηκε στην εντατική χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων. Οι μορφές των ΑΠΕ που είναι σήμερα τεχνικοοικονομικά εκμεταλλεύσιμες είναι οι ακόλουθες:

7

- Ηλιακή Ενέργεια
- Βιομάζα
- Αιολική Ενέργεια
- Γεωθερμική Ενέργεια
- Υδροηλεκτρική Ενέργεια

Το ενδιαφέρον για την ευρύτερη αξιοποίηση των ΑΠΕ, καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους παρουσιάσθηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1974 και παγιώθηκε την τελευταία δεκαετία, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Τα εγγενή πλεονεκτήματα των ΑΠΕ και κυρίως η ουσιαστική συμβολή τους στην ενεργειακή απεξάρτηση της ανθρωπότητας από τους εξαντλήσιμους ενεργειακούς πόρους, επιτάσσουν αυτήν τη στροφή.

Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μία σημαντική εγχώρια πηγή ενέργειας, με μεγάλες δυνατότητες ανάπτυξης σε τοπικό και εθνικό επίπεδο. Συνεισφέρουν σημαντικά στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό και εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, συντελούν και στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο πρωταρχικός υπεύθυνος για τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

Πραγματικά, σχεδόν το 95% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης οφείλεται στην παραγωγή, το μετασχηματισμό και τη χρήση των συμβατικών καυσίμων (άνθρακας και πετρέλαιο). Φαίνεται συνεπώς ότι ο μόνος δυνατός τρόπος για να μπορέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση να ανταποκριθεί στο φιλόδοξο στόχο που έχει θέσει, για σημαντικό περιορισμό των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), είναι να επιταχύνει την ανάπτυξη των ΑΠΕ.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), είναι τα εξής:

 Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από εξαντλήσιμους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους.

8

- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτητοποίησης και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι διάσπαρτες γεωγραφικά και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας.
- Προσφέρουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των ενεργειακών αναγκών των χρηστών (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών, αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή).
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης των ΑΠΕ έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών και σε μικρή κλίμακα εφαρμογών ή σε μεγάλη κλίμακα, αντίστοιχα, έχουν μικρή διάρκεια κατασκευής, επιτρέποντας έτσι τη γρήγορη ανταπόκριση της προσφοράς προς τη ζήτηση ενέργειας.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ είναι εντάσεως εργασίας, δημιουργώντας σημαντικό αριθμό νέων θέσεων εργασίας, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. θερμοκηπιακές καλλιέργειες με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας).
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

1.1.2 Η ανάπτυξη των ΑΠΕ στην Ελλάδα

Η πρώτη προσπάθεια ανάπτυξης των ΑΠΕ έγινε με τον Ν. 1559/85, με τον οποίο δόθηκε η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ σε ιδιώτες και τους ΟΤΑ (αυτοπαραγωγούς), μέχρι το τριπλάσιο της ισχύος των εγκαταστάσεών τους και την πώληση της περίσσειας στη ΔΕΗ. Η συνεισφορά του νόμου στην ανάπτυξη των ΑΠΕ ήταν μηδαμινή, λόγω της χαμηλής τιμής αγοράς της ενέργειας από την ΔΕΗ αλλά και των πολύπλοκων διαδικασιών αδειοδότησης: Το 1993 λειτουργούσαν ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 27 MW, από τις οποίες 3 MW ανήκαν σε ιδιώτες, τους ΟΤΑ και τον ΟΤΕ, ενώ οι λοιπές στην ΔΕΗ.



Εικόνα 1.1. Κατανάλωση Τελικής Ενέργειας, κατανομή ανά τομέα και ενεργειακή μορφή 1998

Ένα επόμενο βήμα για την αξιοποίηση των ΑΠΕ έγινε με τον Ν.2244/94, με τον οποίο δινόταν η δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και σε ιδιώτες και την πώληση της παραγόμενης ενέργειας στη ΔΕΗ και παράλληλα αύξησε τις δυνατότητες αυτοπαραγωγής. Όρισε επίσης σχετικά επαρκείς τιμές αγοράς της πωλούμενης στην ΔΕΗ ενέργειας και δεκαετή διάρκεια συμβάσεων. Παράλληλα θεσπίστηκαν αναπτυξιακά κίνητρα (Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ενέργειας, Αναπτυξιακός Νόμος κ.ά.), τα οποία περιλάμβαναν επιδοτήσεις των δαπανών εγκαταστάσεως ΑΠΕ και Συμπαραγωγής, ώστε παρά τα εμπόδια λόγω των πολύπλοκων διαδικασιών αδειοδότησης, που δεν κατέστη δυνατόν να ξεπεραστούν, να σημειωθεί σημαντική πρόοδος κατά τα τελευταία ιδίως έτη. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το ηλιακό δυναμικό της Ελλάδας, που λόγω των ετήσιων μέσων τιμών του, ευνοεί την εγκατάσταση των ΑΠΕ στον ελλαδικό χώρο.



Εικόνα 1.2. Ημερήσιες τιμές του ηλιακού δυναμικού στον ελλαδικό χώρο

Συμβολή στην ανάπτυξη των ΑΠΕ, αποτέλεσε και η δημιουργία του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας-ΚΑΠΕ, το οποίο από το 1989 που ιδρύθηκε μετέχει ενεργά στην όλη προσπάθεια με μελέτες του δυναμικού των ΑΠΕ (αιολικού, ανάπτυξης μικρών υδροηλεκτρικών κ.ά.) καθώς και των Πανεπιστημίων, για την εκτέλεση πάσης φύσεως μετρήσεων και πιστοποιήσεων. Αξιόλογη επίσης υπήρξε η συμβολή της ΔΕΗ με την εγκατάσταση των πρώτων ανεμογεννητριών, κυρίως σε νησιά, και γενικότερα την απόκτηση των πρώτων εμπειριών. Τα κυριότερα από τα εμπόδια μιας μεγαλύτερης ανάπτυξης των ΑΠΕ, ήταν τα ακόλουθα:

- Οι χρονοβόρες και επίπονες διαδικασίες έκδοσης Αδειών Εγκατάστασης, που κυρίως οφείλονται στην έλλειψη χωροταξικού σχεδιασμού, την μη επαρκή στελέχωση και εκπαίδευση των αρμόδιων περιφερειακών υπηρεσιών και την πολυπλοκότητα και ασάφεια των υφισταμένων ρυθμίσεων.
- Την ανάγκη εκτεταμένων επεκτάσεων και ενισχύσεων των δικτύων της ΔΕΗ σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό (π.χ. Ν. Εύβοια, Λακωνία)

- Την έλλειψη κτηματολογίου και γενικότερου σχεδιασμού της χρήσης γης, η οποία σε συνδυασμό με την ελλιπή ενημέρωση των πολιτών για τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ, και ακόμη τη μη απ' αρχής πρόβλεψη κάποιου αντισταθμίσματος που θα ικανοποιούσε ανάγκες των τοπικών κοινωνιών, οδήγησαν σε αντιδράσεις των κατοίκων.
- Την αδυναμία πλήρους αξιοποίησης του υψηλού αιολικού δυναμικού των νησιών, λόγω τεχνικών προβλημάτων συνεργασίας με τους υφιστάμενους Ντιζελοηλεκτρικούς σταθμούς.



Εικόνα 1.3. Αθροιστικά εγκαθιστάμενη ισχύς μονάδων ΑΠΕ3

1.1.3 Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου πρόκειται για ένα φυσικό φαινόμενο. Αυτό που αποτελεί απειλή για το πλανήτη μας είναι η υπερβολική εμφάνιση του φαινομένου, η οποία οφείλεται στις ανθρωπογενείς εκπομπές ρύπων. Έχει εξακριβωθεί ότι ορισμένα αέρια της ατμόσφαιρας (γνωστά και ως αέρια θερμοκηπίου), επιτρέπουν την διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας προς τη Γη, ενώ αντίθετα απορροφούν και επανεκπέμπουν προς το έδαφος ένα μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια της. Αυτή η παγίδευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας (η οποία διαφορετικά θα απελευθερωνόταν στο Διάστημα) από τα συγκεκριμένα αέρια ονομάζεται «φαινόμενο του θερμοκηπίου».

ουσιώδες και απαραίτητο για την ύπαρξη, τη διατήρηση και της εξέλιξη της ζωής στον πλανήτη. Χωρίς αυτόν τον μηχανισμό η μέση θερμοκρασία της Γης θα ήταν περίπου κατά 35°C χαμηλότερη, δηλαδή περίπου -20°C αντί για +15°C που είναι σήμερα, και η ζωή θα ήταν αδύνατη, τουλάχιστον στη μορφή που τη γνωρίζουμε.



Εικόνα 1.4. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Κατά συνέπεια, το εν λόγω φαινόμενο, στις φυσικές του διαστάσεις, δεν είναι επιβλαβές, αντίθετα έχει ζωτική σημασία για τη διατήρηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη στους 15°C περίπου. Το ανησυχητικό είναι η ενίσχυση του ως αποτέλεσμα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. ανθρωπογενείς της Or εκπομπές θερμοκηπικών αερίων αυξάνουν τη δυνατότητα της ατμόσφαιρας να παγιδεύσει την υπέρυθρη ακτινοβολία της Γης. Η αύξηση αυτή οδηγεί στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου και συνεπώς στην άνοδο της θερμοκρασίας του πλανήτη. Τα αέρια εκείνα των οποίων οι συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα αυξάνονται σημαντικά λόγω της ανθρώπινης παρέμβασης καθώς και ο βαθμός συνεισφοράς τους αναφέρονται στις παρακάτω παραγράφους. Εμάς μας ενδιαφέρουν οι εκπομπές ρύπων που προκαλούνται από τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη χρήση της, άμεσα ή έμμεσα, δηλαδή από τον ενεργειακό τομέα.

1.2 Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

1.2.1 Γενικά

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν τις ρίζες τους στα διαστημικά προγράμματα και χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά το 1960 σε δορυφόρους. Ακόμα εκπληρώνουν αυτό το ρόλο. Ο άλλος πρώιμος τομέας που οδήγησε στην επέκταση της αγοράς ήταν εφαρμογές για πολύ μικρές ποσότητες ισχύος όπως σε τηλεπικοινωνίες. Παρόλα αυτά, οι πολιτικές υποστήριξης σε αρκετές χώρες έχουν παίξει σημαντικό ρόλο στην επέκταση των αγορών για φωτοβολταϊκά στοιχεία και για δικτυακές και έξω-δικτυακές ηλεκτρικές παροχές στα τελευταία χρόνια.



Εικόνα 1.5. Εγκατεστημένη Ισχύς φωτοβολταϊκών παγκοσμίως από 1995 έως 2005

Η ανάπτυξη της αγοράς σε παραδόσεις φωτοβολταϊκών στοιχείων φτάνουν κατά μέσο όρο το 15% από τα μέσα του 1980 και στα τελευταία 5 χρόνια αυτό το ποσοστό αυξήθηκε σε περίπου 30% το χρόνο με την ανάπτυξη να προσεγγίζει το 40% τα τελευταία 2 χρόνια. Αυτή η ανάπτυξη έχει συσχετιστεί με την εξέλιξη των προοδευτικά μεγαλύτερων αποκλειστικά κατασκευαστικών εργοστασίων.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν μετακινηθεί από τα εξειδικευμένα εργαστήρια στα εξειδικευμένα εργοστάσια. Αυτό έχει επιφέρει οικονομία στη κλίμακα και στην αύξηση της αυτοματοποίησης και την τυποποίηση της κατασκευαστικής διαδικασίας. Το κόστος έχει μειωθεί από αρκετές εκατοντάδες δολλάρια ανά peak Watt (Wp) στις αρχές του '70 σε λιγότερο από 6 σε είκοσι χρόνια (Anderson,1998), ενώ τώρα πλησιάζει το 1\$. Επιπλέον η επάρκεια μετατροπής των καλύτερων εμπορικά διαθέσιμων μοντέλων έχει αυξηθεί σταθερά από κάτω του 10% το 1980, σε περίπου 14%-16% σήμερα.



Εικόνα 1.6. Κόστη και αποδόσεις μετατροπής τυπικών φωτοβολταϊκών στοιχείων

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, μεγάλα ποσά ηλιακής ενέργειας μπορούν να μετατραπούν σε ηλεκτρική με την χρησιμοποίηση κατασκευών που αποτελούνται από φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Όταν το ηλιακό φως προσπέσει στα φωτοβολταϊκά στοιχεία ελευθερώνει ηλεκτρικά φορτία στο εσωτερικό τους τα οποία με την ενέργεια που παίρνουν κινούνται ελεύθερα και μπορούν να περάσουν από έναν καταναλωτή όπως είναι μια λάμπα ή ένας κινητήρας και να τον θέσουν σε λειτουργία. Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία αναπτύχθηκαν από τη δεκαετία του πενήντα για να τροφοδοτήσουν τους διαστημικούς δορυφόρους με την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζονταν για την λειτουργία των συσκευών τους. Από τότε μέχρι σήμερα τα φωτοβολταϊκά στοιχεία βρήκαν πολλές επίγειες εφαρμογές σε διάφορους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας για δύο βασικούς λόγους. Ο ένας είναι η ευκολία με την οποία παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια και ο άλλος τα διάφορα δισεπίλυτα προβλήματα που παρουσιάζει ο κλασσικός τρόπος παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. **Τα βασικά χαρακτηριστικά των Φ/Β συστημάτων**, που τα διακρίνουν από τις άλλες μορφές ΑΠΕ είναι:

- Απευθείας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμη και σε πολύ μικρή κλίμακα,
 π.χ. σε επίπεδο μερικών δεκάδων Watt.
- Είναι εύχρηστα. Σε μικρά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν από τους ίδιους τους χρήστες.
- Μπορούν να εγκατασταθούν μέσα στις πόλεις και δεν προσβάλλουν αισθητικά το περιβάλλον.
- Μπορούν να συνδυαστούν με άλλες πηγές ενέργειας (υβριδικά συστήματα).
- Μπορούν να επεκταθούν ανά πάσα στιγμή για να αντιμετωπίσουν τις αυξημένες ανάγκες των χρηστών.
- Έχουν αθόρυβη λειτουργία και μηδενικές εκπομπές ρύπων.
- Οι απαιτήσεις συντήρησης είναι σχεδόν μηδενικές.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και αξιοπιστία.
- Υψηλό κόστος επένδυσης.

Τα πλεονεκτήματα των Φ/Β συστημάτων

Υψηλή Αξιοπιστία – μεγάλη διάρκεια ζωής: Η αρχική τους κατασκευή ήταν για χρήση στο διάστημα όπου οι επισκευές είναι δαπανηρές έως ακατόρθωτες. Οι φωτοβολταϊκοί συλλέκτες σήμερα τροφοδοτούν με ρεύμα σχεδόν όλους τους δορυφόρους.

- Μηδενικό κόστος λειτουργίας: Χρησιμοποιούν το φως του ήλιου για να παράγουν ηλεκτρισμό. Δεν καταναλώνουν πρώτες ύλες.
- Δεν απαιτείται συντήρηση: Τα Φωτοβολταϊκά συστήματα δεν απαιτούν κινούμενα μέρη έτσι δεν χρειάζονται καθόλου συντήρηση κατά την λειτουργία τους.
- Δεν μολύνουν το περιβάλλον: Δεν παράγουν υποπροϊόντα ούτε χρειάζονται καύσιμα για να λειτουργήσουν. Επίσης δεν προκαλούν ηχορύπανση αφού η λειτουργία τους είναι εντελώς αθόρυβη. Επίσης κατασκευάζονται από ανακυκλώσιμα υλικά (γυαλί, αλουμίνιο, πυρίτιο) συνεπώς είναι περιβαλλοντικά καθαρά.
- Ευελιξία: Τα φωτοβολταϊκά συστήματα τοποθετούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις σε ενέργεια. Σε περίπτωση που οι ανάγκες αυξηθούν πολύ εύκολα το σύστημα αναβαθμίζεται για να καλύψει ενεργειακά την νέα ζήτηση.
- Αυτονομία: Παρέχουν πλήρη ενεργειακή αυτονομία. Έτσι μπορούν να τοποθετηθούν σε δύσβατες περιοχές, σε πλωτές εξέδρες και γενικά όπου το δίκτυο της ΔΕΗ είναι οικονομικά ασύμφορο να φτάσει.

Η ενεργειακή ανεξαρτησία του χρήστη, όπου και να βρίσκεται αυτός είναι το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των Φ/Β συστημάτων. Το κόστος των Φ/Β πλαισίων είναι σήμερα το μεγαλύτερο μειονέκτημα των Φ/Β συστημάτων. Όμως πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχουν σήμερα αρκετοί χρήστες για τους οποίους το Φ/Β σύστημα είναι η πλέον ενδεδειγμένη οικονομική λύση. Πρέπει να τονιστεί ότι η Φ/Β τεχνολογία, όπως άλλωστε και οι περισσότερες τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, παρουσιάζει ιδιαιτερότητες που κάνουν δύσκολη τη σύγκριση της με τις συμβατικές τεχνολογίες, για παράδειγμα δεν υπάρχει σαφής τρόπος αποτίμησης του περιβαλλοντικού κόστους των συμβατικών τεχνολογιών. Το κόστος της ενέργειας

1.2.2 Ημιαγωγοί

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως κατασκευάζονται κυρίως από ημιαγωγούς που είναι στοιχεία τετρασθενή με τετραεδρική κρυσταλλική δομή όπως το πυρίτιο (Si). Στα στοιχεία αυτά δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς ηλεκτρικού ρεύματος και δε διαθέτουν ηλεκτρική αγωγιμότητα στην υποθετική περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή είναι εντελώς υποβαθμισμένος ενεργειακά. Όταν όμως απορροφήσουν κάποια αξιόλογη ενέργεια, π.χ. με τη μορφή θερμότητας ή ακτινοβολίας, πραγματοποιείται μια ριζική μεταβολή.



Εικόνα 1.7. Κρυσταλλικό πλέγμα πυριτίου με άτομα πρόσμιξης.

Η ενέργεια που παρέχεται στο σώμα και κατανέμεται στα άτομά του, προκαλεί την ελευθέρωση πολλών ηλεκτρονίων από τους δεσμούς. Τα ηλεκτρόνια αυτά απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους στο κρυσταλλικό πλέγμα, χάρη στην κινητική ενέργεια που απόκτησαν και γίνονται ευκίνητοι φορείς του ηλεκτρισμού, δίνοντας στον ημιαγωγό μια αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Είναι φανερό ότι το ενεργειακό διάκενο ανάμεσα στη ζώνη σθένους και στη ζώνη αγωγιμότητας εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου σθένους, ώστε να μετατραπεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο, με ταυτόχρονη δημιουργία μιας οπής.

Αν στα ηλεκτρόνια των δεσμών του κρυστάλλου προσφερθεί μια ποσότητα ενέργειας π.χ. αν δεχθούν μια δέσμη ακτινοβολίας που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια hv μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο (Eg>hv), δε μπορούν να την απορροφήσουν και μένουν στη ζώνη σθένους. Αν όμως τα ενεργειακά κβάντα που προσφέρονται είναι ίσα ή μεγαλύτερα από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού (Eg<hv), τότε κάθε κβάντο μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους και να διεγερθεί προς τη ζώνη αγωγιμότητας, αφήνοντας στη ζώνη σθένους μία οπή. Ο παραπάνω μηχανισμός διέγερσης εξαρτάται και από το αν ο ημιαγωγός είναι άμεσος ή έμμεσος.

Αν τώρα στον τετρασθενή ημιαγωγό Si, γίνει πρόσμιξη με κάποιο πεντασθενές στοιχείο (φώσφορος, P) ή με κάποιο τρισθενές στοιχείο (βόριο, B), τότε παράγεται ημιαγωγός προσμίξεως τύπου-η και τύπου-ρ αντίστοιχα. Τέσσερα από τα πέντε ηλεκτρόνια σθένους κάθε ατόμου Ρ, θα ενωθούν με ηλεκτρόνια σθένους των γειτονικών ατόμων Si και θα σχηματίσουν ομοιοπολικούς δεσμούς. Το πέμπτο ηλεκτρόνιο (φορέας πλειονότητας) θα συγκρατείται πολύ χαλαρά από το θετικό πυρηνικό φορτίο του P και με λίγη ενέργεια μπορεί να αποσπασθεί και να κινηθεί σαν ελεύθερο ηλεκτρόνιο, αφήνοντας ένα ανιόν (P+) που μένει ακίνητο στο πλέγμα. Δηλαδή το πεντασθενές άτομο συμπεριφέρεται στο πλέγμα σαν δότης ηλεκτρονίων (τύπος-η ημιαγωγός). Αντίστοιχα, με την πρόσμιξη τρισθενών ατόμων Β σε πλεγματικές θέσεις του Si, δημιουργούνται κενές θέσεις ηλεκτρονίων στους δεσμούς. Με την απορρόφηση ενός μικρού ποσού ενέργειας, ένα ηλεκτρόνιο από ένα γειτονικό πλήρη δεσμό μπορεί να καλύψει την κενή θέση, αφήνοντας παράλληλα στην προηγούμενη θέση του μια οπή και μετατρέποντας το άτομο Β σε κατιόν (Β-). Δηλαδή το τρισθενές άτομο συμπεριφέρεται σαν αποδέκτης ηλεκτρονίων (φορείς μειονότητας) ή δότης οπών (τύπος-ρ ημιαγωγός).

Όταν σε μια περιοχή του ημιαγωγού υπάρχει δημιουργία ή έκχυση φορέων σε περίσσεια, αυτοί διαχέονται προς τις άλλες περιοχές του ημιαγωγού όπου η συγκέντρωση των αντίστοιχων φορέων είναι μικρότερη. Επίσης όταν ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου p έλθει σε στενή επαφή με ένα τεμάχιο ημιαγωγού τύπου n, δηλαδή σχηματιστεί μια ένωση p-n (διάταξη διόδου ημιαγωγού), τότε ένα μέρος από τις οπές του τεμαχίου τύπου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου τύπου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι πολύ λιγότερα. Η ανάμιξη αυτή των φορέων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στις περιοχές κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια (περιοχή αραίωσης) των τεμαχίων τύπου p και n, ανατρέπουν την ισορροπία που υπήρχε πριν. Η αποκατάσταση των συνθηκών ισορροπίας γίνεται με επανασυνδέσεις των φορέων, μέχρι οι συγκεντρώσεις τους να πάρουν τιμές που να ικανοποιούν τον νόμο δράσης των μαζών.

19

Η συγκέντρωση των κατιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι αποδέκτες στο τμήμα τύπου p και n, παραμένουν αμετάβλητες αφού τα ιόντα, όπως συνήθως όλα τα άτομα στα στερεά, μένουν ακίνητα στο σώμα. Έτσι το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική ουδετερότητα και οι δύο πλευρές της ένωσης p-n φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία. Δημιουργείται λοιπόν μια διαφορά δυναμικού, που η τιμή της είναι σχετικά μικρή, αλλά το ενσωματωμένο αυτό ηλεκτροστατικό πεδίο εμποδίζει την παραπέρα διάχυση των φορέων πλειονότητας προς το απέναντι τμήμα της ένωσης. Το αποτέλεσμα είναι ότι η δίοδος που περιέχει την ένωση p-n, παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, ανάλογα με την φορά του. Στην εικόνα 1.8 φαίνεται η υλοποίηση διόδου σε ένα κρυσταλλικό ηλιακό κύτταρο πυριτίου.



Εικόνα 1.8. Σχηματική διάταξη ενός Φ/Β στοιχείου. Ηλιακή ακτινοβολία (φωτόνια) προσπίπτει στην εμπρόσθια επιφάνεια της δι-επαφής p-n όπως δείχνει το σχήμα. Το πάχος του στοιχείου μερικά μm.

1.2.3 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Είναι γνωστό ότι τα ηλιακά στοιχεία είναι δίοδοι ημιαγωγού με τη μορφή ενός δίσκου, (δηλαδή η ένωση p-n εκτείνεται σε όλο το πλάτος του δίσκου), που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία. Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού, έχει τη δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα

χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Δημιουργείται έτσι, όσο διαρκεί η ακτινοβολία, μία περίσσεια από ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές), πέρα από τις συγκεντρώσεις που αντιστοιχούν στις συνθήκες ισορροπίας. Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντιθέτου πρόσημου), μπορεί να βρεθούν στην περιοχή της ένωσης p-n οπότε θα δεχθούν την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου (Σχήμα 1.9).



Σχήμα 1.9: Το φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Τα φωτόνια της ακτινοβολίας, που δέχεται το στοιχείο στην εμπρός του όψη, τύπου n στο παράδειγμα του σχήματος, παράγουν ζεύγη φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές). Ένα μέρος από τους φορείς αυτούς διαχωρίζεται με την επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου της διόδου και εκτρέπεται προς τα εμπρός (τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, e-) ή προς τα πίσω (οι οπές, h+), δημιουργώντας μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δυο όψεις του στοιχείου. Οι υπόλοιποι φορείς επανασυνδέονται και εξαφανίζονται. Επίσης ένα μέρος της ακτινοβολίας ανακλάται στην επιφάνεια του στοιχείου, ενώ ένα άλλος μέρος της διέρχεται από το στοιχείο χωρίς να απορροφηθεί, μέχρι να συναντήσει το πίσω ηλεκτρόδιο. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου Ω και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Δηλαδή, η διάταξη αποτελεί μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται όσο διαρκεί η πρόσπτωση του ηλιακού φωτός πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Η αποδοτική λειτουργία των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στην πρακτική εκμετάλλευση του παραπάνω φαινομένου. Εκτός από τις προσμίξεις των τμημάτων p και n μιας ομοένωσης, δηλαδή υλικού από τον ίδιο βασικά ημιαγωγό, το ενσωματωμένο ηλεκτροστατικό πεδίο, που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την πραγματοποίηση ενός ηλιακού στοιχείου, αλλά και κάθε φωτοβολταϊκής διάταξης, μπορεί να προέρχεται επίσης και από διόδους άλλων. π.χ. από διόδους Σότκυ που σχηματίζονται όταν έρθουν σε επαφή ένας ημιαγωγός με ένα μέταλλο.

1.2.4 Η απορρόφηση ακτινοβολίας στα φ/β πλαίσια

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι δυνατή η μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια του συνόλου της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχονται στην επιφάνειά τους. Ένα μέρος από την ακτινοβολία ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον. Στη συνέχεια, από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό, προφανώς δεν μπορεί να απορροφηθεί το μέρος που αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού. Για τα φωτόνια αυτά, ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα. Έτσι, η αντίστοιχη ακτινοβολία διαπερνά άθικτη το ημιαγώγιμο υλικό του στοιχείου και απορροφήται τελικά στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο που καλύπτει την πίσω όψη του, με αποτέλεσμα να το θερμαίνει. Αλλά και από τα φωτόνια που απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο με το μέρος εκείνο της ενέργειάς τους που ισούται με το ενεργειακό χάσμα συμβάλλει, όπως είδαμε, στην εκδήλωση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Το υπόλοιπο μεταφέρεται, σαν κινητική ενέργεια, στο ηλεκτρόνιο που ελευθερώθηκε από τον δεσμό, και τελικά μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα. Όπως θα αναλυθεί όμως

παρακάτω, η αύξηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων επιδρά αρνητικά στην απόδοσή τους.

Η ενέργεια ενός φωτονίου Ε συνδέεται με τη συχνότητα της ακτινοβολίας ν και με το μήκος κύματος λ με τις σχέσεις:

$$E = h \cdot v = h \cdot c / \lambda$$

όπου h είναι η σταθερά δράσης του Plank (h=6,3xl0⁻³⁴ Js) και c είναι η ταχύτητα του φωτός (c = 3.10⁸ m/s). Επομένως, αν το ενεργειακό χάσμα είναι σε μονάδες ηλεκτρονιοβόλτ (eV) και το μήκος κύματος σε μικρόμετρα (μm), τότε το μέγιστο χρησιμοποιήσιμο μήκος κύματος ακτινοβολίας σε ένα ημιαγωγό, ενεργειακού χάσματος Ε_α θα είναι:

$$\lambda_g = 1,238 / E_g$$

θεωρώντας τώρα ότι στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού διεισδύει μια, μονοχρωματική δέσμη ακτινοβολίας από όμοια φωτόνια ενέργειας hv, που έχει ροή (η ένταση) ίση με Η μονάδες ισχύος ανά μονάδα επιφανείας. Η ροή των φωτονίων (Φ), δηλαδή το πλήθος των φωτονίων ανά μονάδα επιφανείας και χρόνου, θα είναι:

$$\Phi = \mathbf{H} / hv = H\lambda / hc$$

Βλέπουμε όπως άλλωστε είναι αυτονόητο ότι, για σταθερή ένταση Η ροή Φ είναι αντίστροφα ανάλογα με την ενέργεια των φωτονίων ή, που είναι το ίδιο, αυξάνει γραμμικά με το λ.

Ας συμβολίσουμε, στη συνέχεια με Φ_ο την αρχική τιμή της ροής των φωτονίων στην επιφάνεια ενός ημιαγωγού, με x την απόσταση που διανύει η ακτινοβολία μέσα στον ημιαγωγό, αρχίζοντας από την επιφάνειά του, και με Φ(x) την τιμή της ροής των φωτονίων (δηλαδή το πλήθος των φωτονίων που δεν έχουν ακόμα απορροφηθεί) στο βάθος αυτό. Η ευκολία με την οποία πραγματοποιείτε η απορρόφηση των φωτονίων, που είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα για τη χρησιμοποίηση του ημιαγωγού ως υλικού κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, θα δίνεται από το ρυθμό της μεταβολής της Φ με την αύξηση της απόστασης που διανύει η ακτινοβολία. Ο ρυθμός αυτός έχει αρνητική τιμή, αφού η Φ μειώνεται με την αύξηση του x, και είναι προφανώς ανάλογος με τη συγκεκριμένη τιμή της Φ στο βάθος x, δηλαδή με τη Φ(x). Θα ισχύει επομένως η σχέση:

$$d\Phi/dx = a\Phi(x)$$

και η σταθερά της αναλογίας α, που δίνεται σε αντίστροφες μονάδες μήκους, ονομάζεται συντελεστής απορρόφησης της υπόψη ακτινοβολίας.

Δοθέντος ότι για x=0 η Φ(x) παίρνει την τιμή Φ_ο, η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης είναι:

$$-d\Phi/dx = a\Phi_0 \exp^{(-ax)}$$

που ονομάζεται νόμος του BEER.

Στη συνέχεια βρίσκουμε εύκολα ότι:

$$-d\Phi / dx = a\Phi_0 \exp^{(-ax)}$$

δηλαδή ότι ο ρυθμός της απορρόφησης των φωτονίων, επομένως και της δημιουργίας των φορέων από την ακτινοβολία που δέχεται ο ημιαγωγός, είναι μεγαλύτερος κοντά στην επιφάνειά του και εξασθενεί με την απόσταση από αυτή.



Εικόνα 1.10. Η μεταβολή του συντελεστή απορρόφησης (α) σε συνάρτηση με το μήκος κύματος (λ) ή την ενέργεια των φωτονίων (hv) της ακτινοβολίας, για τους κυριότερους ημιαγωγούς των φωτοβολταϊκών διατάξεων

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.10, η τιμή του συντελεστή απορρόφησης μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, μηδενίζεται όταν το λ υπερβαίνει το λ_g του ημιαγωγού, αφού για αυτά τα μήκη

κύματος δεν πραγματοποιείται καμιά απορρόφηση φωτονίων. Αντίθετα, παίρνει μεγάλες τιμές προς την πλευρά των μικρών μηκών κύματος που σημαίνει ότι η απορρόφηση πρακτικά όλων των αντίστοιχων φωτονίων γίνεται πολύ κοντά στην επιφάνεια του ημιαγωγού.

1.2.5 Η δημιουργία του φωτορρεύματος

Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται μια κατάλληλη ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρρευμα Ι_φ, που η τιμή του θα είναι ανάλογη προς τα φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. π.χ. ας υποθέσουμε ότι έχουν εξασφαλιστεί οι δύο βασικές προϋποθέσεις για ένα καλό φωτοβολταϊκό στοιχείο, δηλαδή η ένωση p-n να βρίσκεται σε κατάλληλη απόσταση από την όψη του στοιχείου και η μέση διάρκεια ζωής των φορέων μειονότητας στον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο, να είναι αρκετά μεγάλο. Τότε, για την πυκνότητα του φωτορρεύματος, ισχύει ικανοποιητικά η σχέση:

$$I_{\varphi} = eg(L_n + L_p)$$

όπου e είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο, g είναι ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών φορέων από τα φωτόνια της ακτινοβολίας (πλήθος ζευγών ηλεκτρονίων-οπών ανά μονάδα χρόνου και μονάδα όγκου του ημιαγωγού), και L_n, L_p είναι τα μέσα μήκη διάχυσης των ηλεκτρονίων και των οπών, αντίστοιχα.

Ένα χρήσιμο μέγεθος για τον υπολογισμό του φωτορρεύματος είναι η φασματική απόκριση S (ή απόδοση συλλογής ή κβαντική απόδοση), που ορίζεται ως το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου, σε σχέση με τη φωτονική ροή Φ, δηλαδή με το πλήθος των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται το στοιχείο ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου. Για ακτινοβολία μήκους κύματος λ, η φασματική απόκριση S(λ) θα είναι:

$$S(\lambda) = I_{\varphi}(\lambda) / e\Phi(\lambda)$$

25

όπου Φ(λ) είναι το πλήθος των φωτονίων με ενέργεια που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος από λ μέχρι λ+dλ, και επομένως το συνολικό φωτόρρευμα του στοιχείου, όταν δέχεται πολυχρωματική ακτινοβολία, θα είναι:

$$I\varphi = e\int_{0}^{\lambda_{g}} S(\lambda)\Phi(\lambda)d\lambda$$

Η τιμή της φασματικής απόκρισης, και συνεπώς του φωτορρεύματος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, εξαρτάται από πολλούς κατασκευαστικούς παράγοντες, όπως ο συντελεστής ανάκλασης στην επιφάνεια του στοιχείου, ο συντελεστής απορρόφησης και το πάχος του ημιαγωγού, το πλήθος των επανασυνδέσεων των φορέων κλπ. Στην εικόνα 1.11 φαίνεται η μεταβολή της φασματικής απόκρισης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου του εμπορίου σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας που δέχεται.



Εικόνα 1.11. Η μεταβολή της φασματικής απόκρισης S(v) σε συνάρτηση με την ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας, στις 3 περιοχές ενός φωτοβολταϊκού ηλιακού στοιχείου πυριτίου

Όταν το ποσοστό της επιφάνειας του στοιχείου δεν είναι αμελητέο γράφεται:

$$I_{\varphi} = e \int_{0}^{\lambda_{g}} S(\lambda) [1 - R(\lambda)] \Phi(\lambda) d\lambda$$

όπου R(λ) είναι ο δείκτης ανάκλασης για την ακτινοβολία μήκους κύματος λ.

1.2.6 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Για να προχωρήσουμε σε μια πρώτη εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορούμε να το θεωρήσουμε ότι αποτελεί μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από μία δίοδο, και ότι περιγράφεται από το πολύ απλοποιημένο διάγραμμα του σχήματος 1.12.



Εικόνα 1.12. Απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, θα αποκατασταθεί μια ισορροπία όταν η τάση, που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, θα προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρρευμα. Δηλαδή, σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα ισχύει η σχέση:

$$I_{\Phi} = I_0[\exp(eV / \gamma kT) - 1]$$

από την οποία βρίσκουμε ότι, η τιμή τάσης ανοιχτού κυκλώματος του στοιχείου V_{οc} (από την αγγλική έκφραση open –circuit Voltage) θα είναι:

$$I_1 = I_{\Phi} - I_0[\exp(eI_LR_L / \gamma kT) - 1]$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η τιμή του Ι_φ είναι πολύ μεγαλύτερη από το Ι_οκαι επομένως η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί στη:

$$V_{oc} = \left[(\gamma kT / e) \ln I_{\Phi} / I_0 \right]$$

που δείχνει τη λογαριθμική μεταβολή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος σε συνάρτηση με το φωτόρρευμα, δηλαδή με την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Από τις σχέσεις για το Ι₀ που αναφέρθηκαν μπορούμε να βρούμε την εξάρτηση της V_{oc} από τις διάφορες ιδιότητες του ημιαγωγού, όπως το ενεργειακό χάσμα E_g, η ενδογενής συγκέντρωση των φορέων n_i, οι συγκεντρώσεις των προσμίξεων N_A και N_D κλπ.

Στην άλλη ακραία περίπτωση, δηλαδή σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψης του στοιχείου το ρεύμα Ι (short-circuit current) θα ισούται με το παραγόμενο φωτόρρευμα:

$$\mathbf{I}_{sc} = I \Phi$$

Όταν όμως το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου κλείσει διαμέσου μιας εξωτερικής αντίστασης RL (από την αγγλική έκφραση Load resistance), το ρεύμα θα πάρει μια μικρότερη τιμή Ι, που βρίσκεται με την λύση της εξίσωσης:

$$(I_{\varphi} / I_0) + 1 = [1 + (eV_m / \gamma kT)] \exp(eV_m / \gamma / kT)$$

Προφανώς θα υπάρχει κάποια τιμή της αντίστασης (δηλαδή του φορτίου του κυκλώματος) για την οποία η ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο θα γίνεται μέγιστη. Στις συνθήκες αυτές, θα αντιστοιχεί μια βέλτιστη τάση V_m, που δίνεται από την λύση της εξίσωσης:

$$(I_{\varphi} / I_0) + 1 = [1 + (eV_m / \gamma kT)] \exp(eV_m / \gamma / kT)$$

1.2.7 Ο Συντελεστής Πλήρωσης (Fill Factor)

Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος P_m=I_mV_m προς το γινόμενο της βραχυκυκλωμένης έντασης και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος I_{sc}V_{oc} ενός

φωτοβολταϊκού στοιχείου, ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF (από την αγγλική έκφραση fill factor). Δηλαδή:

$$FF = I_m V_m / I_{sc} V_{od}$$



Εικόνα 1.13. Η χαρακτηριστική καμπύλη Ι-V ενός φ/β στοιχείου στο σκοτάδι και στο φως

Στο διάγραμμα της εικόνας 1.13, ο FF δίνεται από το λόγο του εμβαδού του μέγιστου ορθογωνίου που μπορεί να εγγραφεί στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V του στοιχείου, σε συνθήκες ακτινοβολίας, προς το εμβαδόν που ορίζεται από τις τιμές I_{sc} και V_{oc}

Οι τρεις παραπάνω παράμετροι, δηλαδή ο FF, I_{sc}, και η V_{oc} είναι τα κυριότερα μεγέθη για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και καθορίζουν την απόδοσή τους. Επιστρέφοντας στον συντελεστή απόδοσης στοιχείων (η) μπορούμε τώρα να τον ορίσουμε με τη σχέση:

$$n = Pm / AG = ImV_m / AG = FFI_{sc}V_{oc} / AG$$

όπου G είναι η ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του Φ/β στοιχείου, εμβαδού Α. Όπως βλέπουμε, για την πραγματοποίηση αυξημένων αποδόσεων, επιδιώκεται οι τιμές των FF,I_{sc} και V_{oc} να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες.

Προφανώς θα ισχύει και η σχέση:

$$n = \Phi(\mathbf{E}_g) V_m / \Phi \mathbf{E}_\mu$$

όπου Φ(E_g) είναι η ροή των φωτονίων με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού, Φ είναι η συνολική φωτονική ροή στην ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο, και Ε_μ είναι η μέση ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας.

Στην ηλιακή ακτινοβολία, περίπου τα 2/3 των φωτονίων έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου (1,1eV). Επίσης, η V_m των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου ίση με το 1/3 της Ε_μ της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως βρίσκουμε πρόχειρα ότι η <u>θεωρητική απόδοση</u> των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου.

n=2/3 1/3=22%

Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός αλλά επηρεάζεται σημαντικά από τη σύσταση της ακτινοβολίας. Δηλαδή, μια δέσμη ακτινοβολίας θα προκαλέσει σε ένα στοιχείο την παραγωγή λιγότερης ηλεκτρικής ενέργειας, σε σύγκριση με μια άλλη ίσης ισχύος αλλά πλουσιότερη σε φωτόνια με ευνοϊκότερη ενέργεια για τον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο.

1.2.8 Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείωνδεύτερη προσέγγιση

Μια πιο σωστή προσέγγιση αποτελεί το ισοδύναμο κύκλωμα της εικόνας 1.14, διότι περιέχει και τις αναπόφευκτες σειριακές αντιστάσεις R_s (από την αγγλική έκφραση series resistance) που παρεμβάλλονται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό (κυρίως στο εμπρός επιφανειακό στρώμα του) και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια. Ακόμα, επειδή η αντίσταση διαμέσου της διόδου δεν έχει άπειρη τιμή, αφού λόγω επίσης αναπόφευκτων κατασκευαστικών ελαττωμάτων γίνονται διαρροές ρεύματος, το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει και την παράλληλη αντίσταση R_{sh} (από την αγγλική έκφραση shunt resistance). Συνήθως, στα φωτοβολταϊκά στοιχεία του εμπορίου η R_s είναι μικρότερη από 5Ω και η R_{sh} είναι μεγαλύτερη από 500 Ω.



Εικόνα 1.14. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Πάντως επηρεάζουν αισθητά την τάση V_L και του ρεύματος I_L που διαρρέει το φορτίο του κυκλώματος R_L, με αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση της απόδοσης του στοιχείου. στην περίπτωση αυτή ισχύει η σχέση:

$$I_{L}[1 + (R_{s} / R_{sh})] = I_{\Phi} - I_{0} \{ \exp[e(V_{L} - I_{L}R_{s}) / \gamma kT] - 1 \} - V_{L} / R_{sh}$$

Εκτός από τις αντιστάσεις R_s και R_{sh}, ένας άλλος παράγοντας που επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι η θερμοκρασία τους, όπως αναφέρεται και παρακάτω. Συγκεκριμένα, με την αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αντίστοιχη αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι, εκδηλώνεται ισχυρό ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται μείωση της V_{oc} και του FF. Παράλληλα μειώνεται και η απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου (Εικόνα 1.15).



Εικόνα 1.15. Τυπική απόκλιση της μεταβολής της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία λειτουργίας τους

Αν ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου σε μια δεδομένη θερμοκρασία (π.χ. 20[°]C) είναι (n), η τιμή του σε μια διαφορετική θερμοκρασία (θ) θα είναι:

$$\eta = \eta \times \sigma_{\theta}$$

1

όπου σ_θ είναι ένας αδιάστατος συντελεστής της θερμοκρασίας διόρθωσης της απόδοσης. Στη δεδομένη θερμοκρασία, ο σ_θ είναι ίσος με τη μονάδα, και μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης θερμοκρασίας, για τα συνηθισμένα φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου.

1.2.9 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση φ/β στοιχείων

Η αύξηση της θερμοκρασίας του Φ/Β στοιχείου που επιδρά αρνητικά στην απόδοση του. Η θερμοκρασία λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού καθορίζεται από μια ενεργειακή ισορροπία. Η ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από το φωτοβολταϊκό μετατρέπεται κατά ένα μέρος σε ηλεκτρική που απομακρύνεται από τα στοιχεία μέσω του εξωτερικού κυκλώματος, και κατά ένα μέρος σε θερμική. Η θερμική ενέργεια αυξάνει τη θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού και λόγω διαφοράς με το περιβάλλον, η θερμότητα μεταφέρεται σε αυτό με ένα συνδυασμό μηχανισμών θερμικής μεταφοράς. Η θερμική μεταφορά από το φωτοβολταϊκό πρέπει να μεγιστοποιείται για να λειτουργούν τα στοιχεία με όσο το δυνατόν μικρότερη θερμοκρασία, διότι, όσο μικρότερη είναι η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόδοσή του. Η ενεργειακή ισορροπία σε μια μοναδιαία περιοχή ενός φωτοβολταϊκού το οποίο ψύχεται λόγω θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον, μπορεί να γραφεί ως:

$$\tau \alpha G_r = n_c G_r + U_L (T_c + T_a)$$

όπου **r** είναι η διαπερατότητα του διαφανούς καλύμματος που είναι τοποθετημένο πάνω στα στοιχεία, **a** είναι το ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην επιφάνεια των στοιχείων η οποία και απορροφάται, **G**_r είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία, **n**_c είναι η απόδοση του φωτοβολταϊκού στο να μετατρέπει την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια και **Tc** η θερμοκρασία λειτουργίας των στοιχείων. Αυτή η απόδοση κυμαίνεται από μηδέν ως τη μέγιστη ηλεκτρική απόδοση, ανάλογα με το πόσο κοντά βρίσκεται σε συνθήκες μέγιστης ισχύς. Ο συντελεστής απωλειών U_L περιλαμβάνει θερμικές απώλειες από τη φωτιζόμενη πλευρά του φωτοβολταϊκού προς το περιβάλλον.

Η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας των στοιχείων (NOCT) καθορίζεται από τη θερμοκρασία που φθάνουν τα φωτοβολταϊκά όταν τοποθετούνται με τον κανονικό τρόπο και σε ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 800 W/m², σε ταχύτητα αέρα 1 *m/sec.*, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20° C, και χωρίς φορτίο, $n_c = 0$

Μετρήσεις της θερμοκρασίας των στοιχείων, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να καθορίσουν το τα/U₁.

$$\tau \alpha / U_L = (T_{c, Noct} - T_a) / G_{T, NOC} T$$

Η θερμοκρασία σε άλλες συνθήκες, όπου υποθέτουμε ότι το *τα/U_L*, να είναι σταθερό, βρίσκεται από την σχέση:

$$T_c = T_a + (G_T \tau a / U_L)(1 - nc / \tau \alpha)$$

Το *τα*, που είναι ο τελευταίος όρος στην εξίσωση, δεν είναι γενικά γνωστός και χωρίς σημαντικό σφάλμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την τιμή 0.9, επειδή ο όρος *η* /*τα* είναι μικρός σε σχέση με τη μονάδα.

- Η τιμή του συντελεστή απορρόφησης μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Ο συντελεστής απορρόφησης μας δείχνει την ευκολία με την οποία πραγματοποιείτε η απορρόφηση των φωτονίων από ημιαγώγιμο υλικό κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.
- <u>Η απόσταση μεταξύ της όψης του στοιχείου και της ένωσης p n.</u>
- Η μέση διάρκεια των φορέων μειονότητας στον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη.
- <u>Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας επιδρά σημαντικά στην απόδοση της</u> <u>ηλιακής κυψέλης</u>.

Κάποιες χαρακτηριστικές καμπύλες I-V ενός φωτοβολταϊκού, για διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας και σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας καθώς και το αντίστροφο παρουσιάζονται παρακάτω:



Εικόνα 1.16. Χαρακτηριστικές καμπύλες Ι-V ενός φωτοβολταϊκού, για διαφορετικές τιμές ακτινοβολίας και σταθερή θερμοκρασία λειτουργίας



Εικόνα 1.17. Χαρακτηριστικές καμπύλες Ι-V ενός φωτοβολταϊκού, για διαφορετικές τιμές θερμοκρασία λειτουργίας και σταθερή ακτινοβολία

1.2.10 Φωτοβολταϊκά στοιχεία

Τα κύρια συστατικά των φωτοβολταϊκών και η καρδιά κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ή ηλιακά κελιά ή κυψελίδες. Αυτά είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου, που καθώς δέχονται στην επιφάνεια τους την ηλιακή ακτινοβολία, εκδηλώνουν μία διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και στην πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και την ένταση ακτινοβολίας που δέχονται, ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μπορεί να δώσει μέχρι 0.5-1.0 V και πυκνότητα ρεύματος μέχρι 20-40mA ανά cm² της επιφανείας του.



Εικόνα 1.18. Θεωρητικά μέγιστα επίπεδα της απόδοσης διαφόρων φωτοβολταϊκών κυττάρων σε συνάρτηση με το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού από τον οποίο είναι κατασκευασμένα σε κανονικές συνθήκες.

Το είδος του ημιαγωγού που επιλέγεται ως υλικό κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων, καθορίζεται, με κυριότερο κριτήριο όπως φαίνεται και στη συνέχεια, από την τιμή του ενεργειακού χάσματος του η οποία καθορίζει και την απόδοση του στοιχείου. Ως συντελεστής απόδοσης ή απλούστερα ως απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ορίζεται ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το στοιχείο προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνεια του. Στο σχήμα 2.14 καταδεικνύεται ότι οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας είναι περίπου 25% και μπορούν να πραγματοποιηθούν με φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με ενεργειακό χάσμα

Το πυρίτιο (Si) αποτελεί το βασικότερο υλικό για την κατασκευή φωτοβολταϊκών κυττάρων από τη στιγμή που αποτελεί το κυρίαρχο υλικό στην κατασκευή ημιαγωγών. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία από πυρίτιο κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας είτε μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά wafer, είτε λεπτά films πυριτίου (άμορφο). Με τη συνεχή αύξηση της παραγωγής ημιαγώγιμων υλικών και τη βελτίωση της τεχνολογίας πυριτίου, η απόδοση των Φ/Β στοιχείων παρουσιάζει μια συνεχή αύξηση πλησιάζοντας τη μέγιστη θεωρητική τιμή τους και με παράλληλη ραγδαία μείωση στο κόστος τους. Για την εκτίμηση του κόστους των φωτοβολταϊκών στοιχείων χρησιμοποιείται συνήθως το κόστος ανά watt αιχμής (W_p, peak watt) που είναι το κόστος που αντιστοιχεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος 1W όταν δέχεται ηλιακή ακτινοβολία με ένταση 1kW/m².

Έτσι, το κόστος ηλιακού στοιχείου 10 €/Wp, σημαίνει πως το κόστος ενός ή περισσοτέρων φωτοβολταϊκών στοιχείων που παράγουν ηλεκτρική ισχύ 1W, όταν εκτεθούν σε ακτινοβολία πυκνότητας 1kW/m², είναι 10€. Δηλαδή το Wp εκφράζει το συνδυασμό του κόστους κατασκευής και της απόδοσης του ηλιακού στοιχείου. Στην εικόνα 1.19 παρουσιάζεται η πορεία ανάπτυξης των φωτοβολταϊκών στοιχείων, τόσο απ' την σκοπιά της αύξησης της απόδοσης όσο και απ' την σκοπιά της μείωσης του κόστους.


Εικόνα 1.19. Κόστη και αποδόσεις μετατροπής τυπικών φωτοβολταϊκών στοιχείων

1.2.11 Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία διακρίνονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες, ανάλογα με το υλικό παρασκευής, τη δομή του βασικού υλικού καθώς και τον τρόπο παρασκευής. Έτσι, έχουμε την παρακάτω κατηγοριοποίηση:

Α. Τύποι φωτοβολταικών στοιχείων πυριτίου <<Μεγάλου Πάχους>>

 Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon, sc-Si)

Το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3 χιλιοστά. Η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15 - 18% για το πλαίσιο. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%. Το μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέση απόδοσης/επιφάνειας ή "ενεργειακής πυκνότητας". Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με την υψηλότερη απόδοση στο εμπόριο σήμερα, έχει απόδοση πλαισίου 18,5%.



Εικόνα 1.20. Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)

Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3 χιλιοστά. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Οπτικά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά. Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ). Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση"), και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.



Εικόνα 1.21: Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου

• Φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου (Ribbon Silicon)

Πρόκειται για μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Προσφέρει έως και 50% μείωση στην χρήση του πυριτίου σε σχέση με τις "παραδοσιακές τεχνικές" κατασκευής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών κυψελών πυριτίου. Η απόδοση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία του έχει φτάσει πλέον γύρω στο 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3 χιλιοστά. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.

- Reference		
0200		
1 56500		

Εικόνα 1.22. Φωτοβολταϊκό στοιχείο ταινίας πυριτίου

Β. Φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών επιστρώσεων, Thin Film

 Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CulnSe2 ή CIS, με προσθήκη γάλλιου CIGS)

Ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτων φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% (πλαίσιο). Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18,8% η οποία είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γάλλιου η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο CIGS. Το πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το ίνδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.



Εικόνα 1.23. Φωτοβολταϊκό στοιχείο τύπου CIS

Φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην περίπτωση μας) πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Έτσι και λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη. Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται με χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά thin films πυριτίου κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6 έως 8% ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά ΦΒ, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

Το μειονέκτημα των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσων αφορά την διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων μιας και δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις αφού η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 χιλιοστά ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά.



Εικόνα 1.24. Φωτοβολταϊκό στοιχείο άμορφου πυριτίου

• Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Το Τελλουριούχο Κάδμιο έχει ενεργειακό χάσμα γύρω στο 1eV το οποίο είναι πολύ κοντά στο ηλιακό φάσμα κάτι που του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει φθάσει το 16%. Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Τροχοπέδη για την χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Επίσης προβληματίζει ή έλλειψη του Τελλουρίου. Σημαντικότερη χρήση του είναι ή ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό, κατάλληλο για ενσωμάτωση στα κτίρια (BIPV Building Integrated Photovoltaic).



Εικόνα 2.15. Φωτοβολταϊκό στοιχείο τύπου CdTe

• Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)

Το Γάλλιο είναι ένα παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το Αρσένιο δεν είναι σπάνιο άλλα έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το Αρσενικούχο γάλλιο έχει ενεργειακό χάσμα 1,43eV που είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση τους σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, για αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του ενδείκνυται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs υποστρώματος.



Εικόνα 2.16. Φωτοβολταϊκό στοιχείο Αρσενικού Γαλλίου

Γ. Πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία

Μια άλλη κατηγορία είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που αποτελούνται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών. - ΗΙΤ (Heterojunction with Intrinsic Thinlayer). Τα ποιο γνωστά εμπορικά πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω) ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17,2% και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Άλλα πλεονεκτήματα για τα πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν τα παραπάνω πλεονεκτήματα, είναι ακριβότερα σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Δ. Άλλες Τεχνολογίες

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια στον κόσμο παρουσιάζουν νέες πατέντες. Κάποιες από τις τεχνολογίες στα φωτοβολταϊκά στοιχεία που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία η χρήση τους είναι:

Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc-Si)

Οργανικά/Πολυμερή στοιχεία

2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία υψηλής συγκέντρωσης (HCPV)

2.1 Εισαγωγή

Στην εισαγωγή αυτή δίνεται μια σύνοψη της ιστορίας των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών και μετά γίνεται επισκόπηση του παρόντος καθώς του μέλλοντος αυτής της τεχνολογίας. Η επισκόπηση λαμβάνει 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 συστημάτων 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 (εικόνα. 2.1). 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 πολυπλοκότητα 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 καμία ή σχεδόν καμία 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 υψηλότατοι 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 ΙΙΙ-V κελιά πολλαπλής συνένωσης.



Εικόνα 2.1. Η αρχή λειτουργίας της φωτοβολταϊκής συγκέντρωσης κάνοντας χρήση οπτικών φακών Fresnel

2.2 Η ανάγκη για CPV

Μια ματιά στον πίνακα 2.2. 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 2.3. 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 ας σημειωθεί ότι προϋποθέτουν 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 πυριτίου 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 δι-επίπεδο 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, τη μία επάνω στην άλλη, από τις οποίες η καθεμία θα είχε διαφορετικό ενεργειακό διάκενο η βελτίωση θα ήταν προφανής. Η <<επόμενη>> δίοδος, 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 φωτοδιόδων 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 δι-επίπεδη φύση των ηλιακών κυττάρων αναφέρεται ως όριο SQ. Όπως αναφέρθηκε, τα στοιχεία πολλαπλής συνένωσης διαφεύγουν αυτού του ορίου, αφού κάτω από τις ίδιες

46

συνθήκες που έχουμε 40% βέλτιστη απόδοση για στοιχεία ενός ημιθαγωγού, 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 αυτοί να είναι πιο φτηνοί από κοινούς μετατροπείς διόδου και να επιταχύνουν τη διείσδυση του ηλιακού ηλεκτρισμού στην αγορά.

Στην εικόνα 2.4 φαίνεται η ετήσια εγκατεστημένη ισχύς από CPV από το 2001 έως και σήμερα. Τον τελευταίο χρόνο παρατηρούμε ότι η τιμή σε MW έχει τριπλασιαστεί.



Εικόνα 2.2. Διαχρονική εξέλιξη της απόδοσης για διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών.



Εικόνα. 2.3. Διάφορες ΦΒ εγκαταστάσεις για τρεις διαφορετικές διαθεσιμότητες κεφαλαίου. Οι ετικέτες PV installations for Ci0=\$10B, %B and 2.5B αντιπροσωπεύουν το 0.1, 0.05 και 0.025% του ΑΕΠ των εκβιομηχανισμένων χωρών. Η καμπύλη με ετικέτα Υψηλό pc/p0 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 ενώ για τις υπόλοιπες περιπτώσεις είναι 0.8253.



Εικόνα. 2.4. Ετήσια εγκατεστημένη ισχύς

2.3 Προκλήσεις στα CPV

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

Απαιτούν πολύ υψηλές συγκεντρώσεις ηλιακής ακτινοβολίας. 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, μεγεθυντικών 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 αχτίδες 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 χρυσή τομή 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 πανέλα από πυρίτιο έχουν απόδοση 20%, συμπεραίνουμε ότι η ελάχιστη δυνατή αποδοτικότητα 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 πανέλα πυριτίου.

Όπως αναφέραμε παραπάνω στα HCPV απαιτείται υψηλή άμεση ακτινοβολία. Στην εικόνα 2.5 φαίνονται οι περιοχές με **Direct Normal Irradiance (DNI)** μεγαλύτερο από 2200kWh/m²/year οι οποίες είναι και πιο κατάλληλες για εγκατάσταση HCPV συστημάτων.



Εικόνα. 2.5. Κατάλληλες περιοχές για εγκατάσταση HCPV

2.4 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 έρθει 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 διείσδυση των ΦΒ ώστε να επιτευχτεί 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 παγκόσμια παραγωγή ακρυλίου (που είναι παράγωγο του πετρελαίου, οπότε είναι ασύμφορο και από οικονομική αλλά και από περιβαλλοντική άποψη). Ωστόσο, κατά τη τελευταία πενταετία όλο και περισσότεροι κατασκευαστές χρησιμοποιούν πολυμερή λεπτού υμενίου (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 πολυσυνδετικά 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 επταετία ζημιώθηκε μέσω μια σειρά τεχνολογικών καινοτομιών μια "μετανάστευση" προς υποστρώματα πυριτίου, 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 πολυσυνδετικά ηλιακά κύτταρα συντίθενται σε έναν ειδικό αντιδραστήρα χημικής επιταξίας. Υποθέτοντας 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 (trackers), υποθέτοντας trackers των 50 m² (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 πάνελ των 0,1 kW(με 250 κύτταρα) δεν θα περιέχει από 1500 κομμάτια. Συνεπώς, για να επιτευχτεί 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 κατά 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 αλλεπάλληλων 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.

3 III-V ενώσεις σε φωτοβολταϊκά

3.1 Εισαγωγή

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

3.1.1 Ιστορία των ΙΙΙ-V ετεροδομών

Η ιδέα χρήσης ετεροδομών σε ημιαγώγιμες διατάξεις υπήρξε ήδη από την αυγή της ηλεκτρονικής, με τον W. Shockley και A.I. Gubanov να κανουν πρωτοπόρα βήματα πάνω σε αυτόν τον τομέα. Την εποχή αυτή ήταν που ανακαλύφθηκαν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ημιαγώγιμων 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.



Εικόνα 3.1. 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 κρύσταλλο-χημικές ιδιότητες. Το 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 ιδανικό. Περαιτέρω μελέτες και η ανάπτυξη της τεχνικής της ρευστής επιταξίας (LPE) είχαν ως αποτέλεσμα την κατασκευή των πρώτων AlGaAs ετεροδομών με κρυσταλλικό ταίριασμα. Από εκεί και πέρα, η πρόοδος στο πεδίο των ημιαγώγιμων ετεροδομών υπήρξε ραγδαία, με τη 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 ταιριάσματος. Σε αυτή την αναζήτηση ήταν πολύτιμη η χαρτογράφηση των ΙΙΙ-V ετεροδομών, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3.2. Ενεργειακό διάκενο Eg συναρτήσει της σταθεράς κρυστάλλου για Si, Ge, και ΙΙΙ-V κραμάτων καθώς και τα στερεά διαλύματά τους.

3.2 Ηλιακή Συγκέντρωση: Αποδοτικότητα και οικονομία

Η μετατροπή συγκεντρωμένου ηλιακού φωτός δίνει τη δυνατότητα περαιτέρω αύξησης της απόδοσης 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 υπερ-γραμμικά με τη συγκέντρωση της ακτινοβολίας, και άρα αυξάνεται η συνολική απόδοση της φωτοβολταϊκής μετατροπής. Συγκεκριμένα, για πολυσυνδετικά κελιά, η μέγιστη θεωρητική απόδοση είναι στο 87%, που είναι πολύ κοντά στην απόδοση του κύκλου Carnot (93%). Συνεπώς, τα πολυσυνδετικά 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 τάσης κατά μήκος της εσωτερικής αντίστασης ενός φωτοκύτταρου. 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 ημιαγώγιμων υλικών που χρειάζονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με το λόγο της ηλιακής συγκέντρωσης. Μόνο δηλαδή αν το κόστος του φωτοκύτταρου πέσει λόγω χρήσης λιγότερων υλικών θα έχει δημιουργηθεί η οικονομική βάση για την εδραίωση των ΙΙΙ-V ετεροδομών.

3.3 Συγκεντρωτικά ΙΙΙ-V ετεροδομικά ηλιακά κελιά

3.3.1 AlGaAs / GaAs κελιά μονής σύνδεσης (single junction)

Ο στόχος του φ/β κελιού 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 επιλεχθεί 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 απολέσουν ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας τους ως θερμικές απώλειες, αφού 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 πυριτίου 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 συγκέντρωση ενός ήλιου(1x) είναι στα 25%.



Εικόνα 3.3. Ιδανικό εύρος για ηλιακό κελί μονής σύνδεσης

Το πυρίτιο και το GaAs εκπληρώνουν στο έπακρο τις απαιτήσεις για κατασκευή ηλιακών κελιών. 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 φωτοκύτταρων από πυρίτιο. Παρά τις αξιόλογες προσπάθειες που έχουν γίνει για ανάπτυξη και κατασκευή ηλιακών πάνελ λεπτού υμενίου, 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 ετερολέιζερ. Το στρώμα αυτό είναι το τρίτο στοιχείο στην αντικατοπτρική επίστρωση του φωτοκύτταρου, 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.



Εικόνα 3.4. 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+-GaAs στρώματος. δ) δομή με μεγάλο διάκενο



Εικόνα 3.5. Σχηματικά διαγράμματα κελιών AlGaAs /GaAs μονής σύνδεσης πολλαπλών στρωμάτων. α) Σύνθεση με τη μέθοδο LPE. β) Σύνθεση με τη μέθοδο MOCVD. Η συγκεκριμένη δομή έχει ενσωματωμένο καθρέφτη τύπου Bragg, ο οποίος αποτελείται απο 12 ζεύγη στρωμάτων AlAs(72 nm)/GaAs(59 nm). Η απορρόφηση είναι στα λ=850 nm με συντελεστή ανάκλασης 96% και έχει ως αποτέλεσμα να περνάει η διπλή ποσότητα φωτός μεγάλου κύματος. Ο καθρέφτης είναι τέτοιος ώστε το φώς μεγάλου μήκος κύματος που δεν απορροφάται κατά την πρώτη διέυλευση 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 μm 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 μονοσυνδετικά κύτταρα, με μέθοδο κατασκευής τη MOCVD όμως, είναι 27,6%.



Εικόνα 3.6. Απόδοση AlGaAs/GaAs κυττάρων μονής σύνδεσης κατασκευασμένων με LPE, σε συνάρτηση με την ηλιακή συγκέντρωση

3.3.2 Δίδυμα (dual junction) ηλιακά κύτταρα

Πολυσυνδετικά κύτταρα είναι ο συνδυασμός διάφορων ημιαγώγιμων υλικών με στόχο την απορρόφηση μεγαλύτερου εύρους ηλιακού φωτός, χωρίς να επεισέρθει πτώση τάσης ή θερμική απώλεια.

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 ημιαγώγιμα υλικά για κάθε "ομάδα" 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 πολυσυνδετικών κελιών. Κράματα μετάλλου στοιχείων που ανήκουν στις ομάδες 3 και 5 του περιοδικού πίνακα, καθώς και χημικές ενώσεις αυτών ενδείκνυνται ιδιαίτερα για την κατασκευή πολυσυνδετικών 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 τρισυνδετικό (triple-junction) κελί GalnP₂ με ενεργειακό διάκενο 1,85 eV και με κρυσταλλική σταθερά(lattice constant) 5,65A. Εφόσον 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.

Ταίριασμα κρυστάλλου

Σε μία μονολιθική, πολυσυνδετική 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 πολυσυνδετικής δομής είναι το ταίριασμα των κρυσταλλικών σταθερών του κάθε στρώματος ημιαγωγού(νοθευμένου και μη). Γιατί είναι τόσο σημαντικό αυτό το ταίριασμα ζημιουργεί 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 ανοικτοκυκλώματος, την πυκνότητα του ρεύματος βραχυκύκλωσης, και επηρεάζουν το συντελεστή γεμίσματος 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.

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.

Ταίριασμα ρεύματος

Λόγω του γεγονότος ότι τα υποκελιά σε ένα φ/β κύτταρο, είναι συνδεδεμένα σειριακά, το ρεύμα εξόδου ενός πολυσυνδετικού στοιχείου ισούται με το με μικρότερο ρεύμα που παράγεται σε κάθε ξεχωριστό τμήμα του. Γι αυτό το λόγο, είναι επιθυμητό, τα παραγόμενα φωτόρρευματα 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 GalnP/GaAs/Ge αυτό σημαίνει ότι το στρώμα του Ge πρέπει να είναι σχετικά χονδρό επειδή έχει μικρότερη απορροφητικότητα.

Παραγωγή ισχύος

Ο στόχος στην σχεδίαση των φωτοβολταϊκών παραμένει η μεγιστοποίηση της ισχύς εξόδου. Τα πολυσυνδετικά κελιά έχουν μεν μειωμένο ρεύμα, ωστόσο κάθε στρώμα παράγει μία τάση η οποία δρα αθροιστικά στην τάση εξόδου. Έτσι τα πολυσυνδετικά 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 ισχύος.

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 επιθυμούμενη συγκέντρωση τόσο αυξάνεται και το κόστος των φακών και των πλαισίων στήριξης. Περισσότερα γι αυτούς στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

Το εργαστήρια 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.



Εικόνα 3.7. Απόδοση, τάση ανοικτοκύκλωσης VOC και συντελεστή πλήρωσης FF ενός δίδυμου κελιού GaInP/GaAs ως προς τη συγκέντρωση

3.3.3 Κατασκευή δίδυμων συγκεντρωτικών ηλιακών κελιών (dual junction cells)

Ένα μονολιθικό δίδυμο ηλιακό κύτταρο είναι μια πολυστρωματική δομή που αποτελείται από μία ποικιλία ΙΙΙ-V σύνθετων ημιαγώγιμων υλικών. Οι πολύ σημαντικές ζώνες απορρόφησης μπορούν να τροποποιηθούν αλλάζοντας τη σύνθεση σε τριαδικά ή τετραδικά κράματα όπως GaxIn1-xP ή (AlxGa1-x)yIn1-yAs. 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 Gao.5Ino.5P/Gao.99Ino.01As/Ge στο οποίο σημειώνεται 100% κρυσταλλική ταύτιση μεταξύ των επί μέρους υλικών του. Πέρα από τις φωτοενεργές p-n ενώσεις, 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 διόδους σήραγγας.

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 10¹⁶ cm⁻³ και 10²⁰ cm⁻³. Υπάρχουν μια σειρά από τεχνικές επιταξικής σύνθεσης, με τις οποίες κατασκευάζονται ΙΙΙ-V ημιαγωγοί. Οι υπάρχουσες είναι οι:

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

Από 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 πολυσυνδετικά κελιά(π.χ. Εταιρείες Aixtron και Veeco).

3.3.4 Τρόπος υλοποίησης



Εικόνα 3.8. Δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για πολυσυνδετικά ηλιακά κελιά. α) υλοποίηση στοίβας: κελιά μονής σύνδεσης από διαφορετικά ημιαγώγιμα υλικά κατασκευάζονται και στοιβάζονται 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 (Multijunction cells MJ): Είτε με κατασκευή στοίβας (εικόνα 3.8.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 (εικόνα 3.8.β) τα διαφορετικά υλικά συντίθενται πάνω σε κοινό υπόστρωμα και συνδέονται σειριακά μέσω διακλαδικών διόδων σήραγγας. Έτσι, στο τέλος η δομή που προκύπτει έχει μόνο δύο ακροδέκτες, όπως σε ένα συμβατικό ηλιακό κελί μονής 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 επιλεχθούν 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 στοίβας μιας και το κόστος του υποστρώματος αποτελεί ένα σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους του κελιού. Επίσης, η υλοποίηση στοίβας απαιτεί αυστηρή οπτική ευθυγράμμιση των υποκελιών, κάτι που αυξάνει κατά πολύ την πολυπλοκότητα και το κόστος της κατασκευής. Το γεγονός ότι η υλοποίηση στοίβας δίνει ελαφρώς μεγαλύτερες αποδόσεις δεν αντισταθμίζει(μέχρι τώρα τουλάχιστον) τις κατασκευαστικές δυσκολίες, και στη διπλωματική αυτή, ασχολούμαστε μόνο με CPV κελιά μονολιθικής χάραξης.

3.4 Τρισυνδετικά ηλιακά κύτταρα (triple junction cells)

άνω επαφή	1
n ⁺ -AllnP - window layer n-GalnP - emitter	Ga _{0.5} In _{0.5} P
p-Ga _{In} P- base	top cell
p ⁺ -GalnP - barrier layer	660 nm
p ⁺ -AlGaInP - barrier layer p ⁺⁺ -AlGaAs - tunnel junction	tunnel diode 1
n ⁺⁺ -GaAs or GaInP - tunnel junction n ⁺ -AlGaInP - barrier layer	
p-Ga _{In} As- emitter	middle cell
p ⁺ -GalnAs - barrier layer p ⁺ -AlGalnAs - barrier layer	880 nm
p ⁺⁺ -AlGaAs - tunnel junction n ⁺⁺ -GalnAs - tunnel junction	tunnel diode 2
GalnAs buffer layer	buffer
n- doped window- and nucleation layer n-Ge diffused emitter	Ge bottom cell
p-Ge substrate (100)	1800 nm
κάτω επαφι	ή

Εικόνα. 3.9. 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 σήραγγας και συνδέουν σειριακά τα υποκελιά.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.11, τα στρώματα GalnP, GaAs, και Ge του τρισυνδετικού ηλιακού κελιού (εικόνα 3.9), επιλέχθηκαν για τη συνολική ικανότητά τους να καλύπτουν με το ενεργειακό διάκενό τους όλο το φάσμα του ηλιακού φωτός. Το GalnP, με εύρος 1,85 eV, απορροφά τα φωτόνια στο υπεριώδες και ορατό μέρος του ηλιακού φάσματος. Το GaAs (Eg = 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 GalnP/GaAs/Ge χαράζεται μονολιθικά, δηλαδή κάθε ένα από τα συνολικά 20 μονολιθικά ημιαγώγιμα στρώματα, σχηματίζονται in situ (στη θέση τους, όλα μαζί). Η εναλλακτική μέθοδος είναι η μηχανική στοίβαξη 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.



Εικόνα 3.10. 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.



Εικόνα 3.11. Κβαντική απόδοση κάθε στρώματος του τρισυνδετικού ηλιακού κυττάρου GaInP/GaAs/Ge



Εικόνα 3.12. Σύστημα μεταλλο-οργανικής χημικής εναπόθεσης ατμών (MOCVD)



Εικόνα 3.13. 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 τριμεθυλικόίνδιο. 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

Αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν την τελική καθαρότητα του κρυστάλλου, άρα και το μέσο χρόνο ζωής την φορέων μειονότητας και άρα την τελική απόδοση του ηλιακού κελιού. Αφού 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 μανδυών. 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 κελιών 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/cm² 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.

71



Εικόνα 3.12. Πλακίδιο διαμέτρου 10 cm με 1150 GaInP/GaInAs/Ge ηλιακά κελιά τριπλής σύνδεσης(διάμετρος 2mm) ανεπτυγμένα πάνω σε υπόστρωμα Ge με τη μέθοδο MOVPE.
4 Πολυσυνδετικά κελιά στη πράξη

4.1 Πολυσυνδετικά κελιά κάτω από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας

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

4.1.1 Μη ενιαία ακτινοβόληση

Ένας πραγματικός οπτικός συγκεντρωτής δεν προκαλεί ενιαία ακτινοβόληση στο ηλιακό κελί. Ο λόγος συγκέντρωσής (π.χ. 500x) του είναι ο μέσος όρος της ακτινοβόλησης πάνω στο κελί. Το κλειδί για να γίνει σωστή αντιστοίχιση του συγκεντρωτή στο κατάλληλο κελί έγκειται στη καταγραφή του προφίλ ακτινοβόλησής 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 σήραγγας, όσον αφορά τη μη ενιαία ακτινοβόληση, μιας και πρέπει να λειτουργούν κάτω από μία συγκεκριμένη συγκέντρωση. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι πολυσυνδετικά κελιά πρέπει να έχουν ενώσεις σήραγγας με μέγιστες πυκνότητες ρεύματος σήραγγας υψηλότερες από την πυκνότητα ρεύματος ανοικτοκύκλωσης που έχουμε στη μέγιστη συγκέντρωση που προκαλούν οι συγκεντρωτές.



Εικόνα 4.1. α)Φωτογραφία του κελιού GaAs, πλάτους 1mm². β) προφίλ ακτινοβόλησης γ) παραγωγή ρεύματος στο κελί και προφίλ ακτινοβόλησης ανάλογα με τις περιοχές του κελιού.

4.1.2 Τροποποίηση και διαβίβαση ηλιακού φάσματος από το

συγκεντρωτή

Στη εικόνα που ακολουθεί βλέπουμε τη διαβίβαση του ηλιακού φάσματος, όπως τη κάνει ένας διαδεδομένος 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 GalnP/GaAs έχουμε μη ταίριασμα ρεύματος μόνο της τάξης του 0,2%, σε κελί GalnP/GaAs/Ge η διαφορά γίνεται 10%.



Εικόνα 4.2. Μεταβίβαση φάσματος από το συγκεντρωτή TIR-R.

4.1.3 Ισοστάθμιση ρεύματος και ηλιακό φάσμα

Η ισοστάθμιση ρεύματος στα πολυενωτικά κύτταρα σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία και τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει αυτή (αυξομειωμένη 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 ακτινοβόλησης του συγκεντρωτή
- η βέλτιστη αντιστοίχιση του πολυενωτικού κυττάρου στον συγκεντρωτή αυτό(π.χ. Ύπαρξη τεκμηριωμένης μελέτης συμπεριφοράς του κελιού με αυτόν το συγκεντρωτή)
- κατασκευή k 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.



Εικόνα 4.3. Δι-αξονικό σύστημα παρακολούθησης στο ΙΕS 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 κελιών 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.

4.1.4 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.



Εικόνα 4.4. Κατανεμημένο 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 Ι-V καμπύλη ενός κελιού GaAs μονής 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. Η ανομοιόμορφη της τάσης ανοικτοκύκλωσης. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι

ότι η ανομοιόμορφη ακτινοβόληση 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 ανοικτοκύκλωσης.



Εικόνα 4.5. Θεωρητική καμπύλη Ι-V ακτινοβόλησης κελιού GaAs μονής σύνδεσης. Έχουμε δύο περιπτώσεις ακτινοβόλησης: μία ομογενή στα 1000x και μία ανομοιογενή με 1000x μέσο όρο. Προσθετικά, θεωρούμε σε κάθε περίπτωση την ύπαρξη μπροστινής επαφής "καλής" και "κανονικής" ποιότητας.

4.2 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 ΙΙΙ-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.

4.2.1 Συσχετίσεις μεταξύ ΙΙΙ-V MJCs και LEDs

Οι ομοιότητες μεταξύ ΙΙΙ-V MJCs και LEDs είναι οι εξής:

- Ανάγκη για καλή ποιότητα κρυστάλλου στα ΙΙΙ-V ημιαγώγιμα στρώματα
- Ενθυλάκωση 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 MJCs 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.

4.2.2 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 εμβαδόν 0,01 mm². Εδώ, φαίνεται πάλι πόσο αποφευκτές είναι οι απώλειες σειράς αφού βλέπουμε πως για εμβαδόν από 10 mm² 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.



Εικόνα 4.6. 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. Από το διάγραμμα βλέπουμε ότι μέχρι 6 mm²έχουμε βέλτιστη απόδοση(διαφορά από το μέγιστο μικρότερη του 1%). Επίσης, τα LEDs κατασκευάζονται με διάμετρο 1 mm², 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 mm² έχουμε βαθμό επιτυχίας 90-95%.

4.2.3 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 έιναι αναλογικός ως προς το μέγεθος του κελιού. Για μία δεδομένη συγκέντρωση και ένα πάνελ 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 πάνελ 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 ημιαγώγιμων 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 συνδεσμολογίας είναι γύρω στα 1 mm².



Εικόνα 4.7. Υπολογισμός συνολικού κόστους για κελί GaAs στους 1000 ήλιους. Το κόστος των συγκεντρωτών και η ενθυλάκωση βασίστηκαν σε αντίστοιχες διαδικασίες στα LED.

4.2.4 Απαγωγή θερμότητας

Ας δούμε τώρα τι σημαίνει λειτουργία στους 1000 ήλιους. Έχουμε

- 1 MW m²
- 100 W cm²
- 1 W mm²

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 τρισυνδετικό ηλιακό κελί με βαθμό απόδοσης 35%. Για κελί 1 mm2 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 MJ cell 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 *κ* = 0.375 Wcm⁻²K⁻¹ ενώ το απαισιόδοξο σενάριο προβλέπει άπνοια και υλικό με μέτρια θερμική αγωγιμότητα *κ* = 0.015Wcm⁻² K⁻¹. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα. Για αρχική θερμοκρασία έχουν υποτεθεί 300 Κ και γεωγραφικό πλάτος 40⁻ Παρατηρούμε ότι στο καλό σενάριο για κελί 1 mm² έχουμε αύξηση μόλις 18 βαθμών C.



Εικόνα 4.8. Αύξηση θερμοκρασίας στο ηλιακό κελί ως συνάρτηση του μεγέθους του. Συγκέντρωση: 1000 ήλιοι Απόδοση MJ Cell: 35%

4.2.5 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.To κόστος ενός τρισυνδετικού κελιού που κατασκευάζεται με τη προσέγγιση LED του 1 mm² κοστίζει ~ 15 λεπτά.

5 Οπτική Συγκεντρωτικών Συστημάτων 5.1 Τύποι οπτικών μέσων

Τα περισσότερα συγκεντρωτικά συστήματα χρησιμοποιούν είτε τους φακούς είτε τα παραβολικά και τα κυλινδροπαραβολικά κάτοπτρα. Οι φακοί οποιουδήποτε μεγέθους άνω των 5cm διαμέτρου είναι πολύ παχιοί και δαπανηροί για να είναι πρακτικοί, επομένως, επιλέγονται συνήθως οι φακοί Fresnel. Ένας φακός Fresnel είναι ο λεπτός φακός όπου σε κάθε σημείο ή τμήμα του, η διάθλαση των προσπίπτων ακτινών είναι διαφορετική, με αποτέλεσμα την σύγκλισή τους σε ένα εστιακό σημείο ή γραμμή. Έτσι, οι φακοί Fresnel ανάλογα με την συμμετρία που έχουν, μπορούν να εστιάζουν το φως σε ένα σημείο (κυκλική συμμετρία) ή σε μια γραμμή (x ή y συμμετρία). Οι φακοί σημειακής εστίασης, χρησιμοποιούν συνήθως ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο πίσω από κάθε φακό, ενώ οι φακοί γραμμικής εστίασης έχουν μια σειρά φωτοβολταϊκών κυττάρων. Το υλικό της επιλογής για το φακό είναι το γυαλί ή το ακρυλικό πλαστικό (methacry-late polymethyl ή PMM), το οποίο έχει καλή εφαρμογή και έχει παρουσιάσει μεγάλη αντοχή στις καιρικές συνθήκες.



Εικόνα 5.1. Διαμορφώσεις φακών Fresnel. (α) Φακός Fresnel σημειακής εστίασης. (β) Γραμμικός φακός Fresnel ή γραμμικής εστίασης. (γ) Καλυμμένος δια θόλου γραμμικός φακός Fresnel.

Μια εναλλακτική περίπτωση στη χρήση των φακών είναι η χρήση των κατόπτρων. Όπως είναι γνωστό, μια ανακλαστική επιφάνεια με τη μορφή μιας παραβολής, θα κατευθύνει τις προσπίπτουσες ακτίνες παράλληλα με τον άξονα της παραβολής, σε ένα σημείο που βρίσκεται στην εστία της παραβολής. Όπως στους φακούς, υπάρχουν 2 είδη παραβολικών συγκεντρωτικών μέσων, αυτά της σημειακής εστίασης (σφαιρικά κάτοπτρα), που διαμορφώνονται με την περιστροφή της παραβολής γύρω από τον άξονά της και τη δημιουργία ενός παραβολοειδούς και αυτά της γραμμικής εστίασης (κυλινδροπαραβολικά κάτοπτρα), που διαμορφώνονται με την περιστροφή της παναβολής γύρω από τον άξονά της και τη δημιουργία ενός παραβολοειδούς και αυτά της γραμμικής εστίασης (κυλινδροπαραβολικά κάτοπτρα), που διαμορφώνονται με την επέκταση της παραβολής ως προς τον άξονα της καθέτου της παραβολής). Οι σχηματικές αναπαραστάσεις, παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:





Μια άλλη γεωμετρία συγκεντρωτικών μέσων είναι αυτή του σύνθετου παραβολικού συγκεντρωτικού μέσου (CPC), που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3. Εδώ οι πλευρές του συγκεντρωτικού συστήματος είναι παραβολές, εντούτοις, η εστίαση για κάθε παραβολή είναι στην αντίθετη πλευρά του απορροφητή και ο άξονας της παραβολής *α* είναι κατά μήκος της κατεύθυνσης της μέγιστης γωνίας αποδοχής, *θmax*. Το σύστημα CPC είναι ενδιαφέρον, δεδομένου ότι παρέχει τη μέγιστη συγκέντρωση συγκριτικά με το μέγεθος του οπτικού ανοίγματος, ή αλλιώς, για μια δεδομένη μέγιστη γωνία αποδοχής. Για την υψηλή συγκέντρωση, ένα CPC πρέπει να



είναι μακρύ και λεπτό, με αποτέλεσμα η χρήση του να περιορίζεται για εφαρμογές στα συστήματα χαμηλής συγκέντρωσης είτε ως δευτεροβάθμιο οπτικό μέσο συγκέντρωσης.

Εικόνα 5.3. Γεωμετρία του σύνθετου παραβολικού συγκεντρωτικού μέσου, όπου σε αυτήν την περίπτωση έχουμε θmax = 30°

5.2 Τύποι παρακολούθησης του ήλιου (Solar Trackers)

Τα συγκεντρωτικά συστήματα, για την επίτευξη σημαντικών λόγων συγκέντρωσης ή ακόμα και για την λειτουργία τους, απαιτούν την χρήση συστημάτων παρακολούθησης του ήλιου, τους ηλιακούς ιχνηλάτες (solar trackers). Η οπτική σημειακής εστίασης γενικά απαιτεί την ιχνηλάτηση του ήλιου σε δύο άξονες έτσι ώστε το σύστημα να είναι πάντα προσανατολισμένο, διότι μικρές αποκλίσεις από τον προσανατολισμό, είναι καταστροφικές για το σύστημα. Από μια μηχανική σκοπιά, η ιχνηλάτηση του ήλιου σε δύο άξονες είναι πιο σύνθετη από αυτή του μονού άξονα, αλλά τα συστήματα σημειακής εστίασης μπορούν να επιτύχουν πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις του ήλιου και επομένως την χρήση μικρότερης επιφάνειας απορροφητή. Τα κυλινδροπαραβολικά κάτοπτρα γραμμικής εστίασης χρειάζονται την ιχνηλάτιση κατά μήκος ενός άξονα έτσι ώστε το είδωλο να περιορίζεται σύμφωνα με τη γραμμή εστίασης. Τα γραμμικά συγκεντρωτικά συστήματα Fresnel υφίστανται οπτικές παρεκκλίσεις όταν ο ήλιος δεν είναι κάθετος στο επίπεδο των φακών. Αυτό περιορίζει γενικά τα γραμμικά συστήματα Fresnel στην χρήση ιχνηλατών ηλίου διπλού άξονα.

Έτσι, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι συστημάτων παρακολούθησης, του ήλιου. Δύο μεγάλες κατηγορίες διαχωρισμού των συστημάτων αυτών είναι βάση της κίνησής τους, δηλαδή μονού ή διπλού άξονα, ενώ μια δεύτερη κατηγοριοποίηση είναι βάση του άξονα συντεταγμένων που κινούνται (ύψος, αζιμούθιο, πολικός άξονας) και της δομής που χρησιμοποιούν. Οι σημαντικότεροι τύποι παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:





Εικόνα 5.4. Τύποι ιχνηλάτησης του ήλιου σε διπλό άξονα. (α) Ιχνηλάτης δύο αξόνων με την παρακολούθηση των συντεταγμένων του ύψους και αζιμούθιου που τοποθετείται σε ένα βάθρο. (β) Ρύθμιση παρακολούθησης περιστροφής-κλίσης που χρησιμοποιεί τον κεντρικό σωλήνα ροπής. (γ) Ρύθμιση παρακολούθησης περιστροφής-κλίσης που χρησιμοποιεί πλαίσια μονάδων. (δ) Ιχνηλάτης δύο αξόνων περιστροφικών επιφανειών



Εικόνα 5.5. Τύποι ιχνηλατικής του ήλιου ένας άξονα. (α) Οριζόντιος ιχνηλάτης ενός άξονα με την κυλινδροπαραβολικό κάτοπτρο. (β) πολικός ιχνηλάτης ενός άξονα με το κυλινδροπαραβολικό κάτοπτρο.

Αξίζει να σημειώσουμε πως υπάρχουν γεωμετρικές διατάξεις συγκεντρωτικών συστημάτων που δεν χρησιμοποιούν ιχνηλάτηση του ήλιου. Σε γενικές γραμμές, είναι δυνατό να υπάρξει συγκέντρωση χωρίς την χρήση ιχνηλάτησης του ήλιου. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν συνήθως την μη γραμμική οπτική όπως το σύνθετο παραβολικό συγκεντρωτικό σύστημα (CPC) που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.6



Εικόνα 5.6. Μια από τις πολλές στατικές γεωμετρίες συγκεντρωτικών μέσων. Σε αυτήν την περίπτωση ένας διπλής όψης απορροφητής, είναι τοποθετημένος στο σημείο εστίασης ενός συστήματος CPC.

Η γοητεία των ακίνητων συγκεντρωτικών συστημάτων είναι πράγματι μεγάλη, λόγω της μη απαιτούμενης παρακολούθησης του ήλιου, με αποτέλεσμα την οικονομικά αποδοτικότερη χρήση τους για συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Δυστυχώς όμως, κανένα σχέδιο ακίνητων συγκεντρωτικών μέσων δεν έχει βρεθεί ακόμα όπου το προστιθέμενο κόστος του συγκεντρωτικού μέσου να είναι λιγότερο από το επιπρόσθετο ενεργειακό κέρδος που επιτυγχάνεται μέσω της συγκέντρωσης. Η ανακάλυψη και η ανάπτυξη ενός πρακτικού, οικονομικώς αποδοτικού ακίνητου συγκεντρωτικού μέσου θα ήταν μια σημαντική συμβολή για την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών.

5.3 Οπτική των συγκεντρωτικών μέσων

Η βασική ιδέα της υψηλής συγκέντρωσης με χρήση των ανακλαστικών ή διαθλαστικών μέσων είναι εννοιολογικά απλή. Αυτό που επιδιώκεται είναι να συγκεντρωθεί το φως του ήλιου όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερα επάνω σε έναν

δέκτη που είναι μικρότερος από το άνοιγμα εισόδων του συγκεντρωτικού μέσου. Σαν περαιτέρω απαίτηση, είναι να φωτιστεί ο δέκτης όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα καθώς και η γωνία αποδοχής του συστήματος να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Αυτό ελαχιστοποιεί την ακρίβεια με την οποία το συγκεντρωτικό μέσο πρέπει να προσανατολίζεται ως προς τον ήλιο. Αυτοί οι παράγοντες, που είναι γενικά διαφορετικοί από αυτούς που αντιμετωπίζονται για τον σχεδιασμό κλασσικών οπτικών συστημάτων, κέντρισαν το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών και έκαναν την αρχή για έναν νέο κλάδο της οπτικής, την αποκαλούμενη **οπτική μη ευκρινούς ειδώλου.**

5.3.1 Βασικά

Ένα από τα πιο αξιοπρόσεκτα θεωρήματα της οπτικής μη ευκρινούς ειδώλου είναι ότι υπάρχει μια σχέση μεταξύ της μέγιστης γωνίας αποδοχής του συγκεντρωτικού συστήματος και της μέγιστης εφικτής συγκέντρωσης, C_{max} . Εξετάζοντας τη παρακάτω γενικευμένη σχηματική αναπαράσταση ενός συγκεντρωτικού συστήματος που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.7, βλέπουμε πως το φως που εισέρχεται από το άνοιγμα εισόδου, εμβαδού A_{conc} διαγωνίως, με γωνία μικρότερη της $\theta_{max,in}$, διαβιβάζεται στο άνοιγμα εξόδου όπου βρίσκεται ο δέκτης επιφάνειας A_{rec} , και εξέρχεται διαγωνίως με γωνία μικρότερη της $\theta_{max,out}$. Για τα συγκεντρωτικά συστήματα ενός άξονα, ή αλλιώς δισδιάστατα, ισχύει η σχέση:

$$C = \frac{A_{conc}}{A_{rec}} \le C \max = \frac{\sin(\theta \max, out)}{\sin(\theta \max, in)}$$

Για τα συγκεντρωτικά συστήματα δύο αξόνων, ή αλλιώς τρισδιάστατα, ισχύει η σχέση:

$$C = \frac{A_{conc}}{A_{rec}} \le C \max = \frac{n}{\sin (\theta \max, in)}$$

Εάν ο δέκτης είναι βυθισμένος σε ένα διηλεκτρικό μέσο με δείκτη διάθλασης *n*, οι παραπάνω σχέσεις παίρνουν την μορφή:

$$C = \frac{A_{conc}}{A_{rec}} \le C_{\max} = n \frac{\sin (\theta_{\max,out})}{\sin (\theta_{\max,in})}$$



Εικόνα 5.7. Σχηματική αναπαράσταση ενός γενικευμένου συγκεντρωτικού μέσου

Και

$$C = \frac{A_{conc}}{A_{rec}} \le C \max = n^2 \frac{\sin^2(\theta \max, out)}{\sin^2(\theta \max, in)}$$

Ένα συγκεντρωτικό σύστημα που επιτυγχάνει αυτό το μέγιστο καλείται *ιδανικό* συγκεντρωτικό σύστημα.

Προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη συγκέντρωση, είναι απαραίτητο να υπάρξει μια γωνία $\theta_{max,out}$ τόσο μεγάλη όσο και πρακτική. Το μέγιστο που θα μπορούσε να είναι 90[°], αλλά ακόμη και για γωνίες που πλησιάζουν την τιμή αυτή, παρουσιάζονται προβλήματα πρακτικότητας, μιας και οι ακτίνες μπορούν εύκολα να αποκλίνουν από το στόχο, εξ αιτίας μηχανικών λαθών ευθυγράμμισης. Οι ανωτέρω εξισώσεις συναντώνται συχνά, για $\theta_{max,out} = 90^{°}$, και γίνονται:

$$C = \frac{A_{conc}}{A_{rec}} \le C \max = \frac{n}{\sin (\theta \max, in)}.$$

Και

$$C = \frac{A_{conc}}{A_{rec}} \le C \max = \frac{n^2}{\sin^2(\theta \max, in)}.$$

92

στην και τρισδιάστατη περίπτωση, αντίστοιχα. Δηλαδή, δισδιάστατη ένα συγκεντρωτικό σύστημα το οποίο έχει γωνία αποδοχής τη μισή γωνία του ήλιου όπως φαίνεται από τη γη, περίπου 1/4°, θα μπορούσε να επιτύχει μια μέγιστη συγκέντρωση ίση με 200 στη δισδιάστατη περίπτωση και 40.000 στην τρισδιάστατη περίπτωση. Ένα τέτοιο συγκεντρωτικό σύστημα, θα δεχόταν το φως μόνο άμεσα από τον ηλιακό δίσκο (άμεση ακτινοβολία), ενώ ακτινοβολία από την υπόλοιπη περιοχή του ουρανού (διάχυτη ακτινοβολία), δεν θα έφθανε στο δέκτη. Άρα, μια συγκέντρωση της τάξης του 40.000 επιτυγχάνει στο δέκτη ακτινοβολία, πυκνότητας ισχύος της τιμής της επιφάνειας του ήλιου. Αυτό οδηγεί σε μια απλή απόδειξη των ανωτέρω εξισώσεων. Υποθέτοντας ότι έχουμε ένα θερμό σφαιρικό σώμα, ξέρουμε ότι έχουμε μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία (ακτινοβολία μέλαν σώματος). Ένα μέρος της ακτινοβολίας παρεμποδίζεται από ένα συγκεντρωτικό σύστημα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.8.



Εικόνα 5.8. Γεωμετρία ενός θερμού σφαιρικού σώματος που ακτινοβολεί και ενός συγκεντρωτικού συστήματος.

Eάν r_1 είναι η ακτίνα του θερμού σώματος και r_2 είναι η απόσταση του συγκεντρωτικού συστήματος από το κέντρο του θερμού σώματος, είναι σαφές ότι sinθ_{max, in} = r_1/r_2 . Υποθέτοντας ότι το θερμό σώμα συμπεριφέρεται σαν μέλαν σώμα, τότε η συνολική πυκνότητα ισχύος στην επιφάνεια του θερμού σώματος είναι P_{rad} = σT_s^4 , όπου σ είναι η σταθερά του Stefan Boltzmann και T_s είναι η θερμοκρασία του θερμού σώματος. Με την χρήση απλής γεωμετρίας υπολογίζεται ότι η πυκνότητα ισχύος στην είναι και τη πυκνότητα ισχύος στην είναι η $P_{conc} = (r_1/r_2)^2 P_{rad} = \sin^2 \theta_{max in}$, P_{rad} . Η πυκνότητα ισχύος στο δέκτη είναι απλά αυτή της εισόδου του συγκεντρωτικού μέσου, πολλαπλασιασμένη με τον λόγο συγκέντρωσης, δηλαδή $P_{rec} = Csin^2 \theta_{max in} P_{rad}$.

Υποθέτοντας ότι ο δέκτης είναι ένα μέλαν σώμα που μονώνεται έτσι ώστε η μόνη απώλεια θερμότητάς του είναι μόνο μέσω θερμικής ακτινοβολίας από την πίσω επιφάνεια, ο δέκτης θα θερμανθεί έως ότου ο ρυθμός απώλειας ενέργειας μέσω θερμικής ακτινοβολίας, να εξισορροπηθεί με τον ρυθμό απολαβής. Αυτό θα συμβεί όταν ο δέκτης βρεθεί σε μια θερμοκρασία τέτοια, ώστε $P_{rec} = \sigma T_r^4$. Εξισώνοντας αυτό με την σχέση της ισχύος που λαμβάνει ο δέκτης, έχουμε:

$$\Pr_{ec} = \sigma Tr^{4} = C \sin^{2} \theta \max, \text{ in } \Pr_{ad} = C \sin^{2} \theta \max, \text{ in } \sigma T\sigma^{4}.$$

$$\Pr_{ec} = \sigma Tr^{4} = C \sin^{2} \theta \max, \text{ in } \Pr_{ad} = C \sin^{2} \theta \max, \text{ in } \sigma T\sigma^{4}$$

$$H$$

$$C = \frac{T_r^4}{T_s^4} \frac{1}{\sin^2 \theta_{\max,in}}.$$

Όσο αναφορά το θερμοδυναμικό μέρος, πρέπει να ισχύει **T**_R < **T**_S, ειδάλλως θα υπήρχε μεταφορά θερμότητας από μια πηγή χαμηλότερης θερμοκρασίας, σε έναν δέκτη υψηλότερης θερμοκρασίας χωρίς κατανάλωση έργου, κάτι που θα ερχόταν σε παραβίαση με τον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής. Η παρεμβολή αυτής της ανισότητας στην ανωτέρω εξίσωση δίνει:

$$C \leq C \max \frac{1}{\sin^2 \theta \max, in}.$$

Η προέλευση του n^2 στην εξίσωση συγκέντρωσης μπορεί να φανεί από το γεγονός ότι σε ένα διηλεκτρικό μέσο, ο νόμος του Stefan Boltzmann γίνεται $P = n^2 \sigma T^4$. Ο παράγοντας n^2 προέρχεται από το γεγονός ότι η τρισδιάστατη ηλεκτρομαγνητική πυκνότητα αυξάνεται κατά n^3 , εξ αιτίας της μείωσης του μήκους κύματος και κατά συνέπεια της ταχύτητας του φωτός κατά 1/n. Επομένως, στη θερμική ισορροπία, η πυκνότητα των φωτονίων αυξάνεται κατά n^3 , αλλά ο αριθμός φωτονίων που διαπερνούν μια επιφάνεια ανά μονάδα χρόνου, και ως εκ τούτου η δύναμη που διασχίζει αυτήν την επιφάνεια, αυξάνεται μόνο *κατά* n^2 .

Η ιστορία των συγκεντρωτικών συστημάτων είναι κορεσμένη με προτεινόμενα συγκεντρωτικά συστήματα που επιτυγχάνουν τιμές υψηλής συγκέντρωσης χωρίς την παρακολούθηση του ήλιου, δηλαδή να δέχεται το σύστημα το φως από οποιοδήποτε σημείο στον ουρανό. Οι περισσότερες αναφορές μέγιστης θεωρητικής συγκέντρωσης είναι βασισμένες στη γεωμετρική οπτική, αλλά η θερμοδυναμική υπόσταση αυτού του θεωρήματος όμως, δείχνει ότι η αναζήτηση ενός συγκεντρωτικού συστήματος υψηλής συγκέντρωσης χωρίς την χρήση ηλιακού ιχνηλάτη είναι δύσκολη, έως απίθανη. Με τον περιορισμό των γωνιών αποδοχής στην περιοχή του ουρανού όπου ο ήλιος βρίσκεται πραγματικά, είναι δυνατές οι συγκεντρώσεις της τάξης του 2-2,5. Εάν ο δέκτης είναι βυθισμένος σε έναν διηλεκτρικό μέσο με *n* = 1,4, μπορεί ακόμα να επιτευχθεί αύξησης στο 3-4. Αυτό σημαίνει ότι είναι δυνατό σε γενικές γραμμές να επιτευχθούν λόγοι συγκέντρωσης για ένα εύρος 2-4, χωρίς την χρήση ηλιακού ιχνηλάτη για λειτουργία της συσκευής καθ όλη την διάρκεια του έτους.

5.3.2 Ανάκλαση και διάθλαση

Τα περισσότερα συγκεντρωτικά συστήματα χρησιμοποιούν την ανάκλαση, τη διάθλαση, ή έναν συνδυασμό και των δύο για να επιτύχουν τη συγκέντρωσή τους καθώς και την γεωμετρική οπτική για την ανάλυσή τους. Μερικοί τύποι συστημάτων χρησιμοποιούν συστήματα σύνθετης διάθλασης ή υλικά μεταβλητού δείκτη διάθλασης. Οι νόμοι που διέπουν τις προσπίπτουσες ηλιακές ακτίνες στις ανακλαστικές και διαθλαστικές επιφάνειες είναι γνωστοί: η γωνία ανάκλασης, είναι ίση με τη γωνία πρόσπτωσης στην περίπτωση της ανακλαστικής επιφάνειας και του νόμου Snell στην περίπτωση της διαθλαστικής επιφάνειας. Για την τρισδιάστατη ανάλυση, μια διανυσματική διατύπωση είναι απαραίτητη. Τα σχήματα 5.9 και 5.10 απεικονίζουν τις προσπίπτουσες και ανακλώμενες ακτίνες σε μια ανακλαστική επιφάνεια με μοναδιαίο διάνυσμα **π**. Μια διανυσματική μορφή που εκφράζει αυτό είναι η εξής:

$$\vec{r_r} = \vec{r_i} + 2(\vec{n} \Box \vec{r_i}).$$

Στην περίπτωση όπου μια ακτίνα προσπίπτει στο όριο μεταξύ δύο διηλεκτρικών μέσων, ισχύει ο νόμος του Snell. Αυτό εκφράζεται ως $n_2 sin \theta_2 = n_1 sin \theta_1$. Μια διανυσματική μορφή που εκφράζει αυτό είναι εξής:

$$\vec{n_1r_1} \times \vec{n} = n_2\vec{r_2} \times \vec{n}$$
.

Οι απλές γεωμετρικές μορφές μπορούν εύκολα να αναλυθούν χρησιμοποιώντας αυτές τις σχέσεις, αλλά η σύγχρονη τεχνική υποδεικνύει την χρήση

προγραμμάτων ανίχνευσης ακτίνων (ray-tracing) που λύνουν αυτές τις εξισώσεις αριθμητικά. Αυτό επιτρέπει την ενσωμάτωση διάφορων ατελειών, όπως την κυματώδη των επιφανειών και μπορεί να δώσει γραφικές αναπαραστάσεις την έντασης στο δέκτη, και τα λοιπά



Εικόνα 5.9. Διανυσματική απεικόνιση της ανάκλασης



Εικόνα 5.10. Διανυσματική απεικόνιση της διάθλασης

5.4 Διαθλαστικοί φακοί Fresnel

Οι διαθλαστικοί φακοί αποτελούν μια εναλλακτική χρήση, έναντι των ανακλαστικών συστημάτων. Ένας τέτοιος φακός παρουσιάζεται στο σχήμα 5.11. Οι φακοί μπορούν να αναλυθούν με την τεχνική ray-tracing χρησιμοποιώντας το νόμο του Snell. Στην συγκεκριμένη περίπτωση του παρακάτω σχήματος, ένας

επιπεδόκυρτος φακός, μπορεί να αναλυθεί με χρήση της αρχής του Fermat, η οποία δηλώνει ότι όλες οι ακτίνες που προσπίπτουν στην εστία, διανύουν το ίδιο οπτικό μήκος.



Εικόνα 5.11. Γεωμετρία διαθλαστικών φακών

Εξισώνοντας το οπτικό μήκος των δύο ακτίνων του σχήματος, ισχύει:

$$F + (n-1)t = \sqrt{(F-y)^2 + x^2} + ny$$

Αυτή είναι η εξίσωση της υπερβολής. Ένας τέτοιος φακός καλείται μησφαιρικός για να διαφοροποιηθεί από τον κλασσικό σφαιρικό φακό, που είναι μια προσέγγιση του ανωτέρω, για μεγάλο **F** και μικρό **x**. Το πάχος του φακού, μπορεί να συσχετιστεί με το παράγοντα **f**, θέτοντας x = D/2. Έτσι έχουμε:

$$\frac{t}{D} = \frac{\sqrt{\frac{F^2}{D^2} + \frac{1}{4}} - \frac{F}{D}}{n-1}.$$

Ένα σοβαρό πρόβλημα σε έναν τέτοιο φακό, είναι ότι γίνεται παχύς για μικρές τιμές του *f*. Παραδείγματος χάριν, για *F/D* = 1 και *n* = 1.5, υπολογίζεται ότι t/D = 0.24. Εάν ο φακός έχει μια διάμετρο 10 cm, κατόπιν το πάχος θα είναι 2.4 cm, με συνέπεια την ύπαρξη κατασκευαστικών δυσκολιών. Για μικρούς φακούς, με διάμετρο της τάξης μερικών εκατοστών, το πάχος είναι ικανοποιητικό.

Για τους μεγαλύτερους φακούς χρησιμοποιείται μια κατασκευαστική τεχνική, πολλών επιφανειών, διαφορετικού μήκους και γωνίας πρόσπτωσης, που διαμορφώνουν το φακό Fresnel του σχήματος 5.12. Λόγω της ανάγκης για υψηλές οπτικές επιφάνειες στις κοίλες πλευρές, έχει αποδειχθεί δύσκολο να κατασκευαστούν τέτοιοι φακοί υψηλής διαπερατότητας.



Εικόνα 5.12. Κάτοψη ενός φακού Fresnel

Οι φακοί Fresnel δεν συγκεντρώνουν όλο το φως που προσπίπτει σ 'αυτούς, στην εστία. Κατ' αρχάς, η ανάκλαση από τις οπτικές διεπαφές του Fresnel, προκαλεί την απώλεια ενός ποσοστού 8% των ακτίνων φωτός που προσπίπτουν στο σύστημα. Αυτό μπορεί ενδεχομένως να μειωθεί με την χρήση αντι-ανακλαστικών επιφανειών. Δεύτερον, οι κάθετες περιοχές μεταξύ των επιφανειών, δεν μπορούν να είναι απολύτως κάθετες με αποτέλεσμα, το φως που χτυπά αυτήν την περιοχή, να εκτρέπεται από την εστία. Έτσι, όσο μικρότερες είναι οι επιφάνειες διάθλασης, τόσο σημαντικότερη αυτή η απώλεια είναι. Οι σύγχρονες κατασκευαστικές μέθοδοι έχουν επιτύχει οπτική διαπερατότητα της τιμής του 85%.

5.5 Οπτικός Συγκεντρωτής για ένα HCPV Σύστημα

Το οπτικό σύστημα είναι θεμελιώδες στοιχείο των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών συστημάτων. Διαφορετικοί τύποι οπτικής ιάνει υπό ανάπτυξη και περιλαμβάνουν διαθλαστικά και αντανακλαστικά στοιχεία.

Μια ιδανική οπτική για ένα HCPV σύστημα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Υψηλή Συγκέντρωση
- Χαμηλό Κόστος
- Υψηλή οπτική απόδοση σε όλο το φάσμα μήκους κύματος
- Επαρκή ομοιομορφη ακτινοβολία σε όλο το φάσμα μήκους κύματος
- Μακροχρόνια αντοχή
- Υψηλή γωνία αποδοχής

Μια υψηλή γωνία αποδοχής απαιτείται να:

- Μειώσει την ακαμψία του tracker
- Χαλαρώσει την οπτική ακρίβεια
- Χαλαρώσει τις ανοχές στην μονάδα συναρμολόγησης και το πεδίο εγκατάστασης
- Μειώνει τις απώλειες

Μεταξύ της απόδοσης των κελιών CPV και της τιμής απόδοσης της μονάδας, υπάρχει μια διαφορά της τάξης του 10 μονάδων: για παράδειγμα, οι τιμές απόδοσης της μονάδας είναι περίπου 26-28%, όταν τα αρχικά κύτταρα MJ τιμές απόδοσης είναι περίπου 33-38%. Μέχρι στιγμής, οι φακοί Fresnel που κατασκευάζονται από πυρίτιο έχουν εφαρμοστεί σε μονάδες CPV εστιακού σημείου για το χαμηλό κόστος τους. Σε υψηλά επίπεδα συγκέντρωσης (500 X) έχει αποδειχθεί ότι παράγει μη ομοιόμορφη χωρική κατανομή φωτός στο εστιακό επίπεδο.

Το προφίλ έντασης του φωτός απέχει αρκετά ώστε να γίνει επίπεδο καθώς και η χρωματική εκτροπή εξαρτάται από το δείκτη διάθλασης μπορούν να εισαγάγουν πιθανή αναντιστοιχία, σημερινά προβλήματα σε MJ ηλιακά κύτταρα. Σε υψηλή συγκέντρωση η γωνία αποδοχής των φακών μπορεί να είναι αρκετά μειωμένη (± 0,47°) και οι απαιτήσεις ιχνηλάτησης είναι πιο αυστηρές. Αυτό με τη σειρά του επιτυγχάνει μία αύξηση στο κόστος του HCPV συστήματος.

Προκειμένου το κόστος CPV να φτάσει σε ανταγωνιστικό επίπεδο, δευτερεύοντα στοιχεία οπτικής, (SOE) εισάγονται τα τελευταία χρόνια. Χρησιμοποιούνται ως ένα δεύτερο στάδιο οπτικής κάτω τον οπτικό κύριο φακό και μπορεί να ομογενοποιήσει

το φάσμα προσπίπτοντος φωτός πάνω από την ηλιακή επιφάνεια των κυττάρων, καθώς και να αυξήσει τη γωνία αποδοχής. Εκτός από τους φακούς Fresnel, άλλες ενδιαφέρουσες οπτικές λύσεις, εξακολουθούν να βρίσκονται υπό το ενδιαφέρον της κοινότητας CPV. Ένα από αυτά είναι οι υπό ανάπτυξη πρισματικοί / υβριδικοί φακοί από το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα ΑΠΟΛΛΩΝ από την ΕΝΕΑ / CRP.

6 Απόδοση ΗCPV

Στα περισσότερα φωτοβολταϊκά συστήματα υψηλής συγκέντρωσης χρησιμοποιούνται III-V cells διάστασης 1 cm² και συγκέντρωσης 470-2000x, ενώ για οπτικά μέσα τοποθετούνται Fresnel lens προκειμένου να επιτευχθεί αύξηση της απόδοσης προκειμένου να γίνουν ανταγωνιστικά σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες.

6.1 Απόδοση κελιού (cell)

Απόδοση κελιού ορίζεται ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος (P) που δίνει το κελί προς την ηλιακή ακτινοβολία (G_x) που πέφτει στην επιφάνειά του (A_R). Δίδεται από τον τύπο:

$$\eta_{cell} = \frac{P(W)}{G_x(W / m^2)A_R(m^2)}$$

Η μέγιστη απόδοση κελιού που επιτεύχθηκε σε εργαστηριακές μελέτες είναι μέχρι σήμερα 43,5%. Τα κελιά που διατίθενται στην αγορά κυμαίνονται από 27-40%. Η απόδοση του κελιού εξαρτάται από το συντελεστή συγκέντρωσης. Στην εικόνα 6.1 παρατηρούμε ότι τα Multijunction Cells παρουσιάζουν μέγιστη απόδοση 39% με συντελεστή συγκέντρωσης 500-600x, σε αντίθεση με τα Silicon Cells τα οποία παρουσιάζουν μέγιστη απόδοση 27% με συντελεστή συγκέντρωσης 100x.



Εικόνα 6.1. Αποδόσεις κελιών σε σχέση με τον συντελεστή συγκέντρωσης για διαφορετικές τεχνολογίες φ/β.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρείται μείωση της απόδοσης λόγω αύξησης της θερμοκρασίας γι αυτό το λόγο πρέπει να αποφεύγεται η υπερθέρμανση των υλικών όταν τα κελιά εκτίθενται σε υψηλή ακτινοβολία. Η εξάρτηση της απόδοσης από τη θερμοκρασία κελιού Τς εκφράζεται ως εξής:

$$\eta_c = \eta_0 - \beta(\mathbf{T}_c - T_{ref}).$$

Όπου **η**₀ η απόδοση κελιού στη θερμοκρασία αναφοράς (**T**_{ref}) και **β** ο συντελεστής θερμοκρασίας της απόδοσης.



Εικόνα 6.2. Απόδοση Multijunction Cell σε σχέση με το συντελεστή συγκέντρωσης για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας.

6.2 Απόδοση Μονάδας (Module)

Η απόδοση της μονάδας (module) δίνεται από όμοιο τύπο με αυτή του κελιού με τη διαφορά χρησιμοποιεί την επιφάνεια της μονάδας A_m.

$$\eta \mod = \frac{P(W)}{G_x(W / m^2)A_m(m^2)}$$

Η απόδοση της μονάδας εκφράζεται και ως συνάρτηση της οπτικής απόδοσης ηορ, απόδοσης κελιού ηcell και των απωλειών που εμφανίζονται στη μονάδα (καλωδίωσης, ανομοιότητας,κλπ). Η σχέση εκφράζεται:

$$\eta \mod = \eta_{cell} \cdot \eta_{op} \cdot (1-L)$$
.

Η απόδοση μονάδας είναι χαμηλότερη από εκείνη που υπολογίζεται για τα κελιά που συνθέτουν τη μονάδα, και αυτό οφείλεται κυρίως:

- Στην σειριακή-παράλληλη σύνδεση των κελιών που δίνει στη μονάδα τη κατάλληλη ισχύ. Η συμπεριφορά των κελιών δεν είναι ίδια, αυτό προκαλείται από τις μικρές διαφορές στην διαδικασία κατασκευής τους. Αυτό προκαλεί το αποκαλούμενο πρόβλημα της ανομοιότητας, όπου το κελί με τη χειρότερη ποιότητα και απόδοση καθορίζει τη λειτουργική συμπεριφορά της υπόλοιπης μονάδας, μειώνοντας έτσι τη συνολική απόδοση της μονάδας.
- Στο οπτικό μέσο που χρησιμοποιείται το οποίο έχει κάποιες απώλειες στη μετάδοση της εισερχόμενης ακτινοβολίας από την επιφάνειά του στην περιοχή του κελιού. Αυτό προκαλείται κυρίως από τα μη ιδανικά χαρακτηριστικά του

οπτικού υλικού, όπως διαπερατότητα, απορρόφηση, συντελεστή αντανάκλασης, καθώς και το μηχανισμό συγκέντρωσης που έχει επιλεγεί. Παρά τις απώλειες, η παρούσα οπτική τεχνολογία φτάνει αποδόσεις γύρω στο 85%.

Οι παραπάνω παράγοντες προκαλούν τις μεγάλες διαφορές στην απόδοση κελιού-μονάδας. Η απόδοση μονάδας (module) που δίνεται από τους κατασκευαστές κυμαίνεται από 20-30% σε συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας 400x με 700x, ενώ για μεγάλες συγκεντρώσεις ηλιακής ακτινοβολίας 1400x έως 2000x η απόδοση φτάνει στα 34%.

6.3 Απόδοση Συστήματος

Η απόδοση του συστήματος είναι η σχέση μεταξύ της ισχύος που παράγεται από το σύστημα και της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας. Ο ορισμός της απόδοσης του συστήματος είναι παρόμοια με εκείνη που περιγράφεται για τη μονάδα, έτσι ώστε, λαμβάνοντας υπόψη την περιοχή γεννήτριας (A_G) και τη μέση τιμή της ακτινοβολίας στην επιφάνειά της (G_I), η απόδοση είναι:

$$\eta_{sys} = \frac{P(W)}{G_I(W/m^2)A_G(m^2)}.$$

Η απόδοση του συστήματος μπορεί επίσης να εκφραστεί ως μια συνάρτηση της απόδοσης μονάδας και των απωλειών (L) στα υπόλοιπα στοιχεία (απόδοση BOS), αυτή είναι:

$$\eta_{sys} = \eta_{mod} \cdot \eta_{BOS} \cdot (1-L)$$

Το ολοκληρωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα παρουσιάζει αποδόσεις λίγο μικρότερες από τις αποδόσεις μονάδας από 17-30% και εξαρτάται από την εγκατάσταση.

6.4 Σύγκριση αποδόσεων διαφορετικών τεχνολογιών

Στο παρακάτω διάγραμμα γίνεται μια σύγκριση πειραματικών αποδόσεων διαφορετικών τεχνολογιών από το 1992 μέχρι και σήμερα. Παρατηρούμε οτι μέχρι το 2002 στα Multijunction cells η απόδοσή τους αυξάνεται με πολύ αργό ρυθμό και στη συνέχεια παρουσιάζει μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης σε αντίθεση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες όπου έχουμε ελάχιστη αύξηση της απόδοσης.



Εικόνα 6.3. Πειραματική απόδοση κελιών διαφορετικών τεχνολογιών

6.5 Πρόβλεψη απόδοσης

Η απόδοση των Multijunction Cells αυξάνεται καθώς αυξάνοντα τα επίπεδα ετεροεπαφών στη στοίβα. Όμως, η σχετική αύξηση της απόδοσης μειώνεται κάθε φορά που πολλαπλασιάζονται τα κελιά λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος η οποία είναι υψηλότερη κάθε φορά που προστίθεται ένα κελί. Στην πράξη λοιπόν καθίσταται απίθανο να υπάρχουν περισσότερα από 5-6 στην ίδια στοίβα.

Λαμβάνοντας υπόψη την ιστορική εξέλιξη της αποτελεσματικότητας των κυττάρων και τις εκτιμήσεις που έγιναν από τους κατασκευαστές CPV, η εξέλιξη της απόδοσης των κυττάρων που προβλέπεται μέχρι το 2015 όπως παρουσιάζεται παρακάτω. Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι για τα δεδομένα απόδοσης κυττάρων που δημοσιεύονται από τους κατασκευαστές, καθώς και για τις προβλεπόμενες τιμές από τις εταιρείες αυτές, δεν διευκρινίζουν αν τα στοιχεία αυτά προέρχονται από κελιά με μέγιστη απόδοση (ρεκόρ), από κελιά εργαστηρίου ή εμπορικά κελιά, έτσι η πρόβλεψη της απόδοσης φαίνεται στην εικόνα 6.5, και είναι μεταξύ των τάσεων των εμπορικών κελιών και των κελιών ρεκόρ.





Εικόνα 6.4. Πρόβλεψη Απόδοσης κελιού έως το 2015.

Η πιθανή βελτίωση στη μέθοδο παρασκευής των HCPV στοιχείων καθώς και τα νέα σχέδια που επιτυγχάνονται, οδηγεί την πρόβλεψη της ενεργειακής απόδοσης να έχει υψηλό ρυθμό μάθησης, πράγμα που σημαίνει ότι μέσα στα επόμενα χρόνια, τα HCPV στοιχεία θα παρουσιάσουν σημαντική βελτίωση όσον αφορά την ενέργεια.

Αν αναλύονται τα διάφορα μέρη του συστήματος HCPV, μια πρόβλεψη μπορεί να εκδοθεί. Η πρόβλεψή μας βασίζεται σε μια ανάλυση των η εξέλιξη της τεχνολογίας, την ιστορική εξέλιξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων και των εμπορικών στόχων των κατασκευαστών, καθώς και της ανάλυσης καθώς και την ανάλυση των δημόσιων φορέων που εμπλέκονται στην προώθηση αυτής της τεχνολογίας. Μία βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη απόδοσης φαίνεται στην εικόνα 6.4, όπου τα εμπορικά κελιά θα φτάσουν σε επίπεδα απόδοσης έως και 50%, απόδοση μονάδας 35% και απόδοση συστήματος μέχρι 32%, η οποία ουσιαστικά θα συνεπάγεται μία ουσιαστική μείωση του κόστους κατασκευής.

Απόδοση	Απόδοση 2012	Πρόβλεψη 2015
Cells	30-41%	42-50%
Modules	20-30%	30-40%
Systems	18-30%	25-32%

Εικόνα 6.5. Πίνακας Προβλεπόμενης Απόδοσης.
7 Μελέτη Κόστους ΗCPV

7.1 Συναρτήσεις κόστους

Σε μια μελέτη μπορούν να ληφθούν υπ' όψιν διαφορετικές συναρτήσεις υπολογισμού κόστους. Μια έννοια είναι το Leverized Cost Of Energy (LCOE) το οποίο ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ενέργειας και κόστους συστημάτων παραγωγής. Το εγκατεστημένο λειτουργικό κόστος συν το κόστος λειτουργίας και συντήρησης κατά τη διάρκεια της ζωής (lifetime) του φ/β συστήματος δια την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το σύστημα στη λειτουργική διάρκεια ζωής του, συνήθως 25 χρόνια, και δίνεται σε μονάδες cent / (kWh).

Ο υπολογισμός του LCOE είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος λόγω του κόστους εγκατάστασης λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος, των τοπικών ηλιακών πόρων και κλίματος, του προσανατολισμού φωτοβολταϊκών πάνελ. Εξαρτάται επίσης από θέματα χρηματοδότησης, τη διάρκεια ζωής του συστήματος, τη φορολογία και την πολιτική. Έτσι, οι εκτιμήσεις LCOE ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με τις παραδοχές που έγιναν κατά την ανάθεση τιμών σε αυτές τις μεταβλητές. Για την επίτευξη χαμηλών τιμών LCOE κόστους απαιτείται κατώτερο αρχικό κεφαλαιουχικό κόστος σε αντίθεση με τα συμβατικά φ/β, καθώς υψηλός όγκος παραγωγής και υψηλή απόδοση. Σήμερα οι εταιρείες έχουν HCPV έργα για δεκάδες MW και η αναμενόμενη ετήσια παραγωγή του συστήματος HCPV θα είναι περίπου 100 εκατ. ευρώ το 2020, με τιμή εγκατάστασης συστήματος HCPV των 1,5 € / W.

Μια διαφορετική προσέγγιση του κόστους του συστήματος είναι το κόστος ανά Watt παραγόμενης ισχύος. Όμως αυτό εξαρτάται από το σχεδιασμό του συστήματος HCPV του κάθε κατασκευαστή. Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει αυτό το κόστος είναι η πραγματική συγκέντρωση που χρησιμοποιείται για παράδειγμα, το κόστος ανά watt για το κελί όταν 100W/cm² (συγκέντρωση 1000x) θα είναι σχεδόν το μισό από το κόστος ανά watt για ένα κελί στα 50W/cm². Εκτός από τη συγκέντρωση του συστήματος, ένας άλλος βασικός παράγοντας είναι η απόδοση των HCPV Modules, το σύστημα ψύξης καθώς και οι οπτικές και ηλεκτρικές απώλειες οι οποίες παρατηρούνται συνήθως στις αποδόσεις πάνελ των 25 με 32% σε διαφορετικές εταιρείες CPV που χρησιμοποιούν όλες το ίδιο κελί. Υπάρχουν πολλοί άλλοι

παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος, όπως η ακρίβεια των ανιχνευτών (trackers), η γεωγραφική θέση (γεωγραφικό πλάτος και μήκος), το μέτρο της κάθετης ακτινοβολίας DNI στο χώρο εγκατάστασης και η φασματική διακύμανση όλη την ημέρα / έτος. Όλα αυτά είναι παράγοντες που οι σχεδιαστές του συστήματος CPV εξετάζουν και αναλύουν πριν τη λήψη αποφάσεων για τον κάθε σχεδιασμό. Στην εικόνα 7.1 παρουσιάζεται μια ανάλυση κόστους HCPV συστήματος στην Ισπανία λαμβάνοντας όγκο παραγωγής 50MW.



Εικόνα 7.1. Multijunction cell με απόδοση 40 %, συντελεστή συγκέντρωσης 960x, όγκο παραγωγής 50 MW και cost/W= €1.5.

Επίσης, από ήδη υπάρχουσα μελέτη προέκυψε το πόρισμα ότι το κλειδί για πραγματική αντιστάθμιση του κόστους έγκειται στη λειτουργία με μεγάλη συγκέντρωση. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στην παρακάτω εικόνα. Παρατηρούμε ότι ειδικά για συνολική παραγωγή κάτω των 10 MW, η συγκέντρωση παίζει τεράστιο ρόλο στο τελικό κόστος του φ/β συστήματος. Για παράδειγμα, η τελική τιμή μίας εγκατάστασης που λειτουργεί στους 400x είναι κατά 1 €/W υψηλότερη από μία στους 1000x, ανεξάρτητα από **την απόδοση των κελιών της τελευταίας.**

Επιπροσθέτως, είναι ξεκάθαρη η πτώση στην τελική τιμή καθώς αυξάνεται η παραγωγή και λειτουργούν οι καμπύλες εκμάθησης δηλαδή 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.



Εικόνα 7.2. Ονομαστικό κόστος ενός ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού πάρκου με πολυσυνδετικά κελιά. Οι συγκεντρώσεις είναι από 400-1500x. Απεικονίζονται δύο διαφορετικά σενάρια: α) μαύρες καμπύλες είναι για συνολική παραγωγή 10 MW, β) γκρί καμπύλες είναι για συνολική παραγωγή 1000 MW. Στις γκρι επεισέρχεται ο παράγοντας εκμάθησης.

7.2 Συνάρτηση Κόστους Κελιού (cell)

Στην παρούσα διπλωματική γίνεται μια ανάλυση κόστους του HCPV cell για συγκεκριμένη παραγόμενη ισχύ. Στην εικόνα 7.3 φαίνεται το ένα ηλιακό κελί επιφάνειας μαζί με το φακό Fresnel. Στην εικόνα 7.4 φαίνεται μια σύγκριση μεγέθους του κρυσταλλικού κελιού πυριτίου με III-V cell.



Εικόνα 7.3. Ηλιακό κελί με το οπτικό του στοιχείο.

Εικόνα 7.4. Σύγκριση μεγέθους κρυσταλλικού κελιού πυριτίου και ΙΙΙ-V HCPV cell.

7.2.1 Κόστος HCPV cell

Από προσωπική έρευνα και επικοινωνία με εταιρίες κατασκευής Multijunction Cells συγκέντρωσα πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά τους και την τιμή πώλησής τους. Συγκεκριμένα για τα υψηλής απόδοσης multi-junction solar cells τα οποία οι εταιρίες διαθέτουν στους σχεδιαστές CPV συστημάτων οι οποίοι τα ενσωματώνουν στα modules ή στα συστήματα με τα απαιτούμενα οπτικά μέσα, συστήματα ανίχνευσης (trackers) και ψύξης. Τα κελιά αυτά έχουν απόδοση 39-40% και μπορούν να λειτουργήσουν σε ακτινοβολίες 50W/cm² με 200W/cm² (500x έως 2000x ηλιακή συγκέντρωση) στους 25°C. Η έρευνά μας αφορά κελιά επιφάνειας 1cm², η τιμή πώλησης εξαρτάται από το μέγεθος της παραγγελίας και τον όγκο

παραγωγής. Για μεγάλες παραγγελίες (περισσότερες από 100.000 μονάδες το μήνα) η τιμή του κελιού ανέρχεται στα \$8/cm².

Επίσης, πραγματοποιήσαμε έρευνα στα οπτικά μέσα που χρησιμοποιούνται και ειδικά στους φακούς Fresnel τους οποίους χρησιμοποιούν οι περισσότεροι σχεδιαστές HCPV συστημάτων. Η τιμή τους κυμαίνεται στα \$1.5-2 ανά φακό επιφάνειας 100cm² και έχουν συγκέντρωση 100x. Συνολικά το κελί με τον οπτικό φακό Fresnel έχει τιμή \$10 ανά κελί.

7.2.2 Υπολογισμός απαιτούμενης επιφάνειας για παραγωγή ισχύος 1KW.

Προκειμένου να είναι εφικτές οι συγκρίσεις μεταξύ CPV cells και Πολυκρυσταλλικών κελιών που χρησιμοποιούνται στα συμβατικά φωτοβολταϊκά πήραμε ως δεδομένο συγκεκριμένη παραγόμενη ισχύ 1KW. Χρησιμοποιώντας τον τύπο της απόδοσης κελιού: $\eta_{cell} = \frac{P(W)}{G_x(W / m^2)A_R(m^2)}$, όπου η_{cell} 33% μειωμένη στο 85% της αρχικής, λόγω του φακού Fresnel, P(W) η παραγόμενη ισχύς 1KW και Gx=100*1000 W/m²=10W/cm² η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει στην επιφάνεια του κελιού, η οποία λόγω συγκέντρωσης πολλαπλασιάστηκε επί 100.

Έτσι υπολογίσαμε την απαιτούμενη επιφάνεια σε κελιά για να παραχθεί το 1KW η οποία αντιστοιχεί σε A_R=303cm², όμως επειδή τα κελιά έχουν εμβαδόν 1cm² θα χρειαστούν 303 κελιά. Αφού τα κελιά περιβάλλονται από φακούς των 100cm², απαιτείται επιφάνεια **E=3.03m²** για παραγωγή 1KW.

Το κόστος των 303 κελιών συμπεριλαμβανομένου και του κόστους των φακών είναι **\$3030**.

7.2.3 Κόστος και απαιτούμενη επιφάνεια για πολυκρυσταλλικά κελιά

Μετά από προσωπική έρευνα για την τιμή των πολυκρυσταλλικών κελιών τα οποία επιτυγχάνουν απόδοση 14-18% το κόστος τους είναι \$0.005/cm². Επίσης, σύμφωνα με υπάρχουσα μελέτη για να παράγουν ισχύ 1KW απαιτείται επιφάνεια 8m².

7.2.4 Σύγκριση Κόστους CPV cells – Polycrystalline silicon cells

Για παραγωγή ισχύος 1KW, όπως υπολογίστηκε και φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 7.5 όπου συγκρίνεται το κόστος μεταξύ των CPV cells και Polycrystalline cells, εξάγουμε τα εξής:

- Τα πολυκρυσταλλικά κελιά σύμφωνα με τους υπολογισμούς της παραπάνω ενότητας έχουν συνολικό κόστος \$400.
- Τα CPV cells σύμφωνα με τους υπολογισμούς της ενότητας 7.2.2 κοστίζουν \$3030.



Παρατηρούμε ότι έχουμε κόστος αυξημένο 7.5 φορές.

Εικόνα 7.5. Σύγκριση κόστους κελιών για παραγωγή ισχύος 1KW

7.2.5 Σύγκριση απαιτούμενης επιφάνειας CPV cells – Polycrystalline silicon cells

Στο διάγραμμα της εικόνας 7.6 συγκρίνουμε τις δυο παραπάνω τεχνολογίες ως προς την επιφάνεια που απαιτείται για παραγωγή 1KW ισχύος. Τα πολυκρυσταλλικά κελιά απαιτούν 2.5 φορές περισσότερη γη από τα CPV κελιά για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση.



Εικόνα 7.6. Σύγκριση επιφάνειας κελιών για παραγωγή ισχύος 1KW

7.3 Μια ματιά στο μέλλον

7.3.1 Μείωση Κόστους

Η εύρεση τρόπων μείωσης του κόστους των πολυσυνδετικών κελιών είναι εξαιρετικά σημαντική, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.7 όπου έχουμε τα συγκριτικά κόστη για τρεις διαφορετικές τεχνολογίες:

- επίπεδα πάνελ πυριτίου
- CPV με κελιά πυριτίου
- CPV με πολυσυνδετικά κελία

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



Εικόνα 7.7. Επιπτώσεις απόδοσης κελιού και κόστος κελιού στο συνολικό κόστος του συστήματος.

Για να δούμε πως μπορεί να γίνει αυτό, ας δούμε πως παράγεται ένα πολυσυνδετικό 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 πλακιδίου Ge για να προκύψουν τα κελιά κτλ)
- έλεγχος καλής λειτουργίας

Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι μόλις αρχίσουν να μειώνονται τα παραπάνω κόστη και αυξηθεί η μαζική παραγωγή κελιών θα αρχίσει το κόστος για κάθε κελί να μειώνεται.

7.3.2 Προβλεπόμενη τιμή CPV cell

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 7.8 παρουσιάζει την προβλεπόμενη τιμή ενός κελιού 1 cm² για διαφορετικά σενάρια. Το σενάριο 1 είναι η αναφορά μας όπου δεν λαμβάνουν χώρα οποιεσδήποτε 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.



Εικόνα 7.8. Προβλεπόμενη τιμή κελιού για διαφορετικούς όγκους παραγωγής και συνθηκών

Ένας άλλος τρόπος θεώρησης του προβλεπόμενου κόστους είναι να εκφραστεί η τιμή ως \$/W. Σε αυτή την περίπτωση, το επίπεδο συγκέντρωσης και η απόδοση του κελιού πρέπει να είναι δεδομένες. Στην εικόνα 7.9 βλέπουμε την προβλεπόμενη τιμή κελιού σε \$/W, με την υπόθεση ότι έχουμε 50 W/cm². Τα δεδομένα δίνονται για διαφορετικές αποδόσεις και λαμβάνουν χώρα με τις προϋποθέσεις του σεναρίου 4, της προηγούμενης εικόνας.

Από το διάγραμμα της εικόνας παρατηρούμε ότι για κελιά απόδοσης 45% και παραγωγή 1 εκατομμύριο KW έχουμε το ελάχιστο κόστος ανά Watt.



Εικόνα 7.9. Προβλεπόμενη τιμή κελιού για διαφορετικούς όγκους παραγωγής και αποδόσεις

8 Συμπεράσματα

8.1 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα CPV και Συμπεράσματα

Στη διπλωματική αυτή εργασία έγινε μελέτη των φωτοβολταϊκών στοιχείων υψηλής συγκέντρωσης (HCPV). Ένα HCPV σύστημα χρησιμοποιεί φακούς ή κάτοπτρα και συστήματα ανίχνευσης για να εστιάσει μια μεγάλη περιοχή του ηλιακού φωτός σε μια μικρή δέσμη, το φως στη συνέχεια συγκεντρώνεται επάνω σε ένα μικρό στοιχείο αποδέκτη. Τα τελευταία 10 χρόνια υπάρχει αλματώδης ανάπτυξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας και έχει φτάσει σε υψηλούς συντελεστές απόδοσης, πειραματικά στο 43,5% και εμπορικά στο 40% με περιθώρια αύξησης σε δεκάδες.

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

- Υψηλές συγκεντρώσεις ακτινοβολίας >450x.
- Περιοχές με υψηλό δείκτη DNI.
- Τοποθέτηση οπτικών, μεγεθυντικών μέσων πάνω από το κελί.
- Υψηλής ακρίβειας συστήματα tracking 2 αξόνων.

Αρχικά, αναλύσαμε τις μεθόδους κατασκευής πολυσυνδετικών κελιών και πως χρησιμοποιούνται αυτά στη πράξη. Μετά από έρευνα καταλήξαμε ότι στα περισσότερα HCPV χρησιμοποιούνται τα Multijunction cells τα οποία έχουν υψηλότερη απόδοση και είναι πιο ευαίσθητα σε ένα ευρύτατο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό οφείλεται στις διάφορες στρώσεις διαφορετικών υλικών με ένα συγκεκριμένο διάκενο ζώνης, έτσι ώστε το υλικό αντιδρά με μια συγκεκριμένη περιοχή του ηλιακού φάσματος. Τα πιο διαδεδομένα είναι τα κελιά τριπλής ένωσης ή III-V cells τα οποία παράγονται απο στοιχειά της 3^{ης} και της 5^{ης} ομάδας του περιοδικού πίνακα όπως Γάλλιο, Ίνδιο, Φώσφορο και Αρσενικό που έχουν διαφορετικό εύρος απορρόφησης το καθένα και συντίθενται με τη μέθοδο μεταλλοοργανικής κατάστασης ατμού (MOCVD) επιταξίας το ένα πάνω στο άλλο. Η επιταξία αυτή συνδυάζει υψηλή ποιότητα και ανάπτυξη κρυστάλλου καθώς και εύκολη σχετικά εφαρμογή. Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας HCPV είναι τα εξής:

- Χαμηλό κόστος Ενέργειας Cost Of Energy ανά KW σε σύγκριση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά όταν χρησιμοποιούνται σε περιοχές με μεγάλη ηλιοφάνεια.
- Υψηλή, σταθερή καμπύλη ισχύος εξόδου κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- Υψηλή απόδοση κυττάρων που πλησιάζει το 40% απόδοση συγκριτικά με απόδοση 13-19% για το πυρίτιο φωτοβολταϊκών κυττάρων.
- Αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων εκτάσεων.
- Οπτική από γυαλί ή πλαστικό για μεγάλη αντοχή.
- Χαμηλές οπτικές απώλειες με αποτέλεσμα υψηλή απόδοση.
- Ευρεία γωνία αποδοχής για υψηλή απόδοση και χαμηλότερο κόστος.
- Σχεδιασμένα ώστε να αποφευχθούν τυχόν χρωματικές αλλοιώσεις και ασυμφωνία κυττάρων.
- Κελιά μεγέθους 1cm², έτσι επιτυγχάνεται μείωση των ημιαγώγιμων υλικών με χρήση 1/1000 του υλικού των φωτοβολταϊκών κελιών που χρησιμοποιούνται στα συμβατικά φωτοβολταϊκά συστήματα πυριτίου.
- Πολύ ανθεκτικός σχεδιασμός κελιού, που αρχικά σχεδιάστηκε για το απαιτητικό περιβάλλον των δορυφόρων στο διάστημα.
- Υψηλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Ευέλικτη και εύκολη εγκατάσταση.
- Χαμηλότερος περιβαλλοντικός και οπτικός αντίκτυπος στη γη.
- Σύντομο χρονικό διάστημα να οδηγήσει σε λειτουργία.
- Μικρός χρόνος απόσβεσης.
- Χρήση ανακυκλώσιμων υλικών.

Εκτός από τα πλεονεκτήματα παρουσιάζουν και σημαντικά μειονεκτήματα.

- Υψηλό κόστος κελιού
- Ημέρες με συννεφιά δεν έχουν την επιθυμητή απόδοση λόγω του ότι απαιτούν ευθεία άμεση ακτινοβολία και παρουσιάζουν υψηλή απόδοση μόνο σε περιοχές με υψηλό DNI.
- Δεν είναι κατάλληλα για στέγες διότι απαιτούν συστήματα trackers

Στη συνέχεια, περιγράψαμε τους τύπους οπτικών μέσων που χρησιμοποιούν τα συγκεντρωτικά συστήματα. Τα περισσότερα HCPV συστήματα χρησιμοποιούν φακούς Fresnel για δυο λόγους για να συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία και έτσι να αυξάνεται η ροή της και για να αντικαταστήσουν το πιο ακριβό μέρος του CPV συστήματος το MJ cell με φθηνότερες οπτικές συσκευές.

Ύστερα, ορίσαμε την απόδοση κελιού, μονάδας και συστήματος και τη συγκρίναμε με τις διαφορετικές συμβατικές τεχνολογίες τα τελευταία 20 χρόνια. Σήμερα, με την τεχνολογία των MJ cells έχουμε πειραματική απόδοση 43.5% και σε εμπορικά κελιά η απόδοση φτάνει τα 40%, σε αντίθεση με τα πολυκρυσταλλικά κελιά πυριτίου των οποίων η απόδοση είναι 17.84%. Πρόβλεψη για τα επόμενα 2 χρόνια είναι τα εμπορικά CPV κελιά να φτάσουν σε 50% απόδοση.

Όσο αφορά τη μελέτη κόστους, υπολογίσαμε το κόστος CPV MJ κελιών σε \$/cm² για παραγωγή ισχύος 1KW. Τα κελιά αυτά είναι μεγέθους 1 cm² και περιβάλλονται από φακό Fresnel 100 cm², έχουν απόδοση 40%. Το κόστος σε κελιά για τη συγκεκριμένη παραγωγή ισχύος ανέρχεται στα **\$3030** και η απαιτούμενη επιφάνεια για μια τέτοια εγκατάσταση είναι **E=3.03m²**. Τα αποτελέσματα αυτά τα συγκρίναμε με το κόστος και την απαιτούμενη επιφάνεια χρησιμοποιώντας πολυκρυσταλλικά κελιά για τη παραγωγή της ίδιας ισχύος. Διαλέξαμε τα πολυκρυσταλλικά διότι αποτελούν μια οικονομική τεχνολογία η οποία χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον τα τελευταία χρόνια. Συγκρίνοντας αυτές τις δυο τεχνολογίες καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι τα πολυκρυσταλλικά κελιά είναι 7.5 φορές φθηνότερα απο τα CPV cells όμως απαιτούν 2.5 φορές περισσότερη γη από τα δεύτερα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι καθαρά σε θεωρητικό επίπεδο και σε επίπεδο τάξης κελιών και όχι ολόκληρου του συστήματος. Συνεπώς, για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση η τεχνολογία των HCPV κρίνεται ασύμφορη. Συμπεραίνοντας, για να αποφασίσουμε ποια τεχνολογία είναι πιο συμφέρουσα αρκεί γνωρίζουμε το ποσό παραγόμενης ισχύος που θέλουμε να έχει το σύστημά μας και αναλόγως να υπολογίσουμε το κόστος έκτασης της γης που απαιτείται αλλά και το κόστος αγοράς το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος του συστήματος. Μόνο έτσι θα μπορούμε να αποφανθούμε αν τα HCPV αποτελούν συμφέρουσα τεχνολογία για το σύστημά μας.

Παρόλο που το κόστος των MJ cells είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με το κόστος των συμβατικών τεχνολογιών, αυτά βρίσκονται ακόμα σε στάδιο ανάπτυξης. Το κόστος τους μειώνεται συνεχώς όσο αυξάνεται ο όγκος παραγωγής τους. Εκτιμήσεις αναμένουν μέχρι το 2017 αύξηση της απόδοσης κατά 10 μονάδες και προβλέπουν να είναι σε ανταγωνιστικό επίπεδο σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά κελιά.

8.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι τέτοιας φύσης, που θέλοντας κάποιος να κάνει μια μελλοντική επέκταση, μπορεί να κινηθεί σε πολλές κατευθύνσεις. Παρακάτω σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζουμε δυο επιλογές που εμείς θεωρούμε αρκετά ενδιαφέρουσες να ερευνηθούν και να παρουσιαστούν.

 Σαν πρώτη επιλογή μελλοντικής επέκτασης, θα μπορούσε να ακολουθηθεί η ίδια πορεία, παρουσιάζοντας όμως την τιμή κελιού ανά παραγόμενη ισχύ και να ακολουθήσει σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες.

2) Σαν δεύτερη επιλογή μελλοντικής επέκτασης, θα μπορούσε να παρουσιαστεί μια οικονομική μελέτη που θα αφορούσε τα συστήματα στήριξης φωτοβολταϊκών πάνελ και τους αντιστροφείς (inverters), έτσι με την προθήκη αυτή, θα μπορούσαμε να παρουσιάσουμε μια οικονομική μελέτη για την πορεία της τιμής ενός ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Cyrioum Technologies, <u>http://www.cyriumtechnologies.com/</u>

Concentrating Photovoltaics (CPV), Green Rhino Energy: Concentrating Photovoltaics Solar Power.htm

Dropping Silicon Prices Threaten (CPV) Industry, Dropping Silicon Prices Threaten CPV Industry - Solar Novus Today.htm

Operation and maintenance of CPV power plants with Concentrix[™] technology, Soitec Operation and maintenance of CPV power plants.htm

First 50 Megawatts of Large Solar Power Plant in Baja California, Mexico Enabled by Cross-Border Collaboration, SolFocus News events Press releases 2012 03 29.htm

Suncore Terrestrial CPV Ground Systems, Suncore Terrestrial CPV Ground Systems EMCORE.htm

Jancarle L. Santos, Fernando Antunes, Anis Chehab, Cı'cero Cruz, A maximum power point tracker for PV systems using a high performance boost converter, <u>www.sciencedirect.com</u>, 2004, pp.772-778.

Robert MacConnell, Concentrator Photovaltaic Technologies, 2005.

Cherng – Tsong kuo, Hwa-Yuh Shin, Hwen- Fen Hong, Chih Hung wu, Cheng-Dar Lee, I Tao Lung, Yao-Tung Hsu, Development of the high Concentration III-V photovoltaic system at INER, Taiwan. Insitute of Nuclear Energy Research, P.O. Box 3-11 Longtan Taoyuan 325, <u>www.elsevier.com/locate/renene</u>, 2009, pp.1931-1933.

Daniel Feuermann, Jeffrey M. Gordon, High-Concentration Photovoltaic Designs Based on Moniature Paravolic Dishes, <u>www.elsevier.com/locate/renene</u>, 2000, Vol 70, No. 5, pp. 423-430.

Ghassan Zubi, Jose' L. Bernal-Agustı'n, Gian Vincenzo Fracastoro, High concentration photovoltaic systems applying III–V cells <u>www.elsevier.com/locate/renene</u>, 2009, pp. 2645-2652.

P. Perez-Higueras, E. Munoz, G. Almonacid, P.G. Vidal, High Concentrator Photovoltaics Efficiencies: Present Status and forecast, <u>www.elsevier.com/locate/renene</u>, 2010, pp. 1810-1815

Chung-Jui Lee, Jen -Fin Lin, High Efficiency Concentrated optical module, <u>www.elsevier.com/locate/renene</u>, 2011, pp. 593-603.

PV Antonio L. Luque Viacheslav M. Andreev Concentrator Photovoltaics, Springer Series 2006.

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].

V.M. Andreev, V.A. Grilikhes, V.D. Rumyantsev. Photovoltaic conversion of concentrated sunlight. Wiley, Chichester, 1997.

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

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

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

Universidad Politicnica de Madrid (C. Algora). High efficiency photovoltaic converter for high light intensities manufactured with optoelectronic technology. EP1278248A1 and US2002/0170592A1

SunLab–NREL/Sandia, http://www.energylan.sandia.gov/sunlab/overview.htm

McDonnell FL, High power density photovoltaics, Renewable Energy World, September to October 2002

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

A.W. Bett, G. Siefer, C. Baur, S. van Riesen, G. Peharz, H. Lerchenmuller, F. Dimroth, FLATCON concentrator PV-technology ready for the market, Proc 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, 2005, pp. 114–117

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Νικόλαος Λαποκωνσταντάκης, Επίδραση Σημαντικής Εγκατεστημένης Ισχύος Φωτοβολταικών σε Υποσταθμό Υψηλής/ Μέσης Τάσης, 2011.

Πέτρος Ματζώρος, Οικονομική μελέτη και πρόβλεψη υλικών κατασκευής φωτοβολταϊκών στοιχείων, 2012.