



Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε.

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
PHOTOVOLTAIC SYSTEMS TECHNOLOGY

Διπλωματική Εργασία της Σπουδάστριας
Μίχα Αλεξάνδρα (Α.Μ. 28214)

Επιβλέπων Καθηγητής: Ηρακλής Βυλλιώτης

Μάρτιος 2014

*Αφιερωμένο στον σύζυγό μου
Αλεξίου Μιχαήλ*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σήμερα η φωτοβολταϊκή τεχνολογία είναι το επίκεντρο της προσοχής πολλών ερευνητικών κέντρων. Ο λόγος είναι ότι τα φωτοβολταϊκά και γενικά οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, υπόσχονται μια πολύ πιο οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον, πηγή ενέργειας, η οποία μπορεί να μετριάσει σε μεγάλο βαθμό τη ρύπανση του κόσμου, μαζί με τα οικονομικά και υγειονομικά κριτήρια που επιφέρει. Στα πλαίσια αυτής της έρευνας πραγματοποιήθηκε και η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, με σκοπό τη διερεύνηση τριών από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους τύπους χερσαίων φωτοβολταϊκών, που χρησιμοποιούνται σήμερα στο κόσμο. Μέσα από αυτήν την εργασία θα γίνουν πιο κατανοητοί οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση μιας φωτοβολταϊκής μονάδας, καθώς και οι δυσκολίες κατασκευής οι οποίοι προκύπτουν. Επίσης, θα μελετηθούν πιθανές λύσεις, με στόχο την καταπολέμηση των δυσκολιών και τη βελτίωση της απόδοσης.

Στην αρχή της παρούσας εργασίας επεξηγούνται ορισμένοι βασικοί ορισμοί τους οποίους συναντούμε σε ολόκληρη την εργασία.

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη περιγραφή της ηλιακής ενέργειας τονίζοντας τα οφέλη που θα μπορούσε να έχει για ένα κράτος από επενδύσεις στην τεχνολογία φωτοβολταϊκών.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή των κυριότερων σταθμών της τεχνολογίας φωτοβολταϊκών, από την αρχή της μέχρι και την περασμένη δεκαετία.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται η επεξήγηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου, μαζί με την μελέτη των ημιαγωγικών υλικών. Τέλος, πραγματοποιείται μια περιγραφή του τρόπου λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου.

Στο 4^ο κεφάλαιο αναλύονται τα φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου, μαζί με όλους τους σχετικούς παράγοντες λειτουργίας τους.

Στο 5^ο κεφάλαιο αναλύονται τα φωτοβολταϊκά λεπτών υμενίων πυριτίου, μαζί με όλους τους σχετικούς παράγοντες λειτουργίας τους.

Στο 6^ο κεφάλαιο αναλύονται τα υψηλής απόδοσης ηλιακά κύτταρα πολλαπλών επαφών III – V, μαζί με όλους τους σχετικούς παράγοντες λειτουργίας τους.

Τέλος, στο 7^ο κεφάλαιο γίνεται μια σύγκριση όλων των παραμέτρων των παραπάνω αναφερθέντων τύπων φωτοβολταϊκών, καθώς και της απόδοσης κάθε τύπου. Στο τέλος του κεφαλαίου αναπτύσσονται τα συμπεράσματα από όλη την εργασία.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τους ανθρώπους που με βοήθησαν να φτάσω ως εδώ και να είμαι συνεπής στην εκπλήρωση των υποχρεώσεων μου.

Πρώτα απ' όλους ευχαριστώ τον καθηγητή μου, κύριο Ηρακλή Βυλλιώτη, ο οποίος μου ανέθεσε και μου εμπιστεύτηκε ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα εργασίας, και την προϊσταμένη της Σχολής κυρία Ορφανου Παναγιώτα, η οποία με βοήθησε από την πρώτη μου μέρα στη Σχολή έως και σήμερα.

Ευχαριστώ πολύ τον καλό μου φίλο Ιωάννη Πρέσσα, για την πολύτιμη βοήθεια που μου πρόσφερε κατά τη διάρκεια διεξαγωγής αυτής της εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον σύζυγό μου Αλεξίου Μιχαήλ, ο οποίος με στήριξε και με στηρίζει σε οποιοδήποτε βήμα κάνω στη ζωή μου

Αθήνα, Μάρτιος 2013

Μίχα Γ. Αλεξάνδρα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδα αφιέρωσης.....	σελ. i
Περίληψη.....	σελ. ii
Ευχαριστίες.....	σελ. iii
Περιεχόμενα.....	σελ. iv
Βασικοί ορισμοί.....	σελ. 1
Κεφάλαιο 1: Φυσική των φωτοβολταϊκών.....	σελ. 3
Κεφάλαιο 2: Ιστορική αναδρομή.....	σελ. 8
Κεφάλαιο 3: Τρόπος λειτουργίας του ηλιακού κυττάρου.....	σελ.13
Κεφάλαιο 4: Ηλιακά κύτταρα πυριτίου.....	σελ.28
Κεφάλαιο 5: Ηλιακά κύτταρα λεπτών υμενίων.....	σελ.60
Κεφάλαιο 6: Πολυστρωματικά ηλιακά κύτταρα III – V υψηλής απόδοσης	σελ.91
Κεφάλαιο 7: Σύγκριση απόδοσης φωτοβολταϊκών ευρείας χρήσεων.....	σελ.112
Βιβλιογραφία.....	σελ.116

ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

Στο σημείο αυτό γίνεται επεξήγηση διαφόρων ορισμών που χρησιμοποιούνται σε ολόκληρη της εργασία.

Ανασυνδυσασμός: Όταν ένας ημιαγωγός βγαίνει από τη θερμοδυναμική του ισορροπία, για παράδειγμα όταν ακτινοβολείται ή κατά την έγχυση ρεύματος, οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων (n) και των οπών (p) τείνουν να πάνε πίσω στις τιμές ισορροπίας τους. Η μέθοδος με την οποία γίνεται αυτό ονομάζεται ανασυνδυσασμός, και σε αυτόν ένα ηλεκτρόνιο πέφτει από τη ζώνη αγωγιμότητας πίσω στη ζώνη σθένους. Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει το φαινόμενο του ανασυνδυσασμού με αποτέλεσμα, ανάλογα με την περίπτωση, να ταιριάζει καλύτερα ένα συγκεκριμένο μοντέλο ανασυνδυσασμού. Το φαινόμενο του ανασυνδυσασμού είναι εντονότερο στην επιφάνεια, αναφερόμενο ως επιφανειακός ανασυνδυσασμός, αφού εκεί τα ακραία στοιχεία δέχονται μικρότερες δυνάμεις συγκράτησης. Βέβαια, μπορεί να πραγματοποιείται και σε ολόκληρο τον όγκο του υλικού, κάτι που λέγεται ογκικός ανασυνδυσασμός.

Ταχύτητα ανασυνδυσασμού, S_R : Είναι η ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται ο ανασυνδυσασμός σε μια επιφάνεια ή έναν όγκο υλικού. Οι μονάδες μέτρησης αυτής είναι σε αριθμό στοιχείων που αναδυνδύαζονται ανά μονάδα όγκου ή επιφανείας ανά μονάδα χρόνου.

Χρόνοι ζωής Shockley – Read – Hall, τ_{SLT} : Πρόκειται για το χρόνο ζωής που κάνει ένα φορτίο να μεταπηδήσει από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας ή αντίστροφα. Εξαιτίας του ορισμού του, έχει μεγάλη σχέση με το φαινόμενο του ανασυνδυσασμού, και δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{SLT} = \frac{1}{\sigma \cdot v_{th} \cdot N_T}$$

όπου σ είναι το μέγεθος του διακένου για τη συγκεκριμένη διατομή, v_{th} είναι η θερμική ταχύτητα των φορτίων και N_T είναι η συγκέντρωση των παγίδων φορτίων.

Ντοπάρισμα: Ως ντοπάρισμα ορίζεται η διαδικασία σύμφωνα με την οποία στο κρυσταλλικό πλέγμα ενός υλικού εγχέονται άτομα άλλου στοιχείου, με στόχο την ενίσχυση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Ο τύπος του ντοπαρίσματος έχει άμεση σχέση με το υλικό το οποίο ντοπάρεται, καθώς και με τον επιθυμητό τύπο φορτίων (n ή p).

Σειριακή αντίσταση/ Αντίσταση επιφάνειας: Με το συγκεκριμένο ορισμό αναλύεται η ηλεκτρική αντίσταση που συναντάται λόγω της εν σειρά σύνδεσης των διαφορετικών ηλιακών κυττάρων. Σε περίπτωση που μελετώνται οι ηλιακές μονάδες λεπτών υμενίων, όπου το πάχος τους είναι ομοιόμορφο, χρησιμοποιείται ο ορισμός της αντίστασης επιφάνειας. Η διαφορά μεταξύ των δύο έγκειται στον τρόπο μέτρησης κάθε μίας (απλό ωμόμετρο στην πρώτη περίπτωση, αισθητήριο τεσσάρων ακροδεκτών στη δεύτερη).

Φορτία πλειονότητας/μειονότητας: Έτσι ονομάζονται τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που μπορούν να μετακινούνται ελεύθερα στο εσωτερικό ενός υλικού. Τα φορτία πλειονότητας είναι αυτά που βρίσκονται σε πληθώρα σε κάθε υλικό, σε αντίθεση με τα φορτία μειονότητας. Έτσι, στους n – τύπου ημιαγωγούς, τα φορτία πλειονότητας είναι τα ηλεκτρόνια, ενώ στους p – τύπου ημιαγωγούς είναι οι οπές.

Σκοτεινά ρεύματα: Πρόκειται για μικρά ηλεκτρικά ρεύματα τα οποία ρέουν κατά μήκος μιας φωτοευαίσθητης συσκευής, ακόμα και όταν κανένα φωτόνιο δεν τη διαπερνά. Φυσικά, οφείλονται στη γέννηση οπών ή ηλεκτρονίων στο εσωτερικό της περιοχής εκκένωσης, τα οποία στη συνέχεια παρασύρονται κατά την έκθεσή τους σε ένα υψηλό ηλεκτρικό πεδίο. Είναι σαφές δείγμα των κρυσταλλογραφικών ελαττωμάτων της περιοχής εκκένωσης ενός υλικού.

Ανάκλαση Lambert: Είναι η ιδιότητα που περιγράφει μια ιδανικά «ματ» επιφάνεια ή μια διαχυτικά ανακλαστική επιφάνεια. Η φαινόμενη λαμπρότητα μιας τέτοιας επιφάνειας για έναν παρατηρητή είναι η ίδια, ανεξαρτήτως της γωνίας παρατήρησης. Χαρακτηρίζεται, δηλαδή, από μια ισότροπη φωταύγεια, ενώ η ένταση φωταύγειας υπακούει στο νόμο συνημίτονου του Lambert. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την περίπτωση κυμάτων γενικά, όχι μόνο ακτινοβολιών.

Συντελεστής πλήρωσης (Fill Factor): Ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος ενός ηλιακού κυττάρου προς την αντίστοιχη ποσότητα $J_{sc} \times V_{oc}$. Τυπικές τιμές εμπορικών κυττάρων έχουν $FF > 0.70$, ενώ κατώτερης ποιότητας κύτταρα έχουν FF μεταξύ 0.40 και 0.70 . Κύτταρα με υψηλό FF έχουν χαμηλές ισοδύναμες σειριακές αντιστάσεις και υψηλές ισοδύναμες αντιστάσεις παρεκκλίσεων, ώστε λιγότερο από το παραγόμενο ρεύμα να χάνεται εξαιτίας εσωτερικών απωλειών.

Φωτορεύματα (Photocurrents): Έτσι ονομάζονται τα ηλεκτρικά ρεύματα που έχουν δημιουργηθεί εξαιτίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Η εξίσωση από την οποία προκύπτουν έχει άμεση σχέση με τον τύπο του φωτοβολταϊκού που εξετάζεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: Φυσική των φωτοβολταϊκών

1.1 ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

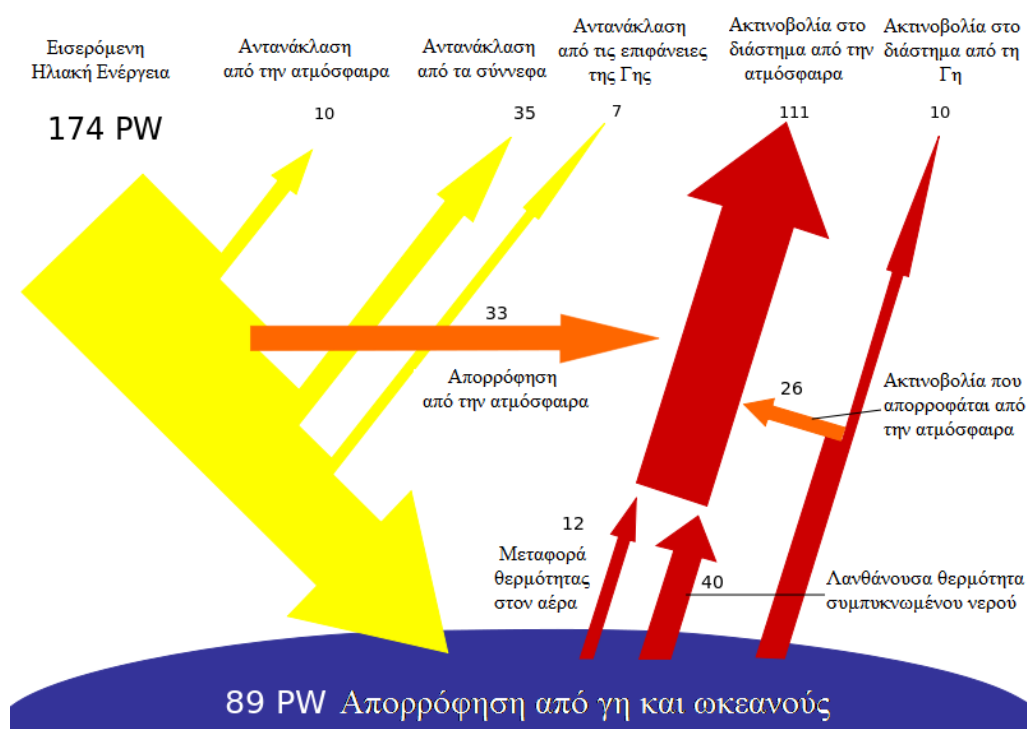
Η Ηλιακή ενέργεια έχει αξιοποιηθεί από τον άνθρωπο, από την αρχαιότητα, με μια σειρά από συνεχώς εξελισσόμενες τεχνολογίες. Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν ηλιακή θέρμανση, ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια, ηλιακή αρχιτεκτονική και τεχνητή φωτοσύνθεση, η οποία μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην επίλυση μέρους των επιτακτικών προβλημάτων ενέργειας που αντιμετωπίζει ο κόσμος σήμερα.

Οι ηλιακές τεχνολογίες σε γενικές γραμμές χαρακτηρίζονται είτε ως παθητικές είτε ως ενεργητικές, ανάλογα με τον τρόπο που συλλέγουν, μετατρέπουν και διανέμουν την ηλιακή ενέργεια. Οι ενεργητικές ηλιακές τεχνικές περιλαμβάνουν τη χρήση στοιχείων όπως φωτοβολταϊκά πάνελ και ηλιακούς συλλέκτες, για την αξιοποίηση της ενέργειας. Οι παθητικές ηλιακές τεχνικές περιλαμβάνουν τεχνικές όπως ο κατάλληλος προσανατολισμός ενός κτιρίου ως προς τον ήλιο, η επιλογή υλικών (δομικών και άλλων) με καλή θερμική αγωγιμότητα ή ιδιότητες διάχυσης του φωτός και ο σωστός σχεδιασμός χώρων ώστε να υπάρχει φυσική ανακύκλωση του αέρα.

Το 2011, ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας, δήλωσε ότι «η ανάπτυξη των προσιτών, ανεξάντλητων και καθαρών τεχνολογιών ηλιακής ενέργειας θα έχουν τεράστια μακροπρόθεσμα οφέλη. Θα αυξήσει την ενεργειακή ασφάλεια των χωρών χάρη σε μια αυτόχθονα, ανεξάντλητη και ως επί το πλείστον ανεξάρτητη πηγή ενέργειας, την ενίσχυση της βιωσιμότητας, τη μείωση της ρύπανσης, τη μείωση του κόστους μετριασμού της κλιματικής αλλαγής και θα κρατήσει τις τιμές των ορυκτών καυσίμων χαμηλότερες. Αυτά τα πλεονεκτήματα είναι παγκόσμια. Ως εκ τούτου, το επιπλέον κόστος των κινήτρων για πρόωρη ανάπτυξη θα πρέπει να θεωρείται σαν αναπτυξιακή επένδυση, να δαπανάται με σύνεση και θα πρέπει να έχει ευρύτερη απήχηση».

Η Γη δέχεται 174 PW (10^{15} W) της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στην εξωτερική ατμόσφαιρα. Περίπου το 30% αντανακλάται πίσω στο διάστημα, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται από τα σύννεφα, τους ωκεανούς και την επιφάνεια της Γης. Το φάσμα του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια της Γης είναι ως επί το πλείστον εξαπλωμένο σε όλη την

περιοχή των ορατών μήκων κύματος και σε ένα μικρό τμήμα της περιοχής των υπεριώδη και υπέρυθρων μήκων κύματος.



Σχήμα 1.1: Ανάλυση της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας

Η επιφάνεια της γης, οι ωκεανοί και η ατμόσφαιρα απορροφούν μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, και αυτό αυξάνει τη θερμοκρασία τους. Ο θερμός αέρας, ο οποίος περιέχει εξατμισμένο νερό από τους ωκεανούς, προκαλεί «ατμοσφαιρική κυκλοφορία». Όταν ο αέρας φτάνει σε μεγάλο υψόμετρο, όπου η θερμοκρασία είναι χαμηλή, οι υδρατμοί συμπυκνώνονται σε σύννεφα και προκαλούν βροχή, έτσι ολοκληρώνεται ο κύκλος του νερού. Η λανθάνουσα θερμότητα της συμπύκνωσης νερού ενισχύει τη μεταφορά αυτή, παράγοντας ατμοσφαιρικά φαινόμενα όπως ανέμους, κυκλώνες, και ξηρασίες. Η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από την επιφάνεια της Γης, διατηρεί τη θερμοκρασία της σε μια μέση τιμή των 14° C. Τέλος, με την φωτοσύνθεση τα φυτά μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε χημική ενέργεια, από την οποία παράγονται τελικά τρόφιμα, ξύλο και βιομάζα, από την οποία προέρχονται τα ορυκτά καύσιμα.

Η συνολική ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από την ατμόσφαιρα και την επιφάνεια της Γης είναι περίπου 3.850.000 EJ (10^{18} J) ανά έτος. Το 2002, η ηλιακή ενέργεια που απορροφήθηκε σε μία ώρα ήταν περισσότερη, από τη συνολική ενέργεια που κατανάλωσε

ο πλανήτη σε ένα χρόνο. Κατά τη φωτοσύνθεση απορροφάται ενέργεια ίση περίπου με 3.000 EJ ανά χρόνο, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας καταλήγει σε βιομάζα. Η κατανάλωση της ενέργειας που διατίθεται από τη βιομάζα υπολογίζεται από 100 έως 300 EJ ανά έτος. Το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που φτάνει στην επιφάνεια του πλανήτη είναι τόσο μεγάλο που σε ένα χρόνο είναι περίπου δύο φορές περισσότερο από αυτό που μπορούμε να αποκτήσουμε από το σύνολο των μη – ανανεώσιμων πηγών του άνθρακα, του πετρελαίου, του φυσικού αερίου, και σε συνδυασμό με ουράνιο.

Ετήσιες ηλιακές ροές & Ανθρώπινη Κατανάλωσης Ενέργειας	
Ηλιακή	3,850,000 EJ
Άνεμος	2,250 EJ
Βιομάζα	100–300 EJ
Κύρια χρήση της ενέργειας (2009)	15 EJ
Ηλεκτρισμός (2009)	62.5 EJ

Πίνακας 1.1: Ετήσιες ηλιακές ροές και η κατανάλωση ενέργειας από τον άνθρωπο

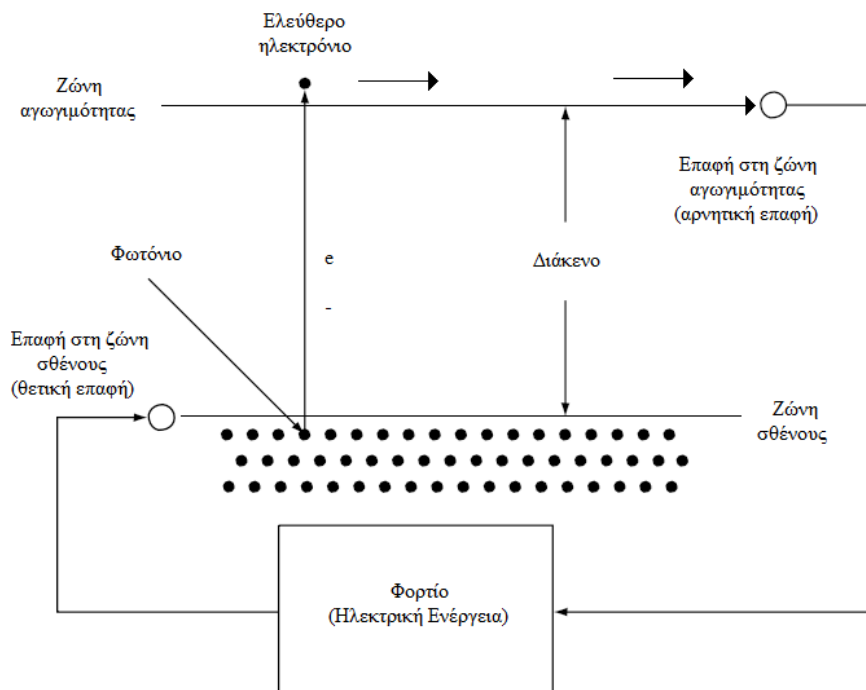
Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί σε διαφορετικά ποσοστά σε όλο τον κόσμο, κυρίως ανάλογα με την απόσταση από τον ισημερινό.

1.2 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Φωτοβολταϊκά ονομάζονται τα στοιχεία τα οποία παράγουν συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα (DC) από ημιαγωγούς, με την παρουσία φωτός. Όσο το φως προσπίπτει στην επιφάνεια του ηλιακού κυττάρου (έτσι ονομάζεται ένα μεμονωμένο στοιχείο ενός φωτοβολταϊκού πάνελ), παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Όταν το φως σταματήσει, σταματά και παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και άρα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηλιακά κύτταρα δεν χρειάζονται ποτέ επαναφόρτιση, όπως π.χ. μια μπαταρία. Μερικά έχουν συνεχή λειτουργία σε εξωτερικούς χώρους στη Γη ή στο διάστημα για πάνω από 30 χρόνια.

Τα ηλιακά κύτταρα κατασκευάζονται από υλικά τα οποία ονομάζονται ημιαγωγοί. Οι ημιαγωγοί έχουν μια πληθώρα από ασθενώς συνδεδεμένα ηλεκτρόνια στα άτομά τους, τα οποία καταλαμβάνουν μια ενεργειακή ζώνη, η οποία ονομάζεται η ζώνη σθένους. Όταν μια ποσότητα ενέργειας που υπερβαίνει ένα ορισμένο ενεργειακό όριο, το οποίο ονομάζεται ενέργεια χάσματος, απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους, ο δεσμός του με το άτομο «σπάει» και το ηλεκτρόνιο είναι «ελεύθερο» να μετακινηθεί σε μια υψηλότερη ενεργειακή

ζώνη, η οποία ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας. Με τον τρόπο αυτό παράγεται ηλεκτρική ενέργεια στο εσωτερικό του υλικού. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας διαχωρίζονται από αυτά της ζώνης σθένους μέσω του διαάκενου (που μετριέται σε μονάδες ηλεκτρονιοβόλτ ή Ev). Η ενέργεια, που απαιτείται για την απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου σθένους μπορεί να προέλθει από την πρόσκρουση φωτονίων σε αυτό, τα οποία είναι τα σωματίδια του φωτός. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η ιδανική σχέση μεταξύ της ενέργειας (κατακόρυφος άξονας) και των χωρικών ορίων (οριζόντιος άξονας). Όταν το ηλιακό κύτταρο εκτίθεται στο ηλιακό φως, τα φωτόνια προσκρούουν στα ηλεκτρόνια σθένους, απελευθερώνοντας τα και οδηγώντας τα στην ζώνη αγωγιμότητας. Εκεί, μια ειδικά κατασκευασμένη επαφή συλλέγει τα ηλεκτρόνια από την ζώνη αγωγιμότητας και τα οδηγεί στο εξωτερικό κύκλωμα (φορτίο). Τα ηλεκτρόνια καταναλώνουν την ενέργεια τους στο εξωτερικό κύκλωμα και έπειτα επιστρέφουν στο ηλιακό κύτταρο από το βρόχο επιστροφής του κυκλώματος μέσω μιας δεύτερης ειδικά κατασκευασμένης επαφής, η οποία τα επιστρέφει στην ζώνη σθένους με την ίδια ενέργεια την οποία είχαν πριν την πρόσκρουση των φωτονίων.



Σχήμα 1.2: Σχηματική αναπαράσταση των ηλιακών κυττάρων.

Το φως του ήλιου είναι ένα φάσμα φωτονίων που διανέμονται σε μία περιοχή ενεργειών. Φωτόνια των οποίων η ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια του διαάκενου, μπορούν να διεγείρουν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας, όπου

και μπορούν να εξέλθουν στη συνέχεια, από τον ημιαγωγό δημιουργώντας ηλεκτρική ισχύ. Τα φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από την ενέργεια του διακένου αποτυγχάνουν να διεγείρουν ηλεκτρόνια και η ενέργεια αυτή χάνεται ως θερμότητα στο σώμα του ηλιακού κυττάρου. Τα ηλιακά κύτταρα σε άμεσο ηλιακό φως μπορεί να είναι περίπου 20° με 30°C θερμότερα από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Γενικά, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς να λειτουργούν σε πολύ υψηλή θερμοκρασία και χωρίς κινητά μέρη, άρα και χωρίς ανάγκη για συντήρηση και επισκευές.

Κεφάλαιο 2^ο: Ιστορική Αναδρομή

Η ιστορία των φωτοβολταϊκών αρχίζει πίσω, στον δέκατο ένατο αιώνα, όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1. Το πρώτο λειτουργικό φωτοβολταϊκό στοιχείο κατασκευάστηκε από τον Αμερικανό Fritts το 1883. Για την κατασκευή του ο Fritts έλιωσε ένα κομμάτι σεληνίου σε ένα λεπτό φύλλο ως μεταλλικό υπόστρωμα στο οποίο κόλλησε στη συνέχεια, ένα λεπτό φύλλο χρυσού σαν επαφή. Το συνολικό του μέγεθος ήταν σχεδόν 30 cm². Παρατήρησε λοιπόν, ότι το ρεύμα μπορούσε είτε παραχθεί στο στοιχείο αυτό και στη συνέχεια να αποθηκευτεί σε άλλες διατάξεις, π.χ. σε συσσωρευτές, είτε να μεταδοθεί πρώτα σε κάποια απόσταση και εκεί να χρησιμοποιηθεί.

1839	Ο Becquerel (Γάλλος) ανακαλύπτει τη φωτοβολταϊκή επίδραση στο υγρό των ηλεκτρολυτών.
1873	Ο Smith (Βρετανός) ανακαλύπτει τη φωτοαγωγιμότητα του στερεού Σεληνίου (Se).
1877	Οι Adams και Day (UK) ανακαλύπτουν την παραγωγή ρεύματος σε σωλήνες Σεληνίου κατά την έκθεση τους στο φως. Αποτελεί την πρώτη παρατήρηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου σε στερεά.
1883	Ο Αμερικανός Fritts κατασκευάζει τα πρώτα ηλιακά κύτταρα με την χρήση μιας ταινίας Σεληνίου.
1954	Γίνεται η πρώτη αναφορά σε αποδοτικά ηλιακά κύτταρα, με απόδοση 6% από το Bell Lab των ΗΠΑ (Φ/Β Πυριτίου) και την Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ (Φ/Β από θειούχο χαλκό ή θειούχο κάδμιο (Cu ₂ S /CdS)).
1955	Η Hoffman Electronics (ΗΠΑ) προσφέρει αποτελεσματικά φωτοβολταϊκά κύτταρα πυριτίου, με βαθμό απόδοσης 2%, στα 1500 δολάρια / W.
1958	Η NASA ενισχύει τους δορυφόρους με συστοιχία ηλιακών κυττάρων πυριτίου, ως εφεδρική πηγή ενέργειας.
1959	Η Hoffman Electronics (ΗΠΑ) προσφέρει αποτελεσματικά φωτοβολταϊκά κύτταρα πυριτίου, με βαθμό απόδοσης 10%.
1963	Η Sharp Corp (JP) παράγει την πρώτη εμπορική μονάδα παραγωγής πυριτίου.
1970	Κατασκευάζονται τα πρώτα ηλιακά κύτταρα από γαλλιούχο αρσενικό (GaAs) από τον Zhores Ivanovich Alferov.
1972	Το πρώτο συνέδριο φωτοβολταϊκών που περιλαμβάνει συζητήσεις για επίγειες εφαρμογές των Φ/Β.
1973	Μια μεγάλη χρονιά για τα φωτοβολταϊκά: Παγκόσμια πετρελαϊκή κρίση ωθεί πολλά έθνη να εξετάσουν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των φωτοβολταϊκών. Το Cherry Hill Conference στις ΠΑ (εδραίωση φωτοβολταϊκών, δυνατότητες και νομιμότητα για τη χρηματοδότηση της έρευνας από την κυβέρνηση), γίνεται η πρώτη κατοικία στον κόσμο ηλεκτροδοτούμενη από ηλιακή ενέργεια (Πανεπιστήμιο του Delaware, ΗΠΑ), χτισμένη με ηλιακούς συλλέκτες από θειούχο χαλκό (Cu ₂ S) (όχι c-Si!).

1974	Το Sunshine Project ξεκίνησε στην Ιαπωνία για να ενισχύσει την ανάπτυξη της βιομηχανίας φωτοβολταϊκών εφαρμογών και το Tyco (ΗΠΑ) μεγαλώνει κατά 2,5 εκατοστά το πλάτος της ταινίας πυριτίου για τα φωτοβολταϊκά.
1975	Το πρώτο βιβλίο αφιερωμένο στη φωτοβολταϊκή επιστήμη και τεχνολογία από τον Hovel (ΗΠΑ).
1980	τα πρώτα thin-film ηλιακά κύτταρα με απόδοση > 10% με τη χρήση θειούχου χαλκού .
1981	Συστοιχία φωτοβολταϊκών κυττάρων συνολικής ισχύος 350 KW εγκαταστάθηκε στη Σαουδική Αραβία.
1984	Συστοιχία φωτοβολταϊκών κυττάρων συνολικής ισχύος 6 MW εγκαταστάθηκε στα Carrisa Plains CA, ΗΠΑ.
1985	Μια μεγάλη χρονιά για τα υψηλής απόδοσης ηλιακά κύτταρα πυριτίου (Si): Si ηλιακών κυττάρων με απόδοση > 20% κάτω από το φως του ήλιου (UNSW, Αυστραλία) και > 25% κάτω από φως 200 φορές πιο συμπυκνωμένο (Stanford Univ. ΗΠΑ).
1986	Η πρώτη εμπορική μονάδα φωτοβολταϊκών λεπτού υμενίου, με την παραγωγή του a-Si G4000 από την Arco Solar (ΗΠΑ).
1987	Δεκατέσσερα ηλιακά αυτοκίνητα ολοκληρώνουν 3200 χιλιόμετρα στον αγώνα World Solar Challenge (Αυστραλία) με τον νικητή να έχει κατά μέσο όρο 70 km/h.

Πίνακας 2.1: Σημαντικά γεγονότα στην ιστορία των φωτοβολταϊκών

Η σύγχρονη εποχή των φωτοβολταϊκών ξεκίνησε το 1954 όταν οι ερευνητές στα εργαστήρια έρευνας και ανάπτυξης Bell Telephone Laboratories (Bell Labs) των ΗΠΑ ανακάλυψαν τυχαία ότι οι p-n διόδοι παρήγαγαν μια τάση όταν τα φώτα του δωματίου ήταν ανοιχτά. Μέσα σε ένα χρόνο, είχαν δημιουργήσει ηλιακά κύτταρα πυριτίου απόδοσης 6%. Την ίδια χρονιά, η ομάδα στο Wright Patterson Air Force Base στις ΗΠΑ δημοσίευσε τα αποτελέσματα των δοκιμών ηλιακών κυττάρων λεπτού υμενίου με ετεροεπαφή, που είχαν ως βάση το θειούχο χαλκό και το θειούχο κάδμιο ($\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$) και τα οποία είχαν επίσης απόδοση 6%. Ένα χρόνο αργότερα, αναφέρθηκε από το RCA Lab στις ΗΠΑ, ηλιακό κύτταρο γαλλιούχου αρσενικού (GaAs), δηλαδή ημιαγωγού p-n, με απόδοση 6%. Μέχρι το 1960, μέσω πολλών εργασιών διαφόρων ερευνητών όπως του πρίγκιπα [26], Joseph J. Loferski, του Rappaport και των Wysoski [28], Shockley (ένας βραβευμένος με Νόμπελ) καθώς και του Queisser [29], αναπτύχθηκαν οι βασικές αρχές της λειτουργίας επαφών p-n ηλιακών κυττάρων, συμπεριλαμβανομένης της θεωρητικής σχέση μεταξύ του διάκενου, το προκύπτον φάσμα, καθώς και ζητήματα για τη θερμοκρασία, τη θερμοδυναμική και την αποδοτικότητα. Επίσης παρήγαγαν κύτταρα με τη μορφή λεπτών ταινιών από καδμιούχο Τελλούριο (CdTe) με απόδοση 6%. Μέχρι τότε, στο διαστημικό πρόγραμμα των ΗΠΑ χρησιμοποιούσαν τα κύτταρα πυριτίου για την τροφοδότηση των δορυφόρων. Αφού το διάστημα ήταν ακόμα ο κύριος στόχος των φωτοβολταϊκών, μελέτες με τις επιπτώσεις της ακτινοβολίας στα ηλιακά κύτταρα καθώς και η ανάγκη για συσκευές με περισσότερη ανοχή

στην ακτινοβολία, οδήγησαν στη δημιουργία κυττάρων από πυρίτιο ενισχυμένο με λίθιο. Το 1970, μια ομάδα στο Ioffe Physical-Technical Institute της Ρωσίας, με επικεφαλής τον Zhores Ivanovich Alferon, έναν νομπελίστα φυσικό της Σοβιετικής Ένωσης, ανέπτυξε ένα ηλιακό κύτταρο ετεροεπαφής GaAlAs/GaAs, το οποίο έλυσε ένα από τα κύρια προβλήματα των κυττάρων με αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) και άνοιξε το δρόμο για νέες δομές στα ηλιακά κύτταρα. Τα κύτταρα με αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) ήταν ενδιαφέροντα λόγω της υψηλής αποδοτικότητας τους και την αντοχή τους στην ιονίζουσα ακτινοβολία στο διάστημα. Το έτος 1973 ήταν καθοριστικό για τα φωτοβολταϊκά, τόσο από τεχνικής όσο και μη τεχνικής άποψης. Μια σημαντική βελτίωση στην απόδοση που συνέβη το 1973 ήταν το «βιολετί κύτταρο» το οποίο είχε μια βελτιωμένη και σύντομη ανταπόκριση στα μήκη κύματος που οδήγησε σε σχετική αύξηση 30% της απόδοσης σε σχέση με την τεχνολογία των κυττάρων πυριτίου. Κύτταρα με αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) αναπτύχθηκαν επίσης από την International Business Machines Corporation (IBM) στις ΗΠΑ έχοντας μέχρι 13% αποδοτικότητα. Επίσης, το 1973, έγινε το πρώτο συνέδριο, το οποίο ονομάστηκε Cherry Hill Conference, και πήρε το όνομα του από την πόλη του New Jersey στις ΗΠΑ, όπου μια ομάδα ερευνητών των φωτοβολταϊκών και ο επικεφαλής των επιστημονικών οργανώσεων των ΗΠΑ συναντήθηκαν για να αξιολογήσουν την επιστημονική αξία και τις δυνατότητες των φωτοβολταϊκών. Το αποτέλεσμα ήταν η απόφαση ότι τα φωτοβολταϊκά ήταν άξια της κρατικής υποστήριξης, με αποτέλεσμα το σχηματισμό του Οργανισμού της Ενεργειακής Έρευνας και Ανάπτυξης των ΗΠΑ, την πρώτη κυβερνητική ομάδα του κόσμου, της οποίας η αποστολή περιλάμβανε την περαιτέρω έρευνα για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και η οποία τελικά έγινε το Τμήμα Ενέργειας των ΗΠΑ. Τέλος, τον Οκτώβριο του 1973, πραγματοποιήθηκε το πρώτο παγκόσμιο εμπόργκο πετρελαίου, από τους παραγωγούς πετρελαίου των χωρών του Περσικού Κόλπου. Αυτό συγκλόνισε τον κόσμο της βιομηχανίας, και οι περισσότερες κυβερνήσεις άρχισαν τα προγράμματα για την ενθάρρυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ιδίως της ηλιακής ενέργειας. Κάποιοι θα έλεγαν ότι αυτό οδήγησε στη σύγχρονη εποχή των φωτοβολταϊκών και έδωσε μια νέα αίσθηση του επείγοντος για την έρευνα και την εφαρμογή των φωτοβολταϊκών σε επίγειες εφαρμογές.

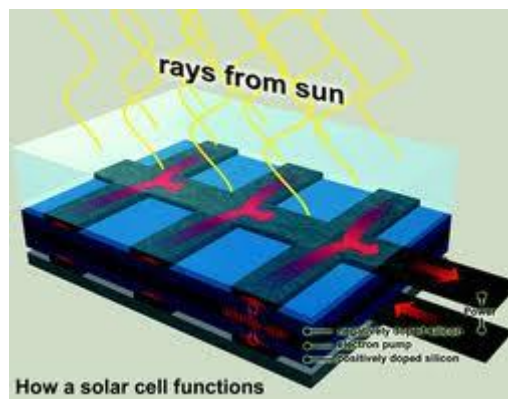
Στη δεκαετία του 1980, η βιομηχανία άρχισε να ωριμάζει, και η έμφαση στην κατασκευή και στο κόστος αυξήθηκε. Κατασκευή εγκαταστάσεων για την παραγωγή φωτοβολταϊκών μονάδων από ηλιακά κύτταρα πυριτίου με πλακίδια p-n επαφών χτίστηκαν στις ΗΠΑ, την Ιαπωνία και την Ευρώπη. Οι νέες αυτές τεχνολογίες ξεκίνησαν να προωθούνται από την κυβέρνηση, τα πανεπιστήμια και από βιομηχανικά εργαστήρια, σε «πilotική» γραμμή παραγωγής. Οι εταιρείες προσπάθησαν να αναβαθμίσουν την τεχνολογία φωτοβολταϊκών

λεπτού υμενίου, όπως πυριτίου (Si) και δισεληνοϊνδιούχου χαλκού (CuInSe_2), τα οποία είχαν επιτύχει μεγαλύτερη από 10% απόδοση για μικρή επιφάνεια (1 cm^2) σε συσκευές που κατασκευάζονται κάτω από ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες. Προς μεγάλη τους έκπληξη, διαπίστωσαν ότι αυτό ήταν πολύ πιο περίπλοκο από απλώς την αλλαγή της κλίμακας του μεγέθους. Οι περισσότερες μεγάλες εταιρείες ημιαγωγών των ΗΠΑ (η IBM, η General Electric, η Motorola), παράτησαν της προσπάθειές τους λόγω έλλειψης υποστήριξης από τα ιδιωτικά ή τα κρατικά μέσα για να συνεχίσουν. Φυσικό αποτέλεσμα ήταν η αγορά των αμερικανικών εταιρειών και των τεχνολογιών τους από ξένες εταιρείες. Το 1990, ο μεγαλύτερος κατασκευαστής ηλιακών του κόσμου ήταν Arco Solar (Καλιφόρνια, ΗΠΑ), που ανήκε στην εταιρεία πετρελαίου Atlantic Richfield, η οποία χρησιμοποίησε πυρίτιο c (c-Si) και πυρίτιο α (a-Si) στην παραγωγή κυττάρων λεπτού υμενίου δισεληνοϊνδιούχου χαλκού (CuInSe_2) προς εμπορευματοποίηση αυτών. Πωλήθηκαν στη γερμανική εταιρεία Siemens και μετονομάστηκαν σε Siemens Solar (το 2001, η ολλανδική εταιρεία Shell Solar θα αγοραστεί από τη Siemens, καταλήγοντας να γίνει μια μεγάλη διεθνής εταιρεία με πολλαπλές τεχνολογίες στην παραγωγή φωτοβολταϊκών). Επίσης, το 1990, η Energy Conversion Devices (MI, USA), δημιούργησε μια κοινή επιχείρηση που ονομάστηκε United Solar Systems Corp. Μαζί με την ιαπωνική κατασκευαστική εταιρεία Canon για να εμπορευματοποιήσει την τεχνολογία κατασκευής κυττάρων τριπλής επαφής, με τη μέθοδο των πολλαπλών επικαλύψεων. Το 1994, η Mobil Solar Energy (MA, USA), η οποία είχε αναπτύξει μια διαδικασία για την ανάπτυξη ηλιακών κυττάρων με ταινία πυριτίου (που ονομάζεται Edge Defined Film Growth ή EFG διαδικασία) αντί της πιο δαπανηρής ανάπτυξης τους σε κρύσταλλο, και η οποία τελικά πωλήθηκε στη γερμανική εταιρεία ASE και μετονομάστηκε σε ASE America. Η βρετανική εταιρεία ηλιακής ενέργειας, BP Solar, απέκτησε το 1989 διπλώματα ευρεσιτεχνίας για την ηλεκτροαπόθεση σε ηλιακά κύτταρα λεπτού υμενίου, τελουριούχου καδμίου (CdTe), όταν η θυγατρική της εταιρεία αγόρασε το αμερικανικό γίγαντα πετρελαίου Standard Oil του Οχάιο. Παράλληλα, απέκτησε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας του Πανεπιστημίου της Νέας Νότιας Ουαλίας (Αυστραλία) για την κατασκευή κυττάρων Laser – Grooved Buried – Grid (LGBG), τα οποία έγιναν οι πιο αποδοτικές κυψέλες πυριτίου στην κατασκευή. Το 1996, υπέγραψε μια συμφωνία με το Πολυτεχνείο της Μαδρίτης στην Ισπανία για την αξιοποίηση της τεχνολογίας περισυλλογής του Ευκλείδη που χρησιμοποιείται στα τύπου LGBG κύτταρα, όπως π.χ. στα συγκεντρωτικά κύτταρα. Το 1999, η BP Solar απέκτησε τα κύτταρα Solarex από την Enron (μια άλλη μεγάλη εταιρεία ενέργειας ορυκτών καυσίμων) που είχε κρυσταλλικά και άμορφα ηλιακά κύτταρα πυριτίου. Έτσι, η BP Solar εδραιώθηκε με την κατασκευή και στις τρεις επιλογές των

τεχνολογιών (πρότυπο πυριτίου, λεπτών υμενίων και συγκεντρωτές). Εν τω μεταξύ, η ιαπωνική βιομηχανία φωτοβολταϊκών άρχισε «να απογειώνεται». Η παραγωγή των μονάδων πυριτίου και η εντατική έρευνα της τεχνολογίας λεπτών υμενίων στην Ιαπωνία οδήγησε σε πολλά καινοτόμα σχέδια για συσκευές, για βελτιωμένες επεξεργασίες υλικών, και σε αυξανόμενη κυριαρχία στην παγκόσμια αγορά φωτοβολταϊκών.

Κεφάλαιο 3^ο: Τρόπος λειτουργίας ηλιακών κυττάρων

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ



Η λειτουργία του ηλιακού κυττάρου διακρίνεται σε τρία στάδια:

- Τα φωτόνια από τις ακτίνες του ηλίου χτυπάνε το ηλιακό πάνελ και απορροφούνται από τα ημιαγώγιμα υλικά, όπως το πυρίτιο.
- Τα ηλεκτρόνια (αρνητικά φορτισμένα) αποσπώνται από τα άτομά τους, προκαλώντας μια ηλεκτρική διαφορά δυναμικού. Το ρεύμα ξεκινάει να ρέει μέσα από το υλικό για να ακυρώσει το δυναμικό και τελικά αυτή είναι η ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται. Λόγω της ειδικής σύνθεσης των ηλιακών κυττάρων, τα ηλεκτρόνια επιτρέπεται να μετακινηθούν σε μία μόνο κατεύθυνση.
- Μια σειρά από ηλιακά κύτταρα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε χρησιμοποιήσιμη ποσότητα συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος (DC).

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται σε βάθος ο τύπος των υλικών στα οποία οφείλεται η λειτουργία των φωτοβολταϊκών. Επίσης γίνεται εκτενής μελέτη της αρχής λειτουργίας των φωτοβολταϊκών κυττάρων.

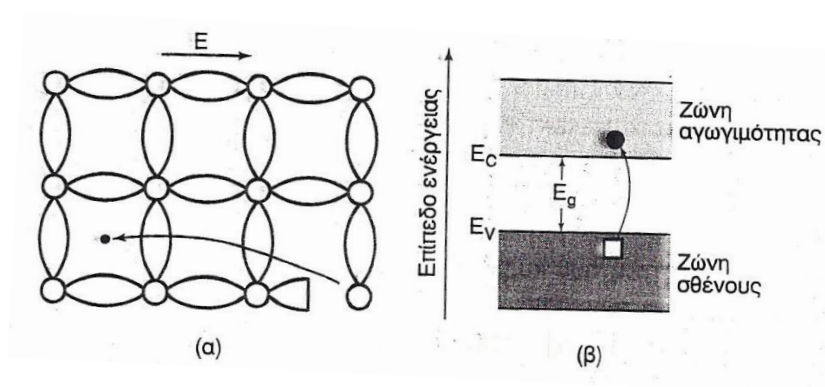
3.2 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

Οι ημιαγωγοί είναι μια ειδική κατηγορία υλικών, τα οποία εμφανίζουν ομοιοπολικό δεσμό. Στα υλικά αυτά το ενεργό διάκενο (E_g) είναι μη μηδενικό και υπερκαλύπτεται με σχετικά μικρή προσφορά ενέργειας. Οι ημιαγωγοί σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι κακοί αγωγοί του ηλεκτρισμού, ενώ σε υψηλές θερμοκρασίες γίνονται καλοί αγωγοί.

Στις συνηθισμένες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, η διαθέσιμη θερμική ενέργεια είναι αρκετή ώστε να προκαλέσει τη μεταπήδηση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Όταν ένα ηλεκτρόνιο μεταπηδά από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, δημιουργείται στην αρχική του θέση μια ηλεκτρονική οπή. Συνεπώς, κάθε φορά που ένα ηλεκτρόνιο μετακινείται στη ζώνη αγωγιμότητας, λόγω προσφοράς θερμότητας, δημιουργούνται δύο φορείς ηλεκτρικών φορτίων: το ηλεκτρόνιο και θετικά φορτισμένη οπή.

3.2.1 ΕΓΓΕΝΕΙΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

Υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια και οι οπές μετακινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις και με διαφορετική κινητικότητα μ (Σχ. 3.1). Εάν αυτό το φαινόμενο λαμβάνει χώρα συχνά τότε αναπτύσσεται σημαντική αγωγιμότητα και ο ημιαγωγός αυτός καλείται αυτοημιαγωγός ή εγγενής ημιαγωγός. Σε αυτούς τους ημιαγωγούς το ενεργειακό διάκενο είναι μικρότερο από 2 eV (όπως π.χ. καθαρό Ge με $E_g=0,66$ eV και καθαρό Si με $E_g=1,12$ eV στη θερμοκρασία περιβάλλοντος).



Σχήμα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση (α) της μεταπήδησης ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και (β) της μετακίνησης οπής και ηλεκτρονίου σε έναν ενδογενή ημιαγωγό.

Στους πίνακες 3.1 και 3.2 παρουσιάζονται οι ομάδες του Περιοδικού Συστήματος που περιλαμβάνουν στοιχεία ημιαγωγών και οι ιδιότητες των κυριοτέρων εγγενών ημιαγωγών στους 20° C, αντίστοιχα.

ΠΕΡΙΟΔΟΣ \ ΟΜΑΔΑ		II	III	IV	V	VI	VII
		2	Be	B	C	N	O
3	Mg	Al	Si	P	S	Cl	
4	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	
5	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	
6	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	

Πίνακας 3.1: Οι ομάδες του περιοδικού συστήματος που περιλαμβάνουν το στοιχεία των ημιαγωγών

Ας θεωρήσουμε τα στοιχεία της ομάδας IVA του Περιοδικού Συστήματος. Το εύρος της απαγορευμένης ζώνης του πρώτο στοιχείου αυτής της ομάδας (του C) είναι 6 Eν. Άρα στη θερμοκρασία περιβάλλοντος το διαμάντι (αλλοτροπική μορφή του C) είναι άριστο μονωτικό υλικό.

Όσο το ατομικό βάρος των ατόμων αυτής της ομάδας (IVA) αυξάνει, τόσο τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους συνδέονται ασθενέστερα με τον πυρήνα, άρα το εύρος της απαγορευμένης ζώνης ελαττώνεται. Στοιχεία με μεγάλο ατομικό βάρος, όπως είναι ο κασσίτερος (Sn) και ο μόλυβδος (Pb), έχουν $E_g=0$ και είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού.

Η αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού (σ) είναι συνισταμένη της αγωγιμότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων και των οπών:

$$\sigma = n \cdot q \cdot \mu_n + p \cdot q \cdot \mu_p \quad (3.1)$$

όπου n : ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων

p : ο αριθμός των οπών

q : το φορτίο του ηλεκτρονίου

μ_n : η κινητικότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων

μ_p : η κινητικότητα των οπών

Υλικό	Ενεργειακό διάκενο (E_g)		Κινητικότητες		Ενδογενής αγωγιμότητα	Πλεγματική σταθερά
	10^{-16}J	eV	μ_n	μ_p		
			$\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$		$\text{ohm}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$	cm^{-1}
Στοιχεία						
C(διαμάντι)	0,96	~ 6	0,17	0,12	$<10^{-16}$	0,357
Si	0,176	1,1	0,19	0,0425	5×10^{-4}	0,543
Ge	0,112	0,7	0,36	0,23	2	0,566
Sn	0,016	0,1	0,20	0,10	10^6	0,649
Ενώσεις						
AlSb	0,26	1,6	0,02	–	–	0,613
GaP	0,37	2,3	0,019	0,012	–	0,545
GaAs	0,22	1,4	0,88	0,04	10^{-6}	0,565
GaSb	0,11	0,7	0,60	0,08	–	0,612
InP	0,21	1,3	0,47	0,015	500	0,587
InAs	0,058	0,36	2,26	0,026	10^4	0,604
InSb	0,029	0,18	8,2	0,17	–	0,648
ZnS	0,59	3,7	0,014	0,0005	–	–
SiC	0,48	3	0,01	0,002	–	–

Πίνακας 3.2: Ιδιότητες των κυριότερων ενδογενών ημιαγωγών στην θερμοκρασία των 20° C

Επίσης, στους ενδογενείς ημιαγωγούς ο αριθμός των ελευθέρων ηλεκτρονίων (n) είναι ίσος με τον αριθμό των οπών (p). Δηλαδή ισχύει:

$$n_i = n = p = N \exp\left(\frac{E_c - E_F}{kT}\right) \quad (3.2)$$

όπου n_i : οι φορείς αγωγιμότητας του ενδογενούς ημιαγωγού και

N : μια σταθερά που ονομάζεται ενεργή πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων και η τιμή της είναι περίπου ίδια για όλους τους ενδογενείς ημιαγωγούς ($N = 2,5 \cdot 10^{25} \text{m}^{-3}$).

Λαμβάνοντας τώρα υπόψη ότι η στάθμη Fermi (E_F) είναι στο μέσο μεταξύ της «κορυφής» της ζώνης σθένους (E_v) και του «πυθμένα» της ζώνης αγωγιμότητας (E_c) ισχύει ότι:

$E_c - E_F = E_F - E_v$ ή $E_c - E_F = E_g/2$. Η εξίσωση 3.2 μετατρέπεται ως εξής:

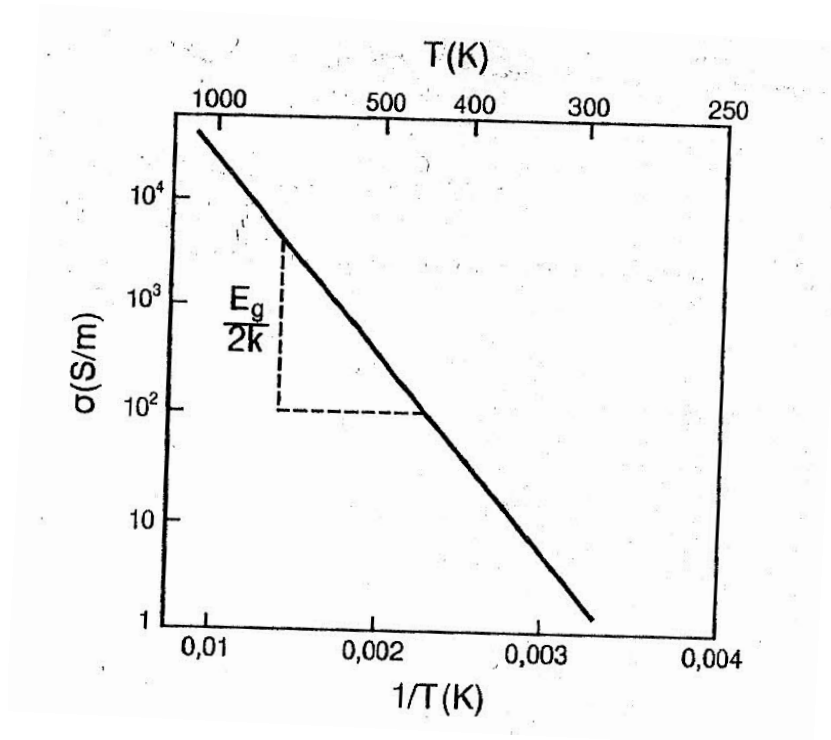
$$n_i = N \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (3.3)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 3.1 και 3.3, η σχέση που δίνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία είναι η εξής:

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (3.4)$$

όπου, $\sigma_0 = Nq(\mu_p + \mu_n)$

Εφόσον οι παραπάνω ποσότητες είναι σταθερές, η ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού αυξάνεται με τη θερμοκρασία, δηλαδή μειώνεται με την αύξηση του $1/T$, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.2



Σχήμα 3.2: Μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ενός ενδογενούς ημιαγωγού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

Μια πολύ σημαντική ιδιότητα των ενδογενών ημιαγωγών είναι η φωτοαγωγιμότητα, δηλαδή, η ικανότητα μετάβασης των ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας με πρόσληψη ενέργειας υπό μορφή ακτινοβολίας.

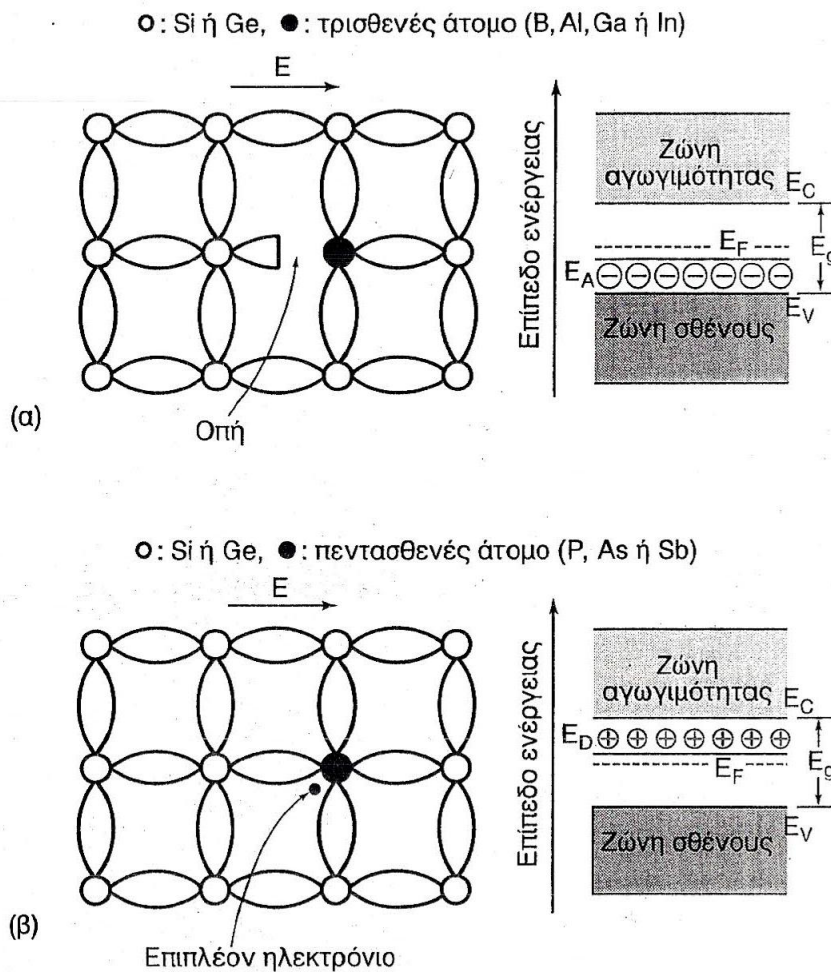
3.2.2 ΕΞΩΓΕΝΕΙΣ ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των ενδογενών ημιαγωγών (Si και Ge, βλ. πίνακα 3.2) είναι πολύ μικρή ώστε να χρησιμοποιηθούν, σε ηλεκτρικά κυκλώματα. Είναι όμως δυνατό να βελτιωθεί η αγωγιμότητα τους κατόπιν ελεγχόμενης προσθήκης ακαθαρσιών. Με αυτόν τον τρόπο παρασκευάζονται οι εξωγενείς ημιαγωγοί ή ημιαγωγοί προσμίξεων.

Οι ακαθαρσίες αυτές είναι είτε θετικού τύπου (τύπου $-p$), είτε αρνητικού τύπου (τύπου $-n$), ανάλογα με τον αριθμό των ηλεκτρονίων σθένους, δηλαδή ανάλογα με το αν αυτός ο αριθμός είναι αντίστοιχα μικρότερος ή μεγαλύτερος του σθένους του μητρικού στοιχείου (4 όταν το μητρικό υλικό είναι το Si). Οι συγκεντρώσεις των προστιθέμενων στοιχείων είναι της τάξης των 100-1000 ppm.

3.2.3 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΤΥΠΟΥ p

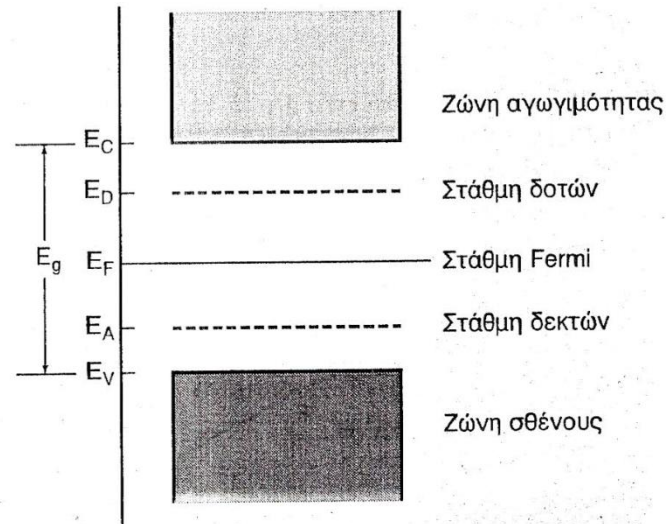
Όταν εισάγεται στο κρυσταλλικό πλέγμα του Si (τετρασθενές) ένα στοιχείο τρισθενές (όπως π.χ. B, Al, Ga, ή In), τότε μετά τη σταθεροποίηση θα δημιουργηθεί ένα στερεό διάλυμα Si με λίγα άτομα του στοιχείου προσθήκης. Καθένα από αυτά τα άτομα καταλαμβάνει ένα κόμβο του κρυσταλλικού πλέγματος με αποτέλεσμα την έλλειψη ενός ηλεκτρονίου που θα συμμετείχε στη δημιουργία δεσμού μεταξύ του ίδιου ατόμου και ενός από τα γειτονικά άτομα πυριτίου (Σχ. 3.3^α).



Σχήμα 3.3: (α) Εξωγενής ημιαγωγός τύπου p και αντίστοιχο διάγραμμα ενεργειακών ζωνών. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα πραγματοποιείται από τις ηλεκτρονικές οπές. (β) Εξωγενής ημιαγωγός τύπου n και αντίστοιχο διάγραμμα ενεργειακών ζωνών. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα πραγματοποιείται από τα υπάρχοντα επιπλέον ηλεκτρόνια.

Δηλαδή δημιουργείται, μεταξύ του ατόμου προσθήκης και του Si μια ηλεκτρονική οπή. Τα γειτονικά ηλεκτρόνια μετακινούμενα, τείνουν να συμπληρώσουν τις υπάρχουσες ηλεκτρονικές οπές, που οφείλονται στην ύπαρξη τρισθενών ατόμων, δημιουργώντας νέες οπές. Η φορά κίνησης των οπών είναι αντίθετη αυτής των ηλεκτρονίων. Τα άτομα αυτά ονομάζονται προσθήκες τύπου p ή δέκτες ηλεκτρονίων, ενώ οι σχηματιζόμενοι ημιαγωγοί ονομάζονται εξωγενής ημιαγωγοί τύπου p. Η απαιτούμενη ενέργεια, στην περίπτωση αυτή, για τη μετακίνηση ενός ηλεκτρονίου από το μητρικό άτομο στο άτομο του δέκτη (και επομένως η απαιτούμενη ενέργεια για την επίτευξη της αγωγιμότητας) είναι $\Delta E = E_A - E_V$. Τα ενεργειακά επίπεδα (στάθμες) για τους ημιαγωγούς τύπου p και n φαίνονται στο Σχ.

3.4. Το ενεργειακό επίπεδο του ατόμου – δέκτη, E_A , είναι μικρότερο του επιπέδου E_F του ενδογενούς ημιαγωγού και επομένως ισχύει ότι $E_A - E_V \ll E_F - E_V = E_g/2$.



Σχήμα 3.4: Η διαμόρφωση του διαγράμματος των ενεργειακών ζωνών στην περίπτωση εξωγενών ημιαγωγών (τύπου p ή n)

Οι φορείς σε έναν ημιαγωγό τύπου p υπολογίζονται από την παρακάτω εξίσωση σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία:

$$n_{ολ} = n_A + 2n_i = N_A \exp\left[-\frac{(E_A - E_V)}{kT}\right] + 2N \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (3.5)$$

Όπου N_A : μια σταθερά που εκφράζει τη μέγιστη πυκνότητα των φορέων των ατόμων δεκτών και εξαρτάται από το συνολικό ποσοστό προσμίξεων

Ο πρώτος όρος (n_A) της Εξ. 3.5 εκφράζει τους φορείς των ατόμων – δεκτών, ενώ ο δεύτερος όρος ($2n_i$) εκφράζει τους φορείς του ενδογενούς ημιαγωγού.

Άρα η αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού τύπου p θα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\sigma_p = N_A q \mu_p \exp\left[-\frac{(E_A - E_V)}{kT}\right] + N q (\mu_n + \mu_p) \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (3.6)$$

Η Εξ. 3.6 μπορεί να απλοποιηθεί για τις ακόλουθες οριακές περιπτώσεις:

- Για χαμηλές θερμοκρασίες: $\sigma_p \propto \exp[-(E_A - E_V)/kT]$ (περιοχή πρόσμιξης). Σε αυτήν την περιοχή των θερμοκρασιών η αγωγιμότητα αυξάνεται με τη θερμοκρασία.
- Για υψηλές θερμοκρασίες: $\sigma_p = \text{σταθερά} = N_A q \mu_p$ (περιοχή εξάντλησης). Παρατηρείται στην περιοχή αυτή «εξάντληση» των φορέων των προσμίξεων. Η περιοχή σταθερής αγωγιμότητας αυξάνεται με το ποσοστό των προσμίξεων.
- Για πολύ υψηλές θερμοκρασίες: $\sigma_p \propto \exp[-E_g/2kT]$ (ενδογενής περιοχή). Σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες ενεργοποιούνται οι φορείς του ενδογενούς ημιαγωγού.

Οι περιοχές αυτές συνοψίζονται στο σχήμα 3.5



Σχήμα 3.5: Μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ενός εξωγενούς ημιαγωγού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

3.2.4 ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ ΤΥΠΟΥ n

Στην περίπτωση που η πρόσμιξη στο κρυσταλλικό πλέγμα του Si ή Ge είναι ένα πεντασθενές άτομο (όπως P, As ή Sb), τότε στη γειτονιά της πρόσμιξης θα υπάρχει ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο που δε θα συμμετέχει στο δεσμό. Το ηλεκτρόνιο αυτό είναι ελεύθερο και μετακινείται εύκολα με την εφαρμογή κάποιου ηλεκτρικού πεδίου (Σχ. 3.3β). Τα άτομα αυτά ονομάζονται προσθήκες τύπου n ή δότες ηλεκτρονίων και οι σχηματιζόμενοι ημιαγωγοί ονομάζονται εξωγενείς ημιαγωγοί τύπου n. Η απαιτούμενη ενέργεια για την

επίτευξη της αγωγιμότητας, είναι η ίδια με αυτήν που απαιτείται για τη μετακίνηση ενός πλεονάζοντος ηλεκτρονίου. Η ενέργεια αυτή ισούται με $E_C - E_D$, όπου E_D , η ενεργειακή στάθμη του ατόμου - δότη. Κατά αναλογία με τους ημιαγωγούς τύπου p ισχύει ότι $E_C - E_D \ll E_C - E_F = E_g/2$.

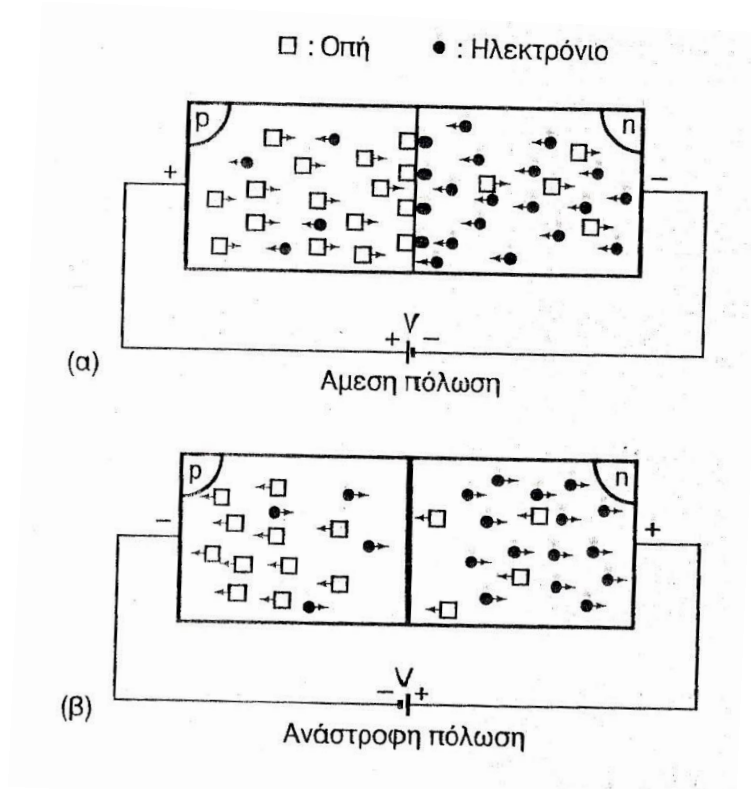
Η αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού τύπου n δίνεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$\sigma_n = N_D q \mu_n \exp\left[-\frac{(E_C - E_D)}{kT}\right] + Nq(\mu_n + \mu_p) \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (3.7)$$

Για την Εξ. 3.7 ισχύουν οι περιοχές πρόσμιξης, εξάντλησης και ενδογενούς ημιαγωγιμότητας που συνοψίστηκαν στην περίπτωση ημιαγωγών τύπου p (βλ. Σχ. 3.5)

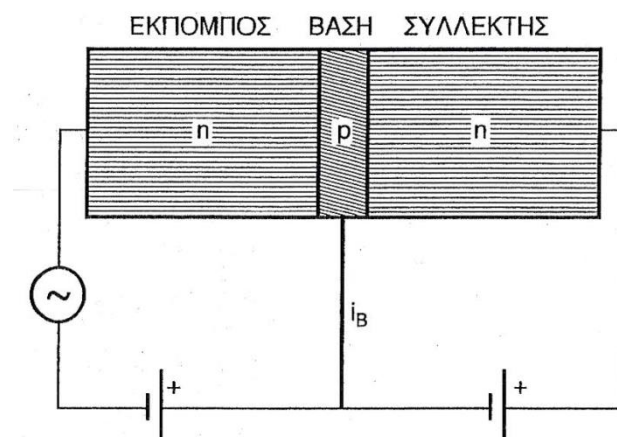
3.3 ΔΙΟΔΟΣ p-n

Μια ημιαγωγίμη δίοδος αποτελείται από δύο μέρη: έναν ημιαγωγό τύπου p και ένα ημιαγωγό τύπου n. Όταν το μέρος p είναι συνδεδεμένο με το θετικό πόλο της πηγής τότε η πόλωση ονομάζεται άμεση ή ορθή, ενώ στην αντίθετη περίπτωση ονομάζεται ανάστροφη (Σχ. 3.6). Στην περίπτωση της ορθής πόλωσης, τα ηλεκτρόνια ρέουν ανεμπόδιστα από την πηγή, διαμέσου του τμήματος n, προς την περιοχή της διεπιφάνειας όπου επανασυνδέονται με τις οπές που σχηματίζονται με την απομάκρυνση ηλεκτρονίων από το θετικό πόλο της πηγής, διαμέσου του τμήματος p. Η δίοδος σε αυτήν την περίπτωση συμπεριφέρεται ως αγωγή. Αντίθετα, αν γίνει ανάστροφη πόλωση, γίνεται επανασύνδεση των οπών του τμήματος p με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την πηγή, και, από την άλλη πλευρά, απομάκρυνση των ελεύθερων ηλεκτρονίων του τμήματος n προς το θετικό πόλο της πηγής. Σε αυτή την περίπτωση η δίοδος παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση και λέγεται ότι συμπεριφέρεται ως μονωτής.



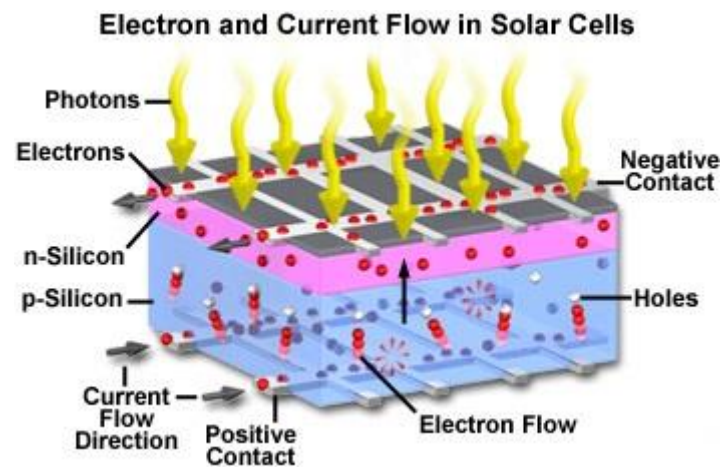
Σχήμα 3.6: Δίοδος p-n. (α) Άμεση πόλωση, (β) Ανάστροφη πόλωση

Με τον συνδυασμό δύο ενώσεων p-n δημιουργείται ένα transistor, που είναι η σημαντικότερη διάταξη ημιαγωγών για την ενίσχυση ηλεκτρικών τάσεων ή εντάσεων. Ένας από τους απλούστερους τύπους transistor είναι το διπολικό transistor n-p-n (Σχ. 3.7).



Σχήμα 3.7: Σχηματική παράσταση ενός διπολικού transistor n-p-n για την ενίσχυση της έντασης ενός σήματος

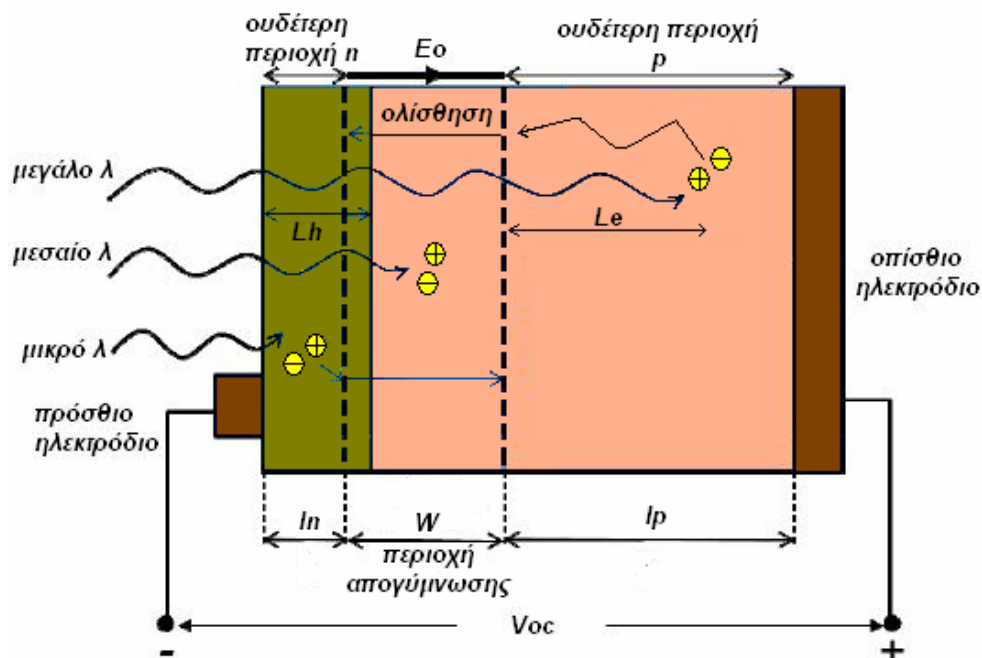
Σχηματικά ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο ημιαγωγού παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα



Σχήμα 3.8: Ροή ρεύματος και ηλεκτρονίων στο εσωτερικό ηλιακών κυττάρων

3.4 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΚΥΤΤΑΡΟΥ

Στην παρακάτω σχήμα απεικονίζεται σχηματικά μια τυπική δομή ενός ηλιακού κυττάρου.



Σχήμα 3.9: Η αρχή λειτουργίας ενός ηλιακού κυττάρου

Το κύριο μέρος της αποτελείται από την επαφή $p - n$, με πολύ λεπτή και έντονα ντοπαρισμένη περιοχή n , από την πλευρά της οποίας προσπίπτει και η ηλιακή ακτινοβολία.

Η περιοχή απογύμνωσης (W) εκτείνεται κατά κύριο λόγο στην περιοχή p. Για να ισχύει η ηλεκτρική ουδετερότητα, θα πρέπει το φορτίο της περιοχής p να ισούται με αυτό της περιοχής n. Έχοντας σαν δεδομένο ότι η συγκέντρωση των δοτών είναι μεγαλύτερη από τη συγκέντρωση των αποδεκτών, η περιοχή απογύμνωσης εκτείνεται περισσότερο στην περιοχή p.

Στην περιοχή απογύμνωσης υπάρχει ένα εσωτερικό πεδίο E_0 . Τα ηλεκτρόδια που είναι συνδεδεμένα στην περιοχή n πρέπει να επιτρέπουν στην ακτινοβολία να διέρχεται στη διάταξη, διατηρώντας παράλληλα χαμηλή την αντίσταση εν σειρά. Επιπλέον, στην επιφάνεια τοποθετείται μία ανακλαστική επικάλυψη για να μειώνεται η ανάκλαση της ακτινοβολίας. Η περιοχή ή είναι πολύ λεπτή, γι' αυτό και τα περισσότερα φωτόνια απορροφώνται εντός της περιοχής απογύμνωσης (W) και της ουδέτερης p – περιοχής (Ip), δημιουργώντας έτσι ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών. Τα ζεύγη που δημιουργούνται στην περιοχή απογύμνωσης διαχωρίζονται αμέσως, λόγω της επίδρασης του εσωτερικού πεδίου E_0 . Το ηλεκτρόνιο ολισθαίνει και φθάνει στην ουδέτερη n – περιοχή, καθιστώντας την αρνητική κατά ένα ποσό φορτίου e^- , ενώ η οπή ολισθαίνει και φθάνει στην ουδέτερη p – περιοχή, καθιστώντας της θετικά φορτισμένη. Με αυτή τη διαδικασία δημιουργείται μία τάση ανοιχτού κυκλώματος ανάμεσα στους ακροδέκτες της διάταξης. Με την εφαρμογή ενός εξωτερικού φορτίου, τα επιπλέον ηλεκτρόνια που έχουν καταφθάσει στην n – περιοχή μπορούν, καταναλώνοντας έργο, να μετακινηθούν διάμεσο του εξωτερικού κυκλώματος και να φθάσουν στην p – περιοχή, όπου και επανασυνδέονται με τις επιπλέον οπές που βρίσκονται εκεί.

Τα ζεύγη που δημιουργούνται λόγω της φωτοδιέγερσης από τα φωτόνια μεγάλου μήκους κύματος, απορροφώνται στην ουδέτερη p – περιοχή και διαχέονται, αφού δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο. Εάν ο χρόνος επανασύνδεσης των ηλεκτρονίων είναι τ_e , τότε το ηλεκτρόνιο διαχέεται σε μία μέση απόσταση $L_e = \sqrt{D_e \cdot \tau_e}$, όπου D_e είναι ο συντελεστής διάχυσης στην p – περιοχή. Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε απόσταση L_e από την περιοχή απογύμνωσης, μπορούν εύκολα να διαχυθούν μέχρι εκεί. Από την περιοχή αυτή και μετά ολισθαίνουν λόγω του πεδίου E_0 και μεταβαίνουν στην n – περιοχή. Επομένως, παρατηρούμε ότι μόνο τα φωτοδημιουργούμενα ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών που βρίσκονται σε απόσταση μήκους διάχυσης L_e των φορέων μειονότητας από το στρώμα απογύμνωσης, συνεισφέρουν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Μόλις ένα ηλεκτρόνιο διαχυθεί μέχρι την περιοχή απογύμνωσης,

σαρώνεται προς την n – περιοχή από το πεδίο E_o δίνοντας ένα επιπλέον αρνητικό φορτίο. Οι οπές που βρίσκονται στην p – περιοχή δημιουργούν ένα συνολικό θετικό φορτίο στην περιοχή. Τα ζεύγη που δημιουργούνται σε απόσταση από την περιοχή απογύμνωσης μεγαλύτερη του μήκους διάχυσης L_e , χάνονται λόγω επανασύνδεσης. Οι ίδιες αρχές ισχύουν και για τα ζεύγη που δημιουργούνται στην n – περιοχή, λόγω της απορρόφηση φωτονίων μικρού μήκους κύματος. Οι οπές που δημιουργούνται την n – περιοχή εντός απόστασης μικρότερης του μήκους διάχυσης, L_h , μπορούν να φτάσουν μέχρι το στρώμα απογύμνωσης όπου και σαρώνονται στην p – περιοχή. Συνεπώς, η φωτοδιέγερση των ζευγών που συνεισφέρει στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο λαμβάνει χώρα στην περιοχή μήκους $L_h + W + L_e$.

Εάν οι ακροδέκτες της διάταξης είναι βραχυκυκλωμένοι, όπως στο Σχ. 3.10, τότε τα επιπλέον ηλεκτρόνια της n – περιοχής μπορούν να κινηθούν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος και να εξουδετερώσουν τις οπές στην p – περιοχή. Το ρεύμα που οφείλεται στη ροή των φωτοδιεγερμένων φορέων ονομάζεται φωτορεύμα I_L και η τιμή του είναι ανάλογη προς τα ενεργά φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Για την πυκνότητα του φωτορεύματος ισχύει ικανοποιητικά η σχέση:

$$I_L = e \cdot g \cdot (L_e + L_h)$$

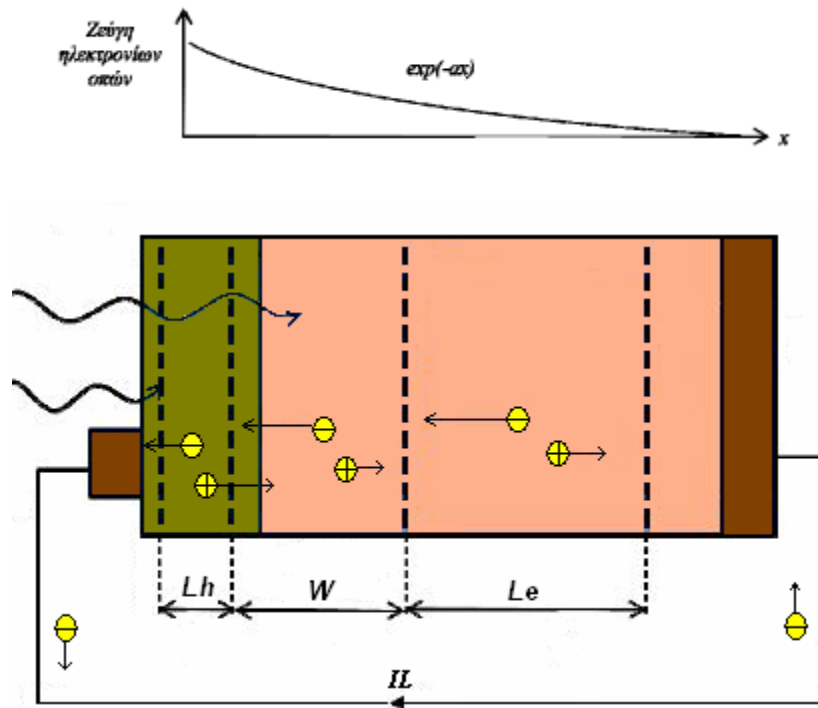
Όπου:

e : το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο.

G : ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών φορέων από τα φωτόνια της ακτινοβολίας

L_e : το μέσο μήκος διάχυσης των ηλεκτρονίων

L_h : το μέσο μήκος διάχυσης των οπών.



Σχήμα 3.10: Οι φορείς που φωτοδιεγείρονται εντός της περιοχής μήκους $L_h + W + L_e$ δημιουργούν το φωτόρευμα I_L . Απεικονίζεται επίσης η διακύμανση της συγκέντρωσης των φωτοδιεγερμένων ζευγών ηλεκτρονίων – οπών με την απόσταση, όπου α , ο συντελεστής απορρόφησης στο εκάστοτε μήκος κύματος.

Τα ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών που φωτοδιεγείρονται λόγω της απορρόφησης των ενεργητικών φωτονίων στην n – περιοχή, κοντά στην επιφάνεια ή εκτός της περιοχής που απέχει από την περιοχή απογύμνωσης απόσταση μεγαλύτερη του μήκους διάχυσης L_h , χάνονται λόγω επανασύνδεσης, αφού ο χρόνος ζωής στην n – περιοχή είναι πολύ μικρός, λόγω υψηλού ντοπαρίσματος.

Κεφάλαιο 4^ο: Ηλιακά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ηλιακά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου επικράτησαν στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών από την αρχή. Σήμερα, αποτελούν το 85% της αγοράς φωτοβολταϊκών και παρόλο που η μείωση στη χρήση τους έχει ανακοινωθεί αρκετές φορές, εκτιμάται ότι θα συνεχίσουν να χρησιμοποιούνται κατά κόρων, τουλάχιστον για μια ακόμα δεκαετία.

Ένας από τους λόγους που ο συγκεκριμένος τύπος φωτοβολταϊκών επικρατεί, είναι το γεγονός ότι η μικροηλεκτρονική έχει βοηθήσει στην ανάπτυξη της τεχνολογία πυριτίου σε μεγάλο βαθμό. Από τη μία, όχι μόνον η κοινότητα της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας επωφελήθηκε από την αποκτηθείσα γνώση, αλλά επίσης και η αγορά πυριτίου, τόσο νέων όσο και μεταχειρισμένων προϊόντων, κατάφερε να μειώσει σε μεγάλο ποσοστό το κόστος αυτών. Από την άλλη μεριά, η επιστήμη της Μικροηλεκτρονικής εξελίχθηκε από το γεγονός ότι ορισμένες καινοτομίες και θεωρίες αυτής, προέκυψαν μέσω της έρευνας των συγκεκριμένων φωτοβολταϊκών.

Για αρκετές δεκαετίες, η αγορά των χερσαίων φωτοβολταϊκών κυριαρχήθηκε από υποστρώματα πυριτίου Czochralski p – τύπου. Οι συνεχείς βελτιώσεις στην επίδοση, απόδοση και αξιοπιστία των φωτοβολταϊκών αυτών οδήγησε στην μείωση του κόστους και την επακόλουθη επέκταση της αγοράς φωτοβολταϊκών γενικά. Εξαιτίας του χαμηλότερου κόστους του πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Multicrystalline Si), ηλιακά κύτταρα από το συγκεκριμένο υλικό (mc-Si cells) άρχισαν να εμφανίζονται, από τις αρχές του 1980, ως εναλλακτικό στα μονοκρυσταλλικά κύτταρα πυριτίου. Παρόλα αυτά, η χαμηλότερη ποιότητα των πολυκρυσταλλικών κυττάρων πυριτίου, εμπόδισε την εξασφάλιση επιδόσεων όμοιων με τα κύτταρα Czochralski, έτσι ώστε μακροπρόθεσμα, τα συνολικά κέρδη από τους δύο τύπους φωτοβολταϊκών να είναι παρόμοιες (Πιν. 4.1).

Τύπος φωτοβολταϊκού	Κόστος μονοκρυσταλλικού	Κόστος πολυκρυσταλλικού
Καθαρό πυρίτιο	38	38
Μορφοποίηση σε ράβδους	115	35
Πριόνισμα	77	77
Συνολικό Κόστος Συστοιχίας	230	150
Κατασκευή κυττάρων	80	80
Κόστος εξαρτημάτων	310	230
Απόδοση	0,95	0,9
Συνολικό Κόστος Κυττάρου	326	256
Συναρμολόγηση	75	75
Ελασματοποίηση	75	75
Κόστος μονάδα (€/m²)	476	406
Απόδοση	0,14	0,12
Κόστος μονάδας (€/W ισχύος)	3,40	3,38

Πιν. 4.1: Ανάλυση κόστους παραγωγής μονοκρυσταλλικών και πολυκρυσταλλικών ηλιακών κυττάρων, έτους 1990.

Βαθύτερη κατανόηση της φυσικής και των οπτικών ιδιοτήτων του πολυκρυσταλλικού πυριτίου, οδήγησε στο σχεδιασμό βελτιωμένων συσκευών, ο οποίος επέτρεψε ευρύτερη διάδοση της τεχνολογίας τους. Ο συνδυασμός των υλικών καλύτερης ποιότητας, αλλά και των βελτιωμένων κατεργασιών των υλικών επέτρεψε καλύτερες επιδόσεις σε ακόμα χαμηλότερο κόστος, αυξάνοντας το μερίδιο του πολυκρυσταλλικού πυριτίου στην αγορά φωτοβολταϊκών, πολύ περισσότερο από το αντίστοιχο μερίδιο του μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Η εξέλιξη της αγοράς για τη δεκαετία 1990 – 2000 φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί (Πιν. 4.2).

Έτος	Ηλιακά κύτταρα Cz – Si		Ηλιακά κύτταρα mc – Si	
	Αποδιδόμενη Ισχύς (MW)	Μερίδιο Αγοράς (%)	Αποδιδόμενη Ισχύς (MW)	Μερίδιο Αγοράς (%)
1996	48,7	55	28,4	32
2000	92,0	32	146,7	51

Πιν. 4.2: Μερίδιο αγοράς ηλιακών κυττάρων μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

4.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΩΣ ΥΛΙΚΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

4.2.1 ΟΓΚΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Το κρυσταλλικό πυρίτιο έχει ένα θεμελιώδες έμμεσο ενεργειακό διάκενο $E_g = 1,17$ eV, ενώ το άμεσο ενεργειακό διάκενο ξεπερνά τα 3 eV σε συνήθη θερμοκρασία. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθορίζουν την παραλλαγή των οπτικών ιδιοτήτων του πυριτίου σε σχέση με το μήκος κύματος, μεταξύ των οποίων είναι και ο συντελεστής χαμηλής απορρόφησης των φωτονίων που βρίσκονται κοντά στο ενεργειακό διάκενο. Στα χαμηλά και στα υπεριώδη μήκη κύματος του φάσματος, η παραγωγή δύο ζευγών οπής – ηλεκτρονίου από μόνο ένα φωτόνιο είναι δυνατή, αν και το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι ποσοτικά μικρό. Στα υψηλά και στα υπέρυθρα μήκη κύματος του φάσματος, η παρασιτική ελεύθερη μεταφορά οπών συναγωνίζεται με την παραγωγή ηλεκτρονίων λόγω του ενεργειακού διακένου. Επίσης, η εγγενής συγκέντρωση είναι μια ακόμα σημαντική παράμετρος η οποία σχετίζεται με τη δομή του ενεργειακού διακένου, αφού συνδέει τη μετακίνηση ζευγών οπών – ηλεκτρονίων με την παραγωγή διαφοράς δυναμικού.

Σε αγωγούς υψηλής πυκνότητας (επιτυγχάνεται μέσω ντοπαρίσματος ή διέγερσης του κυττάρου), η ενεργειακή συμπεριφορά του φωτοβολταϊκού αλλάζει, οδηγώντας σε μια αύξηση στην αποτελεσματική, εγγενή συγκέντρωση: αυτό είναι ένα από τα πιο βαριά αποτελέσματα ντοπαρίσματος, κάτι που υποβαθμίζει την ποιότητα του φωτοβολταϊκού των υψηλά ντοπαρισμένων περιοχών.

Ο ανασυνδυασμός του πυριτίου συνήθως κυριαρχείται από τον ανασυνδυασμό των ελαττωμάτων, τα οποία περιγράφονται από τους χρόνους ζωής Shockley-Read-Hall (SRH lifetimes). Ο σχετιζόμενος χρόνος ζωής τ (ο οποίος μπορεί να περιγραφεί και μέσω του μήκους διάχυσης L) αυξάνεται στα υλικά καλής ποιότητας. Ο ανασυνδυασμός Auger από την άλλη μεριά, είναι μια θεμελιώδης διαδικασία η οποία γίνεται απαραίτητη σε συγκεντρώσεις υψηλής μετακίνησης. Οι συντελεστές Auger αποδεικνύεται ότι είναι υψηλότεροι σε αγωγούς μέσης συγκέντρωσης, εξαιτίας εξιτονικών φαινομένων. Επίσης, ο

άμεσος ανασυνδυασμός του ενεργειακού διακένου είναι μια θεμελιώδης διαδικασία, όμως ποσοτικά αμελητέα.

Σε μέσες και χαμηλές συγκεντρώσεις ντοπαρίσματος, τα ηλεκτρόνια παρουσιάζουν περίπου τρεις φορές περισσότερη κινητικότητα από ότι οι οπές, αν και οι δύο περιορίζονται από τη σκέδαση φωνονίων. Η διασπορά ατελειών κυριαρχεί σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις ντοπαρίσματος. Οι σκεδάσεις των αγωγών ηλεκτρονίων – οπών επηρεάζουν τις ιδιότητες μεταφοράς σε υψηλά εγχυμένα υλικά.

4.3 ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

4.3.1 ΕΠΑΦΕΣ

Οι επαφές είναι κατασκευές δομημένες πάνω στην επιφάνεια ημιαγωγού που επιτρέπουν τις μεταφορές φορτίων μεταξύ των ημιαγωγών και των εξωτερικών κυκλωμάτων. Στα ηλιακά κύτταρα, οι επαφές απαιτούνται για τη μεταφορά των φωτογεννούμενων φορτίων από το απορροφητικό ημιαγωγό υπόστρωμα. Επίσης, πρέπει να είναι επιλεκτικές, ούτως ώστε να επιτρέπουν μόνο τη μεταφορά φορτίου από το πυρίτιο στο μέταλλο (χωρίς ενεργειακές απώλειες) και όχι αντίστροφα.

Οι άμεσες επαφές πυριτίου – μετάλλου, γενικά, δεν συμπεριφέρονται με αυτόν τον τρόπο. Εξαιρέση σε αυτόν τον τύπο επαφών είναι οι επαφές υψηλής περιεκτικότητας οπών, με υπόστρωμα υψηλού ντοπαρίσματος p – πυριτίου με αλουμίνιο. Όμως, η πιο δοκιμασμένη προσέγγιση είναι η δημιουργία περιοχών υψηλού ντοπαρίσματος κάτω από το μέταλλο, τύπου – p για τη δημιουργία οπών και τύπου – n για την εξαγωγή ηλεκτρονίων. Η μετακίνηση των φορτίων πλειονότητας στην περιοχή αυτή γίνεται διαμέσου των επαφών με μικρή απώλεια τάση. Η μεταφορά των φορτίων μειονότητας περιγράφεται από την ταχύτητα επιφανειακού ανασυνδυασμού (SRV), S. Παρόλο που η ταχύτητα επιφανειακού ανασυνδυασμού είναι υψηλή και περιορίζεται μόνο από τη θερμική διάχυση, ώστε $S \approx 10^6$ cm/s, η συγκέντρωση των φορτίων μειονότητας, για κάποιον δεδομένο ημιαγωγό, περιορίζεται από το υψηλό ντοπαρίσμα και η ροή τους μειώνεται.

Όπως φαίνεται παρακάτω, η επαφή για τα φορτία μειονότητας συνήθως τοποθετείται στο μπροστινό πρόσωπο (ακτινοβολούμενο) του υποστρώματος και το αντίστοιχο υψηλό ντοπαρισμένο υμένιο, συνήθως αποκαλείται εκπομπός. Η ντοπαρισμένη περιοχή κάτω από την επαφή των φορτίων πλειονότητας, ονομάζεται πεδίο πίσω επαφής (Back Surface Field, BSF).

Ο ανασυνδυασμός σε αυτές τις υψηλά ντοπαρισμένες περιοχές περιγράφεται από την πυκνότητα κορεσμένου ρεύματος J_0 και περιλαμβάνει το ανασυνδυασμό όγκου και τον ανασυνδυασμό πραγματικής επαφής. Το πάχος τους w πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερο από το μήκος διάχυσης L των φορτίων μειονότητας ώστε οι λίγες επιπλέον μετακινήσεις φορτίων να φτάσουν την επαφή, ενώ παράλληλα το επίπεδο ντοπαρίσματος πρέπει να είναι πολύ υψηλό ώστε να μειωθεί η αντίσταση των επαφών και η συγκέντρωση των φορτίων μειονότητας, αν και τα αποτελέσματα του υψηλού ντοπαρίσματος μπορεί να περιορίσουν το συνιστώμενο επίπεδο ντοπαρίσματος αυτών των περιοχών. Η δραστηριότητα του ανασυνδυασμού του υμενίου πίσω επαφής, συχνά περιγράφεται σε

σχέση με την ταχύτητα επιφανειακού ανασυνδυασμού αντί της συγκέντρωσης κορεσμένου ρεύματος.

Τυπικές τιμές του J_0 είναι μεταξύ του 10^{-3} έως 10^{-2} $A \cdot cm^{-2}$. Ο διάχυτος φώσφορος χρησιμοποιείται στις επαφές – n. Από την άλλη, η κραματοποίηση με αλουμίνιο υπερτερεί του βορίου για τις επαφές – p, όπου πολύ παχιά απορροφητικά υμένα p^+ μπορούν να σχηματισθούν σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και μέτριες θερμοκρασίες. Αδυναμία των τελευταίων είναι τα υμένα p^+ είναι μη – ομογενή και μπορεί ακόμα και να λείπουν τοπικά. Επίσης, οι τιμές του J_0 σε ομοιογενή υμένα τέτοιου τύπου, είναι μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες. Σε σύγκριση με το αλουμίνιο, το βόριο προσφέρει υψηλότερα επίπεδα ντοπαρίσματος, λόγω μεγαλύτερης διαλυτότητας και διαύγειας στο φως, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιείται και στις ακτινοβολούμενες επιφάνειες.

Άλλοι συνδυασμοί που έχουν δοκιμαστεί και επιτυγχάνουν επιλεκτικές μετακινήσεις φορτίων είναι οι παρακάτω: επαφές μετάλλου – μονωτή – ημιαγωγού (Metal – Insulator – Semiconductor contacts, MIS), επαφές πολυπυριτίου (polysilicon contacts) και ετεροεπαφές σε άμορφο πυρίτιο (a – Si) ή άλλα υλικά υψηλού ενεργειακού διακένου.

4.3.2 ΛΟΙΠΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ

Εξαιτίας της σοβαρής εναλλαγής των δεσμών μεταξύ των ατόμων πυριτίου, ένας μεγάλος αριθμός διαφορετικών ενεργειακών διακένων μπορεί να υπάρξει σε μια ελεύθερη επιφάνεια πυριτίου, τα οποία λειτουργώντας σαν κέντρα ανασυνδυασμού SRH κάνουν την ταχύτητα επιφανειακού ανασυνδυασμού πολύ μεγάλη, σε τιμές κοντά στα 10^5 cm/s. Προκειμένου να μειωθεί ο επιφανειακός ανασυνδυασμός, δύο προσεγγίσεις ακολουθούνται.

Στην πρώτη προσέγγιση, περιλαμβάνει τη μείωση της πυκνότητας των καταστάσεων των επιφανειακών ηλεκτρονίων στο ενεργειακό διάκενο. Αυτό επιτυγχάνεται εναποθέτοντας ή αναπτύσσοντας ένα υμένιο κατάλληλου υλικού, το οποίο μερικώς επαναφέρει το περιβάλλον δημιουργίας δεσμών των επιφανειακών ατόμων πυριτίου. Αυτό το υλικό θα πρέπει να είναι μονωτής.

Μία μέθοδος είναι μέσω της ανάπτυξης θερμικών οξειδίων πυριτίου σε μια ατμόσφαιρα πλούσια σε οξυγόνο σε βάρος των ατόμων πυριτίου του υποστρώματος και σε υψηλές θερμοκρασίες γύρω από τους $1000^\circ C$. Μια δεύτερη μέθοδος είναι τα οξείδια πυριτίου να εναποτίθενται μέσω της τεχνικής χημικής εναπόθεσης ατμών υπό την ενίσχυση πλάσματος (Plasma – Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD), σε χαμηλές θερμοκρασίες μεταξύ των 300 και των $400^\circ C$. Η ποιότητα και των δύο τεχνικών είναι πολύ ευαίσθητη σε μεταγενέστερες θεραπευτικές διαδικασίες, με το υδρογόνο να παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόκτηση χαμηλών τιμών ταχύτητας επιφανειακού ανασυνδυασμού, χαμηλότερες των 100 cm/s.

Ως γενικός κανόνας, το S αυξάνεται ντοπαρώντας το υπόστρωμα. Επίσης, εξαρτάται από το επίπεδο έγχυσης και τον τύπο του ντοπαρίσματος, εξαιτίας του ότι οι διεπιφάνειες περιέχουν θετικά φορτία, τα οποία επηρεάζουν τον αριθμό των μετακινήσεων στην επιφάνεια και εξαιτίας του ότι η πιθανότητα δέσμευσης ηλεκτρονίων και οπών είναι

διαφορετική. Ο τύπος – n (εγγενείς επιφάνειες) είναι συνήθως καλύτερος από τον τύπο – p. Η σταθερότητα υπό την έκθεση σε ακτινοβολίες UV είναι ένα ακόμα θεμελιώδες θέμα.

Στην δεύτερη προσέγγιση, η πυκνότητα των επιπλευσών μετακινήσεων στη διεπιφάνεια μειώνεται σε σχέση με τον όγκο. Το φαινόμενο αυτό επιφέρει μειωμένη ταχύτητα επιφανειακού ανασυνδυασμού στις ακμές του όγκου των αντίστοιχων τοπικών χωρικών φορτίων. Μπορεί να παραχθεί από φορτία σε επιφανειακά υμένια, εξαιτίας της ηλεκτροστατικής που σχετίζονται με τις δομές μετάλλου – οξειδίου – ημιαγωγού (Metal – Oxide – Semiconductor, MOS), ή με το ντοπάρισμα.

Το επιφανειακό υμένιο μπορεί να συσσωρευθεί ή να αναστραφεί, ή, αντιστοίχως, να ντοπαρισθεί με τον ίδιο ή τον αντίθετο τύπο από το υπόστρωμα. Η δραστηριότητα του ανασυνδυασμού περιγράφεται καλύτερα από μια σταθερή πυκνότητα κορεσμένου ρεύματος, J_0 , της οποίας η ελαχιστοποίηση ακολουθεί τους ίδιους κανόνες όπως περιγράφηκαν για τις επαφές, εάν το S στην επιφάνεια είναι μεγάλο. Αντίθετα, εάν το S είναι μικρό σε σύγκριση με το λόγο D/L των φορτίων μειονότητας (με D τη σταθερά διάχυσης και L το μήκος διάχυσης στο υπόστρωμα) στο επιφανειακό υμένιο, είναι προτιμότερο το υπόστρωμα να είναι λεπτό ή διαπερατό στους αγωγούς ($w < L$). Το ιδανικό επίπεδο ντοπαρίσματος είναι ένας συνδυασμός μεταξύ της μείωσης των επιπλέον μετακινήσεων, και των αποτελεσμάτων υψηλού ντοπαρίσματος και της αύξησης της ταχύτητας επιφανειακού ανασυνδυασμού μέσω ντοπαρίσματος. Μέτρια επίπεδα ντοπαρίσματος είναι προτιμότερα στην περίπτωση αυτή. Σε παθητικοποιημένες επιφάνειες το J_0 παίρνει τιμές κοντά στο 10^{-14} A/cm², με το ντοπάρισμα φωσφόρου του υποστρώματος να δίνουν καλύτερα αποτελέσματα από το ντοπάρισμα βορίου.

Εν κατακλείδι, ο ανασυνδυασμός σε επιφάνειες μη – επαφής μπορεί να γίνει πολύ μικρότερη από ότι στις μεταλλοποιημένες και αυτό έχει μεγάλη επίδραση στην εξέλιξη του σχεδιασμού ηλιακών κυττάρων πυριτίου.

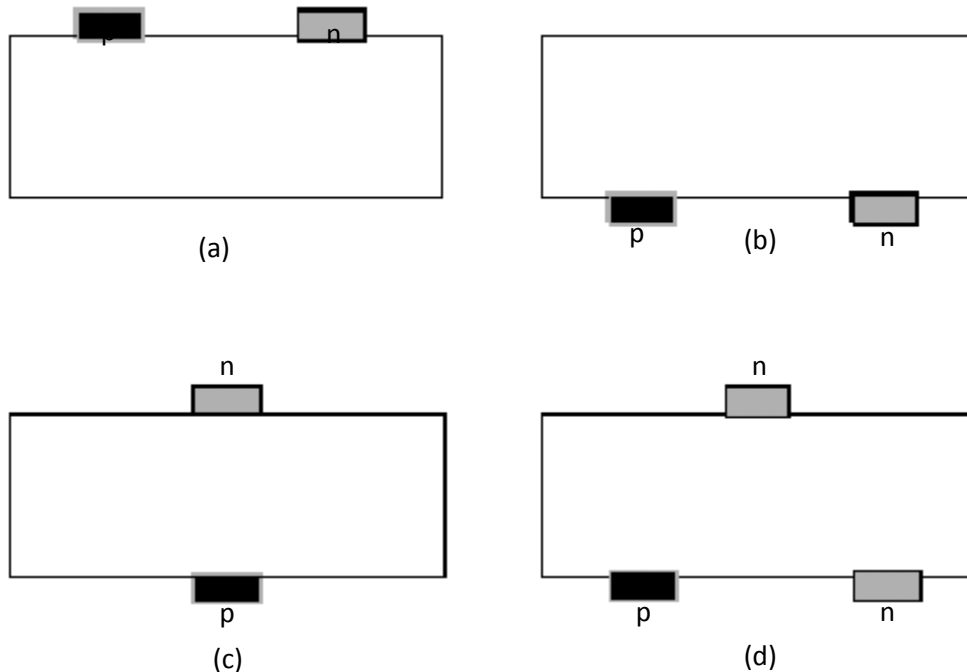
4.4 ΔΟΜΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

4.4.1 ΔΟΜΗ ΚΥΤΤΑΡΟΥ

Αρκετές μελέτες έχουν διεξαχθεί προκειμένου να βρεθεί η περιοριστική αποδοτικότητα και η βέλτιστη δομή ενός ηλιακού κυττάρου άμορφου πυριτίου (a – Si). Από αυτές προέκυψε ότι όλες οι απώλειες μπορούν να αποφευχθούν, με την προϋπόθεση ότι πρέπει να κατασταλούν:

- i. Οι απώλειες μη ανάκλασης και μέγιστης απορρόφησης που επιτυγχάνονται μέσω τεχνικών ιδανικής παγίδευσης – φωτός
- ii. Ο ελάχιστος ανασυνδυασμός: ο SRH και ο επιφανειακός ανασυνδυασμός θεωρούνται αποφεύξιμα και μόνο ο ανασυνδυασμός Auger παραμένει
- iii. Οι επαφές είναι ιδανικές: δεν υπάρχουν ούτε φαινόμενα σκίασης ούτε απώλειες σε εν σειρά αντιστάσεις
- iv. Δεν υπάρχουν απώλειες στις μεταφορές στο εσωτερικό του υποστρώματος: τα προφίλ των αγωγών στο εσωτερικό του υποστρώματος είναι επίπεδα, έτσι ώστε ο ανασυνδυασμός να είναι ο ελάχιστος δυνατός για μια δεδομένη τάση

Τα ιδανικά κύτταρα θα πρέπει να χρησιμοποιούν εγγενή υλικά, προκειμένου να ελαχιστοποιείται ο ανασυνδυασμός Auger και η απορρόφηση των ελεύθερων φορτίων. Επίσης, θα πρέπει να έχουν πάχος περίπου 80 μm , ως βέλτιστο αποτέλεσμα μεταξύ της ανταλλαγής μεταξύ καλής απορρόφησης και χαμηλού ανασυνδυασμού. Μπορεί έτσι να επιτευχθεί 29% αποτελεσματικότητα σε ηλιοφάνεια AM 1.5 Global, και θερμοκρασία 25°C.

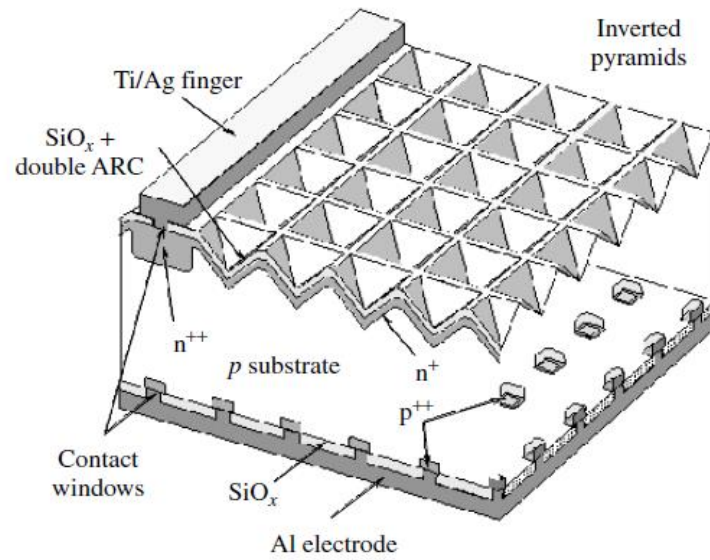


Σχήμα 4.1: Δυνατές δομές επαφών: (a) και οι δύο επαφές τοποθετούνται στην μπροστά επιφάνεια, (b) και οι δύο επαφές τοποθετούνται στην πίσω επιφάνεια, (c) τοποθετούνται επαφές και στις δύο επιφάνειες και (d) σε μία από τις δύο επιφάνειες τοποθετείται ένας επιπλέον αγωγός. Ο επιπλέον αγωγός μπορεί να είναι είτε p – τύπου, είτε n – τύπου

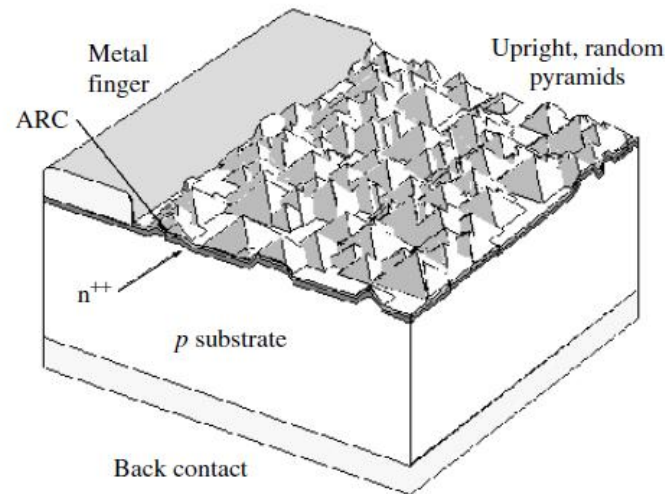
Αυτή η ιδεατή κατάσταση δεν υποδεικνύει τη θέση τοποθέτησης των επαφών. Για να υλοποιηθεί η περίπτωση (iv) που αναφέρθηκε παραπάνω, θα πρέπει να τοποθετηθούν οι επαφές στην ακτινοβολούμενη ή εμπρός επιφάνεια, πιο κοντά στη φωτογέννηση (Σχ. 4.1 (a)). Εξαιτίας των απωλειών από τη σκίαση των μετάλλων αυτό απειλεί την περίπτωση (iii) που αναφέρθηκε παραπάνω. Αυτή η δομή χρησιμοποιείται για την επίτευξη υψηλής συγκέντρωσης. Τοποθετώντας και τις δύο επαφές στην πίσω επιφάνεια (Σχ. 4.1(b)) επιφέρει αντίθετα αποτελέσματα. Τα κύτταρα που έχουν τις επαφές στην πίσω επιφάνεια παρουσιάζουν την καλύτερη απόδοση για δεδομένη συγκέντρωση, παρουσιάζοντας απόδοση έως 23% για μέση ηλιοφάνεια.

Στα περισσότερα κύτταρα, κάθε επαφή τοποθετείται σε διαφορετική επιφάνεια, το οποίο είναι τεχνολογικά απλούστερο (Σχ. 4.1 στις). Οι μετακινήσεις φορτίων μειονότητας στο υπόστρωμα υπόστρωμα συνήθως συλλέγονται μπροστά αφού η εξαγωγή τους είναι πιο προβληματική εξαιτίας της μικρής πυκνότητας. Το μήκος διάχυσης περιγράφει τη μέγιστη απόσταση από όπου μπορούν τα φορτία να συλλεχθούν. Οι μετακινήσεις φορτίων πλειονότητας μπορούν να ολισθήσουν στην πίσω επαφή με χαμηλές απώλειες. Αρκετοί σχεδιασμοί εξαγουν φορτία μειονότητας τόσο στην εμπρός όσο και στην πίσω επαφή (Σχ. 4.1. (d)), και έτσι αυξάνουν τον όγκο της προσοδοφόρας φωτογέννησης.

Τα κύτταρα δύο προσώπων είναι σχεδιασμένα να συλλέγουν το φως και από τις δύο επιφάνειες τους, το οποίο επιτρέπει μια ενίσχυση στην αποδιδόμενη ισχύ αν υπάρχει ένας υψηλός συντελεστής λευκαύγειας. Οποιαδήποτε από τις δομές που αναφέρθηκαν ανωτέρω μπορούν να λειτουργήσουν με αυτόν τον τρόπο, δεδομένου ότι και οι δύο επιφάνειες του κυττάρου επιτρέπουν στο φως να περνά.



(a)



(b)

Σχήμα 4.2: (a) Παθητικοποιημένος εκπομπός και πίσω κύτταρο τοπικής διάχυσης (Passivated Emitter and Rear Locally diffused cell, PERL), και (b) βιομηχανικό κύτταρο με τυπωμένες επαφές

Και τα δύο παραπάνω ηλιακά κύτταρα (Σχ. 4.2 (a) και (b)) έχουν μέγιστη καταγεγραμμένη απόδοση 24.7%, με τη συνήθη τιμή απόδοσης να είναι 15%, και τα οποία ακολουθούν την Τρίτη δομή επαφών (Σχ. 4.1 (c)). Παρακάτω οι δύο αυτοί τύποι περιγράφονται πιο αναλυτικά με στόχο την απεικόνιση του εύρους χρήσης τους, καθώς και την ανάλυση της

διαφοράς απόδοσης των κυττάρων αυτών σε σχέση με τα βέλτιστα θεωρητικά κύτταρα πυριτίου.

4.4.2 ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ

4.4.2.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Οι μέγιστες αποδόσεις επιτυγχάνονται με μονοκρυσταλλικά υλικά επίπεδης ζώνης (Flat Zone Si, FZ – Si), τα οποία σε συνδυασμό με την υψηλή κρυσταλλική τελειότητα έχει τα μικρότερα επίπεδα επιμολύνσεων μεταξύ των μεταλλικών και των ελαφρών (O, C, N) ατελειών. Αυτό μεταφράζεται στους μεγαλύτερους χρόνους ζωής SRH μετά την επεξεργασία να είναι της τάξεως των ms, αν και είναι ακόμα συντομότεροι από το όριο Auger. Το μαγνητικό πυρίτιο Czochralski (MCz – Si) περιλαμβάνει πολύ λιγότερο οξυγόνο από ότι το συμβατικό πυρίτιο Czochralski το οποίο επίσης επιφέρει πολύ υψηλές αποδόσεις.

Τα βιομηχανικά κύτταρα είναι συστοιχίες πυριτίου Czochralski (Cz – Si) εξαιτίας της ευρείας διαθεσιμότητας τους. Οι συστοιχίες πυριτίου Czochralski αν και είναι τέλειοι κρύσταλλοι, έχουν υψηλή συγκέντρωση οξυγόνου, το οποίο επηρεάζει το χρόνο ζωής τους ποικιλοτρόπως. Μερικές εμπορικές συσκευές είναι κατασκευασμένες από υποστρώματα πολυκρυσταλλικού πυριτίου (mc – Si), το οποίο αναπτύσσεται είτε σε μορφή μπλοκ είτε σε μορφή ταινιών, μέσω διαδικασιών ειδικά ανεπτυγμένων για φωτοβολταϊκά. Επιπροσθέτως των κρυσταλλικών ατελειών, όπως τα όρια των κόκκων και οι μετατοπίσεις, το δυναμικό περιεχόμενο (δυνατότητα παραγωγής φορτίου λόγω της ύπαρξης ελεύθερων ηλεκτρονίων) των μετάλλων αυτών είναι υψηλότερο εξαιτίας των χαμηλότερων διαχωρισμών κατά την τήξη και κατά την ταχύτερη διαδικασία στερεοποίησης τους. Ως αποτέλεσμα, ο χρόνος ζωής του πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι σημαντικά μικρότερος.

Όμως ο χρόνος ζωής είναι ένας σημαντικός παράγοντας στο τέλος της κατασκευής των ηλιακών κυττάρων, κατά τη διάρκεια του οποίου μπορούν να υποβληθούν σε ισχυρές διαφοροποιήσεις. Το ζήτημα αυτό ρυθμίζεται με διαφορετικούς τρόπους σε ένα εργαστηριακό και σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον. Στο εργαστήριο, πραγματοποιούνται μετρήσεις ώστε να διατηρηθούν υψηλοί χρόνοι ζωής από την αρχή, αποφεύγοντας τις επιμολύνσεις κατά τη διάρκεια κατεργασιών υψηλής θερμοκρασίας: διασφάλιση καθαρότητας φούρνων, έξτρα καθαρά χημικά κλπ. Στις πιο άγριες συνθήκες ενός εργοστασίου παρόλα αυτά και με τη χρήση υλικών τα οποία περιέχουν ατέλειες (Cz και mc – Si), το πρόβλημα είναι πιο περίπλοκο: επιπλέον των επιμολύνσεων από το περιβάλλον, οι ακαθαρσίες και οι ατέλειες στο εσωτερικό του υποστρώματος κινούνται, αλληλεπιδρούν και αλλάζουν στις υψηλές θερμοκρασίες του χώρου αυτού. Η λύση στην περίπτωση αυτή είναι να εισαχθούν ενδιάμεσα βήματα καθαρισμού και θεραπείας των υποστρωμάτων κατά την παραγωγική διαδικασία. Μέσω αυτής της τεχνικής, ο τελικός χρόνος ζωής του υποστρώματος ενός βιομηχανικού κυττάρου ποικίλει από 1 έως 10 μs.

Τα ενδιάμεσα βήματα που προαναφέρθηκαν αφαιρούν ή μειώνουν σημαντικά το ποσοστό των ακαθαρσιών στο εσωτερικό των υποστρωμάτων στις συστοιχίες των κυττάρων, εξουδετερώνοντας έτσι το φαινόμενο της μείωσης του χρόνου ζωής. Συνήθως, αυτό γίνεται με τη χρήση κατάλληλων στοιχείων, τα οποία συλλαμβάνουν τις ακαθαρσίες και στη

συνέχεια είτε αποβάλλονται μαζί με αυτές, είτε τις συγκεντρώνουν σε αβλαβές για το κύτταρο σημείο. Τέτοια στοιχεία είναι το αλουμίνιο και ο φώσφορος, λόγω της καλής διάχυσής τους στα υμένα BSF και στους εκπομπούς, αντίστοιχα. Τέλος, ένα άλλο ενδιαμέσο βήμα που χρησιμοποιείται συχνά είναι η τεχνική της ογκικής παθητικοποίησης, μιας θεραπευτικής διαδικασίας με τη χρήση υδρογόνου.

4.4.2.2 ΕΠΙΠΕΔΑ ΚΑΙ ΤΥΠΟΙ ΝΤΟΠΑΡΙΣΜΑΤΟΣ

Και οι δύο τύποι υποστρωμάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω χρησιμοποιούν ντοπαρίσμα με βόριο, αφού ενδείκνυται τόσο λόγω των φυσικών ιδιοτήτων του, όσο και για ιστορικούς λόγους. Παρόλα αυτά, η χρήση βορίου συντελεί στην υποβάθμιση των κυττάρων Cz – Si κατά την ακτινοβολία τους και άρα η χρήση του βορίου μέλλει να καταργηθεί.

Το ιδανικό ντοπάρισμα υποστρώματος εξαρτάται από τη δομή του κυττάρου και τον επικρατέστερο μηχανισμό ανασυνδυασμού. Αν και τα εγγενή υποστρώματα παρουσιάζουν το πλεονέκτημα των υψηλότερων περιοριστικών χρόνων ζωής Auger, το υψηλότερο ντοπάρισμα ευνοείται όταν ο ανασυνδυασμός SRH είναι παρόν, αφού ο ανασυνδυασμός είναι ανάλογος της επιπλέουσας πυκνότητας που μειώνεται, για δεδομένη τάση, όσο το ντοπάρισμα αυξάνεται. Αυτό εξισορροπείται με τη μείωση του ίδιου του χρόνου ζωής.

Ένα υψηλό ντοπάρισμα βοηθά επίσης, στην ελαχιστοποίηση των απωλειών των εν σειρά αντιστάσεων, τα οποία σχετίζονται με τη μεταφορά των φορτίων στην πίσω επιφάνεια στα παχιά κύτταρα, με την επαφή των φορτίων πλειονότητας να είναι στην πίσω επιφάνεια.

Τα επίπεδα ντοπαρίσματος της τάξης των 10^{16} cm^{-3} συναντώνται στα υποστρώματα των βιομηχανικών κυττάρων. Πολύ υψηλές αποδόσεις επιτυγχάνονται τόσο σε χαμηλές ($1 \Omega \cdot \text{cm}$ για τα κύτταρα PERL) όσο και σε υψηλές αντιστάσεις υποστρωμάτων, όπως στα κύτταρα σημειακής επαφής.

4.4.2.3 ΠΑΧΟΣ

Από την άποψη της ηλεκτρικής απόδοσης, η επιλογή του βέλτιστου πάχους υποστρώματος εξαρτάται τόσο από τη δομή, όσο και από την ποιότητα των υλικών και περιλαμβάνει διάφορες παραμέτρους. Στα κύτταρα με μήκος διάχυσης μεγαλύτερο από το πάχος υποστρώματος, ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι ο επιφανειακός ανασυνδυασμός: αν το S στην πίσω επιφάνεια είναι υψηλότερο από το D/L για τα φορτία μειονότητας του υποστρώματος (περίπου 250 cm/s για τα καλύτερα κύτταρα), η λέπτυνση του κυττάρου αυξάνει τον ανασυνδυασμό για δεδομένη τάση, και αντιστρόφως. Τα λεπτότερα κύτταρα απορροφούν λιγότερο φως, φαινόμενο το οποίο εξασθενεί μέσω τεχνικών παγίδευσης – φωτός. Οι παθητικοποιημένοι εκπομποί και τα κύτταρα PERL αναφέρθηκε ότι βελτιώνονται όταν το πάχος υποστρώματος είναι από 280 – 400 μm , εξαιτίας ενός (σχετικά) υψηλού ανασυνδυασμού πίσω επιφάνειας και μη ιδανικής παγίδευσης – φωτός.

Οι απώλειες που σχετίζονται με τη μεταφορά φορτίων που εξάγονται από τις μη ακτινοβολούμενες επιφάνειες μειώνονται με τη λέπτυνση: σε συμβατικές δομές κυττάρων, αυτό οδηγεί σε μειωμένες σειριακές αντιστάσεις. Σε κύτταρα πίσω επαφών, και οι δύο τύποι φορτίων επωφελούνται από τη λέπτυνση και η εναλλαγή στην απορρόφηση οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές w , που κυμαίνονται από 150 – 200 μm .

Το μήκος διάχυσης των βιομηχανικών κυττάρων (περίπου 100 μm) είναι γενικά χαμηλότερο από το πάχος. Αυτά τα κύτταρα είναι ιδιαίτερα ανεπηρέαστα από τη λέπτυνση αφού συλλέγουν μόνο τα φορτία που γεννώνται κοντά στην επαφή και δεν επηρεάζονται από τον ανασυνδυασμό της πίσω επαφής. Τα κριτήρια που επηρεάζουν κυρίως είναι το κόστος και η ευκολία κατασκευής. Ένα πάχος περίπου 200 – 300 μm συνήθως επιλέγεται, αν και υπάρχει μια ξεκάθαρη τάση για πιο λεπτές συστοιχίες, κάτι το οποίο αποσκοπεί σε οικονομία υλικού πυριτίου. Προχωρημένες τεχνικές δημιουργίας συστοιχιών και εξελιγμένες μέθοδοι λέπτυνσης χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πολύ λεπτών υποστρωμάτων, μεγάλης επιφάνειας που δεν σπάνε. Σε αυτά η παγίδευση – φωτός και ο ανασυνδυασμός της πίσω επιφάνειας είναι πολύ σημαντικά.

4.4.3 ΜΠΡΟΣΤΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

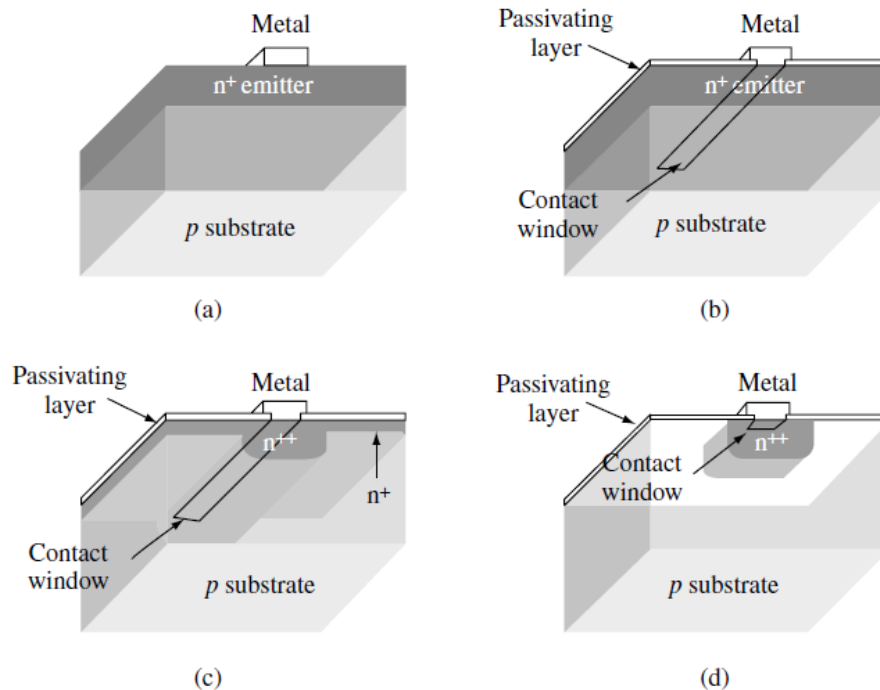
4.4.3.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΜΕΤΑΛΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Μεταλλικά πλέγματα χρησιμοποιούνται στην μπροστινή επιφάνεια για να συλλέξουν τα διεσπαρμένα φωτογεννημένα φορτία. Ο συμβιβασμός μεταξύ της οπτικής διαπερατότητας και της σειριακής αντίστασης επιβάλλουν τη χρήση τεχνικών μεταλλοποίησης, οι οποίες είναι ικανές να παράγουν πολύ λεπτές αλλά αρκετά παχιές αγώγιμες μεταλλικές γραμμές με χαμηλή αντίσταση επαφής με το πυρίτιο. Τα εργαστηριακά κύτταρα χρησιμοποιούν φωτολιθογραφία και εναπόθεση ατμών για το σχηματισμό μεταλλικών δακτύλων πάχους 10 – 15 μm . Οι δομές Ti/Pd/Ag συνδυάζουν επαφές χαμηλής αντίστασης με το πυρίτιο τύπου – η και υψηλής ογκικής αγωγιμότητας. Αυτές οι διαδικασίες είναι καλά προσαρμοσμένες στη μαζική παραγωγή που βασίζεται στις τεχνολογίες παχιών υμενίων. Πάστες Ag αποτυπώνονται στην επιφάνεια του υποστρώματος, οδηγώντας σε φαρδιές γραμμές πάχους 100 μm με υψηλή ογκική και επιφανειακή αντίσταση. Πιο τραχιές τεχνικές μεταλλοποίησης εισάγουν υψηλότερες απώλειες σκίασης και αντίστασης και εμποδίζουν την ενίσχυση της απόδοσης που θα μπορούσε να επιτευχθεί από τον σχεδιασμό του εσωτερικού του κυττάρου.

4.4.3.2 ΟΜΟΓΕΝΕΙΣ ΕΚΠΟΜΠΟΙ

Κάτω από τις μεταλλικές γραμμές, το υπόστρωμα πρέπει να είναι υψηλά ντοπαρισμένο προκειμένου η επαφή να γίνει επιλεκτική. Συνήθως, η ντοπαρισμένη περιοχή ή εκπομπός επεκτείνεται σε ολόκληρη την μπροστινή επιφάνεια, λειτουργώντας ως διαφανές ηλεκτρόδιο, προσφέροντας στο φορτία μειονότητας στο υπόστρωμα ένα μονοπάτι χαμηλής αντίστασης προς τις μεταλλικές γραμμές.

Όταν η εκτιθέμενη επιφάνεια δεν είναι παθητικοποιημένη (Σχ. 4.3 (a)), ο εκπομπός θα πρέπει να είναι όσο πιο λεπτός γίνεται, επειδή η υψηλή SRV μειώνει την δράση του απορροφημένου φωτός στη συγκεκριμένη περιοχή και επίσης προκαλεί υψηλό ντοπαρίσμα προκειμένου να μειωθεί ο ανασυνδυασμός. Από την άλλη μεριά, μια επαρκής αντίσταση υμενίου (low – sheet resistance) μπορεί να επιτευχθεί. Η λύση είναι η δημιουργία πολύ λεπτούς και υψηλού ντοπαρίσματος εκπομπούς.



Σχήμα 4.3: Διαφορετικές δομές εκπομπών: (a) ομογενής εκπομπός χωρίς παθητικοποιημένη επιφάνεια, (b) ομογενής εκπομπός με παθητικοποιημένη επιφάνεια, (c) επιλεκτικός εκπομπός και (d) τοπικός εκπομπός

Εάν η επιφάνεια είναι παθητικοποιημένη (Σχ. 4.3 (b)), η απόδοση της συλλογής του εκπομπού μπορεί να αυξηθεί μειώνοντας το επίπεδο του ντοπαρίσματος και έτσι να μειωθεί το υψηλό ντοπαρίσμα και άλλα επιβλαβή φαινόμενα. Αυτό θα πρέπει να εξισορροπηθεί με την αντίσταση των επαφών. Συχνά απαιτείται η εγχάραξη της παθητικοποιημένης επιφάνειας πριν τη μεταλλοποίηση (δεν ισχύει στην περίπτωση των κυττάρων που έχουν αποτυπωμένες επαφές). Για να διατηρηθεί η χαμηλή επιφανειακή αντίσταση και να μειωθεί ο ανασυνδυασμός στο μεταλλοποιημένο τμήμα, ο εκπομπός έχει υψηλό βάθος (περίπου 1 μm). Σημειώνεται ότι η συλλογή φορτίων κοντά στην επιφάνεια υποδηλώνει ότι ο εκπομπός είναι λεπτός σε σχέση με το μήκος διάχυσης των φορτίων μειονότητας ($w < L$) και έτσι είναι πολύ ευαίσθητος σε επιφανειακό ανασυνδυασμό. Ο ανασυνδυασμός μπορεί να μειωθεί περεταίρω, κάνοντας το παράθυρο επαφής στενότερο από το πάχος των μεταλλικών δακτύλων.

Ο έλεγχος τόσο της επιφανειακής συγκέντρωσης όσο και του βάθους του εκπομπού, μπορεί να επιτευχθεί με εναπόθεση, με μια θερμική κατεργασία, της επιθυμητής ποσότητας φωσφόρου ή βορίου και μετά η διάχυσή τους στο υπόστρωμα με θέρμανση του κυττάρου σε φούρνο. Το MIS ηλιακό κύτταρο, αντίθετα, δεν απαιτεί τη διάχυση στην περιοχή n, το οποίο είναι ηλεκτροστατικά επαγόμενη από τα φορτία στο άνω μέρος της επιφάνειας.

Η J_0 του εκπομπού έχει τη μέση σταθμισμένη τιμή των J_0 της επιφάνειας επαφής και των λοιπών επιφανειών της περιοχής που μελετάται.

4.4.3.3 ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΟΙ ΚΑΙ ΣΗΜΕΙΑΚΟΙ ΕΚΠΟΜΠΟΙ

Περεταίρω βελτίωση περιλαμβάνει τη δημιουργία ξεχωριστών διαχύσεων για τις διαφορετικές περιοχές, αφού οι προϋποθέσεις κάθε περιοχής μπορεί να είναι πολύ διαφορετική (Σχ. 4.3στις): μια περιοχή μεγάλου πάχους και υψηλού ντοπαρίσματος κάτω από τις επαφές έχει διαφορετικές ιδιότητες και άρα απαιτήσεις από μια περιοχή πιο λεπτή και λιγότερο ντοπαρισμένη κάτω από ένα παθητικοποιημένο υμένιο. Αυτές οι δομές γνωστές και ως «επιλεκτικοί εκπομποί», έχουν καλύτερες ιδιότητες αν και είναι δυσκολότεροι στην κατασκευή τους.

Εάν μια πολύ μικρή SRV είναι εφικτή, θα ήταν προτιμότερο να μην υπάρχουν εκπομποί αφού και μόνο το ντοπαρίσμα πάντα μειώνει το χρόνο ζωής του κρυστάλλου (Σχ. 4.3 (d)). Με τους τοπικούς εκποπούς, ο επιφανειακός ανασυνδυασμός μειώνεται με το μειονέκτημα αυξημένης ροής απωλειών στο υπόστρωμα. Η ανταλλαγή αυτή μπορεί να γίνει θετική αν το μέγεθος των επαφών συρρικνωθεί. Το φως και η τοπική διάχυση έχουν επιπλέον το μειονέκτημα της μειωμένης θεραπευτικής δράσης.

4.4.3.4 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ

Η αποτύπωση επιφανειών επηρεάζει δραστικά το σχεδιασμό του εκπομπού. Οι επιφάνειες πρέπει να είναι πολύ υψηλά ντοπαρισμένες για να μειωθεί η αντίσταση υψηλής επαφής και όχι πολύ λεπτό για να μην μπορεί να διατηρηθεί κατά τη διάρκεια της ανάφλεξης της πάστας, κάτι το οποίο θα προκαλούσε βραχυκύκλωμα στην επαφή. Εξάλλου, οι φαρδιές μεταλλικές γραμμές πρέπει να έχουν απόσταση μεταξύ τους και προκειμένου να διατηρηθούν οι απώλειες σκίασης σε μέτρια επίπεδα, η πλευρική αγωγιμότητα του εκπομπού πρέπει να είναι υψηλή, κάτι το οποίο επίσης επιδεικνύει την ύπαρξη περιοχών υψηλού ντοπαρίσματος και σε μεγάλο βάθος. Αυτά τα χαρακτηριστικά βοηθούν στο να μειώνουν τον ανασυνδυασμό στις επαφές, αλλά απέχουν αρκετά από την ιδανική κατάσταση των εκτιθέμενων επιφανειών.

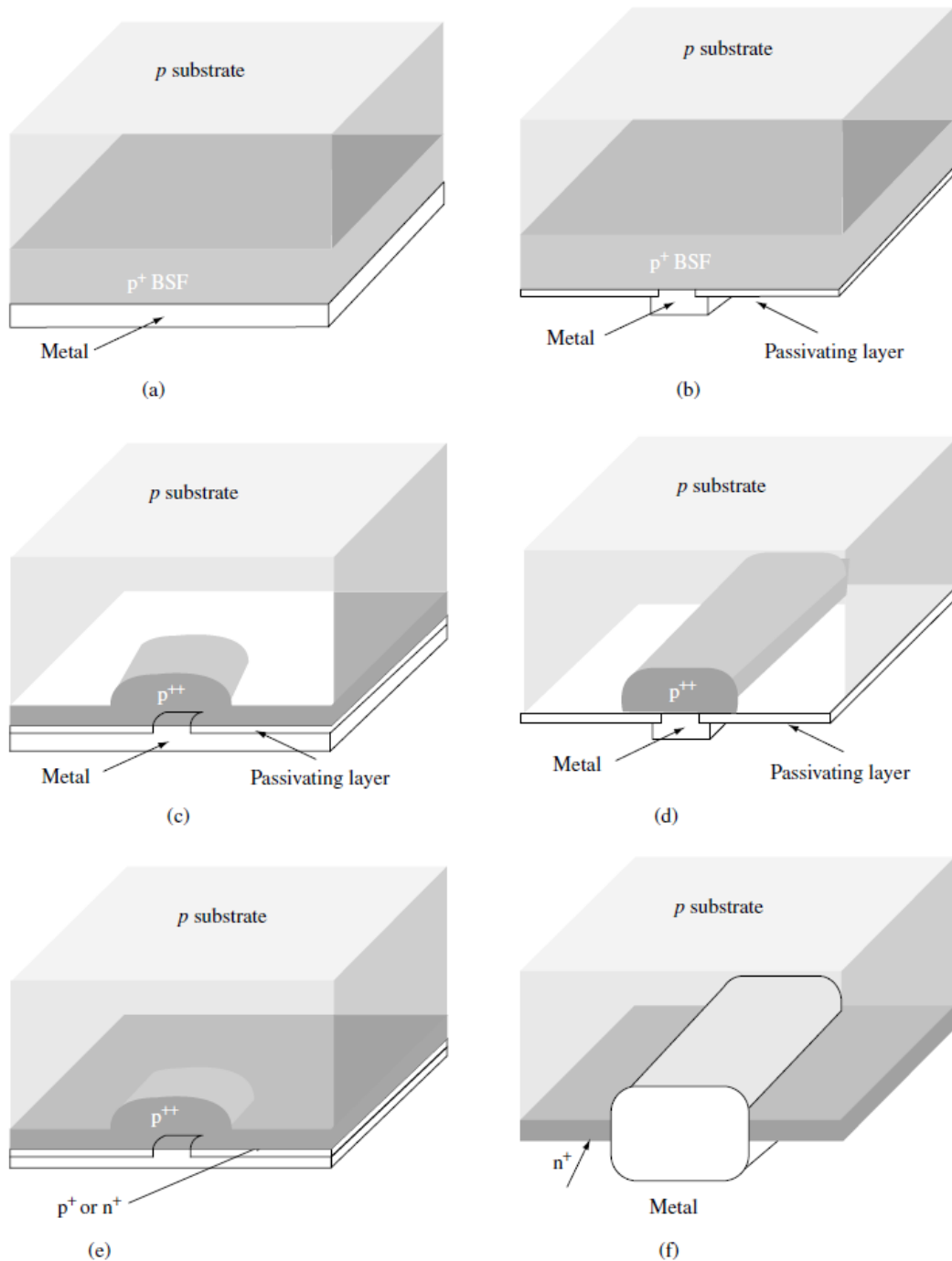
Οι επιφανειακοί εκπομποί φωσφόρου, τυπικά, παρουσιάζουν επιφανειακές συγκεντρώσεις πάνω από 10^{20} cm^{-3} και 0.4 μm βάθος, κάτι το οποίο οδηγεί σε μια μέση αντίσταση υμενίου της τάξης των 40 Ω . Όπως έχει αναφερθεί ήδη η υψηλά ντοπαρισμένες περιοχές παρουσιάζουν ελάχιστη φωτοβολταϊκή δραστηριότητα εξαιτίας της παρουσίας ιζημάτων («νεκρή επιφάνεια»). Ως αποτέλεσμα, η συλλογή φωτός χαμηλού μήκους κύματος είναι πολύ μικρή και η J_0 μεγάλη. Το πλεονέκτημα είναι ότι η υψηλή διάχυση του φωσφόρου παράγει πολύ αποτελεσματική θεραπευτική δράση. Ορισμένοι τρόποι για να ενσωματωθούν οι επιλεκτικοί εκπομποί στα ηλιακά κύτταρα με αποτυπωμένες επιφάνειες, περιλαμβάνουν κυρίως την παθητικοποίηση των επιφανειών αυτών με τη χρήση οξειδίων του πυριτίου (SiN_x). Αυτό το γεγονός, βέβαια, πρέπει να συνοδεύεται και με ταυτόχρονη μείωση του πλάτους των μεταλλικών δακτύλων, προκειμένου να μειωθεί η αντίσταση του υμενίου με ανεκτά επίπεδα.

4.4.4 Η ΠΙΣΩ ΕΠΑΦΗ

Τα φορτία πλειονότητας πηγάζουν από την πίσω p – επαφή των βιομηχανικών ηλιακών κυττάρων. Η πίσω επαφή στα κύτταρα αυτά είναι συνήθως κατασκευασμένη μέσω

αποτύπωσης, με επακόλουθο ψήσιμο στην επιφάνεια μιας πάστας αλουμινίου, η οποία μπορεί να άγει στο εσωτερικό της άτομα αργύρου.

Η p^+ στρώση είναι χρήσιμη στο να μειώνει τον επιφανειακό ανασυνδυασμό, όπως εξηγήθηκε και παραπάνω, αν και αυτή η ιδιότητα είναι επουσιώδης στα ηλεκτρικά παχιά ηλιακά κύτταρα ($w > L$) που χρησιμοποιούνται σήμερα, και άρα δεν βελτιστοποιείται για το συγκεκριμένο σκοπό.



Σχήμα 4.4: Δομές πίσω επαφών: (a) Συνεχής BSF, (b) Ηλιακό κύτταρο δύο προσώπων, (c) Τοπική BSF, (d) Τοπική BSF σε ηλιακό κύτταρο δύο προσώπων, στις Επιλεκτικός εκπομπός ή κυμαινόμενη παθητικοποιημένη επαφή, (f) Βραχυκυκλωμένη επαφή στην πίσω επιφάνεια βιομηχανικού ηλιακού κυττάρου

Για τα ηλιακά κύτταρα υψηλής απόδοσης, η παθητικοποίηση των επαφών στην πίσω επιφάνεια είναι απαραίτητη. Η κατασκευή μιας BSF είναι το πρώτο βήμα (Σχ. 4.4 (a)). Η χρήση τοπικών επαφών (Σχ. 4.4 (b)) μειώνει περεταίρω τον ανασυνδυασμό. Η δομή αυτή χρησιμοποιείται από μερικά ηλιακά κύτταρα δύο προσώπων.

Εάν η παθητικοποίηση είναι καλή, η BSF περιορίζεται σε σημειακές επαφές, μεγέθους μερικών μm, όπως στην περίπτωση των ηλιακών κυττάρων PERL ή άλλων παρόμοιων ηλιακών κυττάρων (Σχ. 4.4 στις). Η πίσω επιφάνεια ηλιακού κυττάρου δύο προσώπων, η οποία έχει παθητικοποιηθεί με SiN_x , παρουσιάζεται στο Σχ. 4.4 (d).

Μια ρηχή και ελαφριά διάχυση βοηθά στη μείωση του επιφανειακού ανασυνδυασμού (Σχ. 4.4 στις). Η διάχυση μπορεί να γίνει με στοιχείο ίδιου τύπου με αυτόν του υποστρώματος ή διαφορετικού: τα λεγόμενα PERT (Passivated Emitter Rear Totally difused) και PERF (Passivated Emitted Rear Floating junction) κύτταρα αντίστοιχα, έχουν αυτήν τη λογική. Ο δεύτερος τύπος κυττάρων επωφελείται από χαμηλότερες τιμές J_0 των υμενίων n^+ , και είναι βασικό καμία ροή ηλεκτρονίων να μην εγχέεται από την n περιοχή στην p επαφή: η σύνδεση πρέπει να είναι ανοικτό – κύκλωμα («πλωτή» επαφή). Σημειώνεται ότι αυτή η δομή δεν είναι η ίδια με τις δομές που συναντώνται στο πίσω μέρος των βιομηχανικών ηλιακών κυττάρων (Σχ. 4.4 (f)). Εκεί ένα τραχύ μεταλλικό πλέγμα απολύεται διαμέσου του παρασιτικού n^+ υμενίου η οποία δημιουργείται κατά τη διάρκεια της διάχυσης της μπροστινής επιφάνειας. Το πλέγμα προτιμάται από μια συνεχόμενη επιφάνεια για μηχανικούς λόγους. Η σύνδεση βραχυκυκλώνεται και παρουσιάζει στο υπόστρωμα μια υψηλή SRV.

4.5 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΟΥΣ

Τα άκρα του υποστρώματος είναι επιφάνειες με μεγάλο βαθμό επιφανειακού ανασυνδυασμού, κάτι που επηρεάζει δυσμενώς της απόδοση των ηλιακών κυττάρων, ειδικά για τις μικρές σε μέγεθος και μεγάλου μήκους διάχυσης συσκευές. Για τα εργαστηριακά ηλιακά κύτταρα, η απόδοση καθορίζεται στη βάση της περιοχής σχεδιασμού. Ο εκπομπός περιορίζεται σε αυτή μέσω της κάλυψης επιπέδων ή της εγχάραξης οροπεδίων. Έτσι, τα πραγματικά άκρα τοποθετούνται μακρύτερα από τα όρια του κυττάρου, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τον ανασυνδυασμό. Για πραγματικές εφαρμογές, αντίθετα, δίνεται σημασία μόνο στην περιοχή του υποστρώματος, οπότε η βελτιστοποίηση των άκρων, ως πιο περίπλοκη, δεν υπολογίζεται τόσο πολύ. Για το λόγο αυτό, πιο εξελιγμένες τεχνικές παθητικοποίησης μελετώνται, όπως για παράδειγμα η διάχυση στα άκρα. Στα μεγάλα βιομηχανικά κύτταρα, ο ανασυνδυασμός είναι πολύ λιγότερο σημαντικός.

Τα ηλιακά κύτταρα μεγάλου μεγέθους προτιμώνται στη βιομηχανία, με κύτταρα επιφάνειας $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ή $12.5 \times 12.5 \text{ cm}^2$ να είναι τα συνηθέστερα. Εκτός από θέματα κατασκευασιμότητας, ένα μεγαλύτερο κύτταρο απαιτεί μεγαλύτερους ακροδέκτες για τη συλλογή μεγαλύτερης ποσότητας ρεύματος, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες απώλειες Joule: η διαμήκης αντίσταση των μεταλλικών γραμμών αυξάνεται δραματικά με την αύξηση του μήκους. Αυτό το πρόβλημα, είναι πιο σοβαρό για πιο τραχιές τεχνικές μεταλλοποίησης, και μπορεί να μειωθεί αποτελεσματικά με την αύξηση του μεγέθους. Για την αποφυγή σειριακών αντιστάσεων λόγω της αύξησης των σκιάσεων, οι ακροδέκτες είναι συγκολλημένες με το μεταλλικό κύριο κύκλωμα στο εσωτερικό ενεργό μέρος του κυττάρου,

μειώνοντας έτσι την απόσταση από την οποία πρέπει να συλλεχθεί το ρεύμα κατά μήκος των μεταλλικών δακτύλων.

4.6 ΟΠΤΙΚΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΚΥΤΤΑΡΟΥ

Τα επίπεδα ηλιακά κύτταρα κατά τη λειτουργία τους ακτινοβολούνται από ένα μεγάλο μέρος του ουρανού, όχι μόνο εξαιτίας των ισότροπων συστατικών της ακτινοβολίας, αλλά και εξαιτίας της κίνησης του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας και του χρόνου. Έτσι, σε σχέση με τη γωνιακή κατανομή, αυτά τα κύτταρα πρέπει να δέχονται φως από όλο το ημισφαίριο. Η κατανομή του φάσματος επίσης ποικίλει σε σχέση με το χρόνο, τις καιρικές συνθήκες κλπ. Για λόγους ρύθμισης, μια συγκεκριμένη κατανομή φάσματος AM 1.5 Global υιοθετείται σαν αντιπροσωπευτική κατάσταση, η οποία συνήθως καθορίζεται στα 0.1 W/cm^2 .

Ένα ηλιακό κύτταρο θα πρέπει να απορροφά όλο το χρήσιμο φως. Για τα ηλιακά κύτταρα χωρίς ενθουλάκωση, η πρώτη οπτική απώλεια είναι η σκίαση από το μεταλλικό πλέγμα της ακτινοβολουμένου προσώπου. Αυτή η απώλεια μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 10% για τα βιομηχανικά κύτταρα, ενώ για τα εργαστηριακά, στα οποία χρησιμοποιείται λεπτή μεταλλοποίηση, η απώλεια αυτή είναι πολύ μικρότερη. Αν και πολλές τεχνικές έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, όπως μεταλλικά δάκτυλα ειδικής γεωμετρίας, πρισματικά κελύφη, ή κοιλότητες, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από την κατεύθυνση του φωτός, οπότε δεν είναι κατάλληλες για την ισότροπη ακτινοβολία.

4.6.1 ΑΝΤΙΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ

Μεγάλη είναι η απώλεια λόγω της ανάκλασης του φωτός στη διεπιφάνεια του πυριτίου, όπου μπορεί να είναι πάνω από 30% για το καθαρό πυρίτιο στον αέρα, εξαιτίας του υψηλού δείκτη διάθλασης. Μια επίστρωση ενώ μη απορροφητικού υλικού με χαμηλότερο δείκτη διάθλασης (n_{ARC}) στην επάνω επιφάνεια του υποστρώματος πυριτίου μειώνει την ανάκλαση. Εάν η επίστρωση είναι παχιά σε σχέση με το μήκος συνοχής της ακτινοβολίας, που κυμαίνεται περίπου στο $1 \mu\text{m}$ για το φως του ήλιου, δεν παρουσιάζονται φαινόμενα αλληλεπίδρασης στο εσωτερικό της επίστρωσης. Η ενθουλάκωση του ηλιακού κυττάρου (με γυαλί και ελασματοποίηση στη συνέχεια) ανήκει στην κατηγορία αυτή.

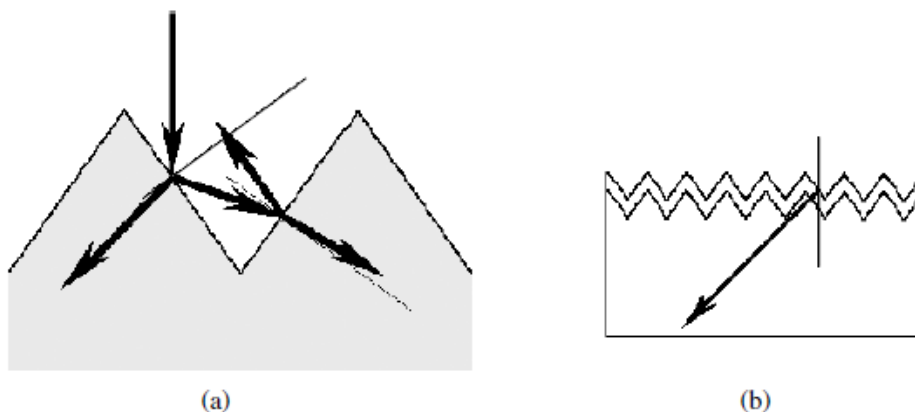
Οι αντανάκλαστικές επικαλύψεις (AntiReflection Coatings – ARC) υποδηλώνουν μια οπτικά λεπτή διηλεκτρική επίστρωση, σχεδιασμένη να καταστέλλει την ανάκλαση μέσω φαινομένων αλληλεπίδρασης. Η ανάκλαση είναι μικρότερη όταν το πάχος της επίστρωσης είναι περίπου πολλαπλάσιο του $n_{\text{ARC}} \lambda_0/4$, όπου το λ_0 είναι το μήκος κύματος στο κενό, αφού στην περίπτωση αυτή τα στοιχεία που ανακλώνται αλληλεπιδρούν καταστρεπτικά. Στα υπόλοιπα μήκη κύματος, η ανάκλαση αυξάνεται, αν και είναι πάντα μικρότερη ή σε ορισμένες περιπτώσεις ίση με την ανάκλαση που πραγματοποιείται όταν απουσιάζει η ARC. Η ARC σχεδιάζεται συνήθως με ελάχιστο πάχος 600 nm , όπου η ροή των φωτονίων γίνεται μέγιστη για το ηλιακό φάσμα. Για να επιτευχθεί μηδενική ανάκλαση, η συντελεστής της επικάλυψης πρέπει να είναι γεωμετρικός μέσος αυτών του αέρα και του πυριτίου, περίπου δηλαδή 2.4 για 600 nm μη ενθουλακωμένου κυττάρου.

Στη βιομηχανία χρησιμοποιείται επικάλυψη TiO_x μέσω χημικής εναπόθεσης ατμών (Chemical Vapor Deposition – CVD). Επίσης, η επικάλυψη SiN_x μέσω της χημικής εναπόθεσης ατμών ενισχυμένης με πλάσμα (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition – PECVD), παρουσιάζει ενδιαφέρον, αφού εξυπηρετεί ταυτόχρονα και ως παθητικοποιημένο υμένιο.

Με τη χρήση διπλών επικαλύψεων με σχεδιασμό $\lambda/4$, μεγαλύτερων δεικτών από τους του αέρα και του πυριτίου, η ελάχιστη τιμή ανάκλασης διευρύνεται ως προς το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Ατμοποιημένα SZn και MgF_2 χρησιμοποιούνται στα εργαστηριακά ηλιακά κύτταρα υψηλής απόδοσης, για το σκοπό αυτό. Ο χαμηλός δείκτης παθητικοποιημένου SiO_x σε επαφές με πυρίτιο υποβαθμίζει την λειτουργία των ARC. Το υμένιο SiO_x είναι τότε και πολύ λεπτό και συμβατό με μια αποτελεσματική παθητικοποίηση.

4.6.2 ΥΦΗ

Τα αλκαλικά (με βάση KOH ή $NaOH$) διαλύματα χαράσσουν ανισότροπα τον κρύσταλλο του άμορφου πυριτίου, εμφανίζοντας τα επίπεδα $\{1\ 1\ 1\}$ στα οποία ο βαθμός εγχάραξης είναι ελάχιστος. Στις συστοιχίες διεύθυνσης $[1\ 0\ 0]$ σχηματίζονται πυραμίδες τετραγωνικής βάσης, τυχαία διατεταγμένες, των οποίων το μέγεθος περιορίζεται σε μερικά μικρόμετρα με έλεγχο του χρόνου και της θερμοκρασίας εγχάραξης. Σε μια επιφάνεια καθορισμένης υφής, μια ακτίνα μπορεί να ανακλαστεί σε κάποια γειτονική πυραμίδα (Σχ. 4.5(a)) και έτσι η απορρόφηση είναι ενισχυμένη. Αν και ο υπολογισμός της ανάκλασης απαιτεί ιχνηλασία της ακτίνας, μπορεί να γίνει μια χονδρική εκτίμηση της γωνία πρόσπτωσης, υποθέτοντας ότι κάθε ακτίνα χτυπάει δύο φορές στην επιφάνεια του πυριτίου έτσι ώστε η ανάκλαση είναι το τετράγωνο της μη υφασμένης θήκης.



Σχήμα 4.5: Φαινόμενα εξαιτίας της υφής της επιφάνειας: (a) μειωμένη ανάκλαση και (b) αυξημένη φωτογένεση στη βάση.

Η υφή είναι ενσωματωμένη τόσο στα βιομηχανικά όσο και στα εργαστηριακά ηλιακά κύτταρα πυριτίου και σε συνδυασμό με ARC, μειώνεται η απώλεια λόγω ανάκλασης σε ένα μικρό ποσοστό. Στην τελευταία περίπτωση, προκειμένου να ελεγχθεί καλύτερα η γεωμετρία της πυραμίδας και να επιτραπεί η οριοθέτηση των λεπτών στοιχείων της επιφάνειας, φωτολιθογραφικές τεχνικές χρησιμοποιούνται για να καθοριστούν αντίστροφες ή ορθές

πυραμίδες στις επιθυμητές θέσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή η ανακλαστικότητα είναι παρόμοια με αυτή της τυχαίας υφής.

Το φως που εισέρχεται στο υπόστρωμα μια υφασμένης επιφάνειας αποκτά κλίση σε σχέση με την κάθετο του ηλιακού κυττάρου. Αυτό σημαίνει ότι η φωτογέννεση πραγματοποιείται πιο κοντά στις επαφές συλλογής, το οποίο είναι πολύ ωφέλιμο για ηλιακά κύτταρα μικρού μήκους διάχυσης, ενισχύοντας την αποτελεσματική συλλογή στα μέτρια και μακρά μήκη κύματος (Σχ. 4.5(a)). Το φαινόμενο είναι ισοδύναμο με μια αύξηση του συντελεστή απορρόφησης. Μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι οι υφασμένες επιφάνειες παρουσιάζουν υψηλότερη SRV.

4.6.3 ΠΑΓΙΔΕΥΣΗ ΦΩΤΟΣ

Τα φωτόνια των υψηλών μηκών κύματος απορροφούνται δυσκολότερα στο πυρίτιο και μπορούν να ξεφύγουν από το υπόστρωμα χωρίς να συμβάλουν στη φωτογέννεση, εκτός και αν οι εσωτερικές ανακλάσεις είναι υψηλές. Ο στόχος της παγίδευσης του φωτός ή των τεχνικών περιορισμού του φωτός είναι να επιτευχθούν υψηλές εσωτερικές ανακλάσεις.

Πρακτικοί πίσω καθρέφτες, πλήρως συμβατοί με τον ηλεκτρικό σχεδιασμό του κυττάρου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως αυτοί που παραστάθηκαν στο Σχ. 4.4. Ένα μέταλλο μπορεί να είναι ένας καλός ανακλαστήρας, αλλά το αλουμίνιο, ειδικά μετά από θερμική κατεργασία, δίνει χαμηλές ανακλάσεις. Η δομή πυριτίου – οξειδίου – μετάλλου στο Σχ. 4.4 στις μπορεί να παρουσιάσει υψηλές ανακλάσεις αξιοποιώντας τα φαινόμενα αλληλεπίδρασης.

Στην μπροστά επιφάνεια, ο μεταλλικός καθρέφτης δεν είναι εφαρμόσιμος αφού η διαδρομή των ακτινών πρέπει να είναι ανοικτή για την είσοδο του φωτός. Παρόλα αυτά, υψηλές ανακλάσεις στην μπροστά επιφάνεια μπορεί να επιτευχθούν εξαιτίας του φαινομένου της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Οι ακτίνες χτυπούν την επιφάνεια με γωνίες μεγαλύτερες από την κρίσιμη γωνία αέρα – πυριτίου και ανακλώνται ολικά. Υφαίνοντας μία ή και τις δύο επιφάνειες με μακροσκοπικά ή μικροσκοπικά στοιχεία εξυπηρετεί το φαινόμενο αυτό δίνοντας κλίση στις ακτίνες, ούτως ώστε να ξεπεράσουν την κρίσιμη γωνία. Ακόμα και στην περίπτωση της γεωμετρικής ύφανσης με καλά καθορισμένους επιφανειακούς προσανατολισμούς, μετά από λίγες εσωτερικές ανακλάσεις, η κατεύθυνση των ακτινών μέσα στο κύτταρο διανέμεται τυχαία: αυτή είναι η περίπτωση Lambertian, μια χρήσιμη αναλυτική προσέγγιση παγίδευσης του φωτός. Τα ηλιακά κύτταρα δύο προσώπων στο Σχ. 4.4 μπορούν για το ίδιο λόγο να είναι πολύ αποδοτικά στο περιορισμό του φωτός.

Η παγίδευση του φωτός αυξάνει το αποδοτικό πάχος της συστοιχίας για την απορρόφηση. Στο γεωμετρικό σύστημα οπτικής, έχει αποδειχθεί ότι για τη μονόπλευρη ιστροπική ακτινοβολία, ο μέγιστος παράγοντας ενίσχυσης (αν και δεν είναι μάλλον υλοποιήσιμος) είναι $4 (n_{\text{Si}}/n_{\text{air}})^2$, δηλαδή κάθε ακτίνα ταξιδεύει 50 φορές το πάχος του κυττάρου προτού διαφύγει. Η αντίστοιχη ενίσχυση στη φωτογέννεση θα μειωθεί εξαιτίας της αντιστάθμισης της απορρόφησης από τα ελεύθερα φορτία στα μακρά μήκη κύματος.

Η παγίδευση του φωτός είναι απαραίτητη για τα λεπτά κύτταρα. Ακόμα και στο σχεδιασμό των κυττάρων PERL, η ενίσχυση του βραχυκυκλωμένου ρεύματος μπορεί να πάρει τιμές

κοντά στο 1 Ma/cm^2 σε σχέση με τις περιοχές όπου οι εσωτερικές ανακλάσεις είναι μηδενικές.

4.7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΥΤΤΑΡΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

Ο πίνακας που ακολουθεί (Πιν. 4.3) συλλέγει σχετικές παραμέτρους του ιδανικού περιορισμένου κατά Auger ηλιακού κυττάρου πυριτίου, του καλύτερου ηλιακού κυττάρου PERL και ενός τυπικού βιομηχανικού κυττάρου Cz – Si με επιφανειακή αποτύπωση. Οι διαφορετικές περιπτώσεις πίσω από τα διάφορα δεδομένα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά τη σύγκριση. Για παράδειγμα, το ιδανικό κύτταρο έχει θεωρηθεί ότι είναι ιστροπικά ακτινοβολημένο, αν και οι μετρήσεις έγιναν σε σχεδόν κάθετη πρόσπτωση.

Τύπος κυττάρου	Ιδανικό	PERL	Βιομηχανικό
Μέγεθος (cm^2)	-	4	100
Πάχος (μm)	80	450	300
Αντίσταση υποστρώματος ($\Omega \text{ m}$)	Εγγενής	0.5	1
Πυκνότητα βραχυκυκλωμένου ρεύματος, J_{sc} (A/cm^2)	0.0425	0.0422	.0.34
Τάση ανοικτού κυκλώματος, V_{oc} (V)	0.765	0.702	0.600
Παράγοντας πλήρωσης, FF	0.890	0.828	0.740
Απόδοση, η (%)	28.8	24.7	15.0

Πιν. 4.3: Απόδοση ηλιακών κυττάρων (25°C , AM 1.5 Global 0.1 W/cm^2)

Η πιο μεγάλη διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των PERL και του ιδανικού κυττάρου είναι η διαφορά στο σχεδιασμό: παχύ και χαμηλής έγχυσης (PERL) σε σχέση με το λεπτό και υψηλής έγχυσης (ιδανικό). Το κύτταρο PERL είναι σίγουρα το καλύτερο από άποψη σχεδιασμού σε σχέση με τα επιτεύξιμα επίπεδα επιφανειακού ανασυνδυασμού, κάτι που περιορίζει την τάση ανοικτού κυκλώματος και αλλάζει τις ιδανικές τιμές πάχους σε μεγάλες τιμές. Η χαμηλή αντίσταση ακολουθεί ως παράγοντας για τις δομές αυτές. Ο υψηλός παράγοντας πλήρωσης του ιδανικού κυττάρου είναι χαρακτηριστικό της υψηλής έγχυσης και της Auger – περιορισμένης λειτουργίας.

Η μείωση του επιφανειακού ανασυνδυασμού στα βέλτιστα εργαστηριακά κύτταρα βασίζεται στην παθητικοποίηση της επιφάνειας και τον περιορισμό των πολύ υψηλά ντοπαρισμένων περιοχών στο ελάχιστο. Τελικά, αυτό είναι δυνατό εξαιτίας της πιθανότητας καθορισμού και ευθυγράμμισης πολύ μικρών στοιχείων της επιφάνειας.

Οι πολύ υψηλά ντοπαρισμένοι εκπομποί, μαζί με τους μειωμένους χρόνους ζωής των υποστρωμάτων, είναι υπεύθυνα για το μειωμένο ρεύμα βραχυκύκλωσης και την τάση ανοικτού κυκλώματος των βιομηχανικών κυττάρων. Ο παράγοντας πλήρωσης επηρεάζεται από τη μεγάλη επιφάνεια σε συνεργασία με τους περιορισμούς των τεχνικών μεταλλοποίησης, οι οποίες μειώνουν περεταίρω το ρεύμα εξαιτίας σκιάσεων.

Η συνεχής βελτίωση στην ποιότητα των υλικών και η επιζήμια, από μεριάς κόστους, λέπτυνση του υποστρώματος θα αυξήσει την ανάγκη για τα βιομηχανικά κύτταρα να εφαρμόσουν επιφανειακή παθητικοποίηση. Αυτό θα προϋποθέτει την βελτίωση των τεχνικών μεταλλοποίησης. Ένα ακόμα σημαντικό ζήτημα είναι ότι ο χρόνος ζωής του υποστρώματος στα βιομηχανικά περιβάλλοντα εξαρτάται από τις θεραπευτικές κατεργασίες στις περιοχές υψηλής διάχυσης, που δεν είναι συμβατές με τη βέλτιστη απόδοση επιφάνειας. Η προσέγγιση PERL – διαδικασίες υψηλής θερμοκρασίας και οριοθέτηση των λεπτών στοιχείων – είναι η πιο επιτυχημένη επιλογή για υψηλή απόδοση, αλλά δεν είναι η μόνη που μπορεί να καθορίσει την ανάπτυξη των βιομηχανικών κυττάρων. Πρέπει να σημειωθεί σε αυτήν την κατεύθυνση, ότι άλλοι τύποι ηλιακών κυττάρων πυριτίου, όπως τα ηλιακά κύτταρα ετεροεπαφής με εγγενή λεπτά υμένα (Heterojunction with Intrinsic Thin – layer solar cells, HIT) έχουν επιτύχει αποδόσεις πάνω από 20% μέσω διαφορετικών προσεγγίσεων.

4.8 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

Το παρακάτω σχήμα (Σχ. 4.6) περιγράφει τα βασικά βήματα κατασκευής ενός απλού ηλιακού κυττάρου πυριτίου, βασισμένο στην επιφανειακή αποτύπωση. Με πολλές ή λίγες μικρές διαφοροποιήσεις, η συγκεκριμένη διαδικασία χρησιμοποιείται από τους περισσότερους κατασκευαστές. Οι κύριες αρχές αυτή της 30άχρονης τεχνολογίας φωτοβολταϊκών εύκολα αυτοματοποιούνται, είναι αξιόπιστες, κάνουν καλή χρήση των υλικών και είναι υψηλά αποδοτικές. Το μειονέκτημα είναι το σφάλμα απόδοσης που προέρχεται από τις χονδροειδείς και άκρως επεμβατικές τεχνικές μεταλλοποίησης.

Παρακάτω γίνεται αναφορά και μικρή περιγραφή των βημάτων της κατασκευής ενός ηλιακού κυττάρου. Επίσης, θα παρατεθούν ορισμένα αριθμητικά δεδομένα θερμοκρασιών, μεγεθών και χρόνων. Σε κάθε βήμα αντιστοιχεί και κάθε ένα από τα παρακάτω επιμέρους σχήματα του Σχ. 4.6:

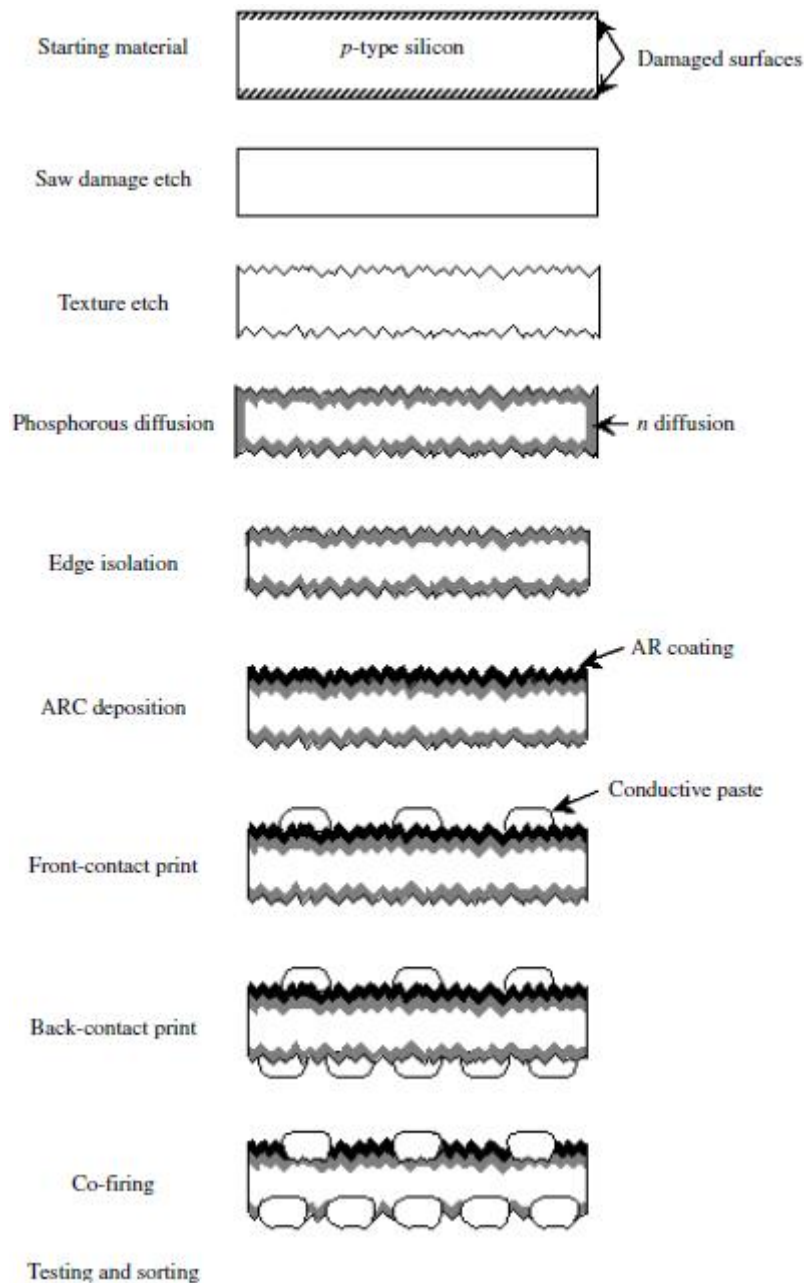
- i. *Διαμόρφωση αρχικού υλικού:* Στη βιομηχανία χρησιμοποιείται συνήθως συστοιχία Cz – Si, στρογγυλοποιημένη ή σε ψευδο – τετράγωνο σχήμα, ή πολυκρυσταλλική συστοιχία τετραγωνικού σχήματος. Οι διαστάσεις τους κυμαίνονται σε 10 – 15 cm πλευρές και 200 – 350 μm πάχος. Το ντοπάρισμα είναι p – τύπου (βόριο), ως μια αντίσταση περίπου 1 Ω cm.
- ii. *Αποκοπή φθαρμένων άκρων:* Γίνεται αποκοπή των πολύ φθαρμένων επιφανειών. Επειδή η επιφάνεια που μένει είναι συνήθως κακής ποιότητας, ένα βάθος περίπου 10 μm στο τέλος, αποκόπτεται μέσω εμβάπτισης σε κάποιο αλκαλικό ή όξινο διάλυμα (προτιμάται το αλκαλικό διάλυμα), σε ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και σύστασης του διαλύματος.
- iii. *Ύφανση:* Γίνεται ύφανση της επιφάνειας ακτινοβόλησης με εγχάραξη με NaOH, σε σχηματισμό μικροσκοπικών πυραμίδων. Το μέγεθος τους πρέπει να είναι το βέλτιστο δυνατό, αφού πολύ μικρές πυραμίδες οδηγούν σε υψηλές ανακλάσεις του φωτός, ενώ πολύ μεγάλες μπορούν να δυσχεράνουν το σχηματισμό των επαφών. Για να εξασφαλιστεί πλήρης κάλυψη της επιφάνειας με την κατάλληλη υφή, η συγκέντρωση, η θερμοκρασία, ο χρόνος ύφανσης και η ανακίνηση του διαλύματος

πρέπει να ελέγχονται. Τυπικές τιμές των παραμέτρων είναι 5% συγκέντρωση διαλύματος NaOH, θερμοκρασία 80°C και χρόνος ύφανσης 15 min.

- iv. *Διάχυση φωσφόρου:* Ο φώσφορος χρησιμοποιείται παντού σαν ντοπάρια n – τύπου για το πυρίτιο των ηλιακών κυττάρων. Επειδή οι θερμοκρασίες που απαιτούνται είναι υψηλές, η επιφάνεια θα πρέπει να είναι καθαρή από επιμολύνσεις πριν τη συγκεκριμένη κατεργασία. Για να επιτευχθεί αυτό, η συστοιχία μετά την ύφανση υπόκειται σε εγχάραξη με οξέα, προκειμένου τα αλκαλικά κατάλοιπα ουδετεροποιηθούν και οι μεταλλικές ακαθαρσίες να απορροφηθούν. Στη βιομηχανία, η συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιείται μέσω πολλών διαφορετικών διατάξεων όπως από φούρνους χαλαζία, από φούρνους μεταφορικής ταινίας κλπ. Για κάθε διάταξη οι χρησιμοποιούμενες συνθήκες αλλάζουν και άρα κάθε διάταξη έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Μετά τη διάχυση, ένα άμορφο γυαλί φωσφο – πυριτιατών παραμένει στην επιφάνεια, το οποίο συνήθως απομακρύνεται σε διάλυμα HF αφού μπορεί δυσχεράνει τα επακόλουθα βήματα.
- v. *Μόνωση επαφών:* Η περιοχή n – τύπου στα άκρα της συστοιχίας θα διασύνδε τις μπροστά και πίσω επαφές, με αποτέλεσμα η επαφή να παρεκκλίνει από αυτή τη διαδρομή με αποτέλεσμα μια χαμηλή και παρεκκλινή επαφή. Για να απομακρυνθεί αυτή η περιοχή πραγματοποιείται στεγνή εγχάραξη σε χαμηλή θερμοκρασία. Εναλλακτικά μπορούν να πραγματοποιηθούν εγχαράξεις με πλάσμα ή laser, σε πιο περίπλοκες διατάξεις βέβαια. Οι παράμετροι και πάλι αλλάζουν ανάλογα με τη διαδικασία που χρησιμοποιείται.
- vi. *Εναπόθεση ARC:* Το υλικό που χρησιμοποιείται συνήθως για τη δημιουργία τις αντανάκλαστικής επίστρωσης είναι το διοξείδιο του τιτανίου (TiO₂) για τον σχεδόν ιδανικό συντελεστή διάθλασης στα ενθυλακωμένα ηλιακά κύτταρα. Μια δημοφιλής τεχνική για τα κύτταρα από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο είναι η χημική εναπόθεση ατμών υπό ατμοσφαιρική πίεση (Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition – APCVD) από οργανικές ενώσεις τιτανίου και νερό: το μίγμα ψεκάζεται από ένα ακροφύσιο στη συστοιχία, σε θερμοκρασία περίπου 200°C και οι ενώσεις υδρολύονται στην επιφάνεια. Άλλες τεχνικές περιλαμβάνουν την περιστροφική εναπόθεση ή την επιφανειακή αποτύπωση ειδικών παστών. Για τα κύτταρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου χρησιμοποιούνται συνήθως ARC από νιτρίδια του πυριτίου, λόγω της καλής συνεργασίας των δύο υλικών.
- vii. *Αποτύπωση μπροστά επαφών και στέγνωμα:* Οι απαιτήσεις για την μπροστά μεταλλοποίηση είναι η χαμηλή αντίσταση της επαφής με το πυρίτιο, η χαμηλή ογκική αντίσταση, το μικρό πλάτος γραμμής με υψηλό λόγο διαστάσεων, καλή μηχανική πρόσφυση, ευτηκτικότητα, και συμβατότητα με τα υλικά ενθυλάκωσης. Από άποψη αντίστασης, τιμής και διαθεσιμότητας, η καλύτερη επιλογή για τις επαφές είναι ο άργυρος. Ο χαλκός έχει επίσης πολλά πλεονεκτήματα, αλλά δεν προάγεται ως υλικό επαφών μέσω αποτύπωσης, αφού οι επακόλουθες θερμικές κατεργασίες που είναι απαραίτητες, προκαλούν διάχυση του χαλκού στο υπόστρωμα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία επιμολύνσεων. Οι συνήθεις τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι η αποτύπωση επιφάνειας και η εναπόθεση σε κενό, με την επιφανειακή αποτύπωση να πλεονεκτεί. Μέσω αυτής της τεχνικής μια πάστα αργύρου (περιέχει σκόνη αργύρου) αποτίθεται στην

μπροστά επιφάνεια της συστοιχίας στην επιθυμητή μορφή. Η πάστα είναι έχω υγρό υψηλού ιξώδους λόγω των διαλυτών που περιέχουν. Οι διαλύτες στη συνέχεια εξατμίζονται σε ένα φούρνο θερμοκρασίας 100 – 200°C. Η στερεοποιημένη πάστα στη συνέχεια περνά από άλλες διαδικασίες.

- viii. *Αποτύπωση πίσω επαφών και στέγνωμα:* Η ίδια διαδικασία με την μπροστά επιφάνεια ακολουθείται, με τη διαφορά ότι η πάστα περιέχει και άργυρο και αλουμίνιο, ενώ η μορφή του αποτυπώματος είναι διαφορετική. Το αλουμίνιο είναι απαραίτητο αφού ο άργυρος σχηματίζει ομικές επαφές στο p – Si, αλλά δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνος του γιατί δεν είναι μπορεί να κολληθεί σε αυτό. Οι χαμηλές ευτηκτικές θερμοκρασίες των συστημάτων Al – Si υποδηλώνουν ότι ένα μικρό ποσοστό του πυριτίου θα διαλυθεί και θα ανακρυσταλλοποιηθεί κατά την ψύξη σε μια επιφάνεια p – τύπου. Αν και ένα συνεχόμενο αποτύπωμα θα έδινε καλύτερα αποτελέσματα (χαμηλή επιφανειακή αντίσταση), στις περισσότερες εφαρμογές σχηματίζεται ένα μεταλλικό πλέγμα, τόσο από άποψη οικονομία της πάστας, όσο και για να αποφευχθούν αναδιπλώσεις του κυττάρου λόγω διαφορετικών συντελεστών θερμικής διαστολής των διαφόρων υλικών.
- ix. *Ψήσιμο των μεταλλικών επαφών:* Η συγκεκριμένη διαδικασία πραγματοποιείται σε υψηλή θερμοκρασία για διάφορους λόγους: αποτέφρωση οργανικών στοιχείων της πάστας, συγκόλληση μεταλλικών κόκκων για το σχηματισμό καλού αγωγού, σχηματισμός συμπαγούς ηλεκτρικής επαφής με το πυρίτιο. Κατά το ψήσιμο τα ενεργά στοιχεία της πάστας στις μπροστά επαφές πρέπει να διεισδύσουν την ARC για να έρθουν σε επαφή με τον n – εκπομπό χωρίς να τον βραχυκυκλώσουν: υψηλή θερμοκρασία θα δημιουργήσει υψηλή αντίσταση επαφής, αλλά πολύ υψηλή θερμοκρασία θα ενεργοποιήσει τον άργυρο ώστε να περάσει μέσα από τον εκπομπό και να ενωθεί με τη βάση. Η πάστα των πίσω επαφών με τη σειρά της πρέπει να διαπεράσει πλήρως τον παρασιτικό πίσω εκπομπό για να φτάσει στη βάση, κατά το ψήσιμο. Για να πραγματοποιηθούν τα δύο αυτά συμβάντα ταυτόχρονα, τόσο η σύσταση κάθε πάστας, όσο και τα θερμοκρασιακά προφίλ πρέπει να επιλεγούν πολύ προσεκτικά.
- x. *Δοκιμή και διαλογή:* Τα τελειωμένα κύτταρα δοκιμάζονται σε τεχνητό φως και μετράται η απόδοσή τους. Μετά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τα κύτταρα καταχωρούνται σε διάφορες κατηγορίες (ορίζονται από τον κατασκευαστή συνήθως σε σχέση με το αποδιδόμενο ρεύμα σε σταθερή τάση). Τα πάνελ που θα κατασκευαστούν έχουν κύτταρα ίδιας κατηγορίας, ώστε να μειωθούν οι απώλειες αναντιστοιχίας.



Σχήμα 4.6: Τα βήματα μιας τυπικής διαδικασίας κατασκευής ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου

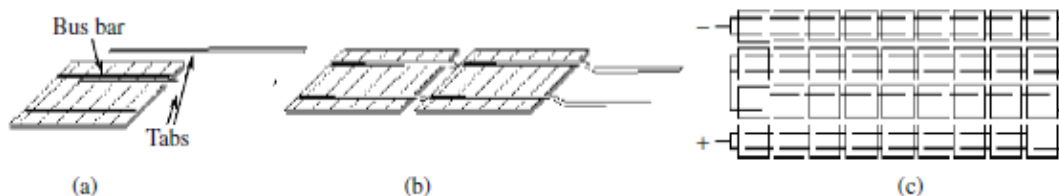
4.9 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΑΝΕΛ

Η αποδιδόμενη ισχύς ενός ηλιακού κυττάρου είναι μικρή. Για το λόγο αυτό πολλά ηλιακά κύτταρα πρέπει να συνδεθούν ηλεκτρικά ώστε να κατασκευαστεί μια πρακτική γεννήτρια ρεύματος. Μια φωτοβολταϊκή μονάδα είναι το πραγματικό φωτοβολταϊκό προϊόν που θα προχωρήσει για εμπορική εκμετάλλευση. Η απόδοση και ο χρόνος ζωής του φωτοβολταϊκού συστήματος εξαρτώνται από την προστασία που προσφέρεται στη μονάδα κατά την κατασκευή της

Η βασική διαδικασία κατασκευής φωτοβολταϊκών μονάδων αναλύεται παρακάτω. Για ειδικές εφαρμογές απαιτούνται ορισμένες παραλλαγές στις διαδικασίες και τα υλικά.

4.9.1 ΜΗΤΡΑ ΚΥΤΤΑΡΩΝ

Σε μια μονάδα τα κύτταρα συνήθως διατάσσονται σε σειρές. Μετά την κατάλληλη τοποθέτηση των κυττάρων, επικασσιτερωμένες λωρίδες χαλκού συγκολλούνται στην κύρια ράβδο επικοινωνίας των μπροστά επαφών (Σχ 4.7(a)). Πρέπει να σημειωθεί ότι οι λωρίδες πρέπει να επικαλύπτονται σε μια μεγάλη απόσταση κατά μήκος της κυρίας ράβδου επικοινωνίας, αφού η αγωγιμότητα των αποτυπωμένων ράβδων είναι πολύ μικρή. Αγωγήμα εποχικά μπορούν να αντικαταστήσουν τα συμβατικά συγκολλημένα κράματα με ταυτόχρονη χρήση ακτινοβολίας αντί για θερμά μέταλλα.



Σχήμα 4.7: (a) Διασύνδεση κυττάρων, (b) δύο κύτταρα σε σειρά και (c) κάτοψη 36 εν σειρά συνδεδεμένων κυττάρων

Συνήθως, χρησιμοποιούνται δύο λωρίδες ανά κύτταρο, προσφέροντας έτσι ασφάλεια σε περίπτωση που η συνέχεια κάποιας από τις δύο λωρίδες καταστραφεί λόγω κάποιας φθοράς. Εξάλλου, με τον τρόπο αυτό το ενεργό μήκος των μεταλλικών δακτύλων περιορίζεται στο ένα τέταρτο της πλευράς του κυττάρου, και η εν σειρά αντίσταση μετριάζεται. Οι λωρίδες προσφέρουν μια μη συμπαγή σύνδεση μεταξύ των κυττάρων που επιτρέπουν τη λήψη θερμικών διαστολών χωρίς προβλήματα.

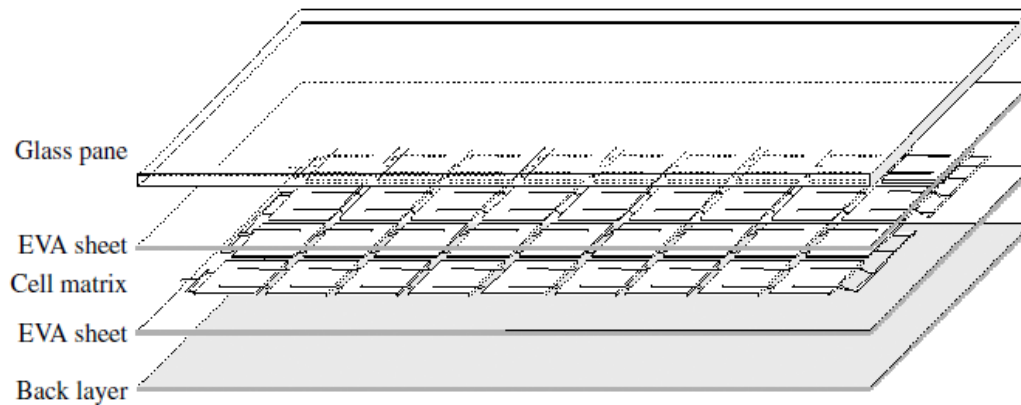
Στη συνέχεια, τα διάφορα κύτταρα ενώνονται μεταξύ τους, απλά συγκολλώντας τα, εκτός των κυττάρων, άκρα των λωρίδων (Σχ. 4.7 (b)). Τα εν σειρά κύτταρα διασυνδέονται με βοηθητικές λωρίδες για το σχηματισμό της μήτρας των κυττάρων. Αυτό μπορεί να αποτελείται από μια σειρά διασυνδεδεμένων κυττάρων, ή πολλές σειρές (Σχ. 4.7 (c)). Αν τα εν σειρά κύτταρα δεν είναι εσωτερικά παραλληλοποιημένα, οι ακροδέκτες τους μεταφέρονται εκτός των φωτοβολταϊκών μονάδων, ώστε να είναι δυνατή μια πιο ευέλικτη συνδεσιμότητα.

Μια συνηθισμένη μονάδα, είναι κατασκευασμένη από 36 εν σειρά κύτταρα, τα οποία, κάτω από τις συνθήκες λειτουργίας, θα παράγουν τάση περίπου 15 V στη μέγιστη ισχύ, κατάλληλη για φόρτιση 12 V μπαταριών. Όσο οι εφαρμογές των φωτοβολταϊκών σε κτίρια εξελίσσονται, οι συνδεδεμένες σε πλέγμα εφαρμογές αυξάνονται, με αποτέλεσμα μονάδες με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες να μπαίνουν στην αγορά.

4.9.2 ΟΙ ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ

Η συστοιχία των κυττάρων θα πρέπει να είναι σωστά ενθυλακωμένη, ώστε να έχει μια αξιόπιστη εξωτερική λειτουργία για περισσότερα από 20 έτη, πάντα με προσοχή σε παράγοντες όπως η στιβαρότητα για να είναι ανθεκτική σε μηχανικά φορτία, η προστασία από περιβαλλοντικούς παράγοντες και η υγρασία, η προστασία από κρούσεις, η ηλεκτρική μόνωση για την ασφάλεια των ανθρώπων κλπ.

Οι διαφορετικές στρώσεις από τις οποίες μια φωτοβολταϊκή μονάδα είναι κατασκευασμένη πρέπει να τοποθετούνται σε κατάλληλη σειρά για να εξασφαλιστεί η ορθή λειτουργία της μονάδας. Μια τυπική δομή των στρώσεων μιας φωτοβολταϊκής μονάδας παρουσιάζεται στο Σχ. 4.8.



Σχήμα 4.8: Συστάδα στρώσεων σε φωτοβολταϊκή μονάδα

Μια παχιά στρώση πάχους 2 – 3 mm από γυαλί νατρασβέστου χρησιμοποιείται ως υπερκράτος που προσδίδει μηχανική στιβαρότητα και προστασία στη μονάδα, ενώ παράλληλα επιτρέπει τη διέλευση του φωτός. Πρέπει να έχει μικρή περιεκτικότητα σιδήρου, αλλιώς η διέλευση του φωτός θα είναι μικρή. Οι σύγχρονες μονάδες χρησιμοποιούν γυαλί με δημήτριο το οποίο απορροφά την UV ακτινοβολία προς αύξηση της αξιοπιστίας. Το γυαλί πρέπει να περάσει από θερμοσκλήρυνση προκειμένου να αναπτύξει αντίσταση στις κρούσεις.

Η μήτρα των κυττάρων τοποθετείται ανάμεσα σε δύο στρώσεις του ενθυλακωτή. Ο πιο δημοφιλής ενθυλακωτής είναι το συμπολυμερές αιθυλο – βινυλο – ακετάτη (Ethylene – Vinyl – Acetate, EVA), ένα πολυμερές το οποίο αποτελείται από μακρομόρια με μια ραχοκοκαλιά από άτομα άνθρακα συνδεδεμένα με απλούς ομοιοπολικούς δεσμούς. Το EVA ανήκει στην οικογένεια των θερμοπλαστικών, με αποτέλεσμα όσες μεταβολές πραγματοποιούνται μετά από θέρμανση, είναι αντιστρεπτές. Στις μονάδες χρησιμοποιείται μια λεπτή στρώση του υλικού αυτού, πάχους περίπου 0.5 mm, ενώ, εκτός του πολυμερούς, περιλαμβάνονται και θεραπευτικοί και σταθεροποιητικοί παράγοντες στη στρώση.

Η εξωτερική στρώση στη μη ακτινοβολούμενη πλευρά της μονάδας είναι συνήθως ένα σύνθετο πλαστικό το οποίο λειτουργεί ως ασπίδα για την υγρασία και τους διαβρωτικούς παράγοντες. Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ακόμα γυαλί, κάτι το οποίο αυξάνει την προστασία.

4.9.3 ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΤΡΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΑΠΕΥΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

Οι συγκεκριμένες διαδικασίες πραγματοποιούνται σε έναν ελασματοποιητή, μια τράπεζα που μπορεί να θερμανθεί και να φουρνιστεί, με ένα κάλυμμα που κλείνει πολύ σφικτά στα άκρα. Το κάλυμμα έχει έναν εσωτερικό θάλαμο και ένα διάφραγμα που ξεχωρίζει τον εσωτερικό θάλαμο από το θάλαμο που βρίσκεται η φωτοβολταϊκή μονάδα. Και οι δύο

θάλαμοι μπορούν να κενωθούν ξεχωριστά: με τον τρόπο αυτό η μονάδα μπορεί να παραμένει σε περιβάλλον κενού, ενώ παράλληλα του ασκείται μηχανική συμπίεση.

Στο στάδιο της σύνδεσης, και οι δύο θάλαμοι κενώνονται ενώ αυξάνεται η θερμοκρασία πάνω από το όριο όπου το EVA τήκεται, περίπου στους 120°C. Το κενό είναι απαραίτητο ώστε ο αέρας, η υγρασία και άλλα αέρια να αφαιρούνται, και έτσι να μην σχηματίζονται κενά. Το EVA ρέει και επικαλύπτει τα κύτταρα. Μετά από μερικά λεπτά, με το θάλαμο της μονάδας ακόμα σε κενό, ο άνω θάλαμος γεμίζει με αέρα ώστε το διάφραγμα να πιέσει τις δύο στρώσεις. Η θερμοκρασία αυξάνεται στους 150°C και το θεραπευτικό στάδιο ξεκινά: οι θεραπευτικοί παράγοντες που προκαλούν διασταυρώσεις στο EVA σχηματίζουν αλυσίδες, χημικούς δεσμούς δηλαδή κατά μήκος των μακρομορίων, που πριν τη θεραπευτική διαδικασία απλά συνδέονται αδύναμα μεταξύ τους. Το πλαστικό τότε αποκτά ελαστομερικές ιδιότητες, συμπεριφορά δηλαδή που είναι όμοια με αυτή των ελαστικών. Το συγκεκριμένο στάδιο παίρνει περίπου 60 min για να ολοκληρωθεί για μια τυπική θεραπεία EVA. Μετά την ψύξη, τα δύο υλικά αποφορτίζονται από τον ελασματοποιητή.

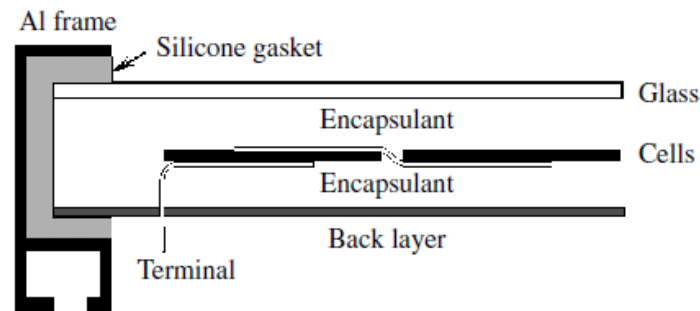
Βελτιώσεις της παραπάνω διαδικασίας σε βιομηχανικό επίπεδο μπορεί να περιλαμβάνουν: (1) βελτιωμένους τύπους EVA που μειώνουν δραστικά το χρόνο θεραπείας στα 10 min, (2) ξεχωριστούς φούρνους για την πραγματοποίηση της θεραπευτικής διαδικασίας με σκοπό τη μείωση του χρόνου χρήσης του ελασματοποιητή και (3) μια μεγάλη επιφάνεια στον ελασματοποιητή (μέχρι μερικά τετραγωνικά μέτρα), επιτρέπει την ταυτόχρονη κατασκευή πολλών ή πολύ μεγάλων φωτοβολταϊκών μονάδων.

Αλλαγές μπορούν να γίνουν και στο υλικό το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τη διασύνδεση. Ένα πολύ καλό εναλλακτικό πολυμερές είναι η πολυ – βινυλο – βουτυράλη (Poly – Vinyl – Butyral, PVB), το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις πρώτες κατασκευές μονάδων. Η επεξεργασία του είναι παρόμοια με του EVA και παρουσιάζει και ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι σε αυτό, αλλά απαιτεί χαμηλή διαδικασία αποθήκευσης. Για τις μονάδες που χρησιμοποιούν δύο γυάλινα παράθυρα, ορισμένες ρητίνες παρουσιάζουν μια εναλλακτική λύση στο EVA με πλεονεκτήματα αξιοπιστίας. Μια σφραγισμένη κοιλότητα σχηματίζεται μεταξύ των δύο γυάλινων παραθύρων, με τα κύτταρα στο εσωτερικό, όπου στη συνέχεια εγχέεται η ρητίνη. Προσοχή χρειάζεται ώστε να μην δημιουργηθούν θύλακες αέρα. Επίσης, οι ρητίνες δεν απαιτούν θερμότητα για τη θεραπεία τους. Οι ρητίνες σιλικόνης είναι ακριβές αλλά πολύ σταθερές και για αυτό πολλές εφαρμογές σε κτίρια τις χρησιμοποιούν. Παρόλα αυτά η θεραπεία αυτών μπορεί να δυσχεράνει από την παρουσία του σφραγιστικού της μονάδας, και έτσι μπορεί να είναι δύσκολες στη χρήση. Τέλος, πρόσφατα άρχισαν να διερευνώνται και ακρυλικές ρητίνες, με θεραπείες βασισμένες σε UV ακτινοβολίες.

4.9.4 ΕΠΟΜΕΝΑ ΒΗΜΑΤΑ

Αυτά περιλαμβάνουν (1) αποκοπή των άκρων του προϊόντος που παράχθηκε κατά τη σύνδεση, ώστε να απομακρυνθούν τα περισσεύματα του ενθυλακωτή, (2) σφράγιση των άκρων με ελαστική σιλικόνη ώστε να αποφευχθεί η εισχώρηση της υγρασίας στη μονάδα, (3) κόλληση του πλαστικού κουτιού των επαφών στο πίσω μέρος της μονάδας και η πραγματοποίηση της συνδεσμολογίας και (4) όταν απαιτείται, η εγκατάσταση του ανοδιωμένου αλουμινένιου περιβλήματος (Σχ. 4.9). Το περίβλημα θα πρέπει να είναι ηλεκτρικά μονωμένο από το ενεργό κύκλωμα των κυττάρων, ώστε οι υψηλές διαφορές

δυναμικού να μπορούν να περιοριστούν μεταξύ των ηλεκτρικών ακροδεκτών και του περιβλήματος χωρίς ροή ρεύματος.



Σχήμα 4.9: Τομή μιας τυπική μονάδας

Τελικά, οι διάφορες μονάδες δοκιμάζονται και αξιολογούνται. Μεταξύ των υπολοίπων δοκιμών οι καμπύλες $I - V$ όλων των μονάδων κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μετρώνται, ώστε να πιστοποιηθούν οι προδιαγραφές τους. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται προσομοιωτές λάμπης, οι οποίοι μπορούν με (συγκριτικά) λίγη ενέργεια και τα κατάλληλα ηλεκτρονικά όργανα, να καταγράψουν μια πλήρη καμπύλη $I - V$, σε κλάσματα του δευτερολέπτου. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι οι προσομοιώσεις πρέπει να περιέχουν ένα φάσμα το οποίο ταιριάζει με αυτό του προτύπου AM 1.5, αλλιώς πρέπει να βαθμονομηθούν με βάση ένα ήδη βαθμονομημένο κύτταρο της ίδιας τεχνολογίας.

4.10 ΕΙΔΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ

4.10.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

Οι μονάδες κτιριακών εγκαταστάσεων (Building Integration of PV, BIPV) προέκυψαν ως μία από τις πιο σημαντικές – από μεριάς όγκου – εφαρμογές φωτοβολταϊκών. Οι μονάδες αυτές έχουν δύο σκοπούς: τόσο ως δομικά υλικά, όσο και ως γεννήτριες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα κτίριο με διάφορους τρόπους και πολλά ειδικά προϊόντα αναπτύχθηκαν, ώστε οι τυπικές περιβεβλημένες μονάδες να μην είναι το μοναδικό φωτοβολταϊκό προϊόν. Πολύ μεγάλες μονάδες με ειδικές στερεώσεις για στέγες και προσόψεις, κεραμίδια οροφών με κύτταρα και ημιδιάφανες μονάδες οι οποίες αφήνουν το φως να περάσει από μέσα τους, είναι μερικά από τα προϊόντα που χρησιμοποιούνται σήμερα. Οι εμφανίσεις ενισχύονται από το σχήμα των μονάδων, την ενθυλάκωση και το χρώμα. Επίσης, τα υλικά αυτά είναι ειδικά καταρτισμένα ώστε να συμμορφώνονται με τους κανόνες ασφαλείας των κτιρίων, π.χ. για περιπτώσεις πυρκαγιάς τα υλικά έχουν μεγάλη αντίσταση στη φωτιά.

4.10.2 ΜΟΝΑΔΕΣ ΔΥΟ ΠΡΟΣΩΠΩΝ

Αρκετές δομές κυττάρων μπορούν να λειτουργήσουν με ακτινοβολήση και στα δύο πρόσωπά τους. Με την ενθυλάκωση ανάμεσα σε δύο γυάλινα παράθυρα, οι μονάδες δύο προσώπων προσφέρουν αυξημένη ισχύ εξόδου ανά μονάδα επιφάνειας κυττάρου, χωρίς

περεταίρω τεχνολογικές αλλαγές. Παρόλα αυτά το μερίδιό τους στην αγορά είναι πολύ μικρό προς το παρόν.

4.10.3 ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕ ΚΥΤΤΑΡΑ ΠΙΣΩ ΕΠΑΦΩΝ

Αρκετές δομές κυττάρων φέρουν και τις δύο επαφές στο πίσω πρόσωπό, το οποίο συνήθως επιτυγχάνεται μέσω διάχυσης φωσφόρου και στα δύο πρόσωπα, τα οποία έχουν ενωθεί εσωτερικά. Τα κύτταρα πίσω επαφών είναι διασυνδεδεμένα χωρίς λωρίδες, απλά συγκολλώντας τα σε μια επιφάνεια με αποτυπωμένες τις διαδρομές σύνδεσης, παρόμοια με την τεχνική PCB στα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Αυτά οι πειραματικοί σχεδιασμοί προσφέρουν ευκολότερη κατασκευή και έχουν καλύτερη εμφάνιση.

4.11 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΕΣ ΑΠΟΔΟΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ

4.11.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η τάση μιας μονάδας είναι, στην αρχή της, ο αριθμός των εν σειρά συνδεδεμένων κυττάρων επί την τάση του ενός κυττάρου, και το ρεύμα της μονάδας είναι ο αριθμός των παράλληλων κυττάρων επί το ρεύμα του ενός κυττάρου. Όποιος και αν είναι ο συνδιασμός, η ισχύς της μονάδας είναι ίση με την ισχύ ενός κυττάρου επί τον αριθμό τους. Συνήθεις τιμές κοινό φωτοβολταϊκών μονάδων είναι για την ισχύ 50 – 200 Wp, με ρεύματα 3 – 8 A και τάσεις 20 – 40 V. Υψηλότερες ή χαμηλότερες τιμές είναι δυνατές για ειδικές εφαρμογές.

Ο κατασκευαστής συνήθως παρέχει τις τιμές κάποιων χαρακτηριστικών σημείων (βραχυκύκλωμα, ανοικτοκύκλωμα, μέγιστη ισχύς κλπ), καθώς και την καμπύλη $I - V$ για κάποιες συγκεκριμένες συνθήκες (ακτινοβολία 1KW/m^2 , AM 1.5, 25°C). Η μέγιστη τιμή της ισχύος για αυτές τις συνθήκες λέγεται peak power και δίνεται σε watts – peak (Wp). Αν και η απόδοση είναι η πιο σημαντική παράμετρον, για τις μονάδες συνήθως έχει δευτερεύουσα σημασία αφού κομμάτι της επιφάνειάς τους δεν καλύπτεται από τα ακριβά ηλιακά κύτταρα.

Οι συνθήκες σε πραγματική λειτουργία δεν είναι οι τυπικές. Αντίθετα, ποικίλουν έντονα και επηρεάζουν την ηλεκτρική απόδοση του κυττάρου, προκαλώντας απώλεια απόδοσης σε σχέση με τις τυπικές συνθήκες. Αυτή η απώλεια μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τέσσερις κύριες κατηγορίες:

- *Γωνιακή κατανομή του φωτός:* Λόγω της περιστροφής του ήλιου και της διάχυσης του φωτός, αυτό δεν προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια κάθε κυττάρου.
- *Φασματικό περιεχόμενο του φωτός:* Για την ίδια ισχύ ακτινοβολίας, διαφορετικά φάσματα προκαλούν τη δημιουργία διαφορετικών φωτορευμάτων στα κύτταρα. Το φάσμα μπορεί να αλλάζει είτε λόγω της θέσης του ήλιου, είτε λόγω μολυσματικών παραγόντων της ατμόσφαιρας.
- *Επίπεδο ακτινοβολίας:* Για σταθερή θερμοκρασία κυττάρου, η απόδοση της μονάδας μειώνεται σε σχέση με τα μειούμενα επίπεδα ακτινοβολίας. Για ακτινοβολίες κοντινές σε αυτές του ήλιου, αυτό γίνεται εξαιτίας της λογαριθμικής εξάρτησης της τάσης ανοικτοκυκλώματος στα φωτορεύματα.

- **Θερμοκρασία κυττάρου:** Η περιβαλλοντική θερμοκρασία μεταβάλλεται και εξαιτίας της θερμικής μόνωσης που παρέχεται από την ενθυλάκωση, το φως κάνει τα κύτταρα στη μονάδα να ζεσταίνονται πάνω από αυτήν. Υψηλότερη θερμοκρασία συνεπάγεται μεγαλύτερες απώλειες. Αυτός είναι ο πιο συνηθισμένος παράγοντας απωλειών απόδοσης.

Για την αντιμετώπιση όλων των παραπάνω παραγόντων απωλειών χρησιμοποιούνται απλές μέθοδοι για τη μεταφορά των ζευγών $I - V$ σε διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες. Οι μέθοδοι αυτές είναι εφαρμόσιμες σε περιορισμένα εύρη θερμοκρασίας και ακτινοβολίες, κοντινά όμως σε αυτά που συναντώνται στην πράξη και που απαιτούν την ρύθμιση μικρού αριθμού, εύκολα ελεγχόμενων παραμέτρων. Παραδείγματα τέτοιων μεθόδων παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η ισορροπία ισχύος σταθερής κατάστασης καθορίζει τη θερμοκρασία του κυττάρου: η είσοδος είναι η απορροφούμενη φωτεινή ισχύς, η οποία μερικώς μετασχηματίζεται σε χρήσιμη ηλεκτρική ισχύ εξόδου και η υπόλοιπη διαμερίζεται στα υπόλοιπα στοιχεία. Η συναγωγή είναι ο κύριος μηχανισμός για τη μεταφορά θερμότητας στις χερσαίες εφαρμογές, ενώ η μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας είναι ο δευτερεύον μηχανισμός. Μια απλοποίηση του μηχανισμού αυτού είναι ότι η μείωση της περιβάλλουσας θερμοκρασίας του κυττάρου αυξάνεται γραμμικά με την ακτινοβολία. Η σταθερά εξαρτάται από την εγκατάσταση της μονάδας, την ταχύτητα του ανέμου την υγρασία κλπ. Οι πληροφορίες αυτές περιέχονται στην ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του κυττάρου (Nominal Operating Cell Temperature, NOCT), η οποία χαρακτηρίζεται ως η θερμοκρασία του κυττάρου για θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C , ακτινοβολία 0.8 KW/m^2 και ταχύτητα ανέμου 1 m/s . Οι τιμές του NOCT είναι τυπικά κοντά στους 45°C . Για διαφορετικές ακτινοβολίες G , αυτή λαμβάνεται από τη σχέση:

$$T_{cell} = T_{ambient} + G \times \frac{NOCT - 20^{\circ}\text{C}}{0.8 \text{ KW/m}^2}$$

- Το ρεύμα βραχυκυκλώματος της μονάδας θεωρείται αυστηρά ανάλογο της ακτινοβολίας. Αυξάνεται ελαφρά με τη θερμοκρασία του κυττάρου (αυτό πηγάζει από τη μείωση στο ενεργειακό διάκενο και στη βελτίωση των χρόνων ζωής των φορτίων μειονότητας). Η σταθερά a δίνει τη σχετική εκατοστιαία μεταβολή του ρεύματος. Συνδυάζοντας και τις δύο υποθέσεις, το ρεύμα βραχυκυκλώματος δίνεται από τη σχέση:

$$I_{SC}(T_{cell}, G) = I_{SC}(STC) \times \frac{G}{1 \text{ KW/m}^2} \times [1 + a(T_{cell} - 25^{\circ}\text{C})]$$

Για το κρυσταλλικό πυρίτιο το a είναι περίπου 0.4% .

- Η τάση ανοικτοκύκλωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία (η κύρια επιρροή είναι η εγγενής συγκέντρωση), μειούμενη γραμμικά με αυτή. Η γνώση της σταθερά β , επιτρέπει την πρόβλεψη της τάσης αυτής σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_{OC}(T_{cell}, G) = V_{OC}(STC) - \beta(T_{cell} - 25^{\circ}\text{C})$$

Η εξάρτηση από την ακτινοβολία χάνεται μέσα στο T_{cell} . Για το κρυσταλλικό πυρίτιο μια τυπική τιμή του β είναι $2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ ανά εν σειρά συνδεδεμένο κύτταρο.

- Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την ποικιλία της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος (ή αλλιώς την απόδοση) σε σχέση με την ακτινοβολία και τη θερμοκρασία. Η παράμετρος γ ορίζεται ως η σχετική μείωση της απόδοσης της μονάδας ανά εκατοστιαία μονάδα αύξησης της θερμοκρασίας:

$$\eta(T_{cell}, G) = \eta(STC) \times [1 - \gamma(T_{cell} - 25^\circ\text{C})]$$

Συνήθεις τιμές του γ είναι περίπου 0.5%

Σε όλα τα παραπάνω παραδείγματα ο δείκτης STC αναφέρεται στα μεγέθη όπως λαμβάνονται κατά τη λειτουργία των μονάδων στις καθορισμένες συνθήκες που αναφέρθηκαν παραπάνω.

4.11.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ

Τα λεγόμενα λάθη αναντιστοιχίας προκύπτουν όταν κύτταρα με διαφορετικά $I - V$ χαρακτηριστικά διασυνδέονται λόγω λιγότερων βαθμών ελευθερίας για την πόλωση της συσκευής, ώστε η αποδιδόμενη ισχύς της συστοιχίας να είναι μικρότερη από ότι κάθε ξεχωριστό κύτταρο θα μπορούσε να αποδώσει. Οι διαφορές προέρχονται από τις κατασκευαστικές ατέλειες, που προκαλούν μη ομοιόμορφη ακτινοβολήση η θερμοκρασία κατά τη λειτουργία.

Για την ελαχιστοποίηση τέτοιων απωλειών, μετά την κατασκευή τα κύτταρα δοκιμάζονται διεξοδικά. Εάν όλα τα κύτταρα μιας τάξης παρουσιάζουν παρόμοια αποδιδόμενα ρεύματα στη μέγιστη ισχύ, τα κύτταρα συνδέονται εν σειρά, ώστε οι συγκεκριμένες απώλειες να είναι πολύ μικρές.

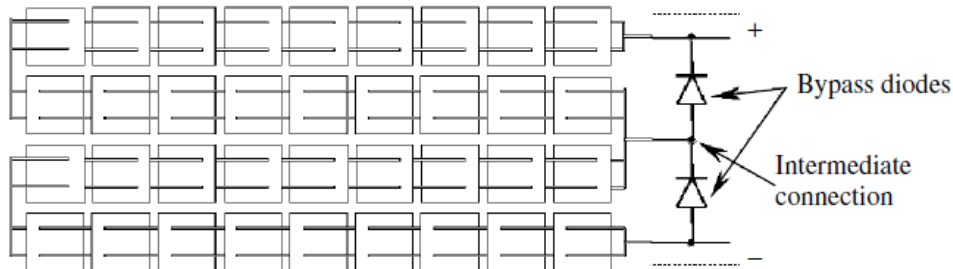
4.11.3 ΤΟΠΙΚΕΣ ΣΚΙΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΥΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

Εξαιτίας των τοπικών σκιάσεων, ένα ή περισσότερα ηλιακά κύτταρα μπορεί να παρουσιάζει μικρότερο ρεύμα βραχυκύκλωσης από τα υπόλοιπα εν σειρά συνδεδεμένα κύτταρα. Εάν τα κύτταρα αυτά αναγκαστούν να αποδώσουν υψηλότερο ρεύμα από ότι μπορούν να παράγουν, πολώνονται αντίστροφα, αρχίζουν να καταρρέουν και απορροφούν ενέργεια αντί να αποδίδουν.

Ένα άλλο φαινόμενο που συναντάται, είναι αυτό της κατάρρευσης χιονοστιβάδας. Το φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα την υπερβολική θέρμανση ορισμένων σημείων της μονάδας (καυτά σημεία) λόγω των ανόμοιων ρευμάτων κατά μήκος των ακροδεκτών. Εάν ξεπεραστεί τοπικά η θερμοκρασία των 150°C τοπικά, τότε το υλικό υποβαθμίζεται στο σημείο αυτό και η μονάδα χάνει την αποτελεσματικότητά της. Το συγκεκριμένο φαινόμενο παρουσιάζει μεγάλη διασπορά και άρα είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθεί.

Η λύση των παραπάνω προβλημάτων είναι ο περιορισμός των εν σειρά κυττάρων που χρησιμοποιούνται σε κάθε μονάδα. Εναλλακτικά, εάν ο αριθμός αυτός πρέπει να είναι μεγάλος, τοποθετούνται δίοδοι (δίοδοι παράκαμψης) παράλληλα με τα κύτταρα, αλλά με αντίθετη πολικότητα. Έτσι, όταν κάποιο κύτταρο σκιαστεί και αρχίζει να απορροφά

ενέργεια, η πολικότητα του αντιστρέφεται και η δίοδος τότε αρχίζει να άγει ευθεία. Η δίοδος αποδίδει το απαραίτητο ρεύμα ώστε το σύστημα να διατηρείται βραχυκυκλωμένο. Απεικόνιση του συγκεκριμένου συστήματος παρουσιάζεται στο Σχ. 4.10. Για την αντιμετώπιση των καυτών σημείων, μόνο η διατήρηση μικρού αριθμού κυττάρων μπορεί να φέρει κάποιο αποτέλεσμα. Συνήθης αριθμός είναι 15 – 20 κύτταρα εν σειρά.



Σχήμα 4.10: Δύο δίοδοι σε μια μονάδα 36 κυττάρων. Οι συνδέσεις πραγματοποιούνται στο κουτί ακροδεκτών

4.11.4 ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

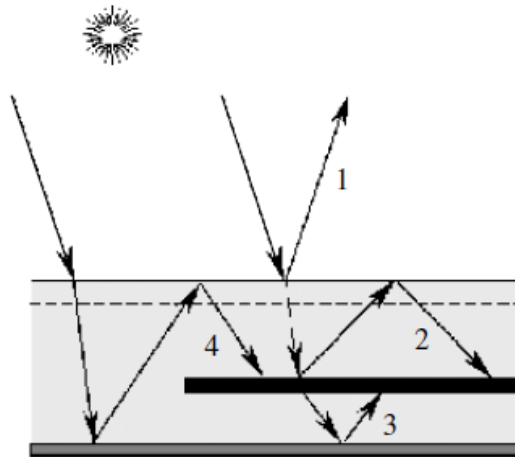
Η ενθυλάκωση επηρεάζει τις οπτικές ιδιότητες του κυττάρου με πολλούς τρόπους. Οι οπτικές ιδιότητες των κυττάρων πρέπει να βελτιστοποιούνται, σε συνάρτηση με το κόστος και την απόδοση, μετά την ενθυλάκωση.

Μερικές επιδράσεις της ενθυλάκωσης είναι:

- Ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού και του EVA είναι παρόμοιος, περίπου 1.5, μεταξύ αυτών του αέρα και του πυριτίου. Η ενθυλάκωση τότε δρα σαν ένα παχύ ARC. Για καλής υφής πυρίτιο, αυτή η ARC μπορεί να είναι αρκετή.
- Ο σχεδιασμός των ARC πρέπει να λαμβάνει υπ' όψιν τα κύτταρα ακτινοβολούνται από ένα μέσο με το συγκεκριμένο δείκτη διάθλασης. Ο βέλτιστος δείκτης διάθλασης των ARC πρέπει να είναι μεγαλύτερος από αυτόν του αέρα.
- Το γυαλί και το EVA απορροφούν λίγο φως χαμηλού μήκους κύματος.
- Τυπικά, 4% ανάκλαση πραγματοποιείται μεταξύ γυαλιού και αέρα (Σχ. 4.11 (1)). Το ποσοστό αυτό μπορεί να μειωθεί με χρήση ARC ή ύφανσης.
- Το φως που ανακλάται στα μεταλλικά δάκτυλα και την επιφάνεια των κυττάρων, εάν έχει κλίση σε σχέση με την επιφάνεια του γυαλιού, μπορούν να επαναφερθούν μερικώς, μέσω της ολικής ανάκλασης στην επιφάνεια αυτή (Σχ. 4.11(2)). Το φαινόμενο μπορεί να ενισχυθεί με ύφανση της επιφάνειας των κυττάρων με επικλινείς πυραμίδες, αντί για ορθές όπως λαμβάνονται μέσω της αλκαλικής εγχάραξης (1 0 0) επιφανειών.
- Μέσω των ικανοτήτων παγίδευσης που έχουν τα κύτταρα, εξαιτίας την χαμηλότερης διαφοράς στο δείκτη διάθλασης, που φαίνεται ότι χειροτερεύουν με την ενθυλάκωση, οι ακτίνες που διαφεύγουν παγιδεύονται από το γυαλί, ώστε η ενίσχυση της απορρόφησης του φωτός να μην επηρεαστεί.
- Για κύτταρα χωρίς πίσω μεταλλικό καθρέφτη, το φως που διαπερνά το κύτταρο μπορεί να επαναφερθεί τοποθετώντας έναν ανακλαστήρα, στο πίσω μέρος της

μονάδας (Σχ. 4.11(3)). Η πίσω πλαστική επιφάνεια, εάν είναι λευκή, εξυπηρετεί αυτό το σκοπό.

- Η ίδια λευκή επιφάνεια, εφόσον ανακλά διαχυτικά, επιτρέπει μέρος του προσπίπτοντος φωτός να συλλέγεται από τα κύτταρα (Σχ. 4.11(4)).



Σχήμα 4.11: Οπτικά φαινόμενα της ενθυλάκωσης: (1) ανάκλαση γυαλιού, (2) παγίδευση ανάκλασης κυττάρου, (3) παγίδευση της διαπερατότητας του κυττάρου, (4) συλλογή περιφερειακού φωτός.

4.12 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κύρια συμπεράσματα του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι τα εξής:

- *Μεταβολή στην κλίμακα:* Η σύγχρονη εκτόξευση στην αγορά των φωτοβολταϊκών επιτρέπει και υποβοηθά της τεχνολογική και κατασκευαστική τους ανάπτυξη.
- *Διαφορά εργαστηρίου – βιομηχανίας:* Υπάρχουν δοκιμασμένες τεχνολογίες στο εργαστήριο που οδήγησαν σε εντυπωσιακά επίπεδα επιδόσεων, ενώ από την άλλη η βιομηχανία προσφέρει γρήγορες, πιο μέτριες αλλά οικονομικές τεχνολογικές λύσεις. Κλείνοντας αυτή τη διαφορά θα μειωθεί το ποσοστό κόστους ανά Wp.
- *Πρωτοποριακά υλικά πυριτίου:* Η αύξηση της αγοράς και η απειλή έλλειψης πυριτίου, τροφοδοτεί την ανάπτυξη νέων υλικών, αλλά και την οικονομία των παρόντων υλικών, μέσω της ανάπτυξης νέων τεχνολογικών λύσεων.
- *Τεχνολογική διαφοροποίηση:* Αυτές οι δύο προκλήσεις πρέπει να αντιμετωπιστούν από την παραγωγική τεχνολογία των ηλιακών κυττάρων στα επόμενα χρόνια. Η εντατική προβιομηχανική έρευνα ήδη καλλιεργείται και οι λύσεις αναπτύσσονται πάνω σε πολλούς διαφορετικούς τομείς.
- *Ποιότητα:* Η απόδοση και η αντοχή των προϊόντων, και η αισθητική και περιβαλλοντική φιλικότητα τους είναι τόσο σημαντικά όσο και το κόστος, για την ανάπτυξη της βιομηχανίας φωτοβολταϊκών, κάτι το οποίο επηρεάζει και την τεχνολογία
- *Μακροπρόθεσμο σενάριο:* Εναλλακτικές τεχνολογίες αυτής του κρυσταλλικού πυριτίου ερευνώνται διεξοδικά και πιθανώς ορισμένες από αυτές να επιτύχουν τη

μείωση του κόστους των φωτοβολταϊκών και την αύξηση της ανταγωνιστικότητάς τους. Παρόλα αυτά, αυτό προϋποθέτει την ύπαρξη μιας ώριμης αγοράς φωτοβολταϊκών, για την οποία η τεχνολογία πυριτίου θα είναι ζωτική, τουλάχιστον για την επόμενη δεκαετία.

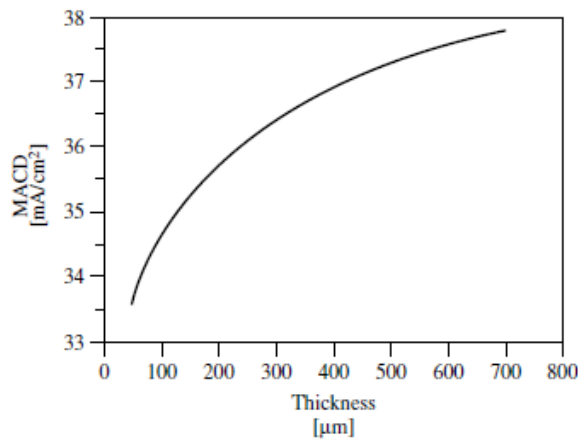
Κεφάλαιο 5^ο: Ηλιακά κύτταρα λεπτών υμενίων

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Επειδή το πυριτίο είναι ένα υλικό έμμεσου ενεργειακού διακένου, συχνά θεωρείται ότι το ελάχιστο πάχος του πυριτίου που απαιτείται για την απορρόφηση του χρήσιμου ηλιακού φωτός θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το $1/\alpha_{\text{bandedge}}$, όπου το α_{bandedge} είναι ο συντελεστής απορρόφησης για το μήκος κύματος λ του φωτός, το οποίο ανταποκρίνεται κοντά στο ελάχιστο ενεργειακό διάκενο. Χρησιμοποιώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού, στη βάση απορρόφησης εξαιτίας ενός απλού περάσματος φωτός, και χρησιμοποιώντας το μέσο του ελάχιστου ενεργειακού διακένου ($\lambda = 1.05 \mu\text{m}$), λαμβάνεται μια τιμή περίπου ίση με $1/\alpha = 700 \mu\text{m}$. Αυτό σημαίνει ότι το πάχος του κυττάρου για μια ικανοποιητική απορρόφηση του ηλιακού φάσματος, θα πρέπει να είναι $> 700 \mu\text{m}$. Αυτό είναι ένα αρκετά πάχος για ένα κύτταρο πυριτίου και δεν είναι επιθυμητό για εμπορική εκμετάλλευση ηλιακών κυττάρων για δύο λόγους: το κόστος του κυττάρου μπορεί να είναι πολύ υψηλό και η αποτελεσματικότητα στη συλλογή των φωτογεννημένων φορτίων είναι μικρή επειδή είναι δύσκολο να έχουν ένα μήκος διάχυσης φορτίων μειονότητας (Minority – Carrier Diffusion Length, MCDL) συγκρίσιμο σε ένα τόσο μεγάλο πάχος κυττάρου. Έτσι, για πρακτικούς λόγους, το πάχος του κυττάρου πρέπει να είναι μικρότερο από αυτήν την τιμή. Επιπλέον, τα λεπτομερή μοντέλα που λαμβάνουν υπ' όψιν τα επιφανειακά χαρακτηριστικά και τις πολυανακλάσεις στο εσωτερικό των κυττάρων, δείχνουν ότι η απορρόφηση μπορεί να ενισχυθεί σημαντικά. Έτσι, η ανάγκη για ένα τόσο παχύ κύτταρο υποβαθμίζεται. Με βάση τις παραπάνω πληροφορίες, αποδεικνύεται ότι χρησιμοποιώντας μια κατάλληλη δομή, ένα πολύ λεπτό υμένιο πυριτίου μπορεί να προσφέρει ένα υψηλό βαθμό απορρόφησης του ηλιακού φάσματος, σχεδόν τόσο πολύ όσο και ένα παχύ κύτταρο. Η φυσική ανάλυση και η μοντελοποίηση κατάλληλων δομών για τα συγκεκριμένα κύτταρα αναπτύχθηκε πολύ τα τελευταία 20 χρόνια, και είναι υπεύθυνα για την πλειοψηφία των βελτιώσεων της τεχνολογίας πυριτίου.

Ως εισαγωγή, είναι απαραίτητο να υπάρχει μια γενική κατανόηση των προαπαιτούμενων για ένα ηλιακό κύτταρο λεπτού υμενίου πυριτίου και των προβλημάτων που προκύπτουν όταν το πάχος ενός ηλιακού κυττάρου πυριτίου μειώνεται. Προφανώς, μια μείωση του πάχους του κυττάρου οδηγεί σε μειωμένη απορρόφηση και άρα μειωμένα φωτορεύματα. Μια ποσοτική προσέγγιση αυτής της μείωσης των φωτορευμάτων ισοδυναμεί με τη μείωση μιας ολόκληρης επίπεδης φωτοβολταϊκής μονάδας. Στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 5.1) αποτυπώνεται η μέγιστη δυνατή πυκνότητα ρεύματος (Maximum Achievable Current Density, MACD) που παράγεται από μια επίπεδη φωτοβολταϊκή μονάδα, με τη βέλτιστη ARC, συναρτήσει του πάχους των κυττάρων. Οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού, το οποίο υποθέτει ότι η παραγωγή ενός ζεύγους ηλεκτρονίου – οπής ανά φωτόνιο και μια συνολική συλλεκτική απόδοση. Οι υποθέσεις αυτές ισοδυναμούν με μηδενική ταχύτητα επιφανειακού ανασυνδυασμού και απουσία μηχανισμών ηλεκτρικών απωλειών. Έτσι, τα φωτορεύματα στο σχήμα αυτό αντιστοιχούν σε μια MACD για ηλιακό φάσμα AM 1.5. Το σχήμα παρουσιάζει αύξηση της MACD, όσο το πάχος αυξάνεται, ενώ σταθεροποιείται για πάχος περίπου $700 \mu\text{m}$. Σε ένα πάχος περίπου

300 μm , η πυκνότητα ρεύματος είναι εντός του 5% της τιμής σταθεροποίησης, το οποίο υπονοεί ότι ένα τέτοιο πάχος κυττάρου είναι συμβατό για την κατασκευή ηλιακών κυττάρων υψηλής απόδοσης πάνω σε επίπεδα υποστρώματα. Το πάχος αυτό συμπίπτει με τις προϋποθέσεις διατήρησης μιας υψηλής απόδοσης στη διαχείριση και την επεξεργασία και άλλων συσκευών από ημιαγωγούς.



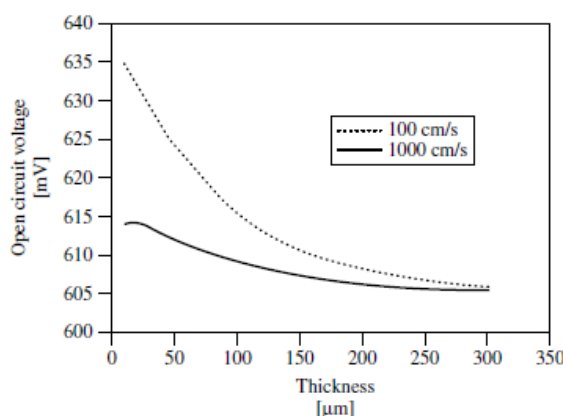
Σχήμα 5.1: Μέγιστη δυνατή πυκνότητα ρεύματος (MACD), για ένα επίπεδο ηλιακό κύτταρο πυριτίου με ARC, συναρτήσει του πάχους.

Η βιομηχανία φωτοβολταϊκών ανέκαθεν δανειζόταν τεχνολογική γνώση σχετικά με την διαχείριση και την επεξεργασία συσκευών από τη βιομηχανία ημιαγωγών, η οποία χρησιμοποιεί παχιά κύτταρα ώστε να αποφευχθούν οι καταστροφές κατά τη μηχανική διαχείριση τους ή τις θερμικές καταπονήσεις από τις διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας. Παράλληλα, η κοινότητα φωτοβολταϊκών αναγκάστηκε να χρησιμοποιήσει κύτταρα με παρόμοιο πάχος για τα φωτοβολταϊκά πυριτίου. Έτσι, η επιλογή παχιών κυττάρων επέτρεψε την κοινότητα να εστιάσει σε θέματα υλικών και διεργασιών των συσκευών, το οποίο βοήθησε στην ανάπτυξη της επιστήμης και της τεχνολογίας των ηλιακών κυττάρων πυριτίου, ως το επίπεδο που βρίσκεται σήμερα.

Πρόσφατα, όμως, υπήρξε μεγάλη πρόοδος στη διαχείριση κυττάρων και στην ανάπτυξη πιο ομαλών και «ευγενικών» μεθόδων με μεγάλη απόδοση. Αυτή η πρόοδος κέντρισε το ενδιαφέρον στη χρήση λεπτότερων υποστρωμάτων για δύο λόγους: (1) Για τη μείωση της ποσότητας πυριτίου ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος από τα φωτοβολταϊκά. Επειδή η βιομηχανία πυριτίου πέρασε από περιόδους έλλειψης του υλικού, μια πιο αποτελεσματική χρήση πυριτίου θα μπορούσε να ελαχιστοποιήσει τέτοιες δυσκολίες. (2) Για τη βελτίωση της απόδοσης των κατασκευασμένων ηλιακών κυττάρων σε υποστρώματα χαμηλού κόστους, με τη χρήση βελτιωμένων τεχνικών σχεδιασμού κυττάρων.

Μια προσέγγιση για να επιτευχθούν ταυτόχρονα αυτές οι απαιτήσεις είναι η χρήση λεπτότερων κυττάρων. Τα λεπτότερα κύτταρα εξοικονομούν υλικό και επίσης προσφέρουν ένα πλεονέκτημα στην επίδοση, μειώνοντας τον ανασυνδυασμό των ογκικών φορτίων στο εσωτερικό των ηλιακών κυττάρων. Έτσι, για μια δεδομένη ποιότητα υλικού του υποστρώματος, μια μείωση στο πάχος του κυττάρου μπορεί να οδηγήσει στη βελτίωση της τάση ανοικτοκύκλωσης (V_{oc}) και στον συντελεστή πλήρωσης (FF) του ηλιακού κυττάρου. Παρόλα αυτά, όσο το πάχος του μειώνεται, ο επιφανειακός ανασυνδυασμός γίνεται ένα

ολοένα και πιο σημαντικό συστατικό του ολικού ανασυνδυασμού. Συγκεκριμένα, ο επιφανειακός ανασυνδυασμός μπορεί να μειώσει σημαντικά την V_{oc} . Αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 5.2), το οποίο παρουσιάζει την V_{oc} συναρτήσει του πάχους (για σχετικά απλά ηλιακά κύτταρα) για δύο διαφορετικές τιμές ταχύτητας επιφανειακού ανασυνδυασμού, $S = 100 \text{ cm/s}$ και $S = 1000 \text{ cm/s}$. Οι υπολογισμοί στο Σχ. 5.2, πραγματοποιήθηκαν για $S_f = S_b$, όπου S_f και S_b οι ταχύτητες επιφανειακού ανασυνδυασμού στην μπροστά και πίσω επαφή, αντίστοιχα. Η σημαντική κατάληξη είναι ότι αν και μια μείωση στο πάχος μπορεί να οδηγήσει σε μια αύξηση στη V_{oc} , μπορεί να έχει ένα αντίθετο αποτέλεσμα εάν ο επιφανειακός ανασυνδυασμός δεν μειώνεται ταυτόχρονα. Εμφανώς, η πλήρης πρόοδος στη μείωση του ογκικού ανασυνδυασμού από λεπτά αρχικά υλικά μπορεί να επιτευχθεί μόνο εάν η συσκευή έχει ένα εγγενές χαρακτηριστικό να δημιουργεί και να ανακλά τα φορτία μειονότητας μακριά από τη διεπιφάνεια, χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικούς ανακλαστήρες (όπως υψηλά – χαμηλά πεδία), και οπτικούς ανακλαστήρες. Αυτές είναι μερικές σημαντικές εκτιμήσεις για τα ηλιακά κύτταρα λεπτών υμενίων.



Σχήμα 5.2: V_{oc} ενός ηλιακού κυττάρου πυριτίου συναρτήσει του πάχους για υψηλές και χαμηλές ταχύτητες επιφανειακού ανασυνδυασμού.

Έτσι, τα λεπτότερα κύτταρα μπορούν να αποδώσουν μεγαλύτερες τάσεις και μεγαλύτερους παράγοντες πλήρωσης εάν οι απαιτήσεις επιφανειακού ανασυνδυασμού απατώνται. Παρόλα αυτά, μπορούν να υποφέρουν από απώλειες στα φωτορεύματα, εκτός και αν οι οπτικές απώλειες που σχετίζονται με τη μείωση του πάχους μπορούν να αντισταθμιστούν διαμέσου ανώτερων σχεδιασμών παγίδευσης φωτός. Εάν αυτές οι συνθήκες εξασφαλιστούν, τα λεπτότερα κύτταρα μπορούν να είναι πιο αποδοτικά από τα παχύτερα ομόλογά τους. Τα ηλιακά κύτταρα λεπτών υμενίων μπορούν επίσης να προσφέρουν ένα πλεονέκτημα στο άμεσο κόστος, το οποίο σχετίζεται με τη χρήση λιγότερου πυριτίου και χρησιμοποιώντας τεχνολογίες λεπτών υμενίων, οι οποίες (κατ' αρχήν) θεωρούνται ότι είναι μέθοδοι χαμηλού κόστους. Είναι ξεκάθαρο ότι τα λεπτότερα κύτταρα μπορούν να προσφέρουν σημαντική μείωση στο ενεργειακό κόστος των φωτοβολταϊκών. Η βιομηχανία φωτοβολταϊκών σχεδιάζει τη σταδιακή μείωση του πάχους των κυττάρων, από την τωρινή τους τιμή των περίπου 350 μm σε πάχη μικρότερα από 100 μm , μέσα στην επόμενη δεκαετία, με βάση τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες. Όμως, τα επιχειρήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω αποτελούν κίνητρο για μια μεγάλη μείωση του πάχους, η οποία θα φτάσει σε μια νέα γενιά ηλιακών κυττάρων με πάχος μικρότερο από 10 μm . Ένα τέτοιο

ηλιακό κύτταρο λεπτού υμενίου πυριτίου (Thin Film Si solar cell, TF – Si) προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα και μπορεί να μειώσει το κόστος στην παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού. Ένα κύτταρο TF – Si προσφέρει (1) μειωμένο ογκικό ανασυνδυασμό οδηγώντας σε χαμηλότερα σκοτεινά ρεύματα, υψηλότερη V_{oc} και υψηλότερο FF στις συσκευές. Σε σύγκριση με τα παχιά κύτταρα, ένα λεπτό κύτταρο της ίδιας ποιότητας υλικού μπορεί να αποδώσει συσκευές υψηλών επιδόσεων. Ομοίως, για συγκρίσιμη επίδοση, ένα κύτταρο TF – Si απαιτεί υλικό χαμηλότερης ποιότητας από ένα παχύ κύτταρο. Επίσης, προσφέρει (2) δυνατότητα για χαμηλού κόστους κύτταρα/μονάδες, (3) δυνατότητα για πιο ελαφρά φωτοβολταϊκά, (4) χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας για την κατασκευή συσκευών και (5) δυνατότητα για ευέλικτα ηλιακά κύτταρα.

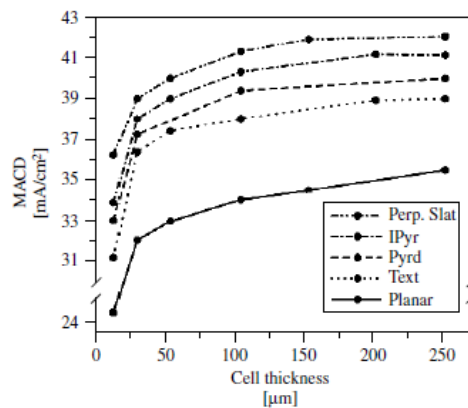
Αυτά τα πλεονεκτήματα των ηλιακών κυττάρων TF – Si, σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα στην απόδοση, τα καθιστούν πολύ ελκυστικά για το μέλλον. Η πρακτική υλοποίηση ηλιακών κυττάρων με τα παραπάνω αναφερθέντα πλεονεκτήματα παρουσιάζουν πολλές προκλήσεις, τόσο στο σχεδιασμό όσο και στην κατασκευή. Οι προκλήσεις αυτές περιλαμβάνουν μια αποδοτική μέθοδο παγίδευσης του φωτός που θα αντισταθμίζει το μειωμένο πάχος, και ένα χαμηλού κόστους υπόστρωμα που θα υποστηρίζει το λεπτό υμένιο. Τα χαμηλού κόστους υποστρώματα γενικά προϋποθέτουν υλικά που μπορεί μα μην είναι συμβατά με τις υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για τη μορφοποίηση και την επεξεργασία των υμενίων πυριτίου. Αυτή η ασυμβατότητα μπορεί να προκύψει εξαιτίας ατελειών του υποστρώματος που μπορεί να διαχυθούν στο εσωτερικό του υμενίου, μαλακώνοντας το υπόστρωμα, προκαλώντας θερμική αναντιστοιχία και λιγότερο επιθυμητές ηλεκτρικές ιδιότητες της διεπιφάνειας, οδηγώντας σε υψηλή S_b .

5.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ

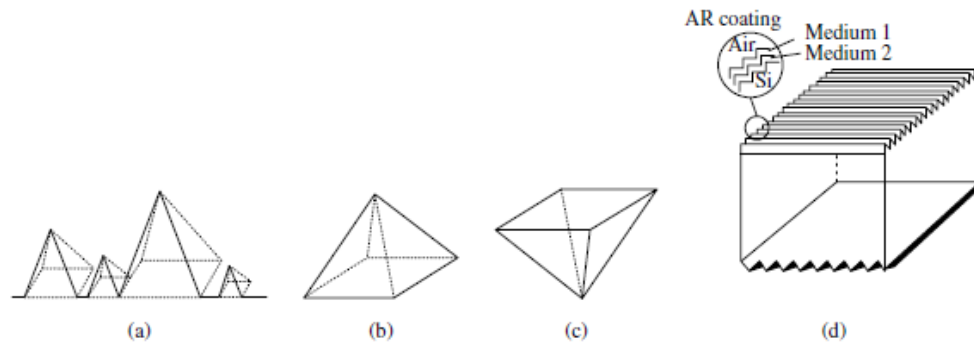
Πολλές βασικές ιδέες σχετικές με τα ηλιακά κύτταρα TF – Si προτάθηκαν πριν από δεκαετίες. Έγινε εμφανές τότε ότι τα λεπτότερα κύτταρα θα προϋπόθεταν ένα τρόπο ενίσχυσης της οπτικής απορρόφησης. Το 1975, προτάθηκε ότι η ενισχυμένη οπτική απορρόφηση σε συνδυασμό με την παγίδευση φωτός μπορεί να βοηθήσει στη μείωση του πάχους του κυττάρου που απαιτείται για μια αποτελεσματική φωτογέννηση, σε μερικά μm. Η προτεινόμενη προσέγγιση χρησιμοποιούσε μια πρισματική ρύθμιση που διαθλούσε το φως σε ένα λεπτό υμένιο σε πλάγια πρόσπτωση, ώστε το φως θα υπόκεινται πολλές φορές σε ολική ανάκλαση, στο εσωτερικό του λεπτού κυττάρου. Αυτή η προσέγγιση είναι παρόμοια με το την αποστολή ελεγχόμενων κυμάτων στην εφαρμοσμένη οπτική. Αν και αυτή η προσέγγιση δεν γνώρισε ευρείας αναγνώρισης εξαιτίας εμφανών ελαττωμάτων, οι υπόλοιπες ρυθμίσεις του κυττάρου που θα υποστήριζαν τη χρήση ενός πολύ λεπτού υμενίου πυριτίου για εφαρμογές ηλιακού κυττάρου, προτάθηκαν αργότερα. Μερικοί απλοί (προσεγγιστικοί) υπολογισμοί έδειξαν ότι οι αποδόσεις των κυττάρων που πλησιάζουν το 10% θα μπορούσαν να ληφθούν από υμένια πολυκρυσταλλικού πυριτίου πάχους 10 μm με μέγεθος κόκκων 1 μm. Αυτοί οι υπολογισμοί λαμβάνουν υπ όψιν μόνο τον ογκικό ανασυνδυασμό που πηγάζει από τα όρια των κόκκων (Grain Boundaries, GBs) στο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο και σε δομές επίπεδων κυττάρων. Αν και η πιθανότητα των ηλιακών κυττάρων λεπτών υμενίων υπήρξε ως όραμα πολύ παλιότερα, η πρακτικές υλοποιήσεις ξεκίνησαν μόλις πρόσφατα. Ο δρόμος για τα κύτταρα TF – Si άνοιξε όταν

υπήρξε λίγη κατανόηση σχετικά με το πώς να μειωθούν οι οπτικές απώλειες μέσω της ενισχυμένης απορρόφησης και της μείωσης των ηλεκτρονικών απωλειών εξαιτίας του ανασυνδυασμού φορτίων στη διεπιφάνεια.

Η αρχική θεωρητική ανάλυση βασισμένη σε θερμοδυναμικές θεωρήσεις πρότειναν ότι οι τραχιές επιφάνειες και μια ασύμμετρη δομή κυττάρου θα ενίσχυε αποτελεσματικά την οπτική απορρόφηση του κυττάρου. Η επιφανειακή ύφανση, η οποία εισήχθη αρχικά για να μειώσει την επιφανειακή ανάκλαση για ένα μεγάλο εύρος ακτινοβολιών, οδήγησε επίσης και σε μια αύξηση της οπτικής διαδρομής του φωτός το οποίο διαδιδόταν στο εσωτερικό του κυττάρου πυριτίου. Ακολουθώντας, την αρχική επιτυχία, η εγχάραξης υφής έγινε μια βασική διαδικασία στην κατασκευή των ηλιακών κυττάρων πυριτίου, τόσο στα εργαστηριακά όσο και στα βιομηχανικά κύτταρα. Στο Σχ. 5.3 παρουσιάζεται η υπολογισμένη πυκνότητα ρεύματος βραχυκύκλωσης (Short – Circuit current density, J_{sc}) συναρτήσει του πάχους, για διαφορετικές δομές ύφανσης που περιλαμβάνουν επίπεδες, βασικές χημικές δομές, πυραμίδες, αντίστροφες πυραμίδες και κάθετους πήχεις. Η δομή των επιφανειών παριστάνονται στο Σχ. 5.4. Παρόλα αυτά, μόνο τα εργαστηριακά κύτταρα, κατασκευασμένα σε υλικά υψηλών επιδόσεων και με πίσω επαφές υψηλής ανακλαστικότητας, υλοποίησαν το πλεονέκτημα της παγίδευσης φωτός. Αν και τα βιομηχανικά κύτταρα χρησιμοποιούν επίσης ύφανση, η χρησιμότητά της ήταν ίσως σημαντικά περιορισμένη στο να μειώνει την επιφανειακή ανάκλαστικότητα, από το να ενισχύει την παγίδευση του φωτός. Αυτό είναι επειδή τα τυπικά εμπορικά ηλιακά κύτταρα χρησιμοποιούν μια πίσω επαφή από κράμα αλουμινίου, η οποία αναπτύσσει μια τραχιά διεπιφάνεια, η οποία έχει πολύ χαμηλή ανακλαστικότητα και επιτρέπει στο περισσότερο από το φως να διαδοθεί μέσα στο μέταλλο που απορροφήθηκε. Το φως που απορροφήθηκε στο μέταλλο συνιστά μια οπτική απώλεια.



Σχήμα 5.3: Υπολογισμένη MACD για ηλιακό κύτταρο με διαφορετικά σχήματα υφής



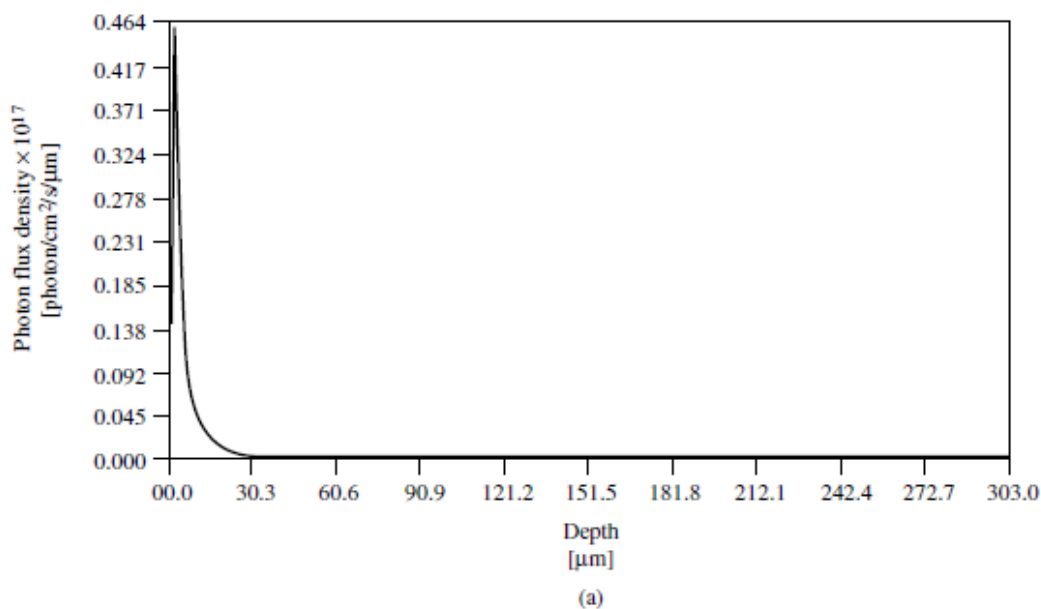
Σχήμα 5.4: Σχέδια διαφορετικών δομών επιφανειών που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς του Σχ. 5.3: (a) χημικά υφασμένες τυχαίες πυραμίδες, (b) ομοιόμορφα υφασμένη πυραμίδα, (c) αντίστροφη πυραμίδα, (d) κάθετοι πήχεις

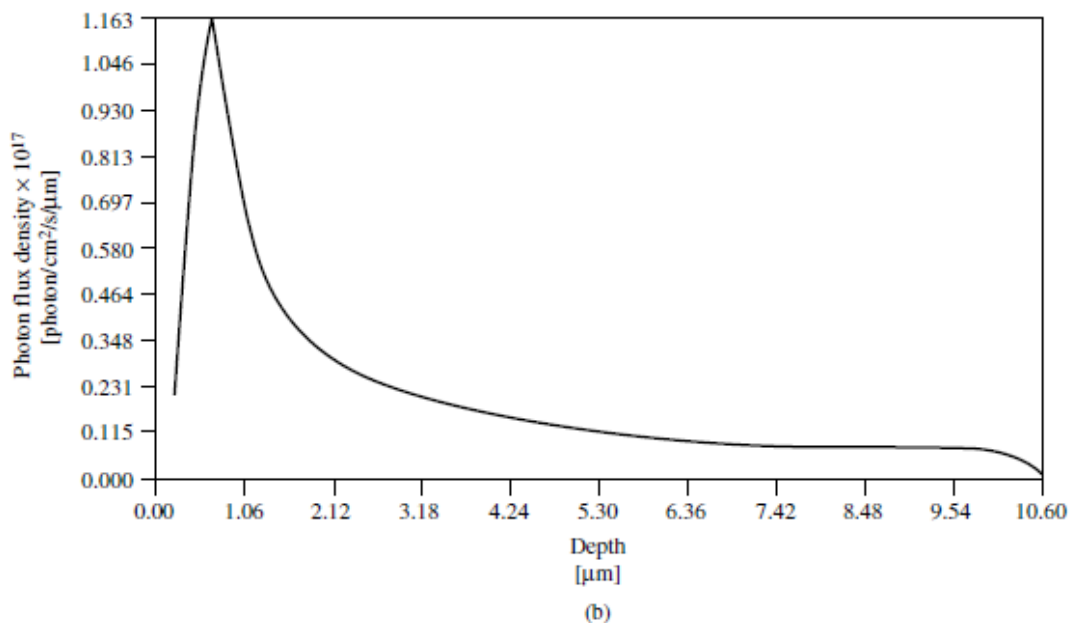
Οι επιφανειακές υφές παράγονται επιτυχώς μέσω ανισότροπης χημικής εγχάραξης σε διαλύματα KOH ή NaOH. Είναι γνωστό ότι η ύφανση περιλαμβάνει έκθεση των (1 1 1) κρυσταλλογραφικών επιπέδων, τα οποία αποδίδουν πυραμίδες στα (1 0 0) υλικά. Όμως, μια καλή ύφανση προϋποθέτει επίπονες διαδικασίες ανάπτυξης μιας χημικής σύστασης που περιέχει πυριτικά άλατα [1 1]. Ήταν ευτυχές ότι η εγχάραξη υφής μπορούσαν να συνδυαστούν με την απομάκρυνση της ζημιάς από τον πριόνισμα για μια διεργασία χαμηλού κόστους. Πρόσφατα, άλλες τεχνικές ύφανσης αναπτύχθηκαν οι οποίες περιλαμβάνουν εγχάραξη με αντιδρώντα ιόντα, μηχανική εγχάραξη αυλακώσεων, και εγχάραξη με οξέα. Όμως, καμία από τις μεθόδους αυτές δεν είναι κατάλληλες για ηλιακά κύτταρα λεπτών υμενίων, αφού παράγουν βαθιές υφές. Μια κατάλληλη προσέγγιση για την παραγωγή υφής στα κύτταρα TF – Si μπορεί να είναι εγγενής στη χρήση πολυκρυσταλλικών υλικών. Αυτή η μέθοδος λειτούργησε καλά για τα διάφανα αγώγιμα οξειδία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα κύτταρα λεπτών υμενίων άμορφου πυριτίου.

Η επιφανειακή ύφανση πραγματοποιείται φυσικά στα πολυκρυσταλλικά υμένια τα οποία εναποτίθενται από ένα αέριο μίγμα το οποίο περιέχει πυρίτιο, όπως επίσης και στα λεπτά ή παχιά υμένια που αναπτύσσονται κοντά στο σημείο τήξης. Αν και οι ακριβείς μηχανισμοί δεν είναι γνωστοί, η ύφανση εμφανίζεται ότι είναι αποτέλεσμα από τα όρια των κόκκων. Σε μια ανάπτυξη αέριας φάσης, τα ενεργειακά υψηλά όρια των κόκκων επιτρέπουν τη μετακίνηση των ατόμων πυριτίου μακριά από την περιοχή των ορίων των κόκκων στο εσωτερικό των κόκκων, οδηγώντας σε απώλεια υλικού (πάχος του υμενίου) στην εγγύς περιοχή των ορίων των κόκκων. Στην περίπτωση ανάπτυξης από τήξη, όπως στην περίπτωση ανάπτυξης λωρίδων πυριτίου, υπάρχουν τοπικές διαφοροποιήσεις στη θερμοκρασία στερεοποίησης ανάμεσα στις περιοχές των ορίων των κόκκων και του εσωτερικού των κόκκων. Εξαιτίας της μεγαλύτερης επιφανειακής τάσης του υγρού πυριτίου ή του πυριτίου σε υψηλότερη θερμοκρασία, εμφανίζεται η τάση σχηματισμού σφαιρών στις ελεύθερες επιφάνειες. Αυτή η διαδικασία είναι αποτέλεσμα των αυλακώσεων στα όρια των κόκκων. Η ύφανση παρατηρείται ακόμα και στα λεπτά υμένια του κρυσταλλικού πυριτίου που προέρχονται από την μεταλλικά επαγόμενη κρυσταλλοποίηση. Μια φυσική μορφή ύφανσης σε ένα υμένιο πυριτίου μπορεί να αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην αποτελεσματικότητα από άποψη κόστους των κυττάρων TF – Si με το να αποφευχθεί η ανάγκη για τη δημιουργία μιας ξεχωριστής στρώσης για την ενίσχυση της παγίδευσης του

φωτός. Επειδή η ύφανση σχετίζεται με την μέθοδο ανάπτυξης ή εναπόθεσης, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η μορφή και το πάχος της υφής μπορεί να αλλάξει με την αλλαγή του μεγέθους των κόκκων. Ένα μειονέκτημα της ύφανσης είναι ότι αυξάνει σημαντικά το εμβαδόν της επιφάνειας, με αποτέλεσμα την αύξηση των σκοτεινών ρευμάτων και την μείωση της V_{OC} .

Οι διεπιφάνειες στα κύτταρα TF – Si παίζουν σημαντικό ρόλο, επειδή, για ένα δεδομένο ηλιακό φάσμα, ένα πιο λεπτό κύτταρο έχει μια μεγαλύτερη παραγόμενη πυκνότητα φορτίων κοντά στην επιφάνεια, εξαιτίας της ενισχυμένης παγίδευσης φωτός. Ένα απλός τρόπος για το οραματισμό αυξημένης ευαισθησίας στον επιφανειακό ανασυνδυασμό είναι η εξέταση της κατανομής της ροής των απορροφημένων φωτονίων, σε ένα παχύ μπλοκ υλικού και σε ένα λεπτό υμένιο. Τα Σχ. 5.5 (a) και (b) συγκρίνουν την κατανομή της ροής των απορροφημένων φωτονίων σε ένα μπλοκ πάχους 300 μm και σε ένα λεπτό υμένιο πάχους 10 μm πυριτίου, αντίστοιχα. Και τα δύο κύτταρα έχουν υφή μπροστά και πίσω, με ένα πίσω ανακλαστήρα αλουμινίου. Το ύψος της υφής για το παχύ και το λεπτό κύτταρο είναι 3 μm και 0.6 μm , αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι στο λεπτό κύτταρο η πυκνότητα ροής απορροφημένων φωτονίων είναι περίπου 3 φορές μεγαλύτερη σε κάθε διεπιφάνεια, υπονοώντας ότι η παραγωγή φορτίων στη διεπιφάνεια των λεπτότερων κυττάρων είναι περίπου 3 φορές μεγαλύτερη. Συνεπώς, για την ίδια ταχύτητα επιφανειακού ανασυνδυασμού, ο ανασυνδυασμός φορτίων για το λεπτό κύτταρο θα είναι 3 φορές μεγαλύτερος. Έτσι, είναι επιτακτικό ότι ο σχεδιασμός ενός αποδοτικού κυττάρου TF – Si θα ελαχιστοποιήσει τις συνεισφορές από όλα τα συστατικά ενός επιφανειακά σχετιζόμενου ανασυνδυασμού.





Σχήμα 5.5: Υπολογισμένη ροή φωτονίων που απορροφήθηκε μέσα σε: (a) μπλοκ πάχους 300 μm και (b) λεπτό υμένιο πάχους 10 μm.

Είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι μπορεί να υπάρχουν αρκετές συνεισφορές στο επιφανειακό ανασυνδυασμό σε ένα ηλιακό κύτταρο (επιπροσθέτως αυτού από τη διεπιφάνεια κυττάρου – αέρα). Αυτές οι συνεισφορές περιλαμβάνουν τις διεπιφάνειες πυριτίου – μετάλλου και τις διαρροές των άκρων. Πολλές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται για να ελαχιστοποιηθεί τον αποτελεσματικό επιφανειακό ανασυνδυασμό σε κάθε επιφάνεια. Μια συνετή προσέγγιση για την ελαχιστοποίηση των επιφανειών επαφή πυριτίου – μετάλλου (τόσο μπροστά όσο και πίσω) είναι μέσω κατάλληλου σχεδιασμού πλέγματος. Αυτός ο συλλογισμός οδήγησε στο σχεδιασμό κυττάρων σημειακών επαφών και θαμμένων επαφών. Αυτό το στοιχείο θα ελαχιστοποιήσει επίσης τις απώλειες σκιάς για το προσπίπτον φως (εκτός από τα κύτταρα πίσω επαφών). Ένα άλλο μέσο μείωσης των επιπτώσεων της αλληλεπίδρασης πυριτίου – μετάλλου στην απώλεια φορτίων είναι η χρήση ενός ανακλαστήρα φορτίων μειονότητας, ο οποίος αποτελείται από υψηλά και χαμηλά πεδία (όπως n^+/n ή p^+/p) κάτω από το μέταλλο. Διάφορα σχέδια έχουν αναπτυχθεί για το σχηματισμό των πίσω επαφών στα παχιά κύτταρα, που περιλαμβάνουν είτε μερική, είτε ολική διάχυση της πίσω επιφάνειας. Για τα κύτταρα TF – Si που δημιουργούνται με εναπόθεση, αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να επιτευχθούν μέσω προσαρμογής του προφίλ ντοπαρίσματος κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης.

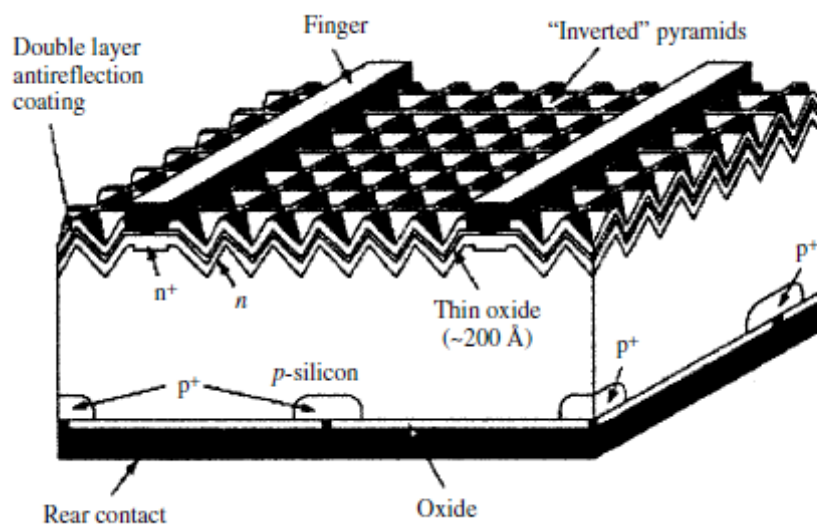
Η επιφανειακή παθητικοποίηση των μη μεταλλοποιημένων περιοχών μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω μέσω οξειδωσης. Έχει αποδειχθεί ότι μια τέτοια παθητικοποίηση μπορεί να μειώσει την ταχύτητα επιφανειακού ανασυνδυασμού σε περίπου 100 cm/s, τιμές πολύ σημαντικές για τα υψηλής απόδοσης κύτταρα TF – Si. Στα παχιά κύτταρα, τα σχέδια παθητικοποίησης ενσωματώνονται σε πολλές δομές όπως οι PERL και PERT (αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο). Η εφαρμογή των μεθόδων παθητικοποίησης των παχιών κυττάρων στα κύτταρα TF – Si μπορεί να μην είναι η ενδεικνυόμενη. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη οξειδίων σε συμβατικές θερμοκρασίες (>1000°C) δεν είναι δυνατή σε κύτταρων

που εναποτίθενται σε χαμηλού κόστους υποστρώματα, όπως το γυαλί. Παρόλα αυτά, έχει αποδειχθεί ότι τα οξείδια χαμηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσονται από ταχείες θερμικές κατεργασίες (Rapid Thermal Processing, RTP) ή όμοιές τους, μπορούν έχουν εξαιρετικές παθητικοποιητικές ιδιότητες. Μια άλλη προσέγγιση για την παραγωγή αποδοτικής επιφανειακής παθητικοποίησης μπορεί να είναι η χαμηλής θερμοκρασίας χημική εναπόθεση ατμών νιτριδίων ενισχυμένη με πλάσμα (PECVD). Είναι τώρα γνωστό ότι τα SiN (ή τα οξυ – νιτρίδια) παράγουν θετικά φορτία στη διεπιφάνεια πυριτίου που οδηγεί σε εξαιρετικά χαρακτηριστικά παθητικοποίησης για το πυρίτιο p – τύπου.

Παρακάτω γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση κάποιων πρωταρχικών εργασιών που ήταν πρόδρομοι της καθιέρωσης των πλεονεκτημάτων των κυττάρων TF – Si και προήγαγαν περαιτέρω έρευνα. Η ικανότητα των κυττάρων λεπτού υμενίου να αποδίδουν υψηλή επίδοση με δραστική ενσωμάτωση παγίδευσης φωτός και επιφανειακή παθητικοποίηση καταδείχθηκε από πολλούς ερευνητές. Ο Πιν. 5.1 συγκρίνει τις παραμέτρους των κυττάρων τριών δομών με διαφορετικά πάχη. Ένα από αυτά είναι ένα τυπικό παχύ κύτταρο υψηλής απόδοσης με παγίδευση φωτός και επιφανειακή παθητικοποίηση. Τα άλλα δύο είναι κύτταρα λεπτών υμενίων τα οποία κατασκευάστηκαν με διαφορετικές μεθόδους. Αυτά τα κύτταρα περιλαμβάνουν παγίδευση φωτός, όπως επίσης και παθητικοποίηση οξειδίων. Η δομή των κυττάρων παρουσιάζεται στο Σχ. 5.6.

Δομή	Πάχος [μm]	V _{oc} [mV]	J _{sc} [mA/cm ²]	Παράγοντας πλήρωσης [%]	Απόδοση [%]
n ⁺ pp ⁺	44	653	35.3	75.8	17.2
PERL	47	698	37.9	81.1	21.5
PERL	400	702	41.2	81.2	23.5

Πιν. 5.1: Παράμετροι δύο τύπων κυττάρων λεπτών υμενίων και σύγκριση με ένα παχύ κύτταρο



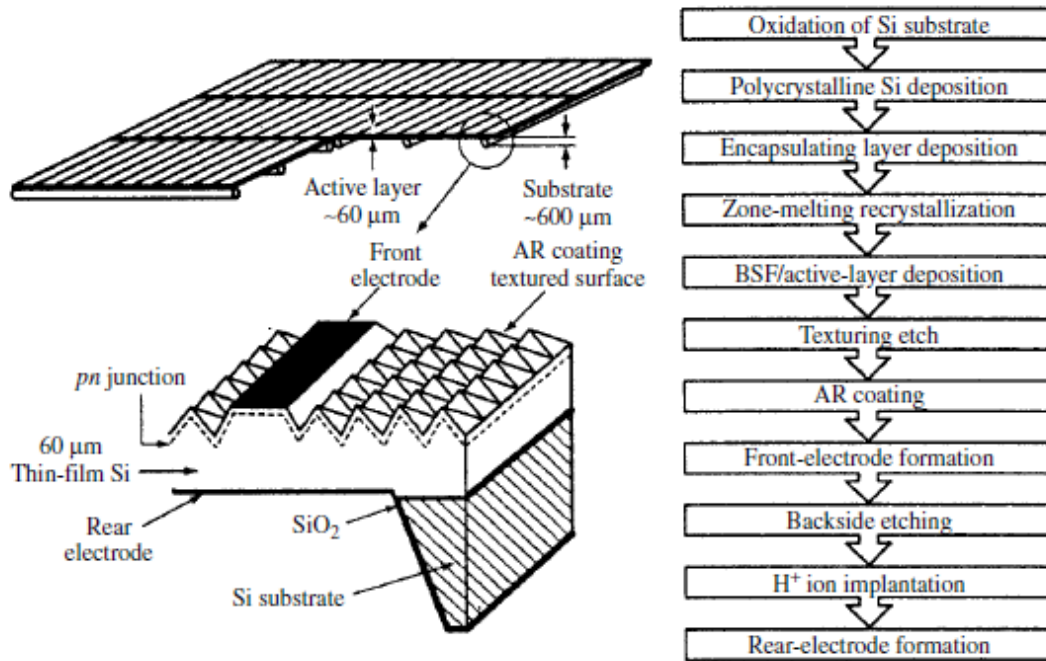
Σχήμα 5.6: Δομή των δοκιμαζόμενων κυττάρων

Η πρώτη περίπτωση είναι ένα κύτταρο πάχους 44 μm και δομής n⁺pp⁺. Οι επιφάνειες του δεν είναι καλά παθητικοποιημένες, αλλά περιλαμβάνουν ένα καλό σχεδιασμό για την παγίδευση φωτός. Η δεύτερη περίπτωση είναι ένα κύτταρο PERL κατασκευασμένο από ένα

47 μm πάχους μονοκρυσταλλικό, πλωτής ζώνης (Float – Zone, FZ) μπλοκ υλικού. Το μπλοκ λεπτύνθηκε χημικά, και NF_3 χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της οξειδωσης για τη μείωση της κάμψης του υλικού εξαιτίας της τάσης οξειδωσης. Η τρίτη περίπτωση είναι επίσης ένα κύτταρο PERL, αλλά κατασκευάστηκε από ένα 400 μm πάχους και FZ μπλοκ υλικού, με τη δομή του να είναι παρόμοια με το προηγούμενο. Στο Σχ. 5.6 παρουσιάζεται η δομή αυτή. Περιλαμβάνουν ιδανική παθητικοποίηση και παγίδευση φωτός, χρησιμοποιώντας την τεχνική PERL και αντεστραμμένες πυραμίδες, αντίστοιχα. Η απόδοση του 44 μm n^+pp^+ κυττάρου είναι σημαντικά μικρότερη από αυτές των δύο άλλων κυττάρων, κυρίως εξαιτίας της ανεπαρκούς παθητικοποίησης. Τα δεδομένα του Πιν. 5.1 παρουσιάζουν ξεκάθαρα τη δυνατότητα των κυττάρων λεπτών υμενίων πυριτίου.

Στον πίνακα φαίνεται ότι η παγίδευση φωτός στο κύτταρο 47 μm μπορεί να αποδώσει μια J_{sc} που είναι μόνο 3.3 mA/cm^2 , χαμηλότερη από αυτή του κυττάρου 400 μm . Συγκρίνοντας τα δύο κύτταρα PERL φαίνεται ότι είναι δυνατό να μειωθεί το πάχος κατά έναν συντελεστή 10, και ακόμα να υπάρχει μειωμένη απόδοση μόνο κατά 10% (23.5% με 21.5%). Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι οι τιμές της J_{sc} αυτών των κυττάρων είναι πολύ κοντινές στις θεωρητικές τιμές, κάτι το οποίο δείχνει πολύ καλή παγίδευση φωτός και συλλογή φορτίων. Από το Σχ. 5.3, έχει φανεί ότι οι αντίστροφες πυραμίδες μπορούν να παράγουν τιμές J_{sc} της τάξης των 38 και 39 mA/cm^2 για κύτταρα που έχουν πάχος 44 και 47 μm , αντίστοιχα. Έχει παρουσιαστεί ακόμα ότι μετά από πάχος κυττάρου 250 μm , η J_{sc} σταθεροποιείται σε μια τιμή περίπου 42 mA/cm^2 .

Ένα άλλο κύτταρο που παρουσιάζει υψηλή απόδοση των κυττάρων λεπτών υμενίων είναι κατασκευασμένο σε υμένιο κρυσταλλικού πυριτίου φτιαγμένο μέσω της ανακρυστάλλωσης τηγμένης – ζώνης (Zone – Melting Recrystallization, ZMR). Το Σχ. 5.7 απεικονίζει τη δομή και την ακολουθία των διεργασιών κατασκευής για τα κύτταρα ZMR. Για την ελαχιστοποίηση τα ζητήματα του υποστρώματος, ένα μονοκρυσταλλικό μπλοκ πυριτίου χρησιμοποιήθηκε ως υποστήριξη. Ένα λεπτό υμένιο SiO_2 εναποτέθηκε σε ένα υπόστρωμα πυριτίου ως μία στρώση ανακοπής της διάχυσης ακαθαρσιών, και τότε μια στρώση πάχους 60 μm από πολύ – πυρίτιο εναποτέθηκε μέσω της μεθόδου CVD. Μια (1 0 0) – επικρατούσα επιφάνεια αποκτήθηκε με μια ταχύτητα ανάπτυξης 0.2 mm/s και μέγεθος κόκκων από nm ως cm να έχουν επιτευχθεί. Επιτυγχάνουν μεγαλύτερη απόδοση μετατροπής περισσότερο από 14% για ένα 10 X 10 cm^2 κύτταρο με $V_{\text{oc}} = 608$ mV, $J_{\text{sc}} = 30$ mA/cm^2 και $\text{FF} = 78.1\%$, και 16% για ένα 2 X 2 cm^2 κύτταρο με $V_{\text{oc}} = 608$ mV, $J_{\text{sc}} = 35.1$ mA/cm^2 και $\text{FF} = 77.1\%$. Αυτά τα αποτελέσματα είναι αρκετά εντυπωσιακά για ηλιακά κύτταρα κατασκευασμένα από λεπτό υμένιο πολυ – πυριτίου το οποίο λαμβάνεται από την τεχνολογία ZMR.



Σχήμα 5.7: Σχηματική αναπαράσταση της δομής ενός ZMR ηλιακού κυττάρου με 60 μm ενεργό πάχος πολυ – πυριτίου και μια απεικόνιση των διεργασιών κατασκευής του κυττάρου

Ακολουθώντας την επιτυχία των ερευνητών που κατασκεύασαν τα λεπτά κύτταρα χρησιμοποιώντας συμβατικές τεχνολογίες λέπτυνσης μπλοκ υλικού, αρκετά εργαστήρια ξεκίνησαν να ερευνούν εναλλακτικές μεθόδους κατασκευής κυττάρων λεπτών υμενίων από πυρίτιο, στα οποία η παραγωγή των υμενίων πυριτίου και η επεξεργασία του κυττάρου θα είναι συμβατά. Μερικές από τις ιδέες αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

Αποδοτική γέννηση φορτίων: Τα λεπτά υμένια πυριτίου έχουν ένα κληρονομημένο μειονέκτημα του να απορροφούν λιγότερο ένα σημαντικό τμήμα του ηλιακού φάσματος. Μια πολύ γνωστή λύση σε αυτό είναι ο συνδυασμός παγίδευσης φωτός μέσω κατασκευής τραχύτητας στην επιφάνεια ή ύφανσης αυτής. Οι αρχικές προσπάθειες κατασκευής TF – Si κυττάρων βασίζονταν πολύ στη συγκεκριμένη τεχνική. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι πίσω ανακλάσεις επρόκειτο να προκύψουν από την ασυνέχεια του συντελεστή διάθλασης στο πίσω μέρος του υμενίου και της υποστήριξης του υμενίου. Μερικές από τις προσεγγίσεις είναι όμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία άμορφου πυριτίου. Παρόλα αυτά, υπάρχουν ακόμα πολλά ζητήματα που παραμένουν άλυτα σε σχέση με την παγίδευση φωτός στα λεπτά υμένια.

Αποδοτική συλλογή φορτίων: Αν και τα TF – Si κύτταρα υποτίθεται ότι λειτουργούν καλά με χαμηλής ποιότητας υλικά, το μήκος διάχυσης των φορτίων μειονότητας πρέπει ακόμα να είναι μεγαλύτερο από το πάχος του υμενίου. Μια προσέγγιση που μπορεί να αναιρέσει αυτόν τον περιορισμό είναι η χρήση δομής ακίδων ή πολλαπλών επαφών, με παρόμοιο τρόπο όπως στα ηλιακά κύτταρα άμορφου πυριτίου.

Μηχανική υποστήριξη: Ένα λεπτό υμένιο πυριτίου, λεπτότερο από 10 μm, δεν είναι μια αυτοσυγκρατούμενη δομή και απαιτεί υποστήριξη. Τυπικά, δύο προσεγγίσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη των ηλιακών κυττάρων λεπτών υμενίων: (1) το

κύτταρο είναι κατασκευασμένο σε ένα προσωρινό υπόστρωμα που έχει κατάλληλες ιδιότητες για να συμμετέχει στα στάδια επεξεργασίας και τότε μετακινείται ή ανασηκώνεται σε μια μόνιμη υποστήριξη. Στην περίπτωση αυτή, η κατασκευή του κυττάρου από μόνη της μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω συμβατικών μεθόδων και η μόνιμη υποστήριξη μπορεί να είναι κάποιο φθινό υλικό. Η προσωρινή υποστήριξη μπορεί να είναι ένα μπλοκ πυριτίου, το οποίο μπορεί να αναχρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη άλλων υμενίων πυριτίου. Μια τεχνική για ανασήκωση CLEFT (Cleavage of Lateral Epitaxial Films for Transfer) αναπτύχθηκε αρχικά για κύτταρα γερμανίου και γαλλίου αρσενικού, χρησιμοποιώντας ZMR. Αυτή η τεχνική είναι πολύ επιτυχημένη, αλλά δεν εγγυάται για το χαμηλό κόστος. (2) Ένα λεπτό υμένιο πυριτίου εναποτίθεται σε ένα μόνιμο υπόστρωμα και στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλιακό κύτταρο. Για τη χρήση συμβατικών διεργασιών, ένα τέτοιο υπόστρωμα πρέπει να αντέχει τις διεργασίες υψηλής θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, πολλά εργαστήρια έχουν επενδύσει στην ανάπτυξη γυαλιού ανθεκτικό στις υψηλές θερμοκρασίες, το οποίο ταιριάζει θερμικά με το πυρίτιο. Εναλλακτικά, οι νεότερες μέθοδοι διεργασιών πρέπει να είναι κατάλληλες και συμβατές με χαμηλού κόστους υποστρώματα.

Οι σύγχρονες τεχνικές για την κατασκευή ηλιακών κυττάρων TF – Si είναι ποικίλες και χρησιμοποιούν μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό μεγάλων κόκκων, ή λεπτόκοκκο μικροκρυσταλλικό υμένιο πυριτίου. Παρόλα που αυτή η διάκριση φαίνεται ότι σχετίζεται με το μέγεθος των κόκκων, στην πραγματικότητα, ξεχωρίζει τις τεχνολογίες που σχετίζονται με την ανάπτυξη του ίδιου του υμενίου. Το μονο- και πολυκρυσταλλικό υμένιο πυριτίου απαιτεί υψηλή θερμοκρασία >800°C, χρήση υποστρώματος πυριτίου, κάποιου τύπου επιταξιακή ανάπτυξη, και/ή διαχωρισμό από το υπόστρωμα. Το λεπτόκοκκο υμένιο (μ – κρυσταλλικό) εναποτίθεται σε χαμηλού κόστους υποστρώματα τυπικά σε <600°C. Έτσι, οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται σήμερα στην κατασκευή κυττάρων TF – Si μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τη θερμοκρασία κατασκευής και τα υποστρώματα που χρησιμοποιούνται. Αυτές οι προσεγγίσεις περιλαμβάνουν τη χρήση μονοκρυσταλλικών μπλοκ για την εναπόθεση λεπτού υμενίου πυριτίου το οποίο επακόλουθα διαχωρίζεται από αυτό (ή απομακρύνεται μια λεπτή στρώση ενός μονοκρυστάλλικού μπλοκ και μεταφέρεται σε ένα άλλο υπόστρωμα), ή την εναπόθεση ενός λεπτού υμενίου σε ένα πολυκρυσταλλικό μπλοκ πυριτίου, ή τη χρήση μη – πυριτικού υποστρώματος. Ο Πιν. 5.2, συνοψίζει διάφορους τύπους υποστρώματος, τεχνολογικές προσεγγίσεις και αποδόσεις από εργαστηριακά κύτταρα. Παρακάτω, αναλύονται μερικές χαρακτηριστικές τεχνικές σχεδιασμού και κατασκευής ηλιακών κυττάρων λεπτών υμενίων πυριτίου.

Τεχνική	Ίδρυμα	Θερμοκρασία [°C]	Υπόστρωμα	Διεργασία	Απόδοση	Άλλα στοιχεία
ZMR	Mitsubishi Electric Co.	>1300	SiO ₂ σε MG – Si	LPCVD ενεργούς στρώσης 50-60 μm, αλκαλική υγρή εγχάραξη, διάχυση P, παθητικοποίηση H με εναπόθεση ιόντων, DARC, εγχάραξη στο	4.2%, 100 cm ² (1993), 16.4% 4 cm ² (2003)	Ταχύτητα ανακρυστάλλωσης = 1 mm/s

				πίσω ηλεκτρόδιο		
	FhG – ISE	>1300	Διάτρητο SiO ₂ σε Si	Μη διασπορά, μη ύφανση, μη παθητικοποίηση ελαττωμάτων, χρήση πλέγματος 30 μm από θερμικό CVD	6.1%, 4 cm ² (1996)	9.3% μέσω LAR
		>1300	Γραφίτης	Χρήση πλέγματος, εγχάραξη ενεργών ιόντων	11.0%, 4 cm ² (1997)	9.3% σε κεραμικά, >17% αναμένεται σε αποτύπωση
SPC	Sanyo Electric Co.	600	Μέταλλο	PECVD p – τύπου a – Si:H (SiH ₄), ITO sputtering, ατμοποίηση των δακτύλων επαφών Ag	9.2%, 1 cm ² (1994)	10 μm a – Si, με 10 – 600 min ανόπτησης
LPE	Astropower Inc.	~1000	Υφασμα γραφίτη	Διάχυση P σε αέρια φάση, PECVD H παθητικοποίηση, φωτολιθογραφικές επαφές, DARC	13.4%, 1 cm ² (1994)	Si κατ' ευθείαν εναποθετευμένο στο υποστρώμα, ενεργός στρώση = 80 μm
			n/r	POCl ₃ , θεραπεία με Al, παθητικοποίηση H, PECVD SiO ₂ ως ARC	14.6%, 1 cm ² (1996)	Άγνωστο πάχος υμενίου
			n/r	n/r	16.6%, 1 cm ² (1997)	Καταγεγραμμένο λεπτό υμένιο Si σε ξένο υποστρώμα, μη χρήση κενού
CVD	Univ. de Neuchatel	200	Υφασμένο TCO/γυαλί	3.6 μm μc – Si μέσω PECVD στα 100 MHz (SiH ₄), ντοπάρισμα από PH ₃ και B ₂ H ₆ , πίσω επαφή ZnO/Ag	8.5%, 1 cm ² (1999) 13.1% a – Si:H /μc – Si 10.7% (1999)	Ρυθμός εναπόθεσης <2 A/s, ασταθές, σταθερό (με άλλα υποστρώματα)
	IMEC	>1000	p ⁺ SILSO	Υμένιο 20 μm από θερμικό CVD, DARC, μη ύφανση, παθητικοποίηση SiN, ατμοποιημένες επαφές	13.7%, 4 cm ² (1997)	Χωρίς παθητικοποίηση H 11.6%, σε SSP 7.6%, σε RGS 10.3%, σε EFG 13.2%
	FhG – ISE	>1000	Φύλλα σιλκόνης από σκόνη (SSP)	Πρώτη εναπόθεση BSF 30 μm από θερμικό CVD, μη ύφανση, μη	8.00%, 4 cm ² (1997)	Ρυθμός εναπόθεσης >10 μm/min, σε SiLSO 11.1%, σε FZ (αντίστροφες

				παθητικοποίηση H, επίστρωση SiN		πυραμίδες, τοπικοί εκπομποί, θερμική οξείδωση) 17.4%
	Ecole Polytechnique	150	Υφασμένο TCO/γυαλί	Πολύμορφο πρότυπο p – i – n, στρώση i πάχους 0.4 – 0.8 μm	9.30%, 0.1 cm ²	Μικτή μήτρα a – Si/μc – Si
	Canon Co.	200 – 400	n/r	Πρότυπες p – i – n δομές, πίσω επαφή Ag/ZnO, >1 μm πάχους στρώση i, VHF PECVD	7.40%, 0.25 cm ² , (1999) 11.5% a – Si:H/μc – Si	Σταθεροποιημένα αποτελέσματα
ELC	Kaneka Co.	<550	Γυαλί	Κρυσταλλοποίηση laser ενός 100 nm a – Si με PECVD (B ₂ H ₆ /SiH ₄), που ακολουθείται από n και p – τύπου μc – Si και εγγενές poly – Si πάχους 6 μm (όλα μέσω PECVD), ITO μπροστά επαφές και δάκτυλα Ag	10.1%, 0.25 cm ² , (1997) 12.8% a – Si:H/μc – Si (1997)	Αναμενόμενη απόδοση >14%

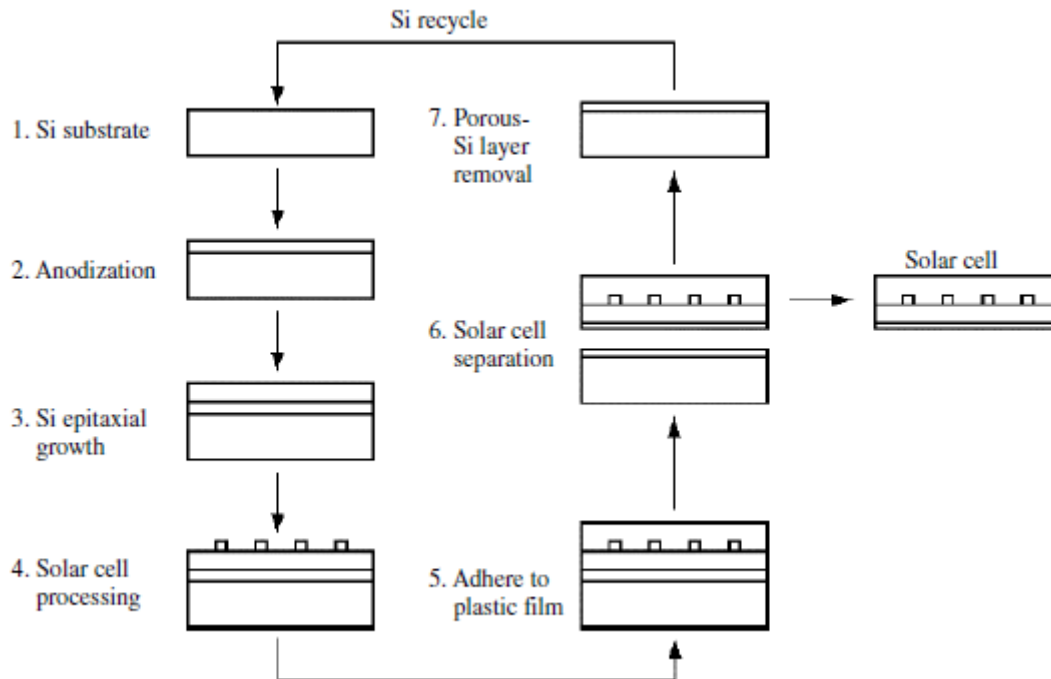
Σημείωση: n/r = not reported, BSF: back surface field, LPCVD: low pressure CVD, TCO: transparent conducting oxide, RGS: ribbon grown on substrate, EFG: edge-defined film-fed growth, ARC: antireflection coating, DARC: double layer ARC, SPC: solid phase crystallization, LPE: liquid-phase epitaxy

Πίνακας 5.2: Ανασκόπηση διάφορων ηλιακών κυττάρων TF – Si

5.3 ΜΙΚΡΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΑ ΥΜΕΝΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΟΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΩΝ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει το διαχωρισμό ενός μονοκρυσταλλικού λεπτού υμενίου από ένα μονοκρυσταλλικό υπόστρωμα. Τρεις τεχνικές ακολουθούνται σήμερα.

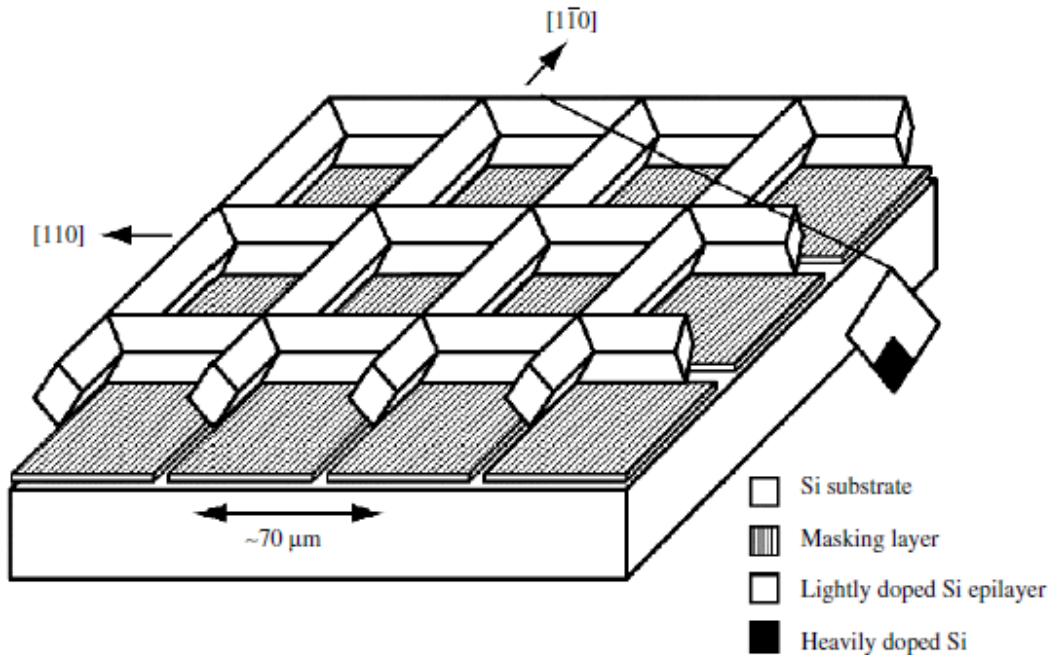
Η πρώτη τεχνική περιλαμβάνει τη δημιουργία μια στρώση πορώδους πυριτίου σε ένα μονοκρυσταλλικό υπόστρωμα, η οποία στη συνέχεια ακολουθείται από μια επιταξιακή ανάπτυξη ενός λεπτού υμενίου. Το λεπτό υμένιο διαχωρίζεται στη συνέχεια, από το υπόστρωμα μέσω χημικής εγχάραξης της διεπιφάνειας του πορώδους πυριτίου. Το Σχ. 5.8 παρουσιάζει διάφορες διεργασίες που χρησιμοποιούνται σε αυτήν τη προσέγγιση. Η βέλτιστη απόδοση που λαμβάνεται από αυτά τα κύτταρα είναι περίπου 12.5%. Οι παράμετροι για τα βέλτιστα κύτταρα είναι (4 cm²): V_{OC} = 623 mV, J_{SC} = 25.5 mA/cm² και FF = 79%.



Σχήμα 5.8: Ένα σχέδιο διαφόρων διεργασιών που λαμβάνουν μέρος στη χρήση πορώδους πυριτίου ως διαχωριστικής στρώσης

Η δεύτερη τεχνική είναι παρόμοια με τη μέθοδο της «έξυπνης κοπής» που χρησιμοποιείται στη μικροηλεκτρονική για σύνδεση συστοιχιών. Περιλαμβάνει την εμφύτευση Η σε μια συστοιχία πυριτίου και τη δημιουργία μιας διεπιφάνειας ελαττωμάτων κάτω από την επιφάνεια, η οποία ακολουθείται από τον διαχωρισμό της επιφανειακής στρώσης. Αυτή η τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για το διαχωρισμό λεπτών (<math><1\ \mu\text{m}</math>) στρώσεων πυριτίου, αλλά μπορεί και να μην είναι αυξημένου κόστους για την κατασκευή 10 μm παχιών, διαχωρίσιμων στρώσεων που χρειάζονται στα ηλιακά κύτταρα. Για να μπορέσουν τα άτομα Η να διεισδύσουν μια τόσο παχιά στρώση όπως αυτή που απαιτείται στα φωτοβολταϊκά, απαιτείται ένα ενεργειακά υψηλό εμφύτευμα. Κανένα κύτταρο απλής επαφής δεν έχει δημιουργηθεί με τη συγκεκριμένη τεχνική. Πρόσφατα, όμως, αυτή η προσέγγιση έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή πολυστρωματικών ηλιακών κυττάρων πολλαπλών επαφών, που χρησιμοποιούν υποστρώματα πυριτίου και GaAs.

Η τρίτη τεχνική ονομάζεται epilift και πραγματοποιείται μέσω της εναπόθεσης μια στρώσης σε ένα διαμορφωμένο μονοκρυσταλλικό μπλοκ, διαμέσου μιας μάσκας με ανοίγματα κατά μήκος των $\langle 1\ 0\ 0 \rangle$ κατευθύνσεων. Η καλυπτόμενη στρώση εκτίθεται σε μια πλεγματική διαμόρφωση, οι γραμμές είναι πλάτους 2 έως 20 μm και απέχουν 50 – 100 μm μεταξύ τους. Τα αναπτυσσόμενα πρόσωπα έχουν (1 1 1) προσανατολισμό, και η στρώση έχει διατομή σχήματος διαμαντιού, που αποδίδει μια αντιανακλαστική υφή. Το Σχ. 5.9 παρουσιάζει το σχέδιο ενός τέτοιου κυττάρου.



Σχήμα 5.9: Σχέδιο της μεθόδου epilift. Καλυπτόμενη επιφάνεια – Si_3N_4 , αναπτυσσόμενη στρώση από LPE. Τυπικό πάχος στρώσης = 20 μm

5.4 ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

Τα λεπτά υμένια μπορούν να εναποτεθούν σε υπόστρωμα πολυκρυσταλλικού πυριτίου, από μια επιταξιακή διεργασία. Ο γενικός σκοπός είναι η χρήση ενός χαμηλού κόστους, μεγάλων κόκκων, χυτού πυριτίου, όπως αυτό που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη στη μεταλλουργία ακριβείας, ως υπόστρωμα και η εναπόθεση ενός υψηλής ποιότητας λεπτού υμενίου σε αυτό. Η επιταξιακά ανεπτυγμένη στρώση θα έχει λίγες ακαθαρσίες, καθώς και μεταλλογραφικά ελαττώματα. Υπάρχει ενδιαφέρον στη χρήση επιταξιακής υγρής φάσης, καθώς και άλλου είδους αέριας φάσης τεχνικών εναπόθεσης για κλίμακα υψηλής ανάπτυξης. Μερικές από τα ζητήματα αυτής της μεθόδου περιλαμβάνουν την επιμόλυνση από ακαθαρσίες από το χαμηλού κόστους υπόστρωμα, τους διαφορετικούς ρυθμούς ανάπτυξης από τους διαφορετικούς κόκκους και την πρόληψη των ελαττωμάτων υποστρώματος από τη διάδοση στο υμένιο.

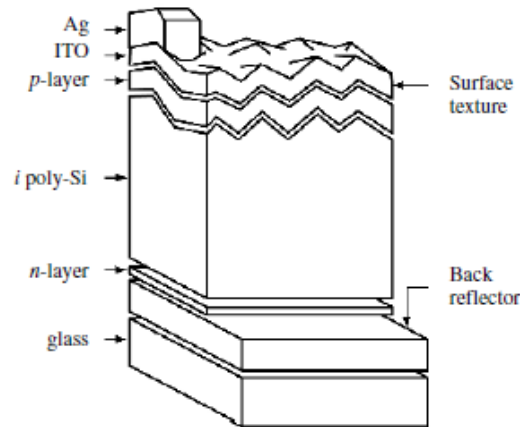
Ένα από τα σημαντικά προβλήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι τα ηλιακά κύτταρα δεν επιδέχονται επαρκή σχεδιασμό για παγίδευση φωτός, εξαιτίας του ότι η πίσω επιφάνεια γίνεται μια διεπιφάνεια Si – Si με μικρή ή καθόλου ασυνέχεια, στο συντελεστή διάθλασης για τις υψηλές ανακλάσεις στη διεπιφάνεια αυτή.

5.5 ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΑΠΟ ΥΛΙΚΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

Τα πλεονεκτήματα κόστους των λεπτών υμενίων πυριτίου είναι πιθανό να υλοποιηθούν εάν η υποστήριξη του λεπτού υμενίου αποτελείται από ένα χαμηλού κόστους υπόστρωμα. Εμφανώς, σε αυτήν την περίπτωση, δεν είναι δυνατό να εναποθέσουμε απευθείας ένα κρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό υμένιο πυριτίου. Η χρήση υποστρωμάτων όχι από πυρίτιο έχει προβληθεί αρκετά τον τελευταίο καιρό, εξαιτίας των επιτυχιών στην εναπόθεση $\mu\text{c} - \text{Si}$

σε υποστρώματα γυαλιού, σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Παρόλα αυτά, υπάρχουν πολλές προκλήσεις στην κατασκευή τέτοιων συσκευών. Αυτές οι προκλήσεις σχετίζονται τόσο με το σχεδιασμό όσο και με τις κατασκευαστικές διεργασίες του κυττάρου. Ένα σημαντικό θέμα στο σχεδιασμό του κυττάρου είναι η εύρεση μεθόδων για επαρκή παγίδευση φωτός, που να είναι συμβατές με χαμηλού κόστους κύτταρα. Θεωρητικοί υπολογισμοί δείχνουν ότι πάχη υμενίων περίπου ίσα με 10 μm είναι επαρκή για φωτορεύματα της τάξης των 35 mA/cm^2 σε σχετικά απλές δομές κυττάρων λεπτών υμενίων. Τα άλλα θέματα του σχεδιασμού σχετίζονται με τη συλλογή φορτίων, όπως είναι η φύση των συνδέσεων, η γεωμετρία των ηλεκτροδίων και οι ηλεκτρονικοί και οπτικοί ανακλαστήρες. Τέλος, όλες αυτές οι παράμετροι πρέπει να είναι συμβατές με χαμηλού κόστους μεθόδους κατασκευής κυττάρων.

Μια πρόσφατη ανάπτυξη στις τεχνολογίες λεπτών υμενίων του πυριτίου οδήγησε σε μια νέα περιοχή ηλιακών κυττάρων λεπτών υμενίων από $\mu\text{c} - \text{Si}$. Το group Kaneka ανέπτυξε μια κυτταρική δομή που ονομάζεται STAR (Surface Texture and enhanced Absorption with a back Reflector). Στο Σχ. 5.10 παρουσιάζεται ένα κύτταρο δομής STAR. Αποτελείται από ένα υπόστρωμα γυαλιού με ένα πίσω ανακλαστήρα, στο οποίο ένα υμένιο $n - \text{Si}$ τύπου $\mu\text{c} - \text{Si}$ εναποτίθεται με την μέθοδο CVD με πλάσμα. Στη συνέχεια, ένα $i - \text{Si}$ τύπου υμένιο $\text{poly} - \text{Si}$ (με τυπικό πάχος 2 – 4 μm) εναποτίθεται σε θερμοκρασία υποστρώματος $< 550^\circ\text{C}$. Η στρώση αυτή δεν ντοπάρεται ηθελημένα, αλλά τείνει προς τον τύπο p και έχει μια συγκέντρωση φορτίων της τάξης των 10^{15} με $10^{16} / \text{cm}^2$. Αυτή η στρώση ακολουθείται από εναπόθεση ενός $p - \text{Si}$ τύπου υμενίου πυριτίου, μια στρώση ITO και ένα πλέγμα αργύρου ως ηλεκτρόδιο. Κάποια από τα αποτελέσματα του κυττάρου STAR παρουσιάζονται στον Πίν. 5.3. Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει καταπληκτική πρόοδο, η οποία εκδηλώνεται σε ένα κύτταρο με απόδοση περίπου 10.4%, σε πολύ μικρό χρόνο. Οι αρχικοί θεωρητικοί υπολογισμοί υπέδειξαν ότι αποδόσεις της τάξης του 16% ή 18% είναι εφικτοί με μέτριο μέγεθος κόκκων και κάποιο πρωτοποριακό σχεδιασμό. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, το κύριο μέρος της συσκευής χρησιμοποιεί το εγγενές υλικό, βασισμένο σε μια πολύ λεπτή δομή. Όπως σημειώθηκε και παραπάνω, το κυλιόμενο πεδίο μέσα στη στρώση i μπορεί να αυξήσει σημαντικά τον αποτελεσματικό χρόνο ζωής των φορτίων μειονότητας. Παρόλα αυτά, επειδή τα όρια των κόκκων υπάρχουν στην περιοχή αυτή, η δομή είναι επιρρεπής σε παρεκκλίσεις που μπορούν να περιορίσουν τα V_{oc} και FF. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρηθεί ότι αν και οι τιμές της J_{sc} αυξάνονται με το πάχος, οι τιμές της V_{oc} του κυττάρου STAR μειώνονται με το πάχος. Αυτή η συμπεριφορά εξηγήθηκε στα Σχ. 5.1 και 5.2.



Σχήμα 5.10: Απεικόνιση της δομής ενός κυττάρου STAR. Η $\mu\text{c-Si}$ i – στρώση είναι τυπικά 2 με 3 μm σε πάχος

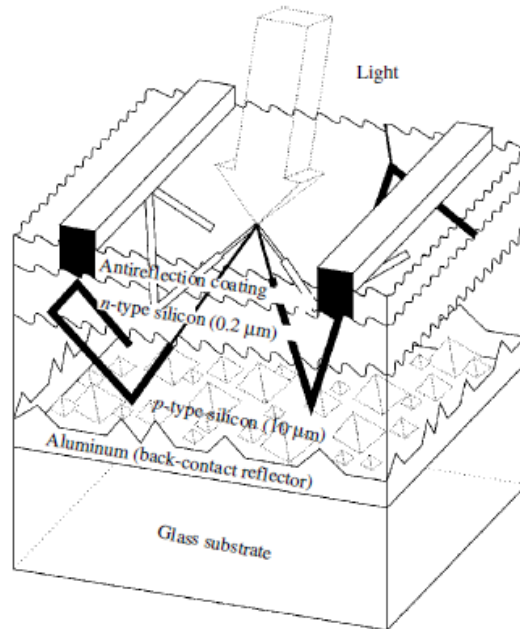
Πάχος κυττάρου	J_{sc} [mA/cm^2]	V_{oc} [mV]	FF [%]	Συνολική απόδοση επιφάνειας [%]	Απόδοση ενεργούς επιφάνειας [%]
1.5	22.90	526	77.2	9.3	-
2.5	24.39	510	75.5	9.4	9.8
3.5	26.12	480	74.8	9.4	9.8

Πίνακας 5.3: Υπολογισμένες παράμετροι I – V του κυττάρου STAR, για διαφορετικά πάχη υμενίου. Οι αποδόσεις είναι υπολογισμένες ως συνολικές (με τις απώλειες μεταλλοποίησης) και ενεργές (δεν λαμβάνουν υπ’ όψιν τη μεταλλοποίηση)

Μια πρωτοποριακή προσέγγιση για τη λήψη υψηλής V_{oc} θα ήταν η χρήση υλικού για λεπτό υμένιο, το οποίο αποτελείται από ένα μίγμα $a\text{-Si}$ και $\mu\text{c-Si}$. Παρόλο που η φυσική της $\mu\text{c-Si}$ φάσης μέσα σε μια μήτρα $a\text{-Si}$ δεν έχει μελετηθεί πλήρως, είναι πιθανό ότι οι ιδιότητες μιας τέτοιας σύνθετης φάσης μπορεί να παρουσιάζει τη συμπεριφορά οποιουδήποτε από τα δύο συστατικά. Έτσι, μια πλούσια σε $a\text{-Si}$ φάση στην i περιοχή μπορεί να παρουσιάζει υψηλότερη V_{oc} , ενώ μια πλούσια $\mu\text{c-Si}$ φάση μπορεί να αποδίδει υψηλότερη J_{sc} . Όντως, τέτοιες συμπεριφορές έχουν αποδειχθεί εν μέρει όπου ηλιακά κύτταρα TF – Si, κατασκευασμένα στο Institut fur Photovoltaic, είχαν $V_{oc} = 600$ mV και απόδοση 10.2%, χρησιμοποιώντας υλικό δύο φάσεων με αναλογία $a\text{-Si}:\mu\text{c-Si}$ ίση με 4:6.

Πρόσφατα, μια νέα δομή προτάθηκε από το National Renewable Energy Laboratory (NREL) που συνδυάζει πολλά πλεονεκτήματα του σχεδιασμού και ξεπερνά πολλά από τα προβλήματα του υποστρώματος. Το Σχ. 5.11 είναι ένα σχέδιο του κυττάρου, το οποίο αποτελείται από ένα p – τύπου υμένιο πυριτίου, πάχους περίπου 10 μm , εναποθετημένου σε ένα μεταλλικά επιστρωμένο γυάλινο υπόστρωμα. Μια επαφή n – τύπου μπορεί να φτιαχτεί από οποιαδήποτε συμβατική μέθοδο, ακολουθούμενη από μια ARC και μπροστά μεταλλοποίηση. Όπως φαίνεται στο σχήμα, το κύτταρο έχει ύφανση τόσο στην πίσω (πυρίτιο – μέταλλο) διεπιφάνεια, όσο και στην μπροστά επιφάνεια. Μερικά άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά του κυττάρου: (1) το πάχος του υμενίου Si είναι περίπου 10 μm , με επιθυμητό μέγεθος κόκκων της τάξεως των 10 – 50 μm (2) ύφανση και των δύο πλευρών με ARC στην μπροστά επιφάνεια, με το ύψος της υφής στο 1 μm και (3) το υλικό

υποστρώματος είναι χαμηλού κόστους γυαλί, το οποίο είναι αποκομμένο από τη στρώση πυριτίου από μια μεταλλική στρώση. Το πίσω μέταλλο (στη διεπιφάνεια Si – γυαλιού) έχει πολλαπλές επαφές και εξυπηρετεί ως ένα οπτικά ανακλαστικό πίσω ηλεκτρόδιο, ένα θεραπευτικό μέσο και μια διεπιφάνεια ανακούφισης των τάσεων που προκύπτουν από τις θερμικές αναντιστοιχίες μεταξύ γυαλιού και πυριτίου.



Σχήμα 5.11: Απεικόνιση του προτεινόμενου λεπτού ηλιακού κυττάρων πυριτίου

Πολλοί σχεδιασμοί κυττάρων χρησιμοποιούν υφασμένες επιφάνειες και ένα ανακλαστικό πίσω ηλεκτρόδιο που είναι απευθείας τοποθετημένο στο λεπτό κύτταρο. Ένα μειονέκτημα του ανακλαστικού (μεταλλικού ή αγώγιμου οξειδίου) πίσω ηλεκτροδίου είναι ότι μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές απώλειες εξαιτίας της οπτικής απορρόφησης. Όμως, αυτές οι απώλειες μειώνονται με την αύξηση του πάχους του υμενίου.

Ο πρωταρχικός στόχος της κατασκευής ενός λεπτού κυττάρου είναι η μείωση των απωλειών λόγω ογκικού ανασυνδυασμού που μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερα FF και V_{oc} . Όμως, αυτό πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο που να προωθήσει καλή παραγωγή και συλλογή φορτίων. Η συλλογή φορτίων μπορεί να είναι ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα σε ένα κύτταρο $\mu c - Si$, εξαιτίας του ανασυνδυασμού φορτίων στα όρια των κόκκων και το μικρό μέγεθος κόκκων. Το Πανεπιστήμιο της Νέας Νότιας Ουαλίας ανέπτυξε μια προσέγγιση κυττάρου πολλαπλών επαφών για να αντιμετωπίσει αυτό το πρόβλημα. Η προσέγγιση πολλαπλών επαφών, θυμίζοντας σχεδιασμούς κυττάρων $a - Si$, μπορεί να παρακάμψει το φαινόμενο της φτωχής ποιότητας υλικού (και άρα του μικρού μήκους διάχυσης φορτίων μειονότητας) με το να παρέχει χωρικά κοντινές επαφές συλλογής. Παρόλο που οι λεπτομέρειες του υλικού του κυττάρου δεν είναι γνωστές, αναμένεται ότι το ημιαγωγικό υμένιο θα αποτελείται από υδρογονωμένο $\mu c - Si$. Ένα τέτοιο υμένιο αποτελείται από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο με μέγεθος κόκκων $<1 \mu m$, υδρογονωμένα όρια κόκκων, και υλικό που αποτελείται από σημαντική ποσότητα άμορφων ιστών στο υμένιο. Πρόσφατα, το συγκεκριμένο πανεπιστήμιο ανακοίνωσε μια απόδοση της τάξης 7.2% με τη συγκεκριμένη

προσέγγιση. Λοιπές λεπτομέρειες δεν ανακοινώθηκαν. Όμως, πιστεύεται ότι μια τεχνική PECVD χρησιμοποιήθηκε για την εναπόθεση. Ο τύπος του υλικού, που εναποτίθεται με υποβοηθούμενες από πλάσμα τεχνικές, έχει πραγματοποιηθεί ξανά, με αποτελέσματα της τάξης έως και 12%.

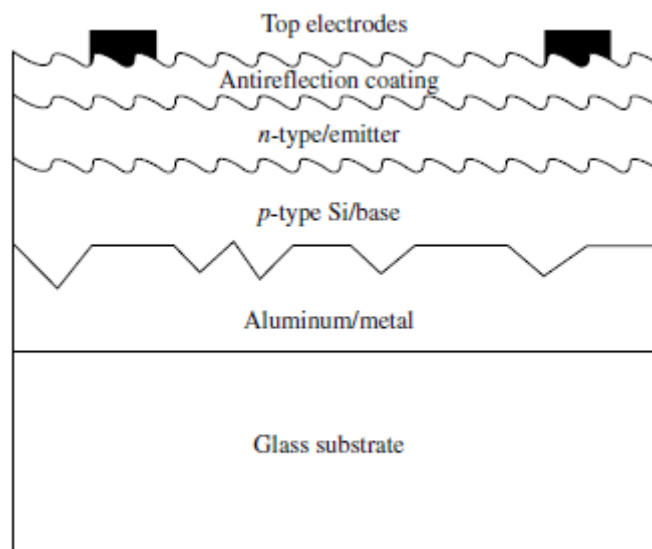
5.6 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΤΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ TF – Si

Όπως και σε κάθε άλλη τεχνολογία ηλιακών κυττάρων, παρουσιάζεται η ανάγκη διερεύνησης ορισμένων παραγόντων, οι οποίοι θα βοηθήσουν στην αύξηση της απόδοσης του κυττάρου. Ο οπτικός σχεδιασμός στοχεύει σε μια μεγάλου βαθμού παγίδευση φωτός, ώστε το αποδοτικό οπτικό πάχος του απορροφητή να είναι παρόμοιο με αυτό ενός πολύ παχύτερου κυττάρου. Είναι γενικά γνωστό ότι μια ή περισσότερες από τις διεπιφάνειες θα πρέπει να είναι τραχιές ή υφασμένες για να παράγουν αποδοτική παγίδευση φωτός. Ο ηλεκτρονικός σχεδιασμός ενός TF – Si κυττάρου, ειδικά ένα το οποίο χρησιμοποιεί μικρόκοκκο Si, είναι πολύ δύσκολος επειδή μια τέτοια δομή έχει τρισδιάστατη ανομοιομορφία. Παρόλα αυτά, ο ποιοτικός σχεδιασμός μπορεί να προέρχεται από τις συγκεντρωτικές παραμέτρους των υλικών, όπως είναι ο ενεργός χρόνος ζωής των φορτίων μειονότητας, η ενεργή ταχύτητα επιφανειακού ανασυνδυασμού, και η απουσία των τοπικών παρεκκλίσεων.

Η ποιότητα υλικού ενός κυττάρου TF – Si θα έπρεπε να είναι τέτοια ώστε ο ογκικός ανασυνδυασμός να είναι σημαντικά μικρότερος από ένα ανάλογο παχύ κύτταρο. Σε ένα λεπτό κύτταρο πυριτίου, ο ανασυνδυασμός φορτίων αναμένεται να προκύψει κυρίως από τις ακαθαρσίες, τα όρια των κόκκων και τις διεπιφάνειες. Τα αποτελέσματα των ακαθαρσιών μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με τη χρήση της θεραπείας αλουμινίου, ενώ μια μεγάλη αναλογία του μεγέθους των κόκκων προς το πάχος του πυριτίου μπορεί να ελαχιστοποιήσει τις παρεκκλίσεις των ορίων των κόκκων. Μια πιο δύσκολη εργασία είναι αυτή της παθητικοποίησης της διεπιφάνειας, ειδικά αν το υμένιο πυριτίου είναι σε επαφή με το υλικό υποστρώματος που μπορεί να είναι αγώγιμο.

Δυστυχώς, ο σχεδιασμός και οι διεργασίες κατασκευής των κυττάρων είναι άρρηκτα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Θα επιχειρηθεί, παρόλα αυτά, να γίνει περιγραφή μιας κυτταρικής δομής (που μπορεί να καλύψει όλα τα στοιχεία όλων των κυττάρων TF – Si) και να παρουσιαστούν οι οπτικές και ηλεκτρονικές ιδιότητες. Η έμφαση δίνεται στον σχεδιασμό και στη φυσική του κυττάρου. Η δομή του συγκεκριμένου κυττάρου παρουσιάζεται στο Σχ. 5.12. Αποτελείται από ένα γυάλινο υπόστρωμα επικαλυμμένο με μια στρώση μετάλλου όπως το αλουμίνιο. Ένα λεπτό στρώμα από p – τύπο άμορφο ή λεπτόκοκκο mc – Si υμένιο εναποτίθεται στο επικαλυμμένο με αλουμίνιο υπόστρωμα. Το εναποτιθέμενο υμένιο μπορεί να έχει ενίσχυση κόκκων χρησιμοποιώντας μια από τις τεχνικές που περιγράφονται παρακάτω. Συγκεκριμένα, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια τεχνική που επιτρέπει τη θερμοκρασία του υποστρώματος να παραμείνει κάτω από το σημείο που αρχίζει να μαλακώνει. Το υμένιο με ενίσχυση κόκκων σχηματίζει τη βάση του κυττάρου. Η μέθοδος εναπόθεσης για το άμορφο ή το mc υμένιο δεν είναι κρίσιμη για τις διαδικασίες ενίσχυσης κόκκων και μπορεί να πραγματοποιηθεί από οποιαδήποτε τεχνική που μπορεί να παράγει καλή απόδοση και καλή ποιότητα υλικού. Έτσι, μια ποικιλία τεχνικών εναπόθεσης υμενίων όπως οι sputtering, PECVD, hot – wire CVD και photo – CVD μπορούν να χρησιμοποιηθούν

για την εναπόθεση πυριτίου. Η επαφή κατασκευάζεται από μια χαμηλής θερμοκρασίας διεργασία, όπως η εναπόθεση μιας n – τύπου, μc – Si στρώσης. Η χρήση χαμηλής θερμοκρασίας τεχνολογιών εναπόθεσης είναι πολύ διαφορετικές μεταξύ του TF – Si και του συμβατικού παχιού ηλιακού κυττάρου πυριτίου. Επιπλέον της διατήρησης της ακεραιότητας του υποστρώματος και της πίσω μεταλλικής στρώσης, μια χαμηλής θερμοκρασίας διεργασία μπορεί να ελαχιστοποιήσει τη διάχυση του ντοπαρίσματος κατά μήκος των ορίων των κόκκων. Άλλες τεχνικές που μπορούν να εκμεταλλεύονται τη θεωρία ελαττωμάτων έχουν επίσης τη δυνατότητα σχηματισμού μια n/p επαφή σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ένα σημαντικό στοιχείο της ρύθμισης του κυττάρου που παρουσιάζεται στο Σχ. 5.12 είναι το διεπιφανειακό υμένιο αλουμινίου. Αυτή η στρώση λειτουργεί σαν μια πολλαπλών χρήσεων ρυθμιστική στρώση. Η στρώση αυτή λαμβάνει μέρος στην ενίσχυση κόκκων, λειτουργεί σαν μια ωμική πίσω επαφή, λειτουργεί σαν μια θεραπευτική στρώση των ακαθαρσιών και παρέχει πίσω ανάκλαση για αποτελεσματική παγίδευση φωτός.



Σχήμα 5.12: Σχέδιο χαρακτηριστικής δομής κυττάρου TF – Si

Ποιοτικά, μπορούν να αναγνωριστούν διάφορα ενσωματωμένα χαρακτηριστικά κυτταρικών δομών που μπορούν δυνητικά να κάνουν σχέδια υψηλής απόδοσης. Αυτά περιλαμβάνουν τα παρακάτω:

- i. Μια διεπιφανειακή υφή που προωθεί την παγίδευση φωτός. Μερικές λεπτομέρειες της φύσης της υφής, όπως το σχήμα, το ύψος και οι θέσεις της υφής, καθορίζονται παρακάτω.
- ii. Η χρήση ενός οπτικού πίσω ανακλαστήρα για την ενίσχυση της παγίδευσης φωτός.
- iii. Η μεγάλη αναλογία μεγέθους κόκκων προς πάχος υμενίου που είναι συμβατή με την υψηλή V_{oc} και FF. Το μεγάλο μέγεθος των κόκκων λαμβάνεται από την στερεάς φάσης ανάπτυξη κόκκων χρησιμοποιώντας φωτοδιέγερση.
- iv. Ένα ενσωματωμένος θεραπευτικός μηχανισμός ακαθαρσιών που μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα υλικού του εναποτιθέμενου πυριτίου. Είναι συχνό για τις διεργασίες των παχιών ηλιακών κυττάρων πυριτίου να απαιτούν ανεπτυγμένες τεχνικές, όπως η θεραπεία ακαθαρσιών και η παθητικοποίηση υδρογόνου. Η

προτεινόμενη δομή προσφέρει έναν απλό τρόπο θεραπείας. Το ίδιο αποτελεσματικές θεραπευτικές διεργασίες είναι και η διάχυση φωσφόρου ή η κραματοποίηση με αλουμίνιο.

5.7 ΠΑΓΙΔΕΥΣΗ ΦΩΤΟΣ ΣΤΑ ΗΛΙΑΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ

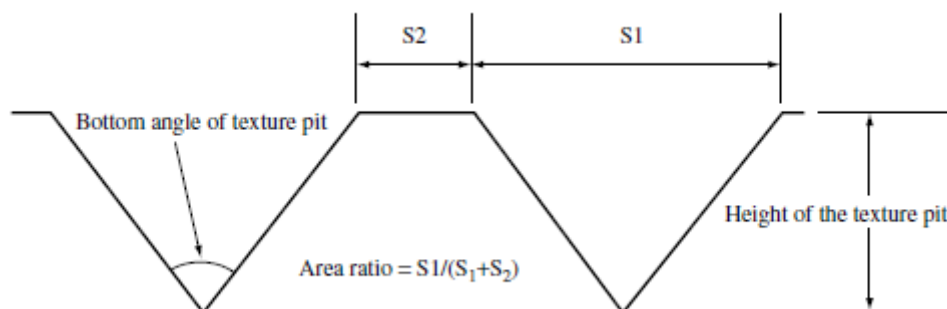
Όπως περιγράφηκε νωρίτερα, ένα ηλιακό κύτταρο λεπτού υμενίου προϋποθέτει υψηλής απόδοσης παγίδευση φωτός ώστε να απορροφά ένα σημαντικό ποσοστό του προσπίπτοντος φωτός και να ελαχιστοποιεί την ανάκλαση. Προσεγγίσεις περιορισμού του φωτός έχουν συζητηθεί επαρκώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο σημείο αυτό θα επικεντρωθούμε μόνο στα λεπτά κύτταρα. Ένας οπτικός περιορισμός (ή παγίδευση φωτός) υπονοεί ότι μόλις το φως μεταδοθεί στο κύτταρο, η δομή διατηρεί το φως στο εσωτερικό χωρίς να επιτρέπει την εκπομπή από τις επιφάνειες. Στις ηλεκτρομαγνητικές συσκευές, αυτό είναι γνωστό ως ελεγχόμενο κύμα. Στα λεπτά διηλεκτρικά υμένα χρησιμοποιούνται ως οδηγό κυμάτων σε ενσωματωμένα οπτικά μέσα, τα ελεγχόμενα κύματα χρησιμοποιούν ολική εσωτερική ανάκλαση και μερικά ειδικά συνεκτικά χαρακτηριστικά για να επιτύχουν αυτή τη συνθήκη. Σε μια δομή ηλιακού κυττάρου, τέτοιες λειτουργίες δεν είναι δυνατές. Οι λειτουργίες της δομής είναι λειτουργίες ακτινοβολίας. Έτσι, η παγίδευση φωτός που χρησιμοποιείται στα ηλιακά κύτταρα είναι ένας εσφαλμένος χαρακτηρισμός. Όμως, υποτίθεται ότι υπονοεί σχετική ενίσχυση της οπτικής αναρρόφησης πάνω στην επίπεδη κλίση. Αυτό επιβάλλει δύο χαρακτηριστικά στη δομή: (1) την ικανότητα να αυξηθεί το οπτικό μονοπάτι του φωτός που διαδίδεται μέσα στο κύτταρο και (2) η διαμόρφωση της δομής σε ασύμμετρη, ώστε η ανάκλαση στις δύο επιφάνειες να είναι διαφορετική. Ένα επιπρόσθετο χαρακτηριστικό σε ένα ηλιακό κύτταρο είναι η ελαχιστοποίηση της ανάκλασης της ακτινοβολούμενης επιφάνειας.

Οι αντανάκλαστικές επικαλύψεις (ARC) και η ύφανση της μπροστά επιφάνειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη αυτού του σκοπού. Η επιλογή κατάλληλων υλικών για τις ARC και ο σχεδιασμός της κατάλληλης υφής για την μπροστά επιφάνεια είναι ανάμεσα στις εργασίες για τον οπτικό σχεδιασμό του ηλιακού κυττάρου. Ο μόνος τρόπος για την ενίσχυση της παγίδευσης φωτός σε ένα χερσαίο (εντελώς ακτινοβολούμενο) ηλιακό κύτταρο είναι η χρήση τραχιών επιφανειών/διεπιφανειών αντί για επίπεδες δομές. Μια ανάλυση των ιδεών παγίδευσης φωτός που χρησιμοποιεί συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας πρότεινε ότι μια μπιγιέτα ημιαγωγού με τραχιές επιφάνειες μπορεί να παράγει μια αποδοτική αύξηση στο οπτικό μονοπάτι με ένα συντελεστή $2n^2$, όπου το n είναι ο δείκτης διάθλασης του ημιαγωγού. Η μορφή της επιφάνειας/διεπιφάνειας της συσκευής θα παίξει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία παγίδευσης φωτός. Η ανεύρεση της πιο κατάλληλης επιφανειακής ρύθμισης που μπορεί να μεγιστοποιήσει την παγίδευση φωτός είναι ένας σημαντικός στόχος του οπτικού σχεδιασμού του ηλιακού κυττάρου. Ανάλογα με τη μορφολογία, μια σκληρή επιφάνεια μπορεί να είχε ανακλαστικότητα είτε κατά Lambert (μια τυχαία σκληρότητα που προκαλεί σκέδαση για να ακολουθήσει μια $\cos^2\theta$ κατανομή), είτε γεωμετρική (η υφασμένη επιφάνεια έχει μεγαλύτερο μέγεθος χαρακτηριστικών από το μήκος κύματος του φωτός). Μόνο η δομή της επιφάνειας/διεπιφάνειας που είναι γεωμετρικά ανακλαστική θα αναλυθεί περαιτέρω.

Ένα σημαντικό θέμα για τα ηλιακά κύτταρα λεπτών υμενίων, που σπανίως συναντάται στα παχιά κύτταρα, είναι οι απώλειες λόγω μεταλλικών απορροφήσεων. Όλα τα ηλιακά κύτταρα χρειάζονται επαφές και σε πολλές περιπτώσεις, οι επαφές μπορεί να λειτουργούν και ως οπτικοί ανακλαστήρες. Για παράδειγμα, τα ηλιακά κύτταρα a – Si χρησιμοποιούν αλουμίνιο ή άργυρο ως μέρος του πίσω ανακλαστήρα. Δυστυχώς, μια μεταλλική επιφάνεια δεν είναι πλήρως ανακλαστική. Μια τυπική τιμή ανάκλασης σε μια διεπιφάνεια αέρα – μετάλλου μπορεί να είναι αρκετά υψηλή, ~90% για το αλουμίνιο και 95% για τον άργυρο. Παρόλα αυτά, όταν ένα τέτοιο μέταλλο χρησιμοποιείται στα ηλιακά κύτταρα, η μεταλλικές απώλειες ενισχύονται. Η ανάκλαση στη διεπιφάνεια μετάλλου ημιαγωγού είναι χαμηλότερη από αυτή της διεπιφάνειας αέρα – μετάλλου. Το φως που διαδίδεται μέσα στο μέταλλο απορροφάται εκεί συνεισφέροντας στις αυξημένες απώλειες. Επιπλέον, εάν η διεπιφάνεια είναι σκληρή ή υφασμένη, η περιοχή του μετάλλου είναι μεγαλύτερη, συνεισφέροντας σε αυξημένες απώλειες. Σε ένα κύτταρο με καλή παγίδευση φωτός, το φως στο πιο αδύναμο άκρο του φάσματος μπορεί να αντιμετωπίσει πολλές ανακλάσεις στο εσωτερικό του κυττάρου. Σε κάθε ανάκλαση, μέρος του προσπίπτοντος φωτός στο μέταλλο θα απορροφηθεί αντί να ανακλαστεί πίσω στον ημιαγωγό. Η απώλεια φωτονίων στο μέταλλο θα γίνει ένα σοβαρό πρόβλημα όταν το πάχος του κυττάρου μειώνεται και ο αριθμός των περασμάτων αυξηθεί. Η ελαχιστοποίηση των απωλειών μετάλλου είναι ένας σημαντικός παράγοντας στο σχεδιασμό του ηλιακού κυττάρου.

5.8 ΥΦΑΝΣΗ ΣΤΑ ΗΛΙΑΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκαν διάφορες τεχνικές ύφανσης των ηλιακών κυττάρων πυριτίου. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει μόνο μια αναφορά της επίδρασης των διαφορετικών υφών στα ηλιακά κύτταρα TF – Si. Η συνήθης δομή που χρησιμοποιείται σε αυτά τα ηλιακά κύτταρα είναι η υφή των αντίστροφων πυραμίδων. Για τη συγκεκριμένη υφή τρεις είναι οι παράμετροι που ελέγχουν τη δομή της υφής: το βάθος, η γωνία πυθμένα και η πυκνότητα των διαμορφώσεων. Στο Σχ. 5.13 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική μορφή τέτοιας υφής, καθώς και οι επιδράσεις που έχουν στο ηλιακό κύτταρο. Από άποψη ορολογίας οι πυραμιδοειδείς πυθμένες ονομάζονται απλά πυθμένες υφής. Σε σχέση με τη διερεύνηση της πυκνότητας των πυθμένων υφής, η αναλογία ανάμεσα στην περιοχή του υφασμένου μέρους και ολόκληρη την περιοχή λέγεται αναλογία περιοχής (στην οποία η «περιοχή» της επιφάνειας είναι στην πραγματικότητα το μήκος της αναφερόμενης επιφάνειας).



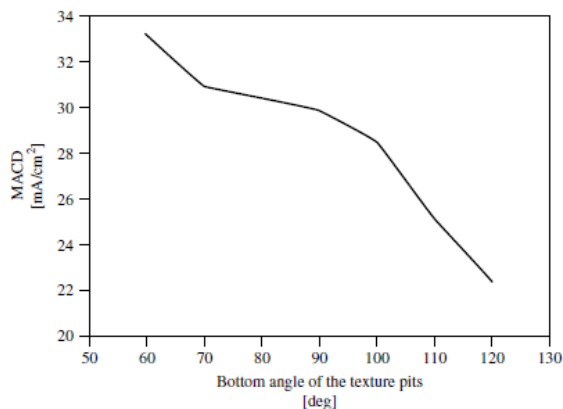
Σχήμα 5.13: Η γεωμετρία και η ετυμολογία που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη θεώρηση

5.8.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΨΟΥΣ ΤΗΣ ΥΦΗΣ ΣΤΗ MACD

Η υφή παράγεται τυπικά από την αποκάλυψη των (1 1 1) κρυσταλλογραφικών επιπέδων, που υποτείνουν μια γωνία 70.4° μεταξύ τους. Για τη διερεύνηση των επιδράσεων του ύψους της υφής στη γέννηση φωτορευμάτων, υποθέεται η ίδια γωνία για κάθε πυθμένα της υφής. Η υπολογιζόμενη MACD για τα ηλιακά κύτταρα που έχουν έναν απορροφητή πυριτίου πάχους 10 μm είναι περίπου 31 mA/cm^2 . Η τιμή αυτή είναι σχεδόν ανεξάρτητη του ύψους της υφής (μεταξύ 0.1 και 2 μm), όταν η γωνία πυθμένα παραμένει αμετάβλητη. Αυτό υπονοεί ότι πολύ ρηχοί πυθμένες υφής μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συσκευή χωρίς μια υποβιβασμένη συμπεριφορά. Αυτή η κατάληξη είναι σημαντική για τις δομές κυττάρων λεπτών υμενίων, οι οποίες δεν περιλαμβάνουν βαθιούς πυθμένες.

5.8.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΠΥΘΜΕΝΑ ΤΩΝ ΠΥΘΜΕΝΩΝ ΥΦΗΣ ΣΤΗ MACD

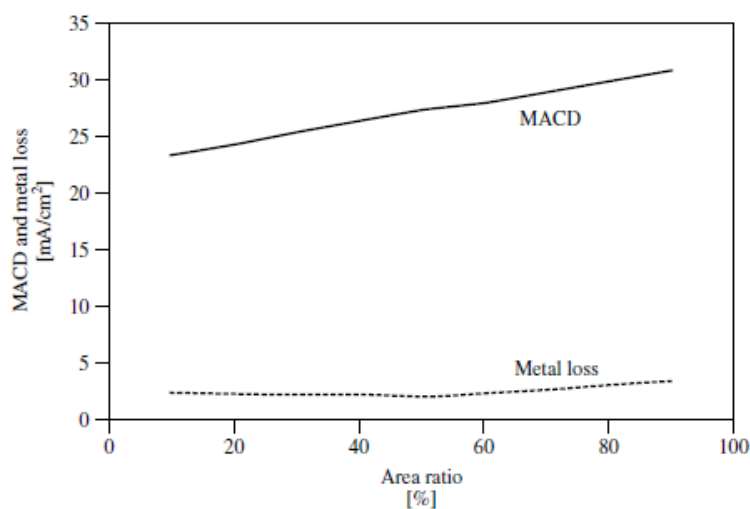
Η ύφανση με χημική εγχάραξη θα δημιουργήσει μια σταθερή γωνία πυθμένων. Πολλές άλλες μέθοδοι εγχάραξης αναπτύχθηκαν πρόσφατα για παχιά ηλιακά κύτταρα, οι οποίες περιλαμβάνουν μηχανική ανάπτυξη αυλακών και τεχνικές επιφανειακής διαμόρφωσης. Επίσης, στα εναποτιθέμενα υμένα, η γωνία πυθμένων μπορεί να σχετίζεται με το μέγεθος των κόκκων. Είναι χρήσιμο να ερευνηθεί η επίδραση της γωνίας πυθμένων στην απόδοση του κυττάρου. Για μια τυπική δομή με απορροφητή πάχους 10 μm και βάθος πυθμένων υφής 1 μm στην μπροστά επιφάνεια, ενώ η πίσω επιφάνεια είναι επίπεδη, πραγματοποιούνται διάφορες μετρήσεις για γωνίες από 60° έως 120° . Το Σχ. 5.14 παρουσιάζει τη MACD συναρτήσει της μεταβολής της γωνίας. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η MACD μειώνεται κατά 30% περίπου όταν η γωνία αλλάζει από 60° σε 120° . Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το επικρατές φαινόμενο που προκαλείται κατά τη μεταβολή της γωνίας, είναι η μεταβολή της ανάκλασης. Η ανάλυση του ανακλώμενου φάσματος δείχνει ότι η ανάκλαση αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας πυθμένων, για ένα εύρος μηκών κύματος από 0.4 μm έως 0.9 μm . Σε αυτό το εύρος μηκών κύματος, η ανάκλαση είναι πρωταρχικά από την μπροστά επιφάνεια. Για αυτό, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη απόδοση, πιο οξεία υφή πρέπει να αποδοθεί στην επιφάνεια. Μια τέτοια δομή μπορεί να αποδοθεί από την τεχνική εγχάραξης αντιδρώντων ιόντων (Reactive – Ion Etching, RIE). Παλιότερα, η συγκεκριμένη τεχνική απέδιδε κύτταρα με χαμηλότερη V_{oc} λόγω παρεκκλίσεων. Οι παρεκκλίσεις αυτές προκύπτουν από την αποκοπή των κορυφών και/ή τη διείδυση του μετάλλου διαμέσου της επαφής κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Όμως, αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται σήμερα εμπορικά από τους κατασκευαστές των κυττάρων.



Σχήμα 5.14: Μεταβολή της MACD συναρτήσει της γωνίας πυθμένων υφής. Το πάχος του πυριτίου είναι 10 μm

5.8.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΥΦΗΣ

Σε μερικές τεχνικές επεξεργασίας, οι διαμορφώσεις της υφής δεν μπορούν να καλύψουν ολόκληρη την επιφάνεια. Μελετώντας την επίδραση της πυκνότητας αυτής της υφής, προέκυψε το διάγραμμα του Σχ. 5.15, το οποίο απεικονίζει την επίδραση του παράγοντα αυτού, στην MACD και τις απώλειες μετάλλου. Φαίνεται ότι η MACD αυξάνεται όσο ο αριθμός των διαμορφώσεων της υφής (αντίστροφες πυραμίδες στην περίπτωση αυτή) αυξάνονται.



Σχήμα 5.15: Μεταβολή της MACD και των απωλειών μετάλλου συναρτήσει της αναλογίας επιφάνειας για ένα κύτταρο πυριτίου με απορροφητή πάχους 10 μm

5.8.4 ΣΥΝΟΨΗ

Από την παραπάνω ανάλυση μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- i. Το πάχος του κυττάρου θα πρέπει να είναι 10 με 20 μm προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική J_{sc} (προέκυψε σαν υπόθεση για την παραπάνω ανάλυση).

- ii. Η βέλτιστη δομή είναι είτε μπροστά επιφάνεια υφασμένη και πίσω ομαλή, είτε μπροστά και πίσω επιφάνειες υφασμένες.
- iii. Η υφή θα πρέπει να είναι όσο πιο πολύ οξεία γίνεται και θα πρέπει να καταλαμβάνει ολόκληρη την επιφάνεια του κυττάρου.

5.9 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Ένα γενικό μοντέλο ενός ηλιακού κυττάρου TF – Si μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα, όπως οι ανομοιομορφίες που πηγάζουν από τα όρια των κόκκων και οι μεταξύ των κόκκων ατέλειες, όπως επίσης και μια λεπτομερής οπτική γέννεση όπως προκύπτει από την παγίδευση του φωτός.

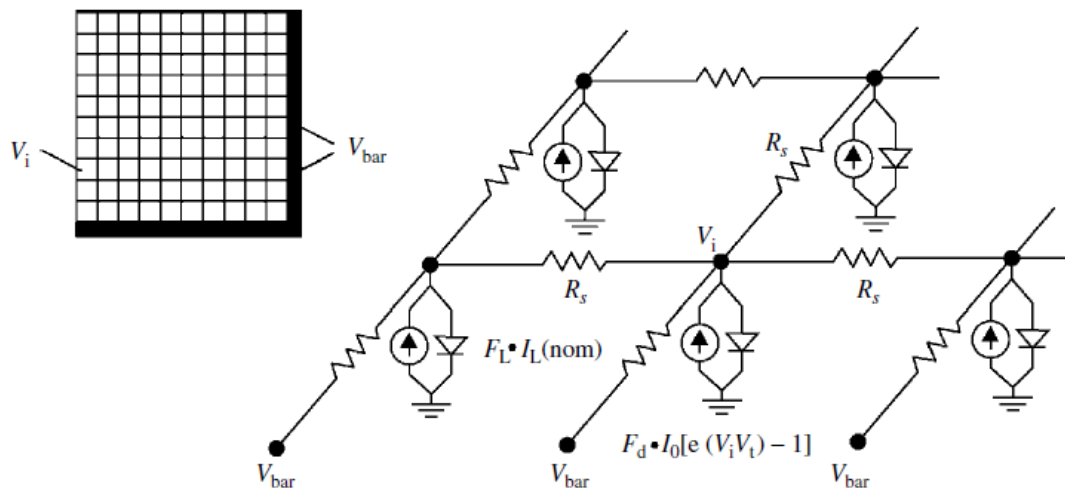
Μια καλή πρωταρχική κατανόηση του σχεδιασμού των κυττάρων TF – Si μπορεί να αποκτηθεί μέσω ενός μοντέλου ενός μονοκρυσταλλικού κυττάρου TF – Si. Ένα τέτοιο κύτταρο μπορεί να θεωρηθεί ότι ομοιόμορφες ιδιότητες υλικού, αν και εγκλείσματα στο μεταλλικό πλέγμα μπορούν να εισάγουν μεγάλες χωρικές ανομοιότητες, αφού τα φαινόμενα σκίασης μπορεί να είναι πιο έντονα σε λεπτότερα κύτταρα.

Η ακριβής μοντελοποίηση ενός κυττάρου πολυκρυσταλλικού TF – Si είναι πιο περίπλοκη, όχι μόνο εξαιτίας των θεμάτων των ορίων των κόκκων, αλλά και εξαιτίας του φαινομένου των ομαδοποιημένων ατελειών. Έχει παρατηρηθεί ότι το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο παρουσιάζει διαχωρισμούς στις ατέλειες μεταξύ των κόκκων, μέσα σε κόκκους ορισμένου προσανατολισμού. Έτσι, είναι δυνατό να ευρεθούν κόκκοι με μηδενική πυκνότητα ατελειών, δίπλα σε κόκκους με πολλές ατέλειες (ομαδοποιημένες ατέλειες). Η διάταξη των ομαδοποιημένων ατελειών στο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο αποδίδεται στην ανακούφιση των θερμικών τάσεων (που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της κρυσταλλικής ανάπτυξης ή της εναπόθεσης) διαμέσου της γέννησης μετατοπίσεων από κόκκους με προτιμώμενο προσανατολισμό. Οι προσανατολισμοί αυτοί ποικίλουν ανάλογα με τις συνθήκες της εναπόθεσης ή της κρυσταλλικής ανάπτυξης. Όταν οι ατέλειες ομαδοποιούνται, αναμένεται ότι τα επαγόμενα δυναμικά από διαφορετικές ατέλειες μπορεί να συζευχθούν αν είναι χωρικά κοντά, ώστε κάποιες επιπλέον δεύτερης τάξης ενεργειακές στάθμες, ή ακόμα και μια δομή ομοιάζουσα ενεργειακό διάκενο, να παραχθεί. Όμως δυστυχώς, δεν υπάρχει επαρκής έρευνα για το συγκεκριμένο φαινόμενο, κάτι που καθιστά την ακριβή μοντελοποίηση πολυκρυσταλλικού πυριτίου αρκετά δύσκολη.

Μιας πρώτης τάξης προσέγγιση (αλλά απλή στη διαχείριση) για ένα κύτταρο πολυκρυσταλλικού TF – Si μπορεί να αποδώσει μια αρκετά καλή εικόνα της απόδοσης του κυττάρου, καθώς αυτή ελέγχεται από τις χωρικές ποικιλότητες που προκύπτουν κατά τη διάρκεια των μεταβολών των ιδιοτήτων κόκκου προς κόκκο, όπως είναι η πυκνότητα μετατοπίσεων. Κάθε κόκκος μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ομοιόμορφος. Στη συγκεκριμένη προσέγγιση, τα φαινόμενα των ορίων των κόκκων μπορούν να προσαρμοστούν σε ομάδες αντιστάσεων εν σειρά, που διασυνδέονται μέσω πολλών κόκκων σε ένα πλήρες δικτυακό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε στο NREL για να προβλέπει τα φαινόμενα των χωρικών ανομοιομορφιών σε ένα μεγάλης επιφάνειας ηλιακό μοντέλο. Στην περίπτωση αυτή, το ολικό κύτταρο αποτελείται από έναν παράλληλο συνδυασμό ενός μεγάλου αριθμού μικρότερων κυττάρων, όπου κάθε κύτταρο αντιπροσωπεύει κάθε κόκκο

ξεχωριστά. Τα χαρακτηριστικά κάθε κυττάρου καθορίζονται από τις τοπικές ιδιότητες του συγκεκριμένου κόκκου.

Στο Σχ. 5.16 απεικονίζεται το συγκεκριμένο δικτυακό μοντέλο. Το ηλιακό κύτταρο χωρίζεται σε μια διάταξη από διόδους, όπου κάθε διάδος είναι αρκετά μικρή για να θεωρηθεί μια ομοιόμορφη κατανομή ατελειών. Κάθε κόμβος του μητρώου απεικονίζει ένα τοπικό κύτταρο, συνδεδεμένο με άλλα κύτταρα από μια αντίσταση, που αντιπροσωπεύει τις εν σειρά αντιστάσεις. Οι εν σειρά αντιστάσεις πηγάζουν από έναν μεγάλο αριθμό πηγών που περιλαμβάνουν την αντίσταση επιφανειακή αντίσταση του εκπομπού σε μια η/ρ συσκευή.



Σχήμα 5.16: Ένα δικτυακό μοντέλο του ηλιακού κυττάρου που δείχνει τις πηγές τάσης και ρεύματος να αντιστοιχούν σε σκοτεινές (με το δείκτη d) και ακτινοβολούμενες (με το δείκτη L) συνθήκες και τα στοιχεία αντιστάσεων που υπάρχουν εξαιτίας της επιφανειακής αντίστασης του εκπομπού

Οι καμπύλες ρεύματος τάσης ($I - V$) του κυττάρου συνθέτονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση της διόδου για κάθε κύτταρο. Έτσι, η ολική πυκνότητα ρεύματος κάθε κυττάρου, J , μπορεί να γραφτεί ως:

$$J = J_{ph} - J_{dark}(V)$$

Όπου J_{ph} και $J_{dark}(V)$ είναι οι φωτογεννημένες και οι σκοτεινές πυκνότητες ρεύματος αντίστοιχα. Το σκοτεινό ρεύμα κάθε τοπικής περιοχής για γνωστή πυκνότητα ατελειών, περιγράφεται από τη σχέση:

$$J_{dark} = J_{01} \cdot e^{\frac{eV}{kT-1}} + J_{02} \cdot e^{\frac{eV}{2kT-1}} + J_{03} \cdot e^{\beta V-1}$$

Οι πρώτοι δύο όροι στην παραπάνω εξίσωση είναι γνωστές εκφράσεις και αντιπροσωπεύουν τον ανασυνδυασμό ατελειών δεσμού προς δεσμό και στο μέσο του διακένου αντίστοιχα, για τις επαφές p - n. Ο τελευταίος όρος προστίθεται για να συμπεριληφθεί τα ρεύματα σήραγγας που προκύπτουν σε μια περιοχή με πολλές ατέλειες. Αυτά τα ρεύματα σήραγγας προκύπτουν εξαιτίας του μηχανισμού μεταπήδησης φορτίων, ο οποίος είναι ανεξάρτητος της θερμοκρασίας. Εδώ το β είναι μια σταθερά που είναι απαραίτητη για να ληφθεί υπ' όψιν η ειδική εξάρτηση τάσης. Έτσι, ένα τοπικό στοιχείο κυττάρου (i, j) στο μητρώο αναπαριστάται από μια πηγή ρεύματος, που αποτελείται από τα

$J_{01i,j}$, $J_{02i,j}$ και $J_{03i,j}$, καθώς και μια αντίστοιχη πυκνότητα ρεύματος λόγω ακτινοβόλησης J_{phij} . Για θερμοκρασία δωματίου, τα ρεύματα σήραγγας μπορούν να παραληφθούν. Όλα τα στοιχεία του ρεύματος των στοιχείων των κυττάρων μπορούν να παρασταθούν σε όρους ονομαστικών ρευμάτων, για συσκευές χωρίς ατέλειες. Αυτοί θα είναι:

$$J_{01i,j} = J_{01} \cdot A_{ij} \cdot e^{\frac{eV}{kT}-1} \text{ και}$$

$$J_{02i,j} = J_{02} \cdot B_{ij} \cdot e^{\frac{eV}{2kT}-1}$$

Όπου J_{01} και J_{02} αντιπροσωπεύουν τις πυκνότητες των σκοτεινών κορεσμένων ρευμάτων στα ονομαστικά στοιχεία χωρίς ατέλειες. Τα A_{ij} και B_{ij} είναι οι παράγοντες που αντιπροσωπεύουν την αναλογία του ονομαστικού σκοτεινού ρεύματος και του ονομαστικού ρεύματος για την περίπτωση μη ύπαρξης ατελειών, για κάθε στοιχείο της συσκευής. Από αυτά η τάση μπορεί να προκύψει σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$V_{ij} = \frac{F_{phij} \cdot I_{ph,nom} - \left[A_{ij} \cdot I_{01,nom} \cdot \left(e^{\frac{V_{ij}}{akT}} - 1 \right) + B_{ij} \cdot I_{02,nom} \cdot \left(e^{\frac{V_{ij}}{bkT}} - 1 \right) + \frac{V_{neighbors}}{R_s} \right]}{N/R_s}$$

Όπου:

V_{ij} : Η τάση στον κόμβο ij

F_{phij} : Ένα μέρος του βραχυκυκλωμένου ρεύματος στον κόμβο που συγκρίνεται με το ονομαστικό βραχυκυκλωμένο ρεύμα χωρίς ατέλειες (<1)

$I_{01,nom}$, $I_{02,nom}$: Το ονομαστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης ανά κόμβο

A_{ij} , B_{ij} : Τμήμα των σκοτεινών ρευμάτων στον κόμβο (>1)

$V_{neighbors}$: Η τάση των κοντινότερων γειτονικών κυττάρων

N : Ο αριθμός των κοντινότερων γειτονικών κυττάρων

R_s : Η ηλεκτρική αντίσταση μεταξύ των κυττάρων

Το παραπάνω μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των χαρακτηριστικών I – V καμπυλών ολόκληρου του κυττάρου.

5.10 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΟΡΙΩΝ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ

Το εύρος της επίδραση των ορίων των κόκκων στις ιδιότητες των φωτοβολταϊκών εξαρτάται από πολλές παραμέτρους των ίδιων των κόκκων. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν την πυκνότητα των ατελειών, το ύψος των ορίων και την πυκνότητα φορτίων των κόκκων. Σε ένα λεπτόκοκκο υλικό, το μέγεθος των κόκκων μπορεί να είναι της ίδιας τάξης με την επίδραση ενός ορίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε περιοχή (είτε το εσωτερικό είτε τα όρια ενός κόκκου) χαρακτηρίζονται από ατέλειες. Οι ατέλειες αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν όπως φαίνεται παρακάτω, βάσει των ιδιοτήτων τους:

- *Τύπος I*: Αυτές οι περιοχές έχουν πολύ μικρή πυκνότητα ατελειών και μπορεί να θεωρηθούν ως κανονικές περιοχές, όπου ο ανασυνδυασμός των φορτίων πλειονότητας μπορεί να παραληφθεί και η πυκνότητα των επιπλέον επαγόμενων φορτίων, λόγω των ατελειών, να είναι σχετικά μικρή.

- *Τύπος II:* Ο ανασυνδυασμός των φορτίων πλειονότητας μπορεί να παραληφθεί, αλλά τα επιπλέον επαγόμενα φορτία λόγω ατελειών δεν μπορούν να παραληφθούν.
- *Τύπος III:* Αυτές οι περιοχές έχουν μεγάλο αριθμό ατελειών, ενεργά «νεκρές» περιοχές στις οποίες σχεδόν όλα τα φορτία (τόσο πλειονότητας όσο και μειονότητας) θα ανασυνδυαστούν. Αυτός ο τύπος περιοχής μπορεί να περιλαμβάνει είτε όρια κόκκων, είτε άλλες πλούσιες σε ατέλειες περιοχές, όπως οι μεγάλης διάχυσης εκπομποί.
- *Τύπος IV:* Μια περιοχή πολλών ατελειών, στην οποία ένα σημαντικό τμήμα των φορτίων πλειονότητας ανασυνδυάζονται. Αποτέλεσμα είναι οι στάθμες Fermi στην περιοχή αυτή να είναι διαφορετικές από αυτές της περιοχής Τύπου I, ακόμα και με τις ίδιες συγκεντρώσεις ντοπαρίσματος. Επίσης, λόγω των πολλών ατελειών, είναι πιθανό να εμφανίζονται και πολλά επιπλέον φορτία.

Στις περιοχές Τύπου I, το ηλεκτρικό πεδίο $E(x,y)$ είναι 0. Όμως, στις περιοχές Τύπου II ή Τύπου III, οι οποίες έχουν επιπλέον φορτία, αυτά προκαλούν εσωτερικά ηλεκτρικά πεδία, οπότε το $E(x,y)$ δεν είναι 0.

5.11 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΓΙΑ ΗΛΙΑΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ

Οι τεχνικές εναπόθεσης για τα λεπτά υμένια πυριτίου εμφανίζουν μια μεγάλη γκάμα από εναπόθεση μονοκρυσταλλικών χρησιμοποιώντας κρυσταλλικά υποστρώματα, έως μικροκρυσταλλικά υμένια πυριτίου σε υποστρώματα γυαλιού, ή μεταλλικά φύλλα. Μια ποικιλία τεχνικών χρησιμοποιείται, οι οποίες περιλαμβάνουν τεχνικές RF και DC λάμψης εκκένωσης όπως οι PECVD, HWCVD, ECRCVD και άλλες μικροκυματικές ή μέσω ακτινών πλάσματος μεθόδους εναπόθεσης. Βεβαίως, το σύστημα της PECVD είναι κατάλληλο για εναποθέσεις μεγάλης επιφάνειας. Μερικές από τις νεότερες τεχνικές, όπως η ECRCVD, η remote plasma – enhanced CVD και η HWCVD μπορούν να παράγουν υλικά με ενδιαφέρουσες ιδιότητες όπως η χαμηλότερη πυκνότητα ατελειών, το μεγαλύτερο μήκος διάχυσης φορτίων μειονότητας και τη μικρότερη συγκέντρωση υδρογόνου. Μερικές από τις τεχνικές αυτές είναι πολλά υποσχόμενες για το μέλλον.

Σήμερα, τα εμπορικά κύτταρα a – Si:H κατασκευάζονται περισσότερο σε αντιδραστήρες πολλών δωματιών. Η ενσωμάτωση υδρογόνου είναι ένα σημαντικό θέμα στην εναπόθεση των κυττάρων αυτών. Ένα αέριο που περιέχει πυρίτιο, τυπικά η σιλάνη, χρησιμοποιείται ως το δραστικό αέριο σε DC ή RF (13.56 – 200 MHz) πλάσμα σε ένα εύρος πίεσης από 0.1 ως 1 torr. Τυπικά, ο ρυθμός εναπόθεσης είναι 1 – 5 Å/s. Ένα υλικό με καλή ηλεκτρονική ποιότητα απαιτεί ένα πυκνό και ομοιογενές δίκτυο άμορφου πυριτίου, με ελάχιστη πυκνότητα κενών. Αυτές οι συνθήκες επιβάλλουν χαμηλούς ρυθμούς εναπόθεσης. Η διαλυτότητα του υδρογόνου φαίνεται να έχει μεγάλη επίδραση στις ιδιότητες του a – Si. Όμως, υψηλός ρυθμός διαλυτότητας του υδρογόνου συνοδεύεται από μια μείωση στο ρυθμό εναπόθεσης. Τυπικά, η πηγή διέγερσης από ένα πλάσμα VHF έχει συχνότητα στην περιοχή των 50 MHz. Η λειτουργία σε ένα τέτοιων εύρος συχνότητας οδηγεί σε υψηλότερους ρυθμούς εναπόθεσης.

Τέλος, για τις μεθόδους CVD είναι γενικά γνωστό ότι, σε χαμηλές θερμοκρασίες (<400°C) γενικά αποδίδονται λεπτόκοκκα (<0.1 μm) υμένια πυριτίου. Τα ηλιακά κύτταρα που κατασκευάζονται με τέτοια υμένια παρουσιάζουν παρεκκλίσεις, χαμηλή V_{oc} και χαμηλή συλλογή φορτίων. Έτσι, είναι επιτακτική η ανάγκη για ένα λεπτόκοκκο (ή άμορφου) υμένιο πυριτίου, σε ένα χαμηλού κόστους υπόστρωμα, να υποστεί ενίσχυση κόκκων από μια χαμηλής θερμοκρασίας διεργασία. Στον Πίν. 5.3 παρουσιάζεται μια σύνοψη των τεχνικών ενίσχυσης κόκκων που χρησιμοποιούνται σήμερα στους σχηματισμούς λεπτών υμενίων μc – Si. Η ενίσχυση κόκκων περιλαμβάνει τη μετακίνηση των ορίων των κόκκων σε μια προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί η ολική ενέργεια. Μια απλή προσέγγιση για να επιτευχθεί αυτό είναι η υλοποίηση μια υψηλής θερμοκρασίας ανόπτωσης. Παρόλα αυτά, τέτοιες θερμοκρασίες (>600°C) είναι ασύμβατες με τα χαμηλού κόστους υποστρώματα. Η θερμοκρασία της διεργασίας μπορεί, όμως, να μειωθεί σημαντικά από κατάλληλη επιλογή των ιδιοτήτων του υμενίου και των συνθηκών της διεργασίας.

Μέθοδος	Θερμοκρασία [°C]	Χρόνος διεργασίας	Επιμόλυνση μετάλλου
Ανάπτυξη CVD	1000	>10 h	Όχι
Ανόπτωση	500	20 – 40 h	Όχι
ZMR	1200	Γρήγορη	Όχι
MIC	<500	Γρήγορη	Σημαντική
LIC	>1000	Γρήγορη	Όχι

Πίν. 5.3: Μέθοδοι ενίσχυσης κόκκων και χαρακτηριστικά τους. LIC – Laser Induced Crystallization, MIC – Metal Induced Crystallization

Το φαινόμενο ανάπτυξης κόκκων σε έναν κρύσταλλο οφείλεται στην προσπάθεια του μετάλλου να ελαχιστοποιήσει την επιπλέον ελεύθερη ενέργεια Gibbs από την παρουσία των ορίων των κόκκων, ελαχιστοποιώντας τη συνολική επιφάνεια των ορίων των κόκκων. Τα όρια των κόκκων είναι μια δομή με υψηλότερη ενέργεια, σε συνθήκες μη ισορροπίας, σε σχέση με μια μονοκρυσταλλική δομή. Έτσι, οι τεχνικές που παρέχουν αρκετή ενέργεια για την κινητοποίηση των ορίων των κόκκων θα προκαλέσουν ενίσχυση των κόκκων.

5.12 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Τα ηλιακά κύτταρα λεπτού υμενίου πυριτίου ήταν μια ιδέα στην αρχή της τεχνολογίας ηλιακών κυττάρων, ως ένας πιθανός τρόπος μείωσης του απαιτούμενου υλικού για ένα αποδοτικό κύτταρο. Αν και αναγνωρίστηκε ότι η ποιότητα του υλικού που απαιτείται για ένα κύτταρο TF – Si δεν χρειάζεται να είναι πολύ υψηλή, οι πειραματικές εργασίες πρέπει να αναμένουν την πρόοδο σε δύο διαφορετικές περιοχές: (1) μια μέθοδο ανύψωσης για μονοκρυσταλλικά κύτταρα και (2) μια διεργασία χαμηλής θερμοκρασίας για εναπόθεση πολυκρυσταλλικού πυριτίου μεγάλων κόκκων πάνω σε χαμηλού κόστους υπόστρωμα. Εμφανώς, υπάρχει πολύ έρευνα να γίνει ακόμα, αν και ο χρονικός ορίζοντας της θεωρείται σχετικά μικρός. Εκτός από ερευνητικό ενδιαφέρον, αυτός ο τύπος κυττάρων παρουσιάζει και εμπορικό ενδιαφέρον. Παρόλα αυτά, υπάρχουν ακόμα αρκετά προβλήματα για να μπορέσουν αυτά τα κύτταρα να είναι στην κορυφή της αγοράς φωτοβολταϊκών.

Η χρήση του μc – Si φαίνεται να αποτελεί μεγάλο ενδεχόμενο, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε κάποιες από τις υπάρχουσες τεχνολογίες παραγωγής.

Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιήσει και ερευνητικά αποτελέσματα που ήδη υπάρχουν για το υλικό αυτό. Επειδή, το $\mu\text{c-Si}$ χρησιμοποιείται σήμερα στα παραδοσιακά κύτταρα a-Si για επαφές, υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον στη μελέτη της κινητικής των εναποθέσεων, της αλλαγής φάσης και των οπτικών και ηλεκτρονικών ιδιοτήτων του. Η απόδοση του συγκεκριμένου υλικού περιορίζεται από το μέγεθος των κόκκων. Οι υψηλότερες αποδόσεις λαμβάνονται για τη χρήση των σημειακών δομών, οι οποίες προσφέρουν το πλεονέκτημα της απόδοσης υψηλών ρευμάτων. Μεγαλύτερες τάσεις έχουν επιτευχθεί σε μίγματα φάσεων a-Si και $\mu\text{c-Si}$. Εξαιτίας των ομοιοτήτων αυτών των δύο υλικών, μπορεί να υπάρχουν και κοινά στοιχεία στην τεχνολογία των αντίστοιχων μονάδων.

Τα ηλιακά κύτταρα TF – Si θα συναγωνιστούν τελικά άλλα κύτταρα λεπτών υμενίων όπως τα CdTe ή CIGS (Cu(InGa)Se_2). Αν και το κόστος της διεργασίας στο πυρίτιο είναι χαμηλό, εντούτοις τα όρια των κόκκων στα άλλα υλικά είναι μηδαμινά, κάτι που τα κάνει εύκολα στην κατεργασία. Εμφανώς, υπάρχει αρκετή δουλειά που πρέπει να γίνει στον τομέα αυτό.

Τα κύτταρα TF – Si είναι μια ιδανική λύση για τη μείωση της χρήσης πυριτίου και της υψηλής απόδοσης με χαμηλό κόστος. Πολλά προβλήματα πρέπει να λυθούν προτού η τεχνολογία αυτή μπορεί να ανταγωνιστεί την ήδη υπάρχουσα τεχνολογία λεπτών υμενίων, αλλά το μέλλον των κυττάρων TF – Si είναι λαμπρό.

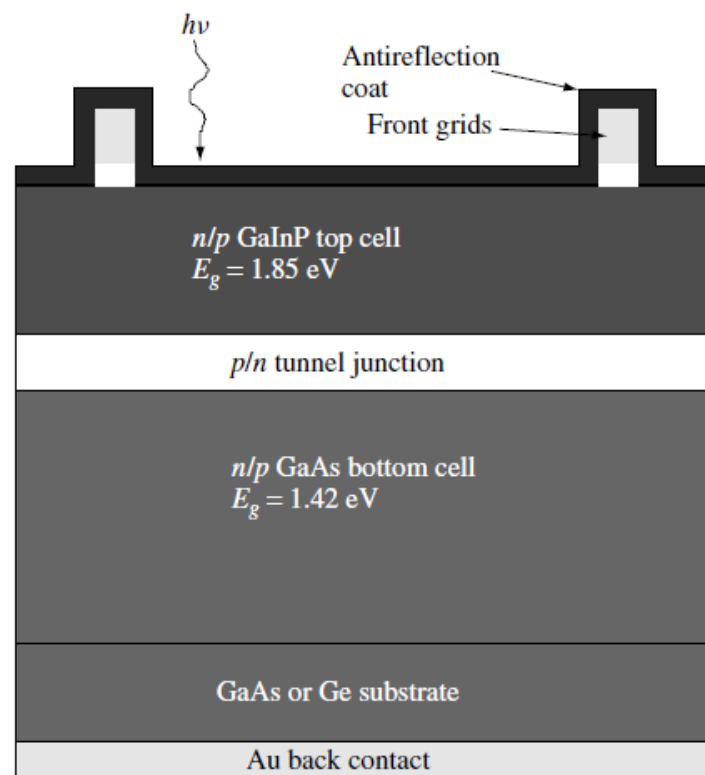
Κεφάλαιο 6^ο: Ηλιακά κύτταρα υψηλής απόδοσης III – V Πολλαπλών επαφών

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

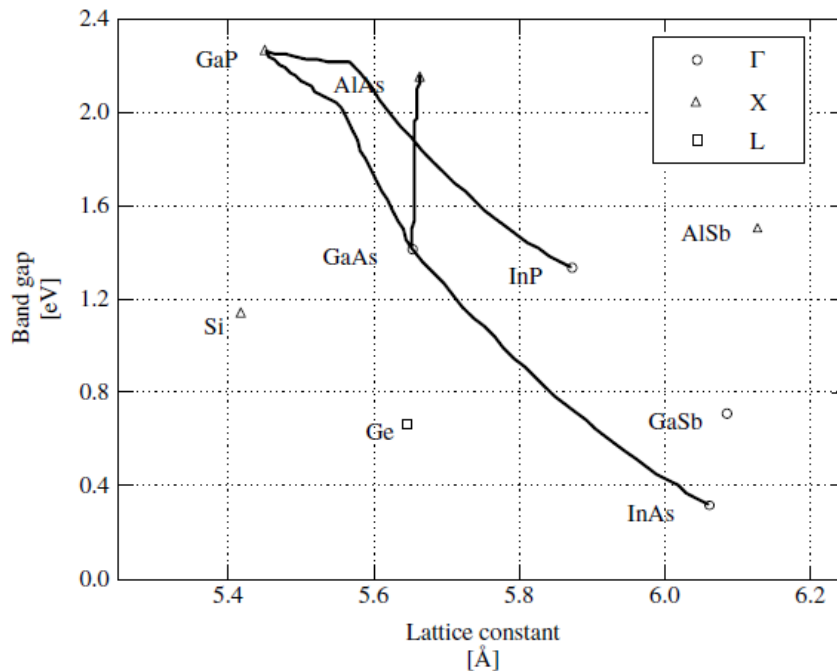
Η υψηλή χρήση των φωτοβολταϊκών είναι στις μέρες μας μια πραγματικότητα. Μικρής ισχύος (10 – 20 kW) συστήματα που χρησιμοποιούν ηλιακά κύτταρα ανταγωνίζονται σήμερα με τις ηλεκτρικές γεννήτριες ορυκτών καυσίμων για κινητές εφαρμογές, όπου ως κινητές ορίζονται οι εφαρμογές που μπορούν να κινούνται μια απόσταση μικρότερη από 1 km από την ηλεκτρική πηγή. Η ολική παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακά κύτταρα το έτος 2000 ήταν 0.3 GW, το μεγαλύτερο ποσοστό της οποίας προερχόταν από επίπεδα ηλιακά κύτταρα πυριτίου. Συγκρίνοντας με την ηλεκτρική παραγωγή των φωτοβολταϊκών της δεκαετίας του '80, αυτή η αύξηση σημειώνει σημαντική πρόοδο. Τα ηλιακά κύτταρα πυριτίου στις μέρες μας έχουν φτάσει σε αποδόσεις που ξεπερνούν το 20%, και το κόστος τους έχει μειωθεί κάτω από τα \$10/W. Παρόλα αυτά, σε σχέση με την παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας τα 0.3 GW είναι ένα ελάχιστο ποσοστό αυτής. Το πρόβλημα σχετίζεται με τη διαχυτική φύση της ηλιακής ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, για την παραγωγή 1 GW ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση ηλιακών κυττάρων πυριτίου, είναι απαραίτητη μια ανοικτή επιφάνεια της τάξης των 10^7 m². Το κύριο πρόβλημα δεν είναι όμως το εμβαδόν της επιφάνειας, αλλά το αποθαρρυντικό γεγονός ότι πρέπει να παραχθούν 10^7 m² αυτού που ονομάζεται ηλιακής τάξης πυρίτιο, το οποίο στην πραγματικότητα είναι μη διακριτό σε σχέση με το πυρίτιο ημιαγώγιμης τάξης. Μια λύση είναι η χρήση τεχνολογία συγκεντρωτών. Εδώ, φακοί ή καθρέφτες το ηλιακό φως σε ένα μικρότερο ηλιακό κύτταρο. Η αναλογία συκέντρωσης είναι τόσο μεγάλη όσο 200X με 300X για το πυρίτιο και 1000X με 2000X για τα ηλιακά κύτταρα GaAs. Σε αυτές τις αναλογίες συκέντρωσης, το κόστος του κυττάρου γίνεται λιγότερο σημαντικό από την απόδοσή του. Για παράδειγμα, ένα κύτταρο με διαδοχικές στρώσεις (υβριδικό κύτταρο) GaInP/GaAs/Ge, με απόδοση 34% σε 1000X και κόστος \$10/cm² μπορεί να είναι πιο αποδοτικό από άποψη κόστους από ένα κύτταρο πυριτίου με συγκεντρωτή με απόδοση 28% στα 200X και κόστος \$0.50/cm². Οι ισορροπίες αν και είναι σύνθετες και όχι καλά ποσοτικοποιημένες τώρα, φαίνεται ότι οι συγκεντρωτές φωτοβολταϊκών πρέπει να παίζουν σημαντικό ρόλο εάν τα φωτοβολταϊκά πρέπει να παρέχουν ένα σημαντικό μέρος της παγκόσμιας ενέργειας.

Σε αυτό το πλαίσιο πραγματοποιήθηκαν τη δεκαετία του '90 διεξοδικές έρευνες από το NREL πάνω σε υβριδικά κύτταρα GaInP/GaAs. Μια σχηματική αναπαράσταση του κυττάρου αυτού παρουσιάζεται στο Σχ. 6.1. Το κύτταρο αποτελείται από ένα άνω υποκύτταρο Ga_xIn_{1-x}P (με ένα ενεργειακό διάκενο περίπου ίσο με 1.8 – 1.9 eV) το οποίο αναπτύχθηκε μονολιθικά σε μια διασυνδεδετική επαφή σήραγγας με αντιστοίχιση πλέγματος, καθώς και ένα κάτω υποκύτταρο GaAs. Όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 6.2 για $x \approx 0.5$, το Ga_xIn_{1-x}P έχει την ίδια πλεγματική σταθερά όπως και το GaAs, με το ενεργειακό διάκενο να κυμαίνεται μεταξύ 1.8 και 1.9 eV. Πριν από αυτή την έρευνα, αρκετές ομάδες δούλευαν σε υβριδικές συσκευές που θεωρητικά μπορούσαν να επιτύχουν αποδόσεις που άγγιζαν το 36 – 40%. Αυτές περιλάμβαναν μηχανικές στοίβες, με μεγάλου ενεργειακού διακένου άνω υποκύτταρο, πάνω σε κάτω υποκύτταρο πυριτίου και μονολιθικούς συνδυασμούς AlGaAs,

GaAs και GaInAs ή GaAsP πάνω σε πυρίτιο. Παρόλα αυτά, οι μηχανικές αυτές στοίβες θεωρούνταν πολύ ακριβές και περίπλοκες (ίσως λίγο άδικα). Οι ατέλειες που προέκυπταν από την αναντιστοιχία πλέγματος μεταξύ του άνω και του κάτω υποκυττάρου σε μερικές μονολιθικές δομές ήταν ένα πρόβλημα που δεν μπορούσε να λυθεί εύκολα. Τα υβριδικά κύτταρα AlGaAs/GaAs είναι πλεγματικά αντίστοιχα με μια θεωρητική απόδοση του 36%. Παρόλα αυτά, η ευαισθησία του AlGaAs να εδχιχνιάζει τα επίπεδα του οξυγόνου σε όλα τα ανεπτυγμένα συστήματα καθώς και στα πηγαία υλικά το έκαναν δύσκολο να έχει υψηλή απόδοση, περιορίζοντας έτσι τη χρήση του σε παραγωγικά περιβάλλοντα. Η καινοτόμα ιδέα του NREL ήταν να ανταλλάξει την ευκολότερη κατεργασιμότητα για μια λίγο μικρότερη απόδοση της τάξης του 34%.

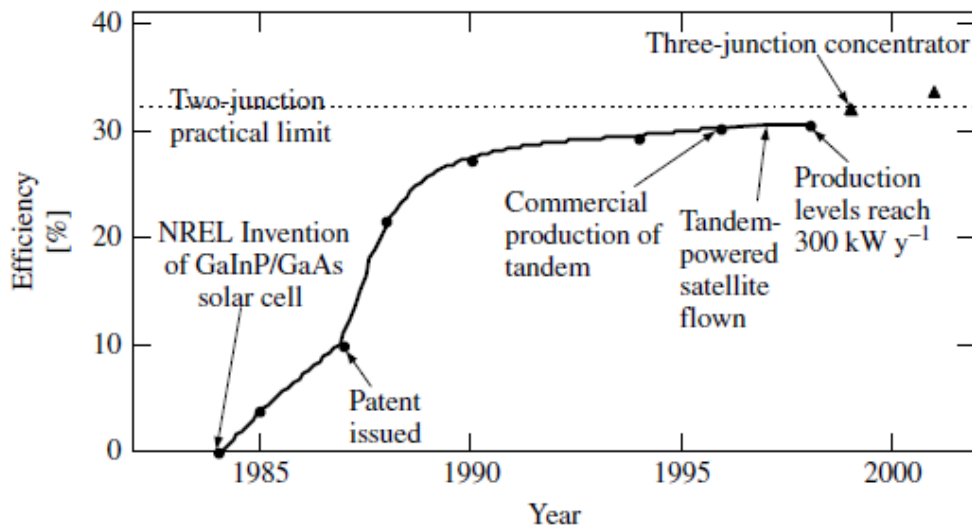


Σχήμα 6.1: Σχηματική αναπαράσταση του υβριδικού ηλιακού κυττάρου GaInP/GaAs. Όταν αναπτύσσεται σε υπόστρωμα Ge, υπάρχει η επιλογή να εισαχθεί και τρίτο υλικό στο υπόστρωμα Ge, και έτσι να ενισχυθεί η απόδοση τάσης από ολόκληρη τη συσκευή. Οι διαστάσεις που παρουσιάζονται δεν είναι ανάλογες του πραγματικού.



Σχήμα 6.2: Εκτιμώμενο ενεργειακό διάκενο συναρτήσει της πλεγματικής σταθεράς για Si, Ge, III – V ζεύγη και τα κράματά τους

Από άποψη συνθηκών, η διαδικασία ήταν γρήγορη (βλ. Σχ. 6.3). Παρόλα τα αρχικά προβλήματα με την ανάπτυξη του GaInP εξαιτίας μεταλλοργανικής χημικής εναπόθεσης ατμών (MetalOrganic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) και τις επιπλοκές που σχετίζονταν με μια ανώμαλη μετατόπιση προς το ερυθρό της ενέργειας του ενεργειακού διακένου, κατά το 1988 λογικά καλά άνω υποκύτταρα GaInP μπορούσαν να κατασκευαστούν. Το 1990, μεγαλύτερες αποδόσεις από 27%, σε συνθήκες ενός ήλιου και AM 1.5G, επιτεύχθηκαν απλά μεταβάλλοντας το πάχος του άνω υποκυττάρου ώστε να επιτευχθεί αντιστοιχία ρεύματος. Η συγκεκριμένη ρύθμιση του πάχους του άνω υποκυττάρου για την αντιστοίχιση ρεύματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε διαφορετικά ηλιακά φάσματα. Λόγω αυτού, τα επόμενα χρόνια το NREL έχεσε ρεκόρ στις συνθήκες AM 1.5 με αποδόσεις της τάξης του $\eta = 29.5\%$, σε 160 ήλιους AM 1.5D με απόδοση $\eta = 30.2\%$ και σε έναν ήλιο AM0 με $\eta = 25.7\%$. Σύντομα, πολλά εργαστήρια στον κόσμο μελέτησαν τις συγκεκριμένες συσκευές και το ρεκόρ 29.5% τελικά ξεπεράστηκε από τους ερευνητές του Japan Energy Corporation με μια απόδοση της τάξης 30.3%. Για τις διατάξεις αυτές τα σημερινά ρεκόρ απόδοσης περιγράφονται στον Πίν. 6.1.



Σχήμα 6.3: Ετήσιες αποδόσεις κυττάρων GaInP/GaAs σε συνθήκες ενός ήλιου με φάσμα AM 1.5 global. Τα τρίγωνα αντιπροσωπεύουν συγκεντρωμένο ηλιακό φως για τρεις επαφές για κύτταρα GaInP/GaAs/Ge

Κύτταρα	Απόδοση [%]	Επιφάνεια [cm ²]	Ένταση φωτός [# ήλιων]	Φάσμα	Περιγραφή
GaAs	25.1±0.8	3.9	1	Global	Korin, παράθυρο AlGaAs
GaAs (λεπτό υμένιο)	23.3±0.7	4.0	1	Global	Korin, 5 mm
GaAs (πολυκρυσταλλικό)	18.2±0.5	4.0	1	Global	Res. Triangle Inst. (RTI), υπόστρωμα Ge
InP	21.9±0.7	4.0	1	Global	Spire, επιταξιακό
GaInP/GaAs	30.3	4.0	1	Global	Japan Energy
GaInP/GaAs/Ge	28.7±1.4	29.93	1	Global	Spectrolab
Si	24.7±0.5	4.0	1	Global	UNSW, PERL
GaAs	27.6±1.0	0.13	255	Direct	Spire
GaInAsP	27.5±1.4	0.08	171	Direct	NREL, κάλυμμα ENTECH
InP	24.3±1.2	0.08	99	Direct	NREL, κάλυμμα ENTECH
GaInP/GaAs/Ge	32.4±2.0	0.1025	414	Direct	Spectrolab
GaAs/GaSb	32.6±1.7	0.053	100	Direct	Boeing, μηχανική στοίβα τεσσάρων

InP/GaInAs	31.8±1.6	0.063	50	Direct	στρώσεων NREL, μονολιθικό τριών στρώσεων
GaInP/GaAs	30.2±1.4	0.103	180	Direct	NREL, μονολιθικό Sunpower, με πίσω επαφή
Si	26.8±0.8	1.6	96	Direct	

Πίν. 6.1: Καταγεγραμμένες αποδόσεις ηλιακών κυττάρων. Παρεκτός κι αν αναφέρεται διαφορετικά, τα κύτταρα κατασκευάστηκαν από μονοκρυσταλλικά υλικά και οι μετρήσεις έγιναν σε κύτταρα δύο στρώσεων

Το 1994, ανακαλύφθηκε ότι τα υβριδικά κύτταρα GaInP/GaAs είχαν πολύ καλή ανοχή ακτινοβολίας για το χώρο εργασίας. Μια δημοσίευση δείχνει αποτελέσματα κυττάρου GaInP/GaAs με $\eta = 19.6\%$ (AM0) μετά από σκτινοβόληση με 1 MeV ηλεκτρονίων σε μια ροή των $10^{15} \text{ e}^-/\text{cm}^2$, μια πολύ συνηθισμένη δόση ακτινοβολίας για μετρήσεις τέτοιου τύπου. Αυτή η απόδοση ήταν υψηλότερη από την αντίστοιχη ενός νεόδμητου κυττάρου πυριτίου. Τα χαρακτηριστικά αυτά σύντομα προσέλκυσαν το ενδιαφέρον του εμπορικού τομέα. Η παραγωγή των GaInP/GaAs ηλιακών κυττάρων (σε υποστρώματα Ge) ξεκίνησε το 1996, και τα πρώτα GaInP/GaAs σε διαστημικούς δορυφόρους εγκαταστάθηκαν το 1997. Σήμερα, η παραγωγή ρεύματος τέτοιων υβριδικών κυττάρων ανέρχεται σε 0.5 MW/έτος.

6.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

6.2.1 ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ

Οι υψηλές αποδόσεις και η αντίσταση στην ακτινοβολία των III – V κυττάρων, τα κατέστησαν θελκτικά ως αντικαταστάτες πολλών κυττάρων πυριτίου σε δορυφόρους και διαστημικά οχήματα. Κατά την πάροδο των ετών, τα κύτταρα GaAs αντικατέστησαν τα κύτταρα πυριτίου στους νέους δορυφόρους. Τα κύτταρα GaInP/GaAs/Ge δομούνται σε μονάδες με παρόμοιους τρόπους με τα απλά GaAs (μονής επαφής) ηλιακά κύτταρα, ενώ διαθέτουν το επιπλέον πλεονέκτημα ότι λειτουργούν σε υψηλές τάσεις και σε χαμηλά ρεύματα και παράλληλα έχουν εξαιρετική αντίσταση ακτινοβολίας. Έχουν επίσης μικρότερο συντελεστή θερμοκρασίας από τα κύτταρα πυριτίου, άρα παρουσιάζουν καλύτερη επίδοση στις συνθήκες του διαστήματος.

6.2.2 ΧΕΡΣΑΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η βιομηχανία φωτοβολταϊκών σήμερα, εξυπηρετεί ένα μεγάλο εύρος χερσαίων εφαρμογών, από παραγωγή ισχύος για μικρά καταναλωτικά προϊόντα έως μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα. Τα ηλιακά κύτταρα III – V είναι προς το παρόν αρκετά ακριβά για τις περισσότερες εφαρμογές σε συνθήκες ενός ήλιου. Παρόλα αυτά, το επιπλέον αυτό κόστος θεωρείται αποδεκτό στις διαστημικές εφαρμογές, για να χερσαία εφαρμογή είναι απαραίτητη μια συγκέντρωση 400 ήλιων ή μεγαλύτερη, ώστε το κόστος να θεωρείται αποδεκτό.

Η χρήση κυττάρων GaInP/GaAs/Ge σε συστήματα υψηλών συγκεντρώσεων (π.χ. 1000X) έχουν τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρισμού με κόστος 7 cents/KWh. Η σημερινή παραγωγή ηλεκτρισμού από τα διαστημικά κύτταρα των περίπου 0.5 MW/έτος μεταφράζεται σε κατασκευή κυττάρων με συγκεντρωτές 1000X, τα οποία θα έχουν δυνατότητα παραγωγής αντίστοιχα 0.5 GW/έτος. Αυτά τα ηλιακά κύτταρα έχουν επιτύχει ρεκόρ απόδοσης 34%, μετρημένη σε συγκέντρωση 210X και συνθήκες φάσματος AM 1.5 global. Μια εξωτερική μονάδα έχει απόδοση με ένα γραμμικό συγκεντρωτή (χαμηλή συγκέντρωση) της τάξης του 25.5 με 29%. Η υψηλή απόδοση, το συνολικά χαμηλό κόστος και η ευκολία κατασκευής σε χερσαίες μονάδες θα μπορούσαν να κάνουν αυτά τα κύτταρα θελκτικά για τέτοιες εφαρμογές. Παρόλα αυτά, απαιτούνται αρκετές επενδύσεις από τη βιομηχανία για ένα αξιόπιστο τελικό προϊόν.

6.3 Η ΦΥΣΙΚΗ ΤΩΝ III – V ΗΛΙΑΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΠΑΦΩΝ ΚΑΙ ΑΠΛΩΝ ΕΠΑΦΩΝ

6.3.1 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΤΩΝ ΦΩΤΟΝΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

Για την καλύτερη κατανόηση του σχεδιασμού και της απόδοσης των υβριδικών κυττάρων, είναι χρήσιμο να ανασκοπηθούν σύντομα οι βασικοί παράγοντες που περιορίζουν την επίδοση των κυττάρων μονών επαφών. Υποτίθεται ιδανικό κύτταρο μονής επαφής με χαρακτηριστικό ενεργειακό διάκενο E_G . Ένα προσπίπτον φωτόνιο στο κύτταρο, με ενέργεια φωτονίου $h_\nu > E_G$ θα απορροφηθεί και θα μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια, αλλά η επιπλέον ενέργεια $h_\nu - E_G$ θα χαθεί με τη μορφή θερμότητας. Όσο μεγαλύτερη είναι η h_ν σε σχέση με το E_G , τόσο μικρότερο τμήμα της ενέργειας του φωτονίου θα μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Από την άλλη μεριά, ένα φωτόνιο ενέργειας $h_\nu < E_G$ δεν θα απορροφηθεί και δεν θα μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια, καθόλου. Έτσι, η βέλτιστη απόδοση θα εμφανίζεται όταν $h_\nu = E_G$. Σημειώνεται ότι, αυτή η βέλτιστη απόδοση είναι μικρότερη από 100%. Το μέγιστο έργο ανά απορροφημένο φωτόνιο, δίνεται από τη σχέση του Henry.

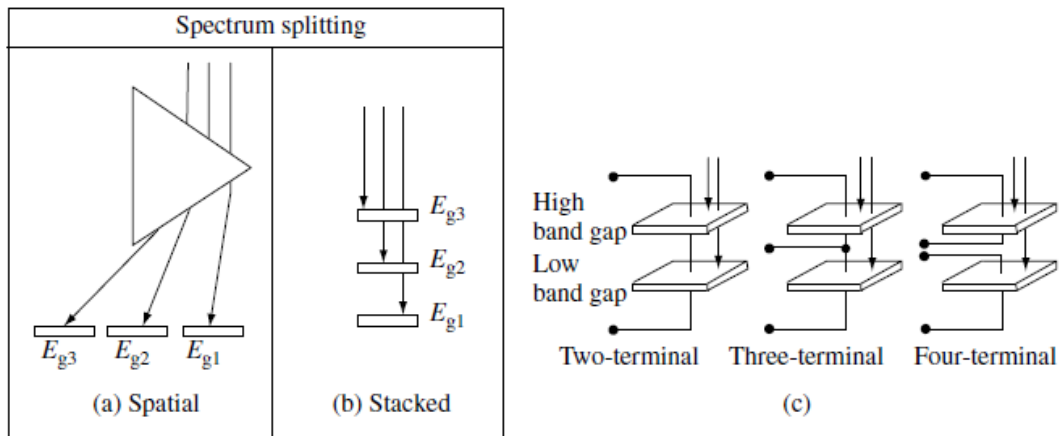
Εφόσον το ηλιακό φάσμα είναι ευρύ, δηλαδή περιέχει φωτόνια με ενέργειες σε εύρος από 0 έως 4 eV, τα ηλιακά κύτταρα μονών επαφών έχουν απόδοση, η οποία περιορίζεται σημαντικά σε σχέση με την απόδοση από τη μετατροπή μιας κατάλληλης μονοχρωματικής ακτινοβολίας. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι (κατ' αρχήν) απλή: από το να επιδιώκεται η μετατροπή όλων του φάσματος φωτονίων με ένα κύτταρο ενός ενεργειακού διακένου, είναι προτιμότερο να διαχωριστεί το φάσμα σε πολλαπλές περιοχές φάσματος, η καθεμία από τις οποίες θα μετατραπεί σε ένα κατάλληλη ρυθμισμένο για αυτή ηλιακό κύτταρο. Για παράδειγμα υποτίθεται ένα φάσμα το οποίο είναι χωρισμένο σε τρεις περιοχές: $h_{\nu_1} - h_{\nu_2}$, $h_{\nu_2} - h_{\nu_3}$ και $h_{\nu_3} - \infty$, με $h_{\nu_1} < h_{\nu_2} < h_{\nu_3}$. Το φως αυτών των φασματικών περιοχών θα μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια από κύτταρα με ενεργειακά διακένια $E_{G1} = h_{\nu_1}$, $E_{G2} = h_{\nu_2}$ και $E_{G3} = h_{\nu_3}$, αντίστοιχα. Όσο μεγαλύτερος επιτρέπεται να είναι ο αριθμός των φασματικών περιοχών, τόσο μεγαλύτερη είναι η δυνατή συνολική απόδοση.

6.3.2 ΘΕΩΡΗΤΙΑ ΟΡΙΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΠΑΦΩΝ

Η σχέση του Henry υπολογίζει τις περιορισμένες αποδόσεις ενός ήλιου για μετατροπές με 1, 2,3 και 36 ενεργειακά διάκενα. Οι αντίστοιχες αποδόσεις είναι 37, 50, 56 και 72%. Η βελτίωση στην απόδοση κατά τη μετάβαση από το ένα στα δύο ενεργειακά διάκενα είναι σημαντική, αλλά σταδιακά εκφυλίζεται όσο προστίθενται ενεργειακά διάκενα. Αυτό είναι ευτυχές, καθότι πρακτικά μια συσκευή με περισσότερες από τέσσερις ή πέντε επαφές είναι αμφίβολη ως προς τη βιωσιμότητά της. Σημειώνεται ότι η αυξημένη απόδοση κατά τη χρήση πολλαπλών επαφών είναι μόνο δυνατή, εφόσον τα ενεργειακά διάκενα κάθε επαφής έχουν επιλογή κατάλληλα σε σχέση με το μετατρεπόμενο φάσμα. Για την κατανόηση των περιορισμών των συσκευών πολλαπλών επαφών χρησιμοποιούνται οι κανόνες της θερμοδυναμικής.

6.3.3 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ

Η προσέγγιση πολλαπλών επαφών απαιτεί τα προσπίπτοντα φωτόνια να κατευθύνονται στην επαφή που έχει ρυθμιστεί για την αντίστοιχη ενέργεια φωτονίου. Πιθανόν, η λογικά απλούστερη προσέγγιση θα ήταν η χρήση ενός οπτικά διασπειρόμενου στοιχείου, όπως ενός πρίσματος, ώστε να κατανεμηθούν χωρικά σε διαφορετικές τοποθεσίες φωτόνια με διαφορετικές ενέργειες, όπου στις τοποθεσίες αυτές θα βρίσκονταν τα κατάλληλα, για τη συλλογή των φωτονίων αυτών, κύτταρα. Η συγκεκριμένη προσέγγιση παρουσιάζεται στο Σχ. 6.4(a). Παρόλο που είναι λογικά απλή η συγκεκριμένη προσέγγιση, στην πράξη και μηχανικές και οπτικές περιπλοκότητες του συγκεκριμένου σχεδίου, το καθιστούν μη επιθυμητό στις περισσότερες περιπτώσεις. Μια γενικά επιθυμητή προσέγγιση είναι η κατανομή των κυττάρων σε στοίβα, όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 6.4(b), όπου στη διάταξη αυτή το φως του ήλιου χτυπά την στρώση με το μεγαλύτερο ενεργειακό διάκενο αρχικά και στη συνέχεια οδεύει σε ολοένα χαμηλότερα ενεργειακά διάκενα, σε κάθε διαδοχική επαφή. Αυτή η διάταξη εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι οι επαφές λειτουργούν ως χαμηλοπερατά ενεργειακά φίλτρα φωτονίων, αφήνοντας μόνο το υποενεργειακό (με ενέργεια κάτω από αυτή του ενεργειακού διακένου) φως. Έτσι, στο Σχ. 6.4(b), τα φωτόνια με $h\nu > E_{G3}$ απορροφούνται από τη συγκεκριμένη επαφή, τα φωτόνια με $E_{G2} < h\nu < E_{G3}$ απορροφούνται από την επαφή E_{G2} κ.ο.κ.. Με άλλα λόγια, οι ίδιες οι επαφές λειτουργούν ως οπτικά στοιχεία για την κατανομή του φάσματος στις κατάλληλες επαφές για μια φωτομετατροπή πολλαπλών επαφών. Τα ενεργειακά διάκενα πρέπει να μειώνονται από την κορυφή προς τον πάτο της στοίβας. Η διάταξη στοίβας αποφεύγει την ανάγκη για ένα ξεχωριστό στοιχείο, όπως ένα πρίσμα, για την κατανομή του φάσματος. Επίσης, ακόμα και αν οι επαφές είναι φυσικά ξεχωριστές ή μια από την άλλη, μπορούν να συνενωθούν μηχανικά σε ένα πιο συμπαγές κύτταρο, που ονομάζεται μηχανική στοίβα. Η διάταξη στοίβας προϋποθέτει, βέβαια, ότι όλες οι επαφές, πλην της τελευταίας (της πιο κάτω), είναι διάφανες για το φως κάτω από το ενεργειακό διάκενό τους, το οποίο, στην πράξη, μπορεί να θέσει προκλητικούς περιορισμούς στα υποστρώματα και της μεταλλοποιήσεις πίσω επαφών των συγκεκριμένων κυττάρων, μέσω των οποίων των υποενεργειακό φως θα πρέπει να περάσει. Μια καλαίσθητη λύση σε αυτό το πρόβλημα, η οποία παρουσιάζει και μια πληθώρα άλλων πλεονεκτημάτων επίσης, είναι η κατασκευή όλων των επαφών, καθεμιάς πάνω από την προηγούμενη, μονολιθικά σε ένα απλό υπόστρωμα.



Σχήμα 6.4: Σχηματική αναπαράσταση: (α) Χωρικής διάταξης προσέγγιση και (β) προσέγγιση διάταξης στοίβας για τη διανομή φωτός στα διάφορα υποκύτταρα διαφορετικών ενεργειακών διακένων. (c) Αναπαράσταση σύνδεσης δύο, τριών και τεσσάρων ακροδεκτών σε ένα κύτταρο δύο επαφών. Στη συγκεκριμένη εικόνα παρουσιάζεται ότι τα υποκύτταρα είναι μηχανικά ξεχωριστά, αλλά οι συσκευές δύο, τριών και τεσσάρων ακροδεκτών μπορούν να είναι μονολιθικές

6.4 ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΥΤΤΑΡΩΝ

6.4.1 ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΑΚΡΟΔΕΚΤΩΝ

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να συνδεθούν τα καλώδια τροφοδοσίας με τις επαφές που αποτελούν μια στοίβα πολλαπλών επαφών. Αυτές οι διατάξεις, οι οποίες παρέχουν για διάφορους βαθμούς ηλεκτρικής μόνωσης των υποκυττάρων (βλ Σχ. 6.4(c)) μια στοίβα δύο επαφών. Στη διάταξη τεσσάρων ακροδεκτών, κάθε υποκύτταρο έχει τους δικούς του δύο ακροδέκτες και είναι ηλεκτρικά μονωμένο από τα άλλα υποκύτταρα. Η συγκεκριμένη διάταξη έχει το πλεονέκτημα ότι δεν θέτει κανένα περιορισμό σε σχέση με τις πολικότητες (p/n vs. n/p) των υποκυττάρων, ούτε στις τάσεις ή τα ρεύματα. Παρόλα αυτά, οι ακροδέκτες και οι ηλεκτρικές μονώσεις μεταξύ των υποκυττάρων στη διάταξη τεσσάρων ακροδεκτών θα ήταν πολύ δύσκολο να επιτευχθούν μονολιθικά, αφού προϋποθέτουν μια περίπλοκη δομή κυττάρου και επεξεργασίας. Γενικά, μια συσκευή τεσσάρων ακροδεκτών είναι, από ανάγκη, μια μηχανική στοίβα, της οποίας η περιπλοκότητα κατασκευής και συναρμολόγησης την καθιστά μια σημαντικά λιγότερο επιθυμητή δομή από τις μονολιθικές συσκευές.

6.4.2 ΤΡΙΩΝ ΑΚΡΟΔΕΚΤΩΝ, ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΣΜΕΝΗΣ ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

Σε αντίθεση, στις διατάξεις τριών ακροδεκτών, τα υποκύτταρα δεν είναι ηλεκτρικά μονωμένα. Το κάτω μέρος καθενός εξ αυτών είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένο με το άνω μέρος του αμέσως από κάτω υποκυττάρου. Η κατασκευή μιας μονολιθικής συσκευής τριών ακροδεκτών είναι σχετικά άμεση, αν και πιο περίπλοκη από την κατασκευή μιας συσκευής δύο ακροδεκτών. Η ημιαγωγική δομή πρέπει να είναι σχεδιασμένη για να παρέχει μια στρώση ως επαφή με τον ενδιάμεσο ακροδέκτη και για να διευκολύνουν τα κατασκευαστικά στάδια που είναι απαραίτητα για να τοποθετηθεί ο ενδιάμεσος ακροδέκτης στην κατάλληλη θέση. Με αυτόν τον ενδιάμεσο ακροδέκτη, τα διαφορετικά υποκύτταρα στη στοίβα δεν χρειάζεται να έχουν ίδια φωτορεύματα. Επιπλέον, σε αυτή τη

διάταξη τριών ακροδεκτών, τα διαφορετικά υποκύτταρα στη στοιβία μπορεί να έχουν διαφορετικές πολικότητες, για παράδειγμα p/n για το άνω υποκύτταρο και n/p για το κάτω υποκύτταρο. Οι διασυνδέσεις για τα επίπεδα μονάδων, στις συσκευές τεσσάρων και τριών ακροδεκτών, θέτουν ξεχωριστό ερευνητικό υπόβαθρο.

6.4.3 ΔΥΟ ΑΚΡΟΔΕΚΤΩΝ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΗ ΣΕ ΣΕΙΡΑ (ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ)

Οι δύο ακροδεκτών διασυνδεδεμένες εν σειρά διατάξεις παρέχουν τους περισσότερους περιορισμούς για τη διασύνδεση των συσκευών. Η συγκεκριμένη διάταξη προϋποθέτει τα υποκύτταρα να έχουν την ίδια πολικότητα και τα φωτορεύματα των υποκυττάρων να είναι καλά αντιστοιχισμένα, αφού στην εν σειρά σύνδεση το υποκύτταρο με το μικρότερο φωτορέυμα περιορίζει την παραγωγή ολόκληρου του κυττάρου. Αυτός ο περιορισμός αντιστοίχισης ρεύματος, θέτει σχετικά αυστηρούς περιορισμούς στην εκλογή των ενεργειακών διακένων των διαφόρων επαφών σε αυτή τη δομή. Ενάντια σε αυτά τα μειονεκτήματα, παρόλα αυτά, παρουσιάζονται κρίσιμα πλεονεκτήματα. Η ύπαρξη υψηλής ποιότητας, μονολιθικών υποκυτταρικών διασυνδέσεων επαφών – σιηράγγων υποδεικνύει ότι αυτές οι στοιβες μπορούν να κατασκευαστούν ως μονολιθικές δομές δύο ακροδεκτών, με μεταλλοποίηση των άνω και κάτω επιφανειών της στοιβας, μόνο. Αυτό με τη σειρά του σημαίνει ότι τέτοιες συσκευές μπορούν να μετατραπούν σε μονάδες με την ίδια ευκολία όπως και στις συσκευές μονών επαφών.

6.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΝ ΣΕΙΡΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ

6.5.1 QE ΚΑΙ J_{sc} ΑΝΩ ΚΑΙ ΚΑΤΩ ΥΠΟΚΥΤΤΑΡΟΥ

Η πυκνότητα ρεύματος βραχυκύκλωσης (J_{sc}) κάθε υποκυττάρου καθορίζεται από την κβαντική απόδοση αυτού ($QE(\lambda)$) και από το φάσμα του προσπίπτοντος φωτός σε αυτό το κύτταρο $\Phi_{inc}(\lambda)$, σύμφωνα με τη σχέση:

$$J_{sc} = e \cdot \int_0^{\infty} QE(\lambda) \cdot \Phi_{inc}(\lambda) \cdot d\lambda$$

Η QE για ένα ιδανικό κύτταρο με πεπερασμένο πάχος βάσης x_b , πάχος εκπομπού x_e και πλάτος κένωσης W (δηλαδή με τελικό πάχος $x = x_e + W + x_b$) δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$QE = QE_{emitter} + QE_{depl} + e^{-a \cdot (x_e + W)} \cdot QE_{base}$$

όπου

$$QE_{emitter} = f_a(L_e) \cdot \left(\frac{l_e + a \cdot L_e - e^{-a \cdot x_e} \cdot [l_e \cdot \cosh(x_e/L_e) + \sinh(x_e/L_e)]}{l_e \cdot \sinh(x_e/L_e) + \cosh(x_e/L_e)} - a \cdot L_e \right) \cdot e^{-a \cdot x_e}$$

$$QE_{depl} = e^{-a \cdot x_e} \cdot (1 - e^{-a \cdot W})$$

$$QE_{base} = f_a(L_b) \cdot \left(a \cdot L_b - \frac{(a \cdot L_b - l_b) \cdot e^{-a \cdot x_e} + l_b \cdot \cosh(x_b/L_b) + \sinh(x_b/L_b)}{l_b \cdot \sinh(x_b/L_b) + \cosh(x_b/L_b)} \right)$$

$$l_b = S_b \cdot L_b / D_b, l_e = S_e \cdot L_e / D_e, D_b = k \cdot T \cdot \mu_b / e, D_e = k \cdot T \cdot \mu_e / e$$

$$f_a(L) = \frac{a \cdot L}{(a \cdot L)^2 - 1}$$

Η εξάρτηση από το μήκος κύματος δεν είναι σαφής σε αυτές τις εξισώσεις, αλλά υπεισέρχεται διαμέσου της εξάρτησης από το μήκος κύματος που έχει ο συντελεστής απορρόφησης $\alpha(\lambda)$. Οι ποσότητες $\mu_{b(e)}$, $L_{b(e)}$ και $S_{b(e)}$ είναι αντίστοιχα η κινητικότητα, το μήκος διάσχυσης και η ταχύτητα επιφανειακού ανασυνδυασμού για τα φορτία μειονότητας στη βάση (εκπομπός). Το T είναι η απόλυτη θερμοκρασία. Ανάλογα με την περίπτωση που μελετάται οι παραπάνω εξισώσεις μπορεί να αποδώσουν είτε πολύ σύνθετες εκφράσεις της J_{sc} (υβριδικά κύτταρα III – V), είτε λιγότερο περίπλοκες (ιδανικά υβριδικά κύτταρα).

6.5.2 ΚΑΜΠΥΛΕΣ I – V ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΚΥΤΤΑΡΩΝ

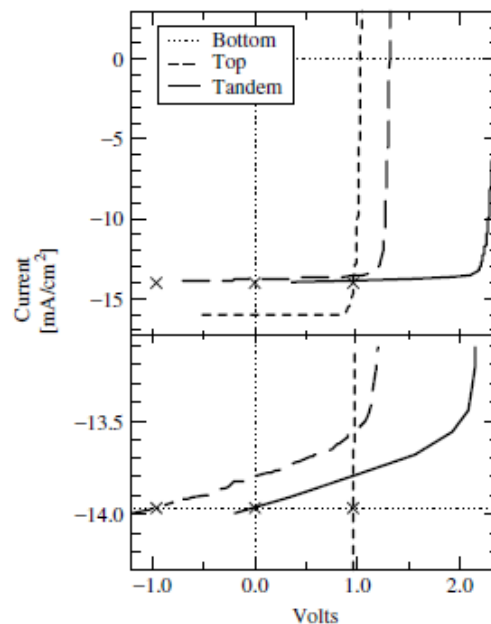
Για ένα σύνολο από m εν σειρά συνδεδεμένων υποκυττάρων (ή οποιουδήποτε είδους στοιχείων ή συσκευών με δύο ακροδέκτες) των οποίων οι μεμονωμένες καμπύλες ρεύματος – τάσης (I – V) δίνονται από τη $V_i(I)$ για την i – επαφή, η καμπύλη I – V για το εν σειρά σύνολο δίνεται από τη σχέση:

$$V(I) = \sum_{i=1}^m V_i(I)$$

Δηλαδή για δεδομένη τιμή του ρεύματος, η συνολική τάση είναι το άθροισμα όλων των επιμέρους τάσεων των υποκυττάρων στην τιμή αυτή του ρεύματος. Κάθε ξεχωριστό υποκύτταρο θα έχει το δικό του μέγιστο σημείο ισχύος $\{V_{mp_i}, I_{mp_i}\}$, το οποίο μεγιστοποιεί το γινόμενο $I \times V_i(I)$. Όμως, κατά την εν σειρά σύνδεση πολλαπλών επαφών των συγκεκριμένων υποκυττάρων, τα ρεύματα διαμέσου καθενός από τα υποκύτταρα περιορίζονται στο να έχουν την ίδια τιμή, και έτσι κάθε υποκύτταρο θα είναι σε θέση να λειτουργεί στο μέγιστο σημείο ισχύος μόνο εάν το I_{mp_i} είναι το ίδιο για όλα τα υποκύτταρα, δηλαδή, $I_{mp_1} = I_{mp_2} = \dots = I_{mp_m}$. Στην περίπτωση αυτή, τότε η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς της συσκευής πολλαπλών επαφών είναι το άθροισμα των μέγιστων αποδιδόμενων ισχύων κάθε υποκυττάρου. Από την άλλη μεριά, αν δεν έχουν όλα τα υποκύτταρα την ίδια τιμή για το I_{mp_i} , τότε αναγκαστικά κάποια από τα υποκύτταρα θα λειτουργούν σε διαφορετικό σημείο από το σημείο μέγιστης ισχύος τους.

Οι συνέπειες αυτού του τελευταίου σημείου είναι ιδιαίτερα σημαντικές όταν, όπως στην περίπτωση των υψηλής ποιότητας III – V επαφών, τα υποκύτταρα δεν διαρρέουν ούτε καταστρέφονται γρήγορα σε αντίστροφο δυναμικό πόλωσης. Η προσθήκη καμπυλών I – V των εν σειρά υπόκυτταρων στην περίπτωση αυτή, απεικονίζεται στο Σχ. 6.5, το οποίο

δείχνει τις καμπύλες $I - V$ για ένα άνω υποκύτταρο GaInP, ένα κάτω υποκύτταρο GaAs και τον δύο ακροδεκτών εν σειρά συνδεδεμένου συνδυασμού τους. Στο παράδειγμα αυτό, το κάτω υποκύτταρο έχει μια υψηλότερη J_{SC} από το άνω υποκύτταρο. Το κάτω υποκύτταρο παρεκκλίνει λίγο, ούτως ώστε η απεικόνιση της συμπεριφοράς της J_{SC} του συνδυασμού να μπορεί να φαίνεται καλύτερα. Για οποιαδήποτε τιμή ρεύματος, η τάση του συνδυασμού ακολουθεί τη σχέση $V_{tandem} = V_{top} + V_{bottom}$, όπως μπορεί να εξακριβωθεί εξετάζοντας το Σχ. 6.5. Η περιοχή του ρεύματος γύρω από το συνδυασμένο κύτταρο με $J_{SC} = -14 \text{ mA/cm}^2$, που παρουσιάζεται σε διευρυμένη κλίμακα στο κάτω μέρος του Σχ. 6.5 παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Σε $I = -13.5 \text{ mA/cm}^2$, και τα δύο υποκύτταρα έχουν ευθεία πόλωση, με τάσεις μόνο κατά λίγο μικρότερες από τις αντίστοιχες τάσεις ανοικτοκύκλωσης (V_{OC}). Όσο το μέγεθος της πυκνότητας ρεύματος αυξάνεται περεταίρω σε -14 mA/cm^2 και πάνω, το κάτω υποκύτταρο παραμένει σε ευθεία πόλωση κοντά στη V_{OC} του. Την ίδια στιγμή, αντίθετα, το άνω υποκύτταρο εμφανίζει τάση η οποία γίνεται γρήγορα πολύ πιο αρνητική, ώστε στο σημείο όπου $I = -14 \text{ mA/cm}^2$, φτάνει μια αρνητική πόλωση περίπου ίση με -1 V , ίση δηλαδή σε μέγεθος αλλά αντίθετου πρόσημου με την ορθή πόλωση του άνω υποκυττάρου που είναι $+1 \text{ V}$. Στην τιμή αυτή του ρεύματος, το συνδυασμένο κύτταρο έχει μηδενική πόλωση και άρα και J_{SC} . Η συμπεριφορά αυτή αναπαριστά την γενική αρχή ότι για υποκύτταρα χωρίς σημαντικές διαρροές ή καταρρεύσεις αντίστροφης πόλωσης, η συνδυασμένη J_{SC} περιορίζεται να είναι, σε καλή προσέγγιση, μικρότερη από τις J_{SC} s των υποκυττάρων. Σημειώνεται ότι λόγω αυτής της συμπεριφοράς, τα υβριδικά κύτταρα θεωρούνται σημαντικά χειρότερα από τα αντίστοιχα κύτταρα μονών επαφών, για τη μετατροπή ακτινοβολιών στενού φάσματος, όπως στην περίπτωση της ακτινοβολίας ενός laser.



Σχήμα 6.5: Αναπαράσταση της άθροισης των καμπυλών $I - V$ για δύο εν σειρά συνδεδεμένα υποκύτταρα. Το κάτω μέρος του διαγράμματος είναι μια μεγαλύτερης κλίμακας μεγέθυνση του άνω μέρους σε μια συγκεκριμένη περιοχή του ρεύματος. Σημειώνεται ότι το άνω υποκύτταρα έχει ελαφρά περισσότερες διαρροές από το κάτω. Τα Χ υποδηλώνουν σε κάθε διάγραμμα το σημείο της βραχυκύκλωσης σε $I = -14 \text{ mA/cm}^2$

Για τη μοντελοποίηση των υβριδικών συσκευών ποσοτικά, απαιτούνται εκφράσεις για τις καμπύλες $I - V$ των υποκυττάρων, $V_i(I)$. Για την υλοποίηση αυτών, χρησιμοποιείται η εξίσωση $I - V$ της ιδανικής φωτοδιόδου (που δεν λαμβάνει υπ' όψιν την περιοχή κένωσης), η οποία είναι:

$$I = I_0 \cdot \left(e^{eV/kT} - 1 \right) - J_{SC}$$

όπου e είναι το ηλεκτρικό φορτίο και θεωρείται ότι ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου είναι 1. Μια σημαντική ειδική περίπτωση αυτού είναι:

$$V_{OC} \approx \frac{kT}{e} \cdot \ln \frac{J_{SC}}{I_0}$$

αφού, στην πράξη $J_{SC}/I_0 \gg 1$. Η πυκνότητα σκοτεινών ρευμάτων I_0 δίνεται από τη σχέση:

$$I_0 = I_{0,base} + I_{0,emitter}$$

όπου

$$I_{0,base} = e \cdot \left(\frac{D_b}{L_b} \right) \cdot \left(\frac{n_i^2}{N_b} \right) \cdot \left(\frac{S_b \cdot L_b / D_b + \tanh(x_b / L_b)}{S_b \cdot L_b / D_b \cdot \tanh(x_b / L_b) + 1} \right)$$

και παρόμοια είναι και η εξίσωση που περιγράφει τη $I_{0,emitter}$. Η εγγενής συγκέντρωση φορτίων n_i δίνεται από τη σχέση:

$$n_i^2 = 4M_C M_V \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 \cdot (m_e^* m_h^*)^{3/2} \cdot e^{-E_G/kT}$$

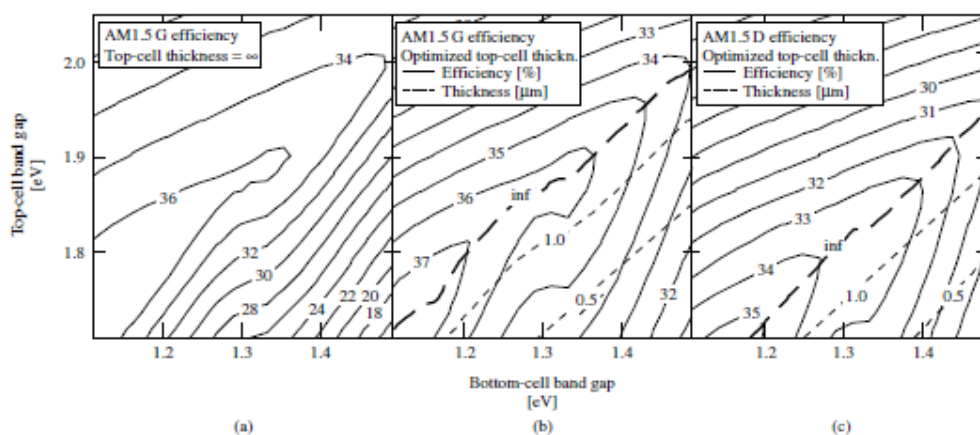
όπου m_e^* και m_h^* είναι οι ενεργές μάζες των ηλεκτρονίων και των οπών αντίστοιχα, και M_C και M_V είναι ο αριθμός των ισοδύναμων ελάχιστων στα εύρη επαγωγής και σθένους, αντίστοιχα. Τα N_b και N_e είναι αντίστοιχα η πυκνότητα ιονισμένων επιμολύνσεων της βάσης και του εκπομπού, αντίστοιχα.

Κάθε επαφή σε μια υβριδική δομή περιγράφεται από τις παραπάνω εξισώσεις. Η i επαφή θα έχει σκοτεινά ρεύματα $I_{0,i}$, ρεύμα βραχυκύκλωσης $J_{SC,i}$ κλπ με μια αντίστοιχη χαρακτηριστική καμπύλη $I - V$, από τη σχέση $V_i(I)$. Αθροίζοντας αυτές τις καμπύλες $V_i(I)$ κάθε διακριτής επαφής, προκύπτει η πλήρης $V(I)$ καμπύλη για το υβριδικό κύτταρο. Το σημείο μέγιστης ισχύος $\{I_{mp}, V_{mp}\}$ μπορεί να υπολογιστεί αριθμητικά στο σημείο της καμπύλης $V(I)$, όπου το γινόμενο $I \times V(I)$ γίνεται μέγιστο. Οι υπόλοιπες λειτουργικές παράμετροι του ηλιακού κυττάρου, μπορούν να υπολογιστούν από το διάγραμμα $I - V$ κατά τα γνωστά, δηλαδή $V_{OC} = V(0)$ και $FF = I_{mp} V_{mp} / (V_{OC} I_{SC})$.

6.5.3 ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΔΙΑΚΕΝΟ

Για τη λήψη στέρεων αριθμητικών τιμών της απόδοσης του κυττάρου, απαιτείται η επιλογή των ιδιοτήτων του υλικού των επαφών. Επιλέγεται ένα τυπικό μοντέλο ενός κυττάρου δύο επαφών n/p , στο οποίο η κάτω επαφή έχει τις ιδιότητες του GaAs, εκτός από το ενεργειακό διάκενο, το οποίο μπορεί να ποικίλει. Η συντελεστής απορρόφησης μεταβάλλεται στέρεα

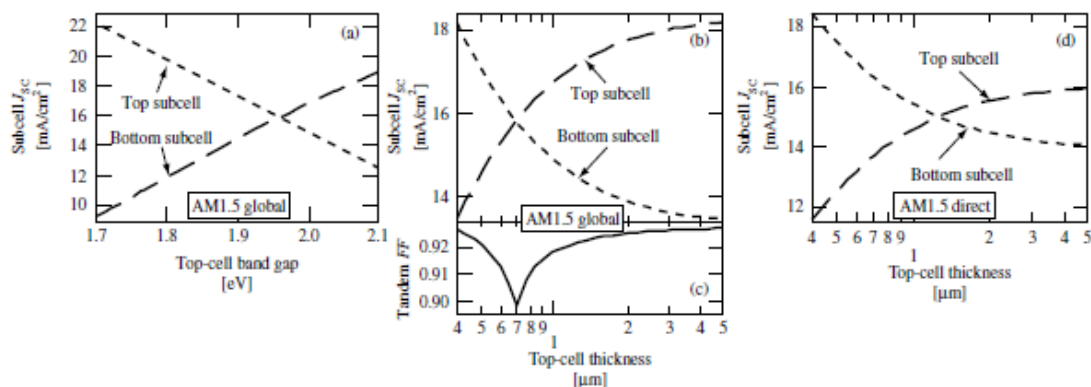
σε σχέση με το ενεργειακό διάκενο, ώστε αυτό να μηδενίζεται όταν η ενέργεια του φωτονίου είναι χαμηλότερη από το επίπεδο του ενεργειακού διακένου. Ομοίως, για το άνω υποκύτταρο, το μοντέλο που χρησιμοποιείται έχει τις ιδιότητες του GaInP, και πάλι με τη δυνατότητα μεταβολής του ενεργειακού διακένου. Το μήκος διάχυσης για θερμοκρασία 300 K για το κύτταρο GaAs είναι $L_b = 17 \mu\text{m}$ (βάση) και $L_e = 0.8 \mu\text{m}$ (εκπομπός). Για το κύτταρο GaInP το $L_b = 3.7 \mu\text{m}$ (βάση) και το $L_e = 0.6 \mu\text{m}$ (εκπομπός). Για λόγους απλότητας, και για να αποδοθούν αποτελέσματα τα οποία αντιστοιχούν στη μέγιστη δυνατή απόδοση, όλοι οι επιφανειακοί ανασυνδυασμοί θεωρούνται μηδενικοί. Οι εκπομποί και για τα δύο υποκύτταρα έχουν πάχος $x_e = 0.1 \mu\text{m}$ και συγκέντρωση ιονισμένου ντοπαρίσματος $N_e = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, ενώ οι βάσεις και για τα δύο υποκύτταρα έχουν $N_b = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Αυτές οι τιμές είναι συγκρίσιμες με αυτές που χρησιμοποιούνται σε πραγματικά υβριδικά κύτταρα GaInP/GaAs, οι οποίες παρέχουν έναν ιδανικό συνδυασμό της υψηλής κβαντικής απόδοσης, της χαμηλών σκοτεινών ρευμάτων και της χαμηλής σειριακής αντίστασης. Με χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου, λαμβάνονται οι απεικονίσεις που παρουσιάζονται στο Σχ. 6.6(a), οι οποίες δείχνουν την απόδοση ενός εν σειρά συνδεδεμένου κυττάρου δύο επαφών, με ένα απείρως παχιά υποκύτταρα, και με βάση ένα φάσμα σε συνθήκες AM 1.5 global ενός ήλιου. Παρόμοιες απεικονίσεις παρουσιάζονται για μια ποικιλία άλλων φασμάτων και σε διάφορες συνθήκες με βάση άλλες έρευνες. Στον ιδανικό συνδυασμό ενεργειακού διακένου με $\{E_{Gt} = 1.75 \text{ eV}, E_{Gb} = 1.13 \text{ eV}\}$, η απόδοση που υπολογίζεται φτάνει σχεδόν στο 38%, πολύ παραπάνω από μια απόδοση 29%, όπως το μοντέλο θα υποδείκνυε για τις βέλτιστες μονών επαφών συσκευές.



Σχήμα 6.6: Απεικονίσεις της απόδοσης συναρτήσει του ενεργειακού διακένου του υποκυττάρου για ένα συνδυασμένο κύτταρο δύο επαφών και δύο ακροδεκτών που είναι εν σειρά συνδεδεμένα. Το παράθυρο (a) υπολογίζεται για συνθήκες φάσματος AM 1.5 global, με ένα απείρως παχύ άνω υποκύτταρο. Το παράθυρο (b) υπολογίζεται για το ίδιο φάσμα, αλλά για ένα πάχος άνω υποκυττάρου που βελτιστοποιεί την απόδοση του συνδυασμένου κυττάρου σε κάθε συνδυασμό ενεργειακών διακένων άνω και κάτω υποκυττάρου. Το παράθυρο (c) δείχνει τις αποδόσεις και το βέλτιστο πάχος άνω υποκυττάρου υπολογισμένο στις ίδιες συνθήκες με το (b) αλλά για φάσμα σε AM 1.5 direct

Ακόμα και σε ένα συνδυασμό ενεργειακών διακένων $\{E_{Gt} = 1.95 \text{ eV}, E_{Gb} = 1.42 \text{ eV}\}$, το οποίο είναι αρκετά μακρύτερα από τον βέλτιστο συνδυασμό. Η απόδοση είναι ακόμα αρκετά υψηλότερη από τη βέλτιστη απόδοση των κυττάρων μονών επαφών. Αυτό το ζεύγος ενεργειακών διακένων επιλέχθηκε για διερεύνηση, επειδή το ενεργειακό διάκενο του κάτω

υποκυττάρου είναι αυτό του GaAs, ενώ το ενεργειακό διάκενο του άνω υποκυττάρου είναι μόνο ελαφρά υψηλότερο από την τιμή του $E_{Gt} = 1.85$ eV, μια τιμή που είναι αρκετά συνήθης για ένα κύτταρο GaInP, που έχει ληφθεί κάτω από τυπικές συνθήκες ανάπτυξης. Όμως όσο το E_{Gt} μειώνεται από τα 1.95 eV σε ένα ενεργειακό διάκενο τιμής 1.85 eV (με το E_{Gb} να διατηρείται στην τιμή του διακένου του GaAs, στα 1.42 eV), η απόδοση πέφτει πολύ γρήγορα από το 35 στο 30%. Αυτή η ραγδαία μείωση οφείλεται στην εξάρτηση των φωτορευμάτων των άνω και κάτω υποκυττάρων από το ενεργειακό διάκενο του άνω υποκυττάρου. Όπως σημειώθηκε και παραπάνω, η μείωση του ενεργειακού διακένου του άνω υποκυττάρου, ενώ διατηρείται σταθερό το ενεργειακό διάκενο του κάτω υποκυττάρου, αυξάνει την J_{SC} του άνω υποκυττάρου σε βάρος της J_{SC} του κάτω υποκυττάρου. Στο Σχ. 6.7(a) απεικονίζεται αυτό για την περίπτωση που αναφέρθηκε και παραπάνω, παρουσιάζοντας τις J_{SCt} και J_{SCb} συναρτήσεσι του E_{Gt} , με το E_{Gb} να παραμένει ίσο με 1.42 eV. Η J_{SC} για τον εν σειρά συνδεδεμένο συνδυασμό αυτών των δύο υποκυττάρων θα είναι μικρότερη από τις J_{SCt} και J_{SCb} . Το Σχ. 6.7(a) ότι η ποσότητα είναι μέγιστη σε ένα ρευματικά αντίστοιχο ενεργειακό διάκενο $E_{Gt} = 1.95$ eV και μειώνεται γρήγορα όσο το E_{Gt} μειώνεται κάτω από τα 1.95 eV. Αυτή η μείωση στη J_{SC} εξαιτίας του κάτω υποκυττάρου που περιορίζει τα φωτορεύματα στα χαμηλά E_{Gt} είναι υπεύθυνη για την αντίστοιχη μείωση στην απόδοση του συνδυασμένου κυττάρου όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 6.6(a). Αυτή η εξάρτηση της J_{SC} και της απόδοσης στο E_{Gt} στο συνδυασμένο κύτταρο, θα υποδείκνυε ότι ένα κύτταρο GaInP/GaAs δεν θα είχε μια χρήσιμη υψηλή απόδοση. Ευτυχώς, αυτή η ραγδαία μείωση στην απόδοση μπορεί να μετριαστεί αποτελεσματικά, μειώνοντας το πάχος του άνω υποκυττάρου.

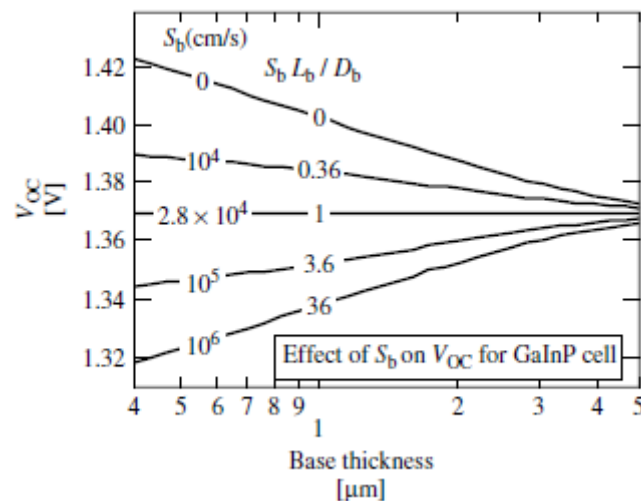


Σχήμα 6.7: (a) Οι J_{SCt} και J_{SCb} για ένα απείρως παχύ άνω υποκύτταρο συναρτήσεσι του ενεργειακού διακένου του άνω υποκυττάρου E_{Gt} , για ένα ενεργειακό διάκενο του κάτω υποκυττάρου ίσο με $E_{Gb} = 1.42$ eV. (b) Οι J_{SCt} και J_{SCb} συναρτήσεσι του πάχους του άνω υποκυττάρου, για συνθήκες φάσματος AM 1.5 global, με $E_{Gb} = 1.42$ eV και $E_{Gt} = 1.85$ eV. Τα υποκύτταρα είναι αντιστοιχισμένα ως προς το ρεύμα τους, με πάχος βάσης ίσο με 0.7 μm . (c) Ο αντίστοιχος παράγοντας πλήρωσης του συνδυασμένου κυττάρου. (d) Οι J_{SCt} και J_{SCb} συναρτήσεσι του πάχους του άνω υποκυττάρου, με ίδιες συνθήκες με του (b), μόνο σε συνθήκες φάσματος AM 1.5 direct. Το πάχος αντιστοίχησης ρεύματος είναι σημαντικά μεγαλύτερο από ότι στις συνθήκες φάσματος global

6.5.4 ΕΠΙΡΕΙΑ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΣΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΠΛΗΡΩΣΗΣ (FF) ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΤΑΣΗ ΑΝΟΙΚΤΟΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ (V_{oc})

Ο συντελεστής πλήρωσης (FF) σε ένα συνδυασμένο κύτταρο εξαρτάται από τα φωτορεύματα των άνω και κάτω υποκυττάρων. Το Σχ. 6.7(c) παρουσιάζει τον παράγοντα πλήρωσης συναρτήσει του πάχους του άνω υποκυττάρου και έτσι είναι ουσιαστικά συνάρτηση του λόγου J_{scf}/J_{scb} , για τη συσκευή του Σχ. 6.7(b). Ο παράγοντας πλήρωσης είναι ελάχιστος για τις συνθήκες αντιστοίχισης ρεύματος, ένα αποτέλεσμα το οποίο ισχύει γενικά για τα ιδανικά (χωρίς διαρροές) υποκύτταρα. Αυτό το αποτέλεσμα ελαφρά υπονομεύει τα οφέλη απόδοσης που προκύπτουν από την αύξηση της J_{sc} στις συνθήκες αντιστοίχισης ρεύματος. Παρόλα αυτά, η μείωση στο συντελεστή πλήρωσης στην αντιστοίχιση ρεύματος είναι σχεδόν η μισή της αύξησης της J_{sc} . Αυτή η εξάρτηση του συντελεστή πλήρωσης με το λόγο των ρευμάτων των υποκυττάρων είναι σημαντικός, αφού υποδεικνύει ότι η σωστή μέτρηση του συντελεστή πλήρωσης της ίδιας της συσκευής απαιτεί μια σωστή πόλωση του φωτός του υποκυττάρου.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, και η V_{oc} εξαρτάται από το πάχος του κυττάρου. Το Σχ. 6.8 δείχνει πως το στοιχειώδες πάχος της βάσης x_b και η ταχύτητα του επιφανειακού ανασυνδυασμού βάσης S_b επηρεάζουν την V_{oc} του κυττάρου GaInP. Αυτές οι καμπύλες υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις, θεωρώντας μια ταχύτητα ογκικού ανασυνδυασμού $D_b/L_b = 2.8 \times 10^4$ cm/s, μια τυπική τιμή για τα κύτταρα GaInP. Το Σχ. 6.8 δείχνει ότι ένα κύτταρο με καλά παθητικοποιημένη βάση, δηλαδή με μια αρκετά μικρή S_b ($S_b \ll D_b/L_b$), όταν λεπταίνει, έχει ως αποτέλεσμα μια αμελητέα αύξηση στην V_{oc} . Από την άλλη μεριά, για τα κύτταρα των οποίων η βάση είναι λίγο παθητικοποιημένη ($S_b > D_b/L_b$), τότε η λέπτυνση του κυττάρου οδηγεί σε μείωση της V_{oc} . Για την κυτταρική δομή του GaInP/GaAs, με ένα λεπτό άνω υποκύτταρο το οποίο απαιτείται για να επιτευχθεί η αντιστοίχιση ρεύματος, η παθητικοποίηση της βάσης του άνω υποκυττάρου είναι έτσι μια σημαντική παράμετρος για ολόκληρη την απόδοση της συσκευής.



Σχήμα 6.8: Επίδραση του πάχους βάσης x_b και της ταχύτητας επιφανειακού ανασυνδυασμού S_b στην V_{oc} για ένα άνω κύτταρο GaInP με $J_{sc} = 14$ mA/cm². Η βάση χαρακτηρίζεται από μια ταχύτητα ογκικού ανασυνδυασμού $D_b/L_b = 2.8 \times 10^4$ cm/s. Σημειώνεται ότι εάν η ογκική και η επιφανειακή ταχύτητα ανασυνδυασμού είναι ίσες, η V_{oc} είναι ανεξάρτητη του πάχους βάσης

6.5.5 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ

Το ποσό του φωτός που διανέμεται σε κάθε υποκύτταρο, και άρα, τα φωτορεύματα που παράγονται από κάθε υποκύτταρο, καθορίζονται από το φάσμα του προσπίπτοντος φωτός. Έτσι, τα βέλτιστα ενεργειακά διάκενα και η βέλτιστη λέπτυνση του άνω υποκυττάρου εξαρτώνται από το προσπίπτον φάσμα. Το Σχ. 6.6(c) δείχνει την απόδοση συναρτήσει του ενεργειακού διακένου του άνω και κάτω υποκυττάρου για τις κανονικές συνθήκες φάσματος AM 1.5 direct και για την ίδια συσκευών δύο επαφών, όπως μοντελοποιήθηκε για το φάσμα global στο Σχ. 6.6(b). Για ένα δεδομένο ενεργειακό διάκενο κάτω υποκυττάρου, το βέλτιστο ενεργειακό διάκενο άνω υποκυττάρου E_{Gt} είναι πιο χαμηλό για το φάσμα direct από ότι για το φάσμα global. Η διαφορά αυτή προκύπτει επειδή το direct φάσμα έχει λιγότερο μπλε φως από το global φάσμα, με αποτέλεσμα ένα μειωμένο λόγο J_{Scf}/J_{Scb} . Το μειωμένο E_{Gt} επανορθώνει για αυτό με το να κατευθύνει περισσότερο φως στο άνω κύτταρο. Παρομοίως, για δεδομένα E_{Gt} και E_{Gb} , το βέλτιστο πάχος άνω υποκυττάρου είναι μεγαλύτερο για ένα direct φάσμα από ότι σε ένα global φάσμα. Το Σχ. 6.7(d) δείχνει τις J_{Scf} και J_{Scb} για το ζεύγος ενεργειακών διακενων {1.85, 1.42} eV συναρτήσει του πάχους του άνω υποκυττάρου, όπως και στο Σχ. 6.7(a), αλλά υπολογισμένες σε direct φάσμα αντί του global φάσματος. Το πάχος που απαιτείται για τη αντιστοίχιση ρεύματος είναι σχεδόν 1.2 μm , σημαντικά μεγαλύτερο από τα 0.7 μm που είναι το φάσμα αντιστοίχισης ρεύματος για το global φάσμα. Από άποψη σύγκρισης, το φάσμα AM0 είναι ακόμα πιο πλούσιο σε μπλε από το AM 1.5 global φάσμα και άρα το άνω υποκύτταρο θα ήταν ακόμα πιο λεπτό στην περίπτωση αυτή, σχεδόν 0.5 μm . Άλλες παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση σε σχέση με το προσπίπτον φάσμα, είναι η διακύμανση του φάσματος και οι χρωματικές παρεκκλίσεις.

6.5.6 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΑΝΤΙΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΩΝ ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΩΝ (ARC)

Μέχρι τώρα έχει θεωρηθεί για λόγους απλότητας ότι δεν υπάρχουν ανακλάσεις του προσπίπτοντος φωτός από την μπροστά επιφάνεια του κυττάρου. Παρόλα αυτά, χωρίς μια ARC, τα κύτταρα III – V τυπικά έχουν μεγάλες ανακλάσεις, της τάξης του 30% στη φασματική περιοχή που μελετάται για τη μετατροπή του ηλιακού φάσματος. Οι ARC μπορούν να μειώσουν αυτές τις ανακλάσεις στο 1% περίπου, αλλά μόνο πάνω από ένα περιορισμένο εύρος φάσματος. Αυτός ο περιορισμός έχει σημαντικές επιπλοκές για το την αντιστοίχιση ρεύματος των υβριδικών κυττάρων. Για τον υπολογισμό της ανάκλασης συναρτήσει του μήκους κύματος λ χρησιμοποιείται η σχέση:

$$R = \left| \frac{X - 1}{X + 1} \right|^2$$

όπου

$$X = \frac{n_2 \cdot (n_3 n_4 - n_2 n_4 t_2 t_3 - n_2 n_3 t_2 t_4 - n_3^2 t_3 t_4) + i \cdot n_1 \cdot (n_3 n_4 t_2 + n_2 n_4 t_3 + n_2 n_3 t_4 - n_3^2 t_2 t_3 t_4)}{n_1 \cdot n_4 \cdot (n_2 n_3 - n_3^2 t_2 t_3 - n_3 n_4 t_2 t_4 - n_2 n_4 t_3 t_4) + i \cdot n_2 \cdot n_4 \cdot (n_2 n_3 t_2 + n_3^2 t_3 + n_3 n_4 t_4 - n_2 n_4 t_2 t_3 t_4)}$$

και

$$t_j = \tan\left(\frac{2\pi n_j d_j}{\lambda}\right)$$

Σημειώνεται ότι n_j είναι ο συντελεστής διάθλασης και d_j είναι το πάχος για τη στρώση με σειρά j από το πάνω μέρος του κυττάρου. Η ARC πρέπει να επιλέγεται κατάλληλα ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα σε σχέση με την αντιστοίχιση ρεύματος.

6.5.7 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ

Οι χερσαίες εφαρμογές των υβριδικών ηλιακών κυττάρων μεγάλης απόδοσης είναι γενικά σε συστήματα με συγκεντρωτές, δεδομένου του υψηλού κόστους αυτών των κυττάρων. Αυτού του τύπου τα κύτταρα είναι κατάλληλα για λειτουργία με συγκεντρωτές, όχι μόνο εξαιτίας της υψηλής τους απόδοσης σε έναν ήλιο, αλλά και επειδή αυτές οι υψηλές αποδόσεις μπορούν να διατηρούνται και σε μεγάλα επίπεδα συγκέντρωσης που ξεπερνούν τους 1000 ήλιους. Για μπορεί αυτό να γίνει εφικτό, τα κύτταρα θα πρέπει να τροποποιούνται κατάλληλα σε σχέση με τους παρακάτω παράγοντες:

- Φάσμα απορρόφησης
- Εξάρτηση συγκέντρωσης από την απόδοση
- Σειριακή αντίσταση και μεταλλοποίηση
- Λειτουργία
- Γραμμικότητα συγκέντρωσης σε σχέση με τη J_{sc}

6.5.8 ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Για την πρόβλεψη της απόδοσης της συσκευής σε ρεαλιστικές θερμοκρασίες λειτουργίας, θα πρέπει να διερευνηθεί η επίδραση της στους διάφορους παράγοντες λειτουργίας ενός κυττάρου. Σε αυτό καθοριστικό παράγοντα παίζει η ακριβής μέτρηση της σταθεράς θερμοκρασίας με βάση της ανωτέρω αναφερόμενες εξισώσεις. Γενικά, ο περιορισμός της αντιστοίχισης ρεύματος για τα εν σειρά συνδεδεμένα υβριδικά κύτταρα οδηγεί σε μεταβολές της σταθεράς θερμοκρασίας σε σχέση με τα κύτταρα μονών επαφών. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταβολή της σταθεράς θερμοκρασίας είναι:

- Η V_{oc}
- Η J_{sc}
- Ο συντελεστής πλήρωσης
- Η απόδοση του κυττάρου

6.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Στη μέχρι τώρα θεώρηση, λήφθηκε ως δεδομένο ότι η απόδοση είναι ομοιόμορφη για όλα τα φωτογεννημένα φορτία, υπονοώντας ότι τα στοιχεία των ημιαγωγών, των διεπιφανειών και των επαφών είναι ιδανικά. Στην πράξη, όμως, αρκετοί εγγενείς και εξωγενείς παράγοντες τείνουν να περιορίζουν την ποιότητα και την απόδοση των υβριδικών ηλιακών κυττάρων. Οι κύριοι παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν την απόδοση του κυττάρου και άρα χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής, είναι οι εξής:

- Επίδραση των διεργασιών κατασκευής στο αρχικό υλικό
- Μέθοδοι πλεγματικής αντιστοίχισης
- Εγγενείς οπτικές ιδιότητες του υλικού (σειρά των επαφών, συντελεστής απορρόφησης)
- Χαρακτηριστικά ντοπαρίσματος (ανάλογα του τύπου ντοπαρίσματος)
- Επίδραση στρώσης παραθύρου και πεδίων πίσω επιφάνειας
- Ποιότητα υποστρώματος
- Διάταξη επαφών
- Ετεροεπιταξία III – V
- Διασυνδέσεις επαφών – σηράγγων
- Φύση χημικών εγχαρακτών
- Διαθεσιμότητα των υλικών κατασκευής

6.7 ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

Τα κύτταρα GaInP/GaAs/Ge έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε διαστημικές εφαρμογές, αλλά οι καταγεγραμμένες αποδόσεις από τους κατασκευαστές συνεχίζουν να αυξάνονται, με τα καλύτερα κύτταρα να έχουν αποδόσεις της τάξης του 30% σε συνθήκες AM0. Η καταγεγραμμένη απόδοση από το Spectrolab για τις χερσαίες εφαρμογές με συγκεντρωτές για τα κύτταρα GaInP/GaAs/Ge ενδέχεται να βελτιωθούν. Η θεωρητική απόδοση είναι 45% σε 500 ήλιους κάτω από AM 1.5 global φάσμα. Ιστορικά, τα III – V υβριδικά κύτταρα έχουν επιτύχει το 80 με 90% των θεωρητικών τους αποδόσεων.

6.7.1 ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΚΥΤΤΑΡΑ GaInP/GaAs/Ge

Μια βελτίωση στην AM0 επίδοση των κυττάρων GaInP/GaAs/Ge προβλέπεται όταν το ενεργειακό διάκενο του GaInP αυξάνεται. Όμως, η προσθήκη αλουμινίου στα κύτταρα GaInP έχει δείξει αύξηση στο ενεργειακό διάκενο, αλλά όχι στην απόδοση του άνω κυττάρου, αφού η J_{SC} είχε μειωθεί παραπάνω από 10% ενώ η V_{OC} αυξήθηκε μόνο λίγο, αν όχι καθόλου, μάλλον εξαιτίας του δυσμενούς αποτελέσματος του αλουμινίου (και της σχετιζόμενης επιμόλυνσης από το οξυγόνο) στις ιδιότητες των φορτίων μειονότητας.

Οι επαφές Ge συλλέγουν περίπου τα διπλάσια φωτορεύματα από όλες τις άλλες επαφές στα κύτταρα GaInP/GaAs/Ge. Τα κύτταρα τριών επαφών θα αύξαναν την απόδοσή τους θεωρητικά, εάν το ενεργειακό διάκενο του GaAs μειωνόταν, το ενεργειακό διάκενο του Ge αυξανόταν, ή μια τέταρτη επαφή θα προστίθεντο μεταξύ των επαφών GaAs και Ge.

Η πιο συνηθισμένη προσέγγιση είναι η προσθήκη ινδίου στη στρώση GaAs και ίσως στη στρώση GaInP. Μια μικρή ποσότητα ινδίου βελτιώνει την πλεγματική αντιστοίχιση με το Ge και βελτιώνει την απόδοση του κυττάρου ακόμα και χωρίς τη χρήση ρυθμιστικής στρώσης. Η προσθήκη μιας μεγαλύτερης ποσότητας ινδίου (π.χ. 12%) ερευνάται γενικά με την ελπίδα την αύξηση της απόδοσης κατά περίπου 2% μόνιμα. Υψηλότερες αποδόσεις προϋποθέτουν την ανάπτυξη μια ρυθμιστικής στρώσης που θα παραλαμβάνει επιτυχώς από τις παραμορφώσεις χωρίς να επιτρέπει τη δημιουργία σπειρωμάτων ή τη μετάδοση άλλων μετατοπίσεων στις ενεργές στρώσεις του κυττάρου. Τα αποτελέσματα είναι πολλά υποσχόμενα, αλλά οι αποδόσεις μέχρι τώρα, είναι περίπου οι ίδιες με αυτές των

πλεγματικά αντιστοιχισμένων κυττάρων. Οι επιδράσεις σε περίπτωση που δεν υπάρχει πλεγματική αντιστοίχιση σε σχέση με την κατεργασιμότητα και το χρόνο ζωής των ηλιακών κυττάρων, δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς.

Σημαντικές προσπάθειες έχουν γίνει επίσης και γύρω από την προσθήκη μιας τέταρτης επαφής 1 eV, μεταξύ της επαφής GaAs και Ge. Μια τέτοια δομή τεσσάρων επαφών έχει θεωρητική απόδοση η οποία ξεπερνά το 50%, το οποίο μεταφράζεται σε μια πρακτική απόδοση περίπου 40%, εάν βρεθούν τα κατάλληλα υλικά. Παρόλα αυτά, ο συγκεκριμένος στόχος είναι ιδιαίτερα δύσκολος. Ο πιο πιθανός υποψήφιος μέχρι τώρα είναι ένα κράμα GaInAsN. Η έρευνα άλλων υλικών παρουσιάζουν χειρότερη συμπεριφορά, προς το παρόν.

Το $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{N}_y$ μπορεί να αναπτυχθεί με πλεγματική αντιστοίχιση ($x = 3y$) σε σχέση με το GaAs και με ένα ενεργειακό διάκενο περίπου ίσο με 1 eV. Παρόλα αυτά, το μήκος διάχυσης των φορτίων μειονότητας του συγκεκριμένου υλικού είναι σχετικά μικρό. Το GaAsN δεν είναι συνηθισμένο αφού το ενεργειακό διάκενο μειώνεται από το 1.4 eV σε περίπου 1 eV με την προσθήκη περίπου 3% αζώτου. Η διασπορά κράματος αναμένεται να είναι μεγαλύτερη από ότι σε ένα συνηθισμένο κράμα, μερικώς επειδή εξηγεί τη μειωμένη κινητικότητα των φορτίων πλειονότητας. Όμως, το πιο σημαντικό πρόβλημα είναι ο χαμηλός χρόνος ζωής των φορτίων μειονότητας, ο οποίος δεν έχει επεξηγηθεί ακόμα πλήρως. Οι επιμολύνσεις με C και H σε ανεπτυγμένα μέσω MOCVD υμένια GaInAsN έχουν καταγραφεί ότι είναι μεγαλύτερες από ότι σε υμένια ανεπτυγμένα μέσω MBE, αν και τα υλικά που κατασκευάζονται μέσω MBE δεν έχουν μέχρι τώρα αξιολογηθεί για τη χρήση τους σε ηλιακά κύτταρα.

6.7.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΤΟΙΒΕΣ

Ένα υψηλής απόδοσης αποτέλεσμα μπορεί επίσης να ληφθεί από μια μηχανική στοιβία, μειώνοντας την ανάγκη για πλεγματική αντιστοίχιση. Οι πιο πιθανοί υποψήφιοι για αυτό είναι οι στοιβες GaInP/GaAs πάνω είτε από GaInAsP (1 eV)/GaInAs (0.75 V), είτε από GaSb. Οι δυσκολίες στη χρήση αυτών των στοιβών σχετίζονται με το να γίνει το άνω υποκύτταρο πολύ διάφανο στο υποενεργειακό φως (η χρήση ενός διάφανου υποστρώματος GaAs, μιας μη συμβατικής προσέγγισης για την πίσω επαφή, και μια καλή ARC στο πίσω και το μπροστά μέρος του άνω υποκυττάρου) και με την ανεύρεση ενός τρόπου για ενωθούν και τα δύο κύτταρα με ταυτόχρονη θερμική συστολή και ηλεκτρική μόνωση. Τα προβλήματα αυτά είναι ακόμα μεγαλύτερα σε συγκεντρώσεις 500 έως 1000X από ότι στις 10 έως 50X. Ένα πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η αποσύνδεση των φωτορευμάτων των δύο μερών, επιτρέποντας μια μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή των υλικών και των υψηλών αποδόσεων όταν το φάσμα αλλάζει.

Η απόδοση του ηλιακού κυττάρου εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας, περιπλέκοντας την πρόβλεψη της εξωτερικής του λειτουργίας. Αυτό είναι ιδιαίτερα περίπλοκο για τα εν σειρά, υβριδικά κύτταρα σε μια πληθώρα φασμάτων. Οι απώλειες που αναμένονται για τη λειτουργία κυττάρων τριών ή τεσσάρων επαφών και δύο ακροδεκτών, σε σύγκριση με τη λειτουργία έξι ή οκτώ ακροδεκτών των ίδιων κυττάρων είναι σημαντικές. Αλλά μπορεί να μην είναι πολύ μεγαλύτερες από τις απώλειες των κυττάρων πυριτίου, όταν λειτουργούν σε μεγάλες θερμοκρασίες. Για τη λειτουργία δύο ακροδεκτών, η μηχανική στοιβία μπορεί πολύ πιο εύκολα να επιτευχθεί με την ένωση των δύο ημιαγωγικών υλικών απευθείας. Επειδή η

σύνδεση της συστοιχίας χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως σε πολλές συσκευές, υπάρχουν διάφορες διαθέσιμες τεχνικές και η συστοιχία δεν χρειάζεται να έχει διάφανο υπόστρωμα, αποφεύγει τις απώλειες ανάκλασης και απομακρύνει τις δυσκολίες, οι οποίες προκύπτουν από τις θερμικές συστολές και την ηλεκτρική μόνωση της στοίβας. Η συγκεκριμένη τεχνική μπορεί να μειώσει και το κόστος του υποστρώματος, εάν η μέθοδος επαναχρησιμοποίησης του υποστρώματος είναι οικονομική.

Γενικά, υπάρχουν πολλές περισσότερες μέθοδοι κατασκευής των υβριδικών κυττάρων από αυτές που συζητήθηκαν. Η επιλογή της πιο κατάλληλης κάθε φορά είναι κυρίως συνάρτηση των αναγκών και του κόστους. Προς το παρόν το κόστος των συγκεκριμένων κυττάρων είναι αρκετά υψηλό, αλλά, με βάση τις έρευνες που διεξάγονται στην περιοχή αυτή, αναμένεται το κόστος τους να μειωθεί σημαντικά στο μέλλον.

6.7.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΕ ΑΛΛΑ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

Μια στοίβα πυριτίου – III – V μπορεί ακόμα να γίνει μέσω της ανάπτυξης III – V επιταξικών στρώσεων απευθείας σε πυρίτιο. Η ανάπτυξη GaAs σε πυρίτιο ανέκαθεν είχε προβλήματα εξαιτίας της πλεγματικής αναντιστοιχίας των δύο υλικών. Παρόλα αυτά, η ανάπτυξη ενός πλεγματικά αντιστοιχισμένου κράματος III – V σε πυρίτιο μπορεί να είναι παρόμοιος με την ανάπτυξη του GaAs σε Ge. Έρευνες έχουν δείξει την επιτυχημένη ανάπτυξη κραμάτων AlGaNP με παρόμοιες πλεγματικές σταθερές όμοιες με του πυριτίου, αλλά που είχαν ενεργειακά διάκενα στο εύρος του 1.4 έως 1.95 eV. Η χρήση του πυριτίου ως το 1 eV υλικού στην υβριδική στοίβα υψηλής απόδοσης περιορίζεται από τη χαμηλή QE κόκκινου, στα περισσότερα κύτταρα πυριτίου, αλλά το χαμηλότερο κόστος και βάρος του υποστρώματος πυριτίου τα καθιστούν επιθυμητά αν μεγαλύτερες αποδόσεις δεν μπορούν να αποδοθούν.

Οι υψηλές αποδόσεις έχουν επιτευχθεί με δομές δύο επαφών (InP/GaInAs) σε InP. Μια δομή τριών ή τεσσάρων επαφών βασιζόμενη σε InP θα μπορούσε, πιθανώς, να επιτύχει μεγαλύτερες αποδόσεις. Αυτή η προσέγγιση περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα των υψηλού ενεργειακού διακένου υλικών, που είναι πλεγματικά αντιστοιχισμένες με το InP και με το βάρος και το κόστος ρεύματος του υποστρώματος InP.

6.7.4 ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ

Κατά την πάροδο των ετών, διάφοροι ερευνητές πρότειναν ότι διαχώριζαν το φως, με το να ακτινοβολούν κάθε μέρος του φωτός σε ένα ηλιακό κύτταρο, το οποίο βελτιστοποιείται για το εύρος του μήκους κύματος. Εάν τα ηλιακά κύτταρα τεσσάρων ή πέντε επαφών χρησιμοποιούνται, η θεωρητική απόδοση είναι σχετικά μεγάλη. Παρόλα αυτά, τα ζητήματα ισορροπίας του συστήματος υποδηλώνουν ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση έχει μόνο νόημα σε διαστημικές εφαρμογές, για τις οποίες η υψηλή απόδοση είναι ζωτικής σημασίας και τα οικονομικά επιτρέπουν το επιπλέον κόστος πολλαπλών υποστρωμάτων, χωρίς την προϋπόθεση υψηλού λόγου συγκέντρωσης.

6.8 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η χρήση των υβριδικών κυττάρων III – V σε χερσαία συστήματα με συγκεντρωτές προϋποθέτουν κατάλληλο σχεδιασμό της οπτικής τους, της οπτικής σύζευξης ανάμεσα στα οπτικά κύτταρα, αποφυγή των προβλημάτων χρωματικής απόκλισης, θερμικών συστολών

ηλεκτρικών συνδέσεων/μονώσεων και υψηλής κλίμακας παραγωγής για τη μείωση του κόστους σε επιτρεπόμενα επίπεδα. Ευτυχώς, ένας μεγάλος αριθμός ερευνητών ασχολείται με τη βελτίωση των συγκεκριμένων παραγόντων και υπόσχονται κατάλληλα αποτελέσματα, σε σύντομο χρονικό διάστημα. Ο λόγος είναι ότι οι αποδόσεις των κυττάρων αυτών παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές, από κάθε άλλο τύπο φωτοβολταϊκών. Έτσι, σε περίπτωση που τα ζητήματα που αναφέρθηκαν καταπολεμηθούν, θα μπορεί πλέον ένα μεγάλο μέρος της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος του κόσμου, να προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά, αντικαθιστώντας άλλες πιο επιζήμιες μορφές ενέργειας του σήμερα.


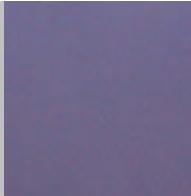

Κεφάλαιο 7^ο: Σύγκριση φωτοβολταϊκών – Συμπεράσματα

7.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Μετά την εκτενή περιγραφή των ανωτέρω περιγραφόμενων στοιχείων, θα πραγματοποιηθεί μια σύγκριση μεταξύ τους. Όπως είναι εύκολα αντιληπτό μια απόλυτη περιγραφή είναι αδύνατη, τόσο επειδή τα διάφορα φωτοβολταϊκά στοιχεία, ακόμα αν ανήκουν στην ίδια οικογένεια, μπορεί να έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες μεταξύ τους, όσο και επειδή όλη η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι ακόμα πολύ ευρέως αναπτυσσόμενη. Παρόλα αυτά, θα επιχειρηθεί να γίνει μια σύγκριση των χαρακτηριστικών κάποιων εμπορικών ηλιακών κυττάρων τα οποία ήδη έχουν δοκιμαστεί στην πράξη.

7.1.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

Η σύγκριση θα ξεκινήσει από την παράθεση και το σχολιασμό μερικών γεωμετρικών και εμφανισιακών στοιχείων τριών ηλιακών μονάδων, μια από κάθε οικογένεια που αναφέρθηκε μέχρι τώρα. Τα στοιχεία για τη σύγκριση αυτή παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 7.1):

Τεχνολογία	Μονοκρυσταλλικό πυριτίου	Λεπτού υμενίου πυριτίου	Υβριδικό τριών επαφών
Διαστάσεις μονάδας [m × m]	1.38 × 1.18	1.38 × 1.18	1.37 × 1.48
Μπροστά κάλυμμα	Γυαλί πάχους 6 mm	Γυαλί πάχους 6 mm	Tefzel
Εμφάνιση			
Πίσω επιφάνεια/χρώμα	Tedlar/ Χρώμα γραφίτη	Tedlar/ Χρώμα γραφίτη	Ανοξείδωτος χάλυβας
Διαστάσεις κυττάρου [mm × mm]	125 × 125	150 × 150	119 × 340
Αριθμός κυττάρων (εν σειρά)	72	56	44
Καταγεγραμμένη ισχύς [W]	153	92	128
Επιφάνεια κυττάρων [m ²]	1.020	1.341	1.780
Επιφάνεια ανοίγματος [m ²]	1.682	1.682	2.108
Επιφάνεια κάλυψης [m ²]	1.160	1.371	1.815
Ετήσια μείωση	1380	1380 έως 1485	1435

εκπομπών CO ₂ [kgCO ₂ /kWp]			
--	--	--	--

Πίν. 7.1: Εξωτερικά χαρακτηριστικά ηλιακών κυττάρων

Σε αντίθεση τη μονοκρυσταλλική και τη μονάδα λεπτού υμενίου, στις οποίες ο αριθμός των κυττάρων εύκολα να ποικίλει για την παραγωγή μονάδων διαφορετικού μεγέθους, η κατασκευή των μονάδων υβριδικών κυττάρων δεν μπορεί να τροποποιηθεί εύκολα, με αποτέλεσμα την παραγωγή μονάδων συγκεκριμένου μεγέθους, για συγκεκριμένες εφαρμογές. Οι επιφάνειες κυττάρων, κάλυψης και ανοίγματος αντιπροσωπεύουν την επιφάνεια όλων των κυττάρων, την επιφάνεια όλων των κυττάρων και των μεταξύ τους διακένων και την ολική επιφάνεια της μονάδας, αντίστοιχα. Γενικά, με βάση τα στοιχεία αυτά δεν χρειάζεται να γίνουν άλλα σχόλια, αφού τα στοιχεία αυτά έχουν μπορεί να μεταβάλλονται λίγο από κατασκευαστή σε κατασκευαστή.

7.1.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Και για αυτή τη σύγκριση θα χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα από μια τυπική ηλιακή μονάδα κάθε οικογένειας. Τα στοιχεία παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα (Πίν. 7.2):

Μόνωση (Κατασκευαστής)	Λεπτών υμενίων		Μονοκρυσταλλικά		Υβριδικά τριών επαφών		
	NAI (NIST)	OXI (SNL)	NAI (SNL)	NAI (NIST)	OXI (SNL)	NAI (NIST)	OXI (SNL)
P_{mp} [W]	103.96 (±2.2%)	104.95 (±2.3%)	104.32 (±2.3%)	133.40 (±2.2%)	133.99 (±2.3%)	57.04 (±2.2%)	57.2 (±2.3%)
J_{sc} [A]	5.11 (±1.7%)	5.07 (±1.9%)	5.04 (±1.9%)	4.37 (±1.7%)	4.32 (±1.9%)	4.44 (±1.7%)	4.48 (±1.9%)
V_{oc} [V]	29.61 (±1.1%)	30.12 (±1.0%)	30.23 (±1.0%)	42.93 (±1.1%)	43.53 (±1.0%)	23.16 (±1.1%)	23.49 (±1.0%)
I_{mp} [A]	4.49 (±1.6%)	4.46 (±2.0%)	4.41 (±2.0%)	3.96 (±1.6%)	3.92 (±2.0%)	3.61 (±1.6%)	3.52 (±2.0%)
V_{mp} [V]	23.17 (±1.4%)	23.53 (±1.1%)	23.66 (±1.1%)	33.68 (±1.4%)	34.23 (±1.1%)	16.04 (±1.4%)	16.27 (±1.1%)

Πίν. 7.2: Λειτουργικά χαρακτηριστικά μονάδων

Για τη σύγκριση των παραπάνω παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές μονάδες πολλές από τις οποίες ανήκουν και στην ίδια οικογένεια. Επίσης, από τις παραπάνω μονάδες, σε άλλες χρησιμοποιήθηκε μόνωση ανάμεσα στα κύτταρα και σε άλλες όχι. Κάτω από κάθε τιμή αναγράφεται και η ποσοστιαία δυνατή μεταβολή της, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές για κάθε μονάδα του ίδιου κατασκευαστή.

Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει ότι γενικά η μεγαλύτερη και η μικρότερη ισχύς συναντάται σε υβριδικές μονάδες τριών επαφών. Οι συγκεκριμένες μονάδες μετρήθηκαν κάτω από διαφορετικές συνθήκες ηλιοφάνειας, αλλά και οι διάφορες επαφές κάθε μονάδας είναι διαφορετικές. Έτσι, προκύπτει ότι μάλλον οι διαφορετικές επαφές των δύο τελευταίων μονάδων δεν είχαν πολύ καλή συνεργασία μεταξύ τους, κάτι που ίσως οφείλεται σε κακή αντιστοίχιση πλέγματος ή ρεύματος.

Πολύ υψηλή είναι και η ισχύς των μονοκρυσταλλικών μονάδων με τη μία από τις δύο μονάδες να εμφανίζει ένα μικρό προβάδισμα, μάλλον λίγο καλύτερης ποιότητας πυριτίου

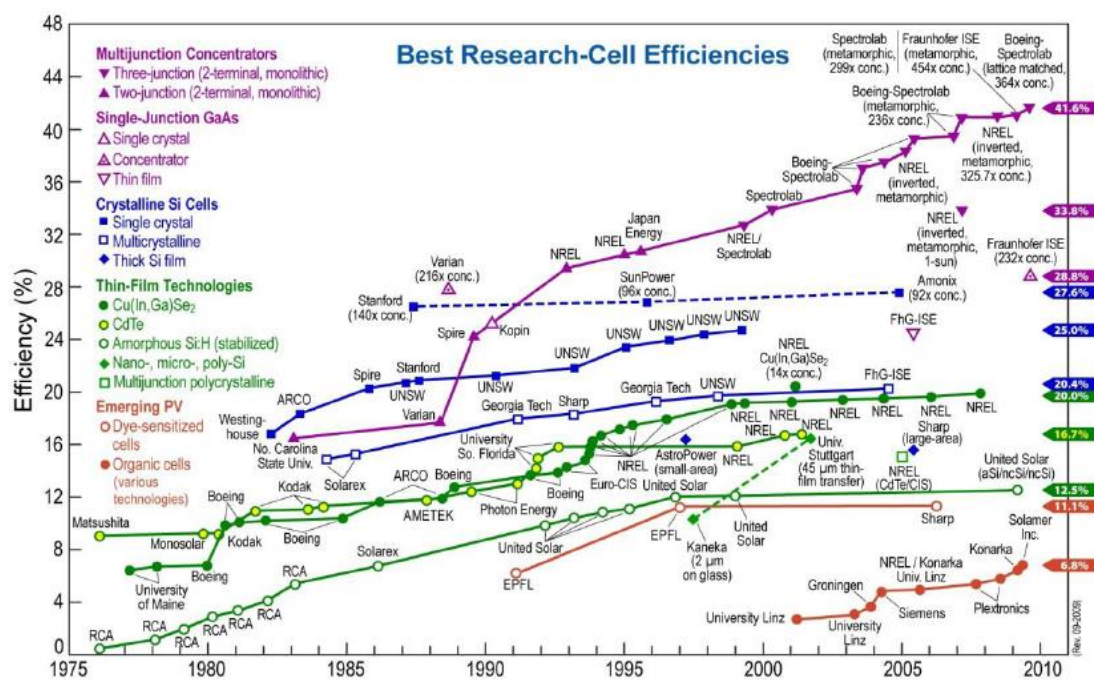
στη μια περίπτωση. Αμέσως μετά ακολουθούν οι μονάδες λεπτών υμενίων, με λίγο μικρότερη τιμή ισχύος από τις μονοκρυσταλλικές μονάδες.

Αντίθετη πορεία από αυτή της ισχύος παρουσιάζουν, όπως ήταν αναμενόμενο οι τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης και του ρεύματος μέγιστης ισχύος. Αντίθετα και σύμφωνα με τις τιμές ισχύος, κινούνται οι τιμές τάσεως ανοικτοκύκλωσης και μέγιστης ισχύος.

Γενικά, όλα τα παραπάνω στοιχεία συνάδουν με το θεωρητικό υπόβαθρο που μελετήθηκε μέχρι τώρα, με το πλεονέκτημα ισχύος να παρουσιάζεται στα υβριδικά κύτταρα που όμως έχουν καλή συνάφεια μεταξύ των διαφορετικών στρώσεων. Επίσης, επιβεβαιώνεται και το γεγονός ότι μικρότερες τιμές ρεύματος βραχυκύκλωσης οδηγούν σε αυξημένη παραγόμενη ισχύ.

7.1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΥΤΤΑΡΩΝ

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η μέχρι σήμερα απόδοση διαφορετικού τύπου ηλιακών μονάδων, όπως αυτές έχουν καταγραφεί από διάφορα ερευνητικά κέντρα του κόσμου σε διάφορες χρονικές στιγμές των τελευταίων 40 ετών. Για το διάγραμμα αυτό έχουν ληφθεί παρόμοιες συνθήκες ακτινοβολήσης των μονάδων. Το διάγραμμα (Σχ. 7.1) παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 7.1: Σύγκριση απόδοσης διαφορετικών φωτοβολταϊκών μονάδων

Συμφωνώντας με την μέχρι τώρα διερεύνηση, φαίνεται ότι την υψηλότερη απόδοση έχουν τα υβριδικά κύτταρα τριών επαφών, σε μια τιμή που αγγίζει το 42%. Στη συνέχεια, ακολουθούν μονοκρυσταλλικά κύτταρα πυριτίου, σε μια τιμή της τάξης του 28%. Τέλος, και μετά και από άλλους τύπους φωτοβολταϊκών που δεν αναλύθηκαν στην παρούσα εργασία, ακολουθούν οι μονάδες λεπτών υμενίων που έχουν απόδοση της τάξης του 20%.

7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μέχρι τώρα ανάλυση παρατηρήθηκε ότι από άποψη απόδοσης τα καλύτερα δυνατά κύτταρα είναι τα υβριδικά, με τα μονοκρυσταλλικά να ακολουθούν και τελευταία να είναι τα κύτταρα λεπτών υμενίων. Παρόλα αυτά, τα υβριδικά κύτταρα είναι και αυτά που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες δυσκολίες και το υψηλότερο κόστος κατασκευής, ενώ τα μονοκρυσταλλικά και τα κύτταρα λεπτών υμενίων παρουσιάζουν παρόμοιες δυσκολίες κατασκευής και κόστη. Επίσης, οι δύο αυτοί τύποι κυττάρων παρουσιάζουν μια πολύ πιο ευέλικτη συμπεριφορά από άποψη διαμορφωσιμότητας, ώστε οι μονάδες να τροποποιούνται πάντα σύμφωνα με τις εκάστοτε ανάγκες. Έτσι, γενικά μπορεί να εξισορροπηθεί η μειωμένη απόδοση αυτών των κυττάρων σε σχέση με το χαμηλότερο κόστος τους, για τις τυπικές χερσαίες εφαρμογές, επιτρέποντας τη χρήση των υβριδικών κυττάρων μόνο σε περιπτώσεις όπου το κόστος είναι δευτερευούσης σημασίας.

Πάντως, από ολόκληρη της εργασία έγινε σαφές ότι όλοι οι τύποι φωτοβολταϊκών μοιράζονται τα παρακάτω στοιχεία:

- Μηδενική ρύπανση
- Αθόρυβη λειτουργία
- Αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής (που φθάνει τα 30 χρόνια)
- Απεξάρτηση από την τροφοδοσία καυσίμων για τις απομακρυσμένες περιοχές
- Δυνατότητα επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες
- Ελάχιστη συντήρηση

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, με πληθώρα ερευνών να υπόσχονται πολλά, τόσο σε σχέση με τη μείωση του κόστους κατασκευής τους, όσο και με την αύξηση της απόδοσης τους. Επίσης, πολλές είναι οι έρευνες που γίνονται γύρω από πολλούς νέους τύπους κυττάρων, με εντελώς διαφορετικές ιδιότητες από τις ήδη γνωστές (π.χ. ανακυκλώσιμα φωτοβολταϊκά στοιχεία από άνθρακα). Η έρευνα στο συγκεκριμένο τεχνολογικό τομέα είναι ακόμα σε πρώιμο σχετικά στάδιο. Όμως, εκτιμάται από τους ειδικούς ότι πολύ σύντομα, ένα μεγάλο ποσοστό της παγκόσμιας ενέργειας θα προέρχεται εξολοκλήρου από τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία, αντικαθιστώντας τη χρήση πολλών τόνων ορυκτών καυσίμων, και βοηθώντας περεταίρω το περιβάλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Έντυπη βιβλιογραφία:

- «Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά»,
- «Handbook of Photovoltaic Science and Engineering», Antonio Luque and Steven Hegedus, John Wiley & Sons Inc. Publications, 2003
- «Comparison of Photovoltaic Module Performance Measurements», A. Hunter Furney et al., ASME 2006
- «Διπλωματική εργασία: Μικρο-επεξεργασία λεπτού υμενίου μολυβδενίου (Mo) με laser για εφαρμογή στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία», Κορράλη Παναγιώτα, Ε.Μ.Π., 2010
- «Review and Comparison of Different Solar Energy Technologies», Yinghao Chu, GENI, 2011

Ηλεκτρονική βιβλιογραφία:

- <http://en.wikipedia.org/>