



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ
ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΜΟΡΦΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ
ΜΕΡΙΚΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευστράτιος Θ. Γεωργούλας

Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΜΟΡΦΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕΡΙΚΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευστράτιος Θ. Γεωργούλας

Επίβλεψη : Σταύρος Παπαθανασίου, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ... Μαρτίου 2013.

.....

Σταύρος Παπαθανασίου
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

.....

Ευστράτιος Θ. Γεωργούλας

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

Copyright © Ευστράτιος Θ. Γεωργούλας, 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του φαινομένου της μερικής σκίασης των φωτοβολταϊκών πλαισίων άμορφου πυριτίου. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε ένα μοντέλο περιγραφής της ηλεκτρικής απόκρισης των Φ/Β πλαισίων στο υπολογιστικό περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού *Matlab*. Το μοντέλο δέχεται σαν εισόδους τα χαρακτηριστικά της δομής του εκάστοτε πλαισίου και τις αντίστοιχες παραμέτρους του ηλεκτρικού ισοδύναμου κυκλώματος κάθε Φ/Β κυψέλης, οι οποίες εξήχθησαν με προσαρμογή σε πειραματικά δεδομένα. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας το προτεινόμενο μοντέλο, μελετήθηκε η λειτουργία των Φ/Β πλαισίων άμορφου πυριτίου, μιας στοιχειοσειράς και έξι παράλληλων στοιχειοσειρών, για διάφορα ρεαλιστικά σενάρια σκίασης. Τέλος διενεργήθηκαν μετρήσεις σε δύο φωτοβολταϊκά πλαίσια, αντίστοιχων δομών, υπό συνθήκες μερικής σκίασης, οι οποίες παρουσιάζουν πολύ ικανοποιητική σύγκλιση με τα αποτελέσματα των αντίστοιχων προσομοιώσεων του μοντέλου, επιβεβαιώνοντας έτσι την ισχύ του.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Φ/Β πλαίσιο, τεχνολογία λεπτών υμενίων, άμορφο πυρίτιο, ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα, δομή πλαισίων, μερική σκίαση.

ABSTRACT

The aim of this Thesis is to study the effects of partial shading on amorphous silicon PV modules. To accomplish that, a model describing the electrical response of a PV module has been created, using the *Matlab* computational environment programming language. The model takes as inputs the characteristics of the structure of each module and the corresponding parameters of the electrical equivalent circuit of each PV cell, which were extracted using curve fitting on measurements. Furthermore, given the proposed model, the operation of both single-string and multi-string structures of PV module are analyzed, under typical scenarios of partial shading. Finally, the validation of the model has been made via measurements, by monitoring the performance of the two aforementioned types of PV modules under partial shading conditions. The results show very good convergence of simulations and measurements.

KEY WORDS

PV module, thin film technology, amorphous silicon, electrical equivalent circuit, module structure, partial shading.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Σταύρο Παπαθανασίου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το αντικείμενο των φωτοβολταϊκών, αλλά και για την πολύτιμη καθοδήγηση κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Ευστράτιο Μπατζέλη, για την πολύτιμη βοήθεια και συνεχή καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας που πραγματοποίησα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξη και βοήθεια που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.1. ΓΕΝΙΚΑ	13
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	15
1.3 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ	15
1.4 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	17
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	17
2.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	17
2.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ	19
2.2.1 <i>Τεχνολογία Κρυσταλλικού Πυριτίου (c-Si)</i>	19
2.2.1.1 Φ/Β Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (Single Crystalline Silicon, sc-Si)	20
2.2.1.2 Φ/Β Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (Multicrystalline Silicon, mc-Si)	22
2.2.1.3 Φ/Β Ταινιών Πυριτίου (Ribbon Silicon)	22
2.2.1.3.1 Φ/Β Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου EFG (Edge-Defined Film-Fed Growth)	22
2.2.1.3.2 Φ/Β Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου String Ribbon	23
2.2.1.3.3 Φ/Β Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου APex	23
2.2.2 <i>Τεχνολογία Λεπτών Υμενίων (Thin Film)</i>	24
2.2.2.1 Φ/Β Άμορφου Πυριτίου (Amorphous Silicon, a-Si)	25
2.2.2.1.1 Η δομή και το ενεργειακό διάκενο του a-Si	25
2.2.2.1.2 Δομή του Φ/Β στοιχείου άμορφου πυριτίου	27
2.2.2.1.3 Το φαινόμενο Staebler-Wronski	28
2.2.2.2 Φ/Β Δισεληνιούχου ινδίου χαλκού (Copper Indium diSelenide, CIS)	30
2.2.2.3 Φ/Β Τελλουριούχου καδμίου (Cadmium Telluride, CdTe)	30
2.2.2.4 Φ/Β Λεπτών υμενίων με κρυσταλλικό πυρίτιο	31
2.2.2.4.1 Φ/Β μικροκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου (a-Si / μc-Si)	31
2.2.2.4.2 Φ/Β Κρυσταλλικού πυριτίου σε γυαλί (Crystalline Silicon on Glass, CSG)	32
2.2.3 <i>Υβριδικά Φ/Β στοιχεία (Heterojunction with Intrinsic Thin layer-HIT)</i>	32
2.2.4 <i>Πλαίσια τεχνολογίας III-IV ομάδας του περιοδικού πίνακα</i>	33
2.2.5 <i>Ηλεκτροχημικά Φ/Β (Electrochemical photovoltaics, ECPV)</i>	33
2.2.5.1 Φ/Β Ευαισθητοποιημένων ηλιακών κυψελών (Dye-sensitized nanocrystalline)	33
2.2.5.2 Οργανικές Φ/Β κυψέλες (Organic Solar Cells)	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	35
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΜΟΡΦΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ	35
3.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ Φ/Β ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΜΟΡΦΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ	35
3.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΟΡΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΤΑΣΗ	37
3.3 ΕΥΡΕΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	39
3.4 ΔΟΜΗ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΜΟΡΦΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ	42
3.4.1 <i>Schuco MPE85 AL01</i>	42
3.4.2 <i>Kaneka GEA060</i>	43
3.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΟΥ	44
3.5.1 <i>Φ/Β κυψέλη (cell) και υποκυψέλη (subcell)</i>	44

3.5.2 Φ/Β στοιχειοσειρά (<i>string</i>)	45
3.5.3 Φ/Β πλαίσιο (<i>module</i>)	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	49
ΜΕΛΕΤΗ ΣΚΙΑΣΗΣ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΜΟΡΦΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ	49
4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΣΚΙΑΣΗ	49
4.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ Φ/Β ΚΥΨΕΛΗΣ ΥΠΟ ΜΕΡΙΚΗ ΣΚΙΑΣΗ	49
4.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΜΙΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΣΕΙΡΑΣ (SINGLE-STRING) ΥΠΟ ΜΕΡΙΚΗ ΣΚΙΑΣΗ	51
4.3.1 Οριζόντια σκίαση	52
4.3.2 Κατακόρυφη σκίαση	54
4.3.3 Διαγώνια σκίαση	55
4.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΠΑΡΑΛΛΗΛΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΟΣΕΙΡΩΝ (MULTI-STRING) ΥΠΟ ΜΕΡΙΚΗ ΣΚΙΑΣΗ	58
4.4.1. Οριζόντια σκίαση	59
4.4.2 Κατακόρυφη Σκίαση	60
4.4.3 Διαγώνια σκίαση	61
4.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΟΜΩΝ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΑΜΟΡΦΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ SINGLE-STRING ΚΑΙ MULTI-STRING	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	67
ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ Φ/Β ΜΟΝΤΕΛΟΥ	67
5.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΟΥ SCHUCO MPE85 AL01	68
5.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ Φ/Β ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΚΑΝΕΚΑ GEA060	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	77
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	77
6.1 ΣΥΜΒΟΛΗ ΕΡΕΥΝΑΣ	77
6.2 ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	77
6.3 ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ	78
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	79

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1. Γενικά

Η σύγχρονη εποχή χαρακτηρίζεται από τα τεράστια περιβαλλοντικά προβλήματα όπως η περιβαλλοντική ρύπανση, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η κλιματική αλλαγή και από την εξ ολοκλήρου πλέον εξάρτηση της κοινωνίας από την παραγωγή και χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Αίτια των φαινομένων αυτών είναι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν από την υπερεκμετάλλευση του πετρελαίου και άλλων ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας, σε συνδυασμό με τη ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και τη μείωση των αποθεμάτων των συμβατικών αυτών καυσίμων. Απόρροια των γεγονότων αυτών, τα τελευταία χρόνια να γίνεται όλο και πιο επιτακτική η ανάγκη η ανθρωπότητα να στραφεί σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας, γνωστές ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) όπως ο άνεμος, η βιομάζα, το νερό και ο ήλιος, οι οποίες είναι ανεξάντλητες, εντελώς φιλικές προς το περιβάλλον και η χρήση τους μόνο θετικά έχει να προσφέρει στην ανθρωπότητα και στον πλανήτη.



Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή ήπιες μορφές ενέργειας προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες και μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Αιολική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Υδατοπτώσεις
- Βιομάζα
- Γεωθερμική ενέργεια
- Ενέργεια από παλίρροιες
- Ενέργεια από κύματα
- Ενέργεια από τους ωκεανούς

Για την εκμετάλλευση των παραπάνω ήπιων μορφών ενέργειας έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες τεχνολογίες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η ηλιακή ενέργεια, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών (Φ/Β) στοιχείων. Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών είναι μια νέα σχετικά

τεχνολογία που εμφανίστηκε στη δεκαετία του 1960, κυρίως ως τμήμα διαστημικών εφαρμογών, και η οποία εμφανίζει μια ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια διεθνώς. Στις μέρες μας, πραγματοποιείται σημαντική έρευνα, με σκοπό την εξεύρεση νέων υλικών, αλλά και λιγότερο ενεργοβόρων διαδικασιών παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων, γεγονότα που από την μια θα αυξήσουν την απόδοση και από την άλλη θα μειώσουν το κόστος παραγωγής. Οι δύο τελευταίες παράμετροι αποτελούν και τα κύρια μειονεκτήματα της Φ/Β τεχνολογίας, τα οποία περιορίζουν την περαιτέρω αύξηση της διεύθυνσής της.

Τα πλεονεκτήματα της φωτοβολταϊκής μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική μπορούν να συνοψισθούν στα ακόλουθα:

- Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή, διατίθεται παντού και δεν στοιχίζει απολύτως τίποτα.
- Μηδενική ρύπανση και πλήρης απουσία αποβλήτων ή άλλων άχρηστων παραπροϊόντων.
- Αθόρυβη λειτουργία.
- Υψηλή αξιοπιστία των φωτοβολταϊκών συστημάτων.
- Ελάχιστες απαιτήσεις επίβλεψης και συντήρησης.
- Αντοχή σε ακραίες καιρικές συνθήκες (ισχυρούς άνεμους, ακραία χαλαζόπτωση, κλπ).
- Μεγάλη διάρκεια ζωής των ηλιακών στοιχείων (25 χρόνια).
- Σχετικά απλή μέθοδος κατασκευής των ηλιακών στοιχείων από πρώτες ύλες.
- Εύκολη επέκταση της υπάρχουσας εγκατάστασης.
- Δυνατότητα ανεξαρτησίας από τα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής για απομακρυσμένες περιοχές (αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα).
- Μεγάλο εύρος εφαρμογών, όσον αφορά την ισχύ. Από μερικά Watt μέχρι μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μερικών MW.
- Με την κατάλληλη γεωγραφική κατανομή, κοντά στους αντίστοιχους καταναλωτές ενέργειας, τα Φ/Β συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν χωρίς να απαιτείται ενίσχυση του δικτύου διανομής

Αντιθέτως τα κύρια μειονεκτήματα είναι:

- Σχετικά υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, το οποίο βέβαια, χάρις την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών, συνεχώς μειώνεται.
- Λόγω της μικρής πυκνότητας της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά και της χαμηλής απόδοσης των εμπορικών Φ/Β πλαισίων, απαιτείται η χρησιμοποίηση μεγάλων σχετικά επιφανειών.
- Εξάρτηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τις καιρικές συνθήκες, που αποτελούν έναν απρόβλεπτο παράγοντα, επιτρέποντας μόνο εκτιμήσεις σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα (συνήθως ετήσια) [21].

1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Η μελέτη της ηλεκτρικής απόκρισης των Φ/Β πλαισίων υπό μη ιδανικές συνθήκες ανομοιόμορφης ακτινοβολίας αποτελεί σχετικά πρόσφατο αντικείμενο έρευνας και ειδικότερα για την τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film) βρίσκεται σε αρχικό στάδιο, όπως αναφέρεται και στην επόμενη ενότητα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ερευνάται η λειτουργία των Φ/Β πλαισίων thin film άμορφου πυριτίου υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Για τον σκοπό αυτό, αναπτύσσεται ένα μοντέλο που περιγράφει τη λειτουργία των συγκεκριμένων Φ/Β πλαισίων, βασισμένο σε ένα εξειδικευμένο ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα της Φ/Β κυψέλης άμορφου πυριτίου, ενώ παράλληλα υιοθετείται κατάλληλη προσέγγιση για την απόκριση της μερικώς σκιασμένης κυψέλης, εξαιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των Φ/Β στοιχείων thin film.

1.3 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας

Πληθώρα διαφόρων αναλυτικών μοντέλων προσομοίωσης της ηλεκτρικής απόκρισης [3][4][18], καθώς και διάφορες μελέτες του φαινομένου μερικής σκίασης [4][18], έχουν αναπτυχθεί για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια της κρυσταλλικής τεχνολογίας. Αντίθετα, οι αντίστοιχοι ερευνητικοί τομείς, για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου της τεχνολογίας λεπτών υμενίων, βρίσκονται σε αρχικό στάδιο.

Η μη ικανοποιητική προσέγγιση της συμπεριφοράς των Φ/Β πλαισίων και Φ/Β στοιχείων άμορφου πυριτίου από τα σύνθετες ηλεκτρικά ισοδύναμα κυκλώματα που χρησιμοποιούνται στην κρυσταλλική τεχνολογία [7], καθιστά ως εξαιρετικά σημαντική, τη συμβολή που έχει στην παρούσα έρευνα, η ανάπτυξη ενός αντίστοιχου ισοδύναμου κυκλώματος για τα Φ/Β πλαίσια και Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου που παρουσιάζεται στο [6]. Αξιοσημείωτη είναι επίσης, η προσέγγιση της ηλεκτρικής απόκρισης των μερικώς σκιασμένων Φ/Β στοιχείων άμορφου πυριτίου που αναφέρεται στο [10], η οποία βασίζεται στην υποδιαίρεση της κυψέλης, σε ένα πλήθος παράλληλων συνδεδεμένων υποκυψέλων καθώς ακόμη και η αναφορά του περιορισμού χρησιμοποίησης μόνο μιας διόδου διαφυγής στα συγκεκριμένα Φ/Β πλαίσια. Μια διαφορετική, αλλά όχι τόσο ακριβής προσέγγιση, για την απόκριση της μερικώς σκιασμένης κυψέλης, χρησιμοποιώντας τον μέσο όρο της ακτινοβολίας, αναφέρεται στο [1]

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιώντας τις παραπάνω ερευνητικές πηγές, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο περιγραφής της ηλεκτρικής απόκρισης των Φ/Β πλαισίων άμορφου πυριτίου, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση, ότι η κυψέλη υποδιαιρείται σε δυο υποκυψέλες. Με βάση το προτεινόμενο μοντέλο λοιπόν, πραγματοποιήθηκε μια εκτενής μελέτη και σύγκριση της λειτουργίας των δύο δομών των Φ/Β πλαισίων άμορφου πυριτίου υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Τα αποτελέσματα της μελέτης καθώς και προτεινόμενο μοντέλο επιβεβαιώθηκαν από πειραματικά δεδομένα.

1.4 Δομή εργασίας

Στο εισαγωγικό κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών, καθώς και στο σκοπό της παρούσας εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής αναφορά σε όλες

τις κύριες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών και ειδικότερα στην τεχνολογία thin film αμόρφου πυριτίου. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα που χρησιμοποιείται και η μοντελοποίηση του πλαισίου με συστήματα εξισώσεων, για τις δύο τυπικές δομές Φ/Β πλαισίων άμορφου πυριτίου που εξετάζονται. Στο τέταρτο κεφάλαιο μελετάται η λειτουργία των Φ/Β πλαισίων των δύο δομών υπό συνθήκες μερικής σκίασης, ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που επιβεβαιώνουν το προτεινόμενο μοντέλο. Τέλος στο έκτο κεφάλαιο παρατίθεται η σύνοψη των αποτελεσμάτων της εργασίας και προτείνονται κατευθύνσεις περαιτέρω έρευνας.

Κεφάλαιο 2

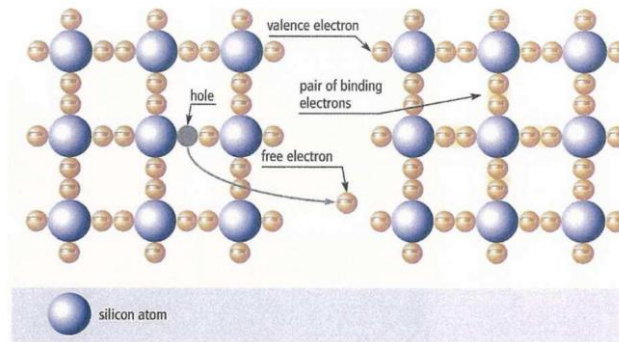
Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

2.1 Αρχή λειτουργίας φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική στα φωτοβολταϊκά συστήματα πραγματοποιείται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (ή ηλιακά κύτταρα ή κυψέλες). Καθώς προσπίπτει στην επιφάνειά τους ηλιακή ακτινοβολία, εκδηλώνουν μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής και την ένταση της ακτινοβολίας, αποδίδουν τάση 0,5-1,0V στην ανοικτοκύκλωση και ροή ρεύματος 10-40 mA/cm² σε λειτουργία βραχυκύκλωσης.

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο αποτελεί τη θεμελιώδη φυσική διαδικασία μέσω της οποίας ένα Φ/Β στοιχείο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρικό ρεύμα. Ημιαγώγιμα υλικά όπως το πυρίτιο (Si), το αρσενιούχο γάλιο (GaAs), το τελουριούχο κάδμιο (CdTe) ή ο δισεληνιούχος ινδιούχος χαλκός (CIS) χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό. Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια τα οποία περικλείουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα το μήκος κύματος. Όταν τα φωτόνια προσπίπτουν στη επιφάνεια ενός Φ/Β στοιχείου, μπορεί να ανακλαστούν, να απορροφηθούν ή απλά να διαπεράσουν το στοιχείο. Τα φωτόνια που απορροφούνται είναι αυτά που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.

Στη συνέχεια παρατίθεται μια συνοπτική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας των Φ/Β στοιχείων, χρησιμοποιώντας σαν παράδειγμα το στοιχείο κρυσταλλικού πυριτίου (sc-Si / mc-Si). Ωστόσο, και οι υπόλοιπες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών βασίζονται στις ίδιες αρχές λειτουργίας. Τα άτομα πυριτίου σχηματίζουν μια σταθερή τετραεδρική κρυσταλλική δομή, ενώ διαθέτουν τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους στην εξωτερική τους στοιβάδα (τετρασθενές στοιχείο). Καθένα από αυτά σχηματίζει ένα ομοιοπολικό δεσμό με ένα ηλεκτρόνιο γειτονικού ατόμου στο πλέγμα πυριτίου. Με τον τρόπο αυτό, κάθε άτομο συνδέεται με τέσσερα άτομα πυριτίου στην κρυσταλλική του δομή και “συμπληρώνει” την εξωτερική του στοιβάδα. Ένας ομοιοπολικός δεσμός είναι δυνατόν να σπάσει υπό την επίδραση ακτινοβολίας ή θερμότητας, οπότε το διεγερμένο ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται και αφήνει στη θέση του μια κενή θέση (οπή).



Σχήμα 2.1. Επίδραση ακτινοβολίας [12].

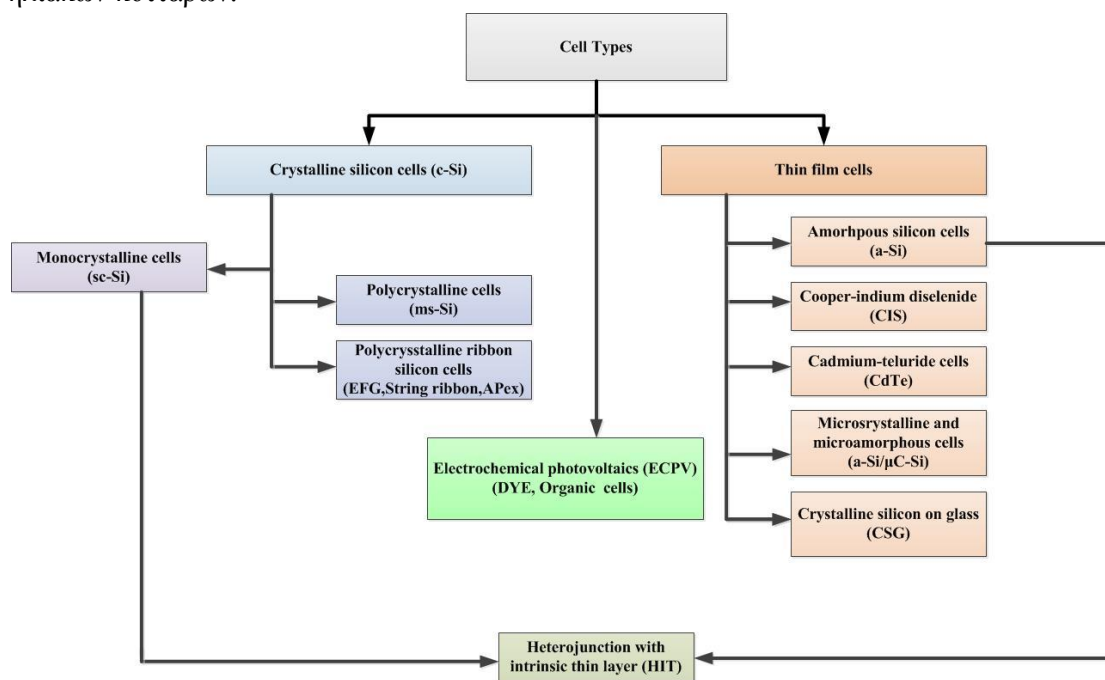
Το διεγερμένο ηλεκτρόνιο κυκλοφορεί ατάκτως μέσα στον κρύσταλλο για απειροελάχιστο χρονικό διάστημα, έως ότου πλησιάσει μια οπή και επανασυνδεθεί. Η μετακίνηση όμως αυτή δεν είναι η αιτία για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, γίνεται νόθευση του πυριτίου με κατάλληλες προσμίξεις. Τα άτομα που προστίθενται διαθέτουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο (πχ. φώσφορος) ή ένα λιγότερο (πχ. βόριο) στην εξωτερική τους στοιβάδα σε σχέση με το πυρίτιο. Στην περίπτωση της πρόσμιξης με πεντασθενές άτομο, όπως ο φώσφορος (πρόσμιξη τύπου n), παρατηρείται πλεόνασμα ενός ηλεκτρονίου για κάθε άτομο φωσφόρου. Το ηλεκτρόνιο αυτό μπορεί να κινείται ελεύθερα στον κρύσταλλο με πρόσληψη ελάχιστης ενέργειας και να αποτελεί ουσιαστικά ηλεκτρικό φορτίο (φορέας αγωγιμότητας). Αντίστοιχα, με την πρόσμιξη τρισθενούς ατόμου, όπως το βόριο (πρόσμιξη τύπου p), παρατηρείται έλλειμμα ηλεκτρονίου (οπή) για κάθε άτομο βορίου. Τα ηλεκτρόνια των γειτονικών ατόμων με την απορρόφηση μικρής ποσότητας ενέργειας μπορούν να μετακινηθούν προς την κενή θέση και να καλύψουν αυτή την οπή, με αποτέλεσμα τη δημιουργία οπής σε κάποιο άλλο σημείο του κρυστάλλου. Μπορεί να θεωρηθεί δηλαδή ότι σε αυτή την περίπτωση υφίσταται μεταφορά οπών και ως εκ τούτου, οι οπές αποτελούν αυτή τη φορά τους φορείς ηλεκτρικού ρεύματος (φορείς αγωγιμότητας).

Στο υλικό που έχει προκύψει από την πρόσμιξη (είτε p είτε n) τα ελεύθερα φορτία που μόλις περιγράφηκαν δεν έχουν κάποια καθορισμένη κατεύθυνση στην κίνησή τους. Εάν οι ημιαγωγοί τύπου p και n έρθουν σε επαφή μεταξύ τους, είναι δυνατόν να οδηγήσουν στο σχηματισμό μιας ένωσης p-n. Στην ένωση αυτή, τα πλεονάζοντα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού τύπου n διαχέονται προς την περιοχή του ημιαγωγού τύπου p. Δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο μια περιοχή στην οποία υπάρχουν λίγοι φορείς αγωγιμότητας, γνωστή ως ζώνη εξάντλησης φορέων (ή απογύμνωσης). Τα θετικά φορτισμένα ιόντα ωστόσο παραμένουν στην περιοχή n και τα αρνητικά στην p, προκαλώντας ένα εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο το οποίο αντισταθεί στη κίνηση των φορέων αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα η παραπάνω διάχυση να μη συνεχίζεται επ' άπειρον. [20]

Εάν ο ημιαγωγός p-n (φωτοβολταϊκό στοιχείο) εκτεθεί σε ηλιακή ακτινοβολία, τα ηλεκτρόνια είναι δυνατόν να απορροφήσουν φωτόνια με επαρκή ποσότητα ενέργειας, με αποτέλεσμα τη διάσπαση των χημικών δεσμών και δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίου-οπής. Καθώς αυτά κινούνται ελεύθερα στον κρύσταλλο όταν πλησιάσουν την περιοχή απογύμνωσης διαχωρίζονται, λόγω τους ηλεκτροστατικού της πεδίου. Τα ηλεκτρόνια συγκεντρώνονται στην περιοχή n και οι οπές στην απέναντι περιοχή p. Έτσι αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού, ενώ τα ηλεκτρόνια μέσω του εξωτερικού κυκλώματος θα ξαναβρούν και θα επανασυνδεθούν με τις οπές στην περιοχή p. Σε αυτή την κίνηση των ηλεκτρονίων οφείλεται η παραγωγή ρεύματος στα Φ/Β στοιχεία [24].

2.2 Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών

Οι δύο βασικές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών (Φ/Β) στοιχείων που συναντάμε σήμερα είναι η κρυσταλλική (c-Si) και η τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film). Οι δυο τεχνολογίες διαφέρουν όσον αφορά το βαθμό απορρόφησης του φωτός, την ενεργειακή απόδοση, τον τρόπο και το κόστος κατασκευής. Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται όλοι σχεδόν οι τύποι ηλιακών κυττάρων.



Σχήμα 2.2. Τύποι φωτοβολταϊκών κυττάρων.

2.2.1 Τεχνολογία Κρυσταλλικού Πυριτίου (c-Si)

Το πιο σημαντικό υλικό στα κρυσταλλικά Φ/Β στοιχεία είναι το πυρίτιο, το δεύτερο σε αφθονία στοιχείο στη γη μετά το οξυγόνο και, ως εκ τούτου είναι διαθέσιμο σε σχεδόν απεριόριστες ποσότητες. Το πυρίτιο βέβαια δεν βρίσκεται σε καθαρή μορφή, αλλά σε χημικές ενώσεις με οξυγόνο σε μορφή χαλαζία ή άμμου. Οπότε, το ανεπιθύμητο οξυγόνο πρέπει να διαχωριστεί από το διοξείδιο του πυριτίου ώστε να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή φωτοβολταϊκών.

Για να γίνει αυτός ο διαχωρισμός, η χαλαζιακή άμμος θερμαίνεται μαζί με άνθρακα σε σκόνη, οπάνθρακα και κάρβουνο σε κλίβανο σε θερμοκρασία της τάξης των 1800°C έως 1900°C. Παράγεται έτσι μονοξείδιο του άνθρακα και το γνωστό ως μεταλλουργικό πυρίτιο, η καθαρότητα του οποίου είναι 98%. Παρόλα αυτά, το 2% των ακαθαρσιών είναι ακόμα υψηλό ποσοστό για ηλεκτρονικές εφαρμογές. Από αυτό, πάρα πολύ μικρό είναι το ποσοστό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές και έτσι καθαρίζεται περαιτέρω με χημικές διαδικασίες. Έπειτα, κόβεται σε μικρά κομμάτια και αντιδρά με αέριο υδροχλωρίο (υδροχλωρικό οξύ) προς σχηματισμό υδρογόνου και τριχλωροσιλανίου, ένα υγρό που βράζει στους 31°C. Στο επόμενο στάδιο, το υγρό αυτό αποστάζεται μέχρις ότου το ποσοστό των ακαθαρσιών να περιοριστεί στα επιθυμητά επίπεδα. Το πρότυπο της βιομηχανίας είναι μια

χημική διεργασία εναπόθεσης ατμών γνωστή ως διαδικασία Siemens, η οποία χρησιμοποιείται για να εξάγει καθαρό πυρίτιο από τριχλωροσιλάνιο (SiHCl_3) και υδρογόνο (H). Τα δύο αέρια εμψυθούνται σε αντιδραστήρα όπου βρίσκονται λεπτές ράβδοι υψηλής καθαρότητας πυριτίου, θερμαίνονται σε θερμοκρασία μεταξύ 1000°C και 1200°C και το πυρίτιο από το τριχλωροσιλάνιο εναποτίθεται στις ράβδους. Το πυρίτιο που σχηματίζεται σε αυτή τη διαδικασία είναι το πολυκρυσταλλικό και είναι γνωστό ως πολυπυρίτιο. Οι ράβδοι διαμορφώνονται σε διάμετρο 10cm και 15cm και κόβονται εκ νέου σε μικρότερα κομμάτια για να χρησιμοποιηθούν ως πρώτη ύλη για μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά δισκία (wafers) πυριτίου, τα οποία στη συνέχεια μετατρέπονται σε ηλιακά στοιχεία.

Λόγω των εν γένει χαμηλότερων απαιτήσεων καθαρότητας για το πυρίτιο που χρησιμοποιείται στην κατασκευή ηλιακών κυψελών σε σχέση με τις ηλεκτρονικές εφαρμογές, η ηλιακή βιομηχανία αξιοποιεί κυρίως τα απόβλητα προϊόντα από τη βιομηχανία ημιαγωγών. Εδώ και χρόνια εντούτοις, δεν υπάρχουν αρκετά απόβλητα πυριτίου για να καλύψουν την ταχεία αύξηση της ζήτησης, οπότε το έλλειμμα καλύπτεται ως επί το πλείστον με χρήση καθαρού πυριτίου, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις με ελαφρώς χαμηλότερη ποιότητα. Κατά την ίδια περίοδο, αναπτύχθηκαν μέθοδοι που καθιστούν δυνατή την παραγωγή πυριτίου με την ίδια ποιότητα που απαιτείται για τα ηλιακά στοιχεία, με μικρότερο κόστος, χρόνο και ενεργειακές δαπάνες.

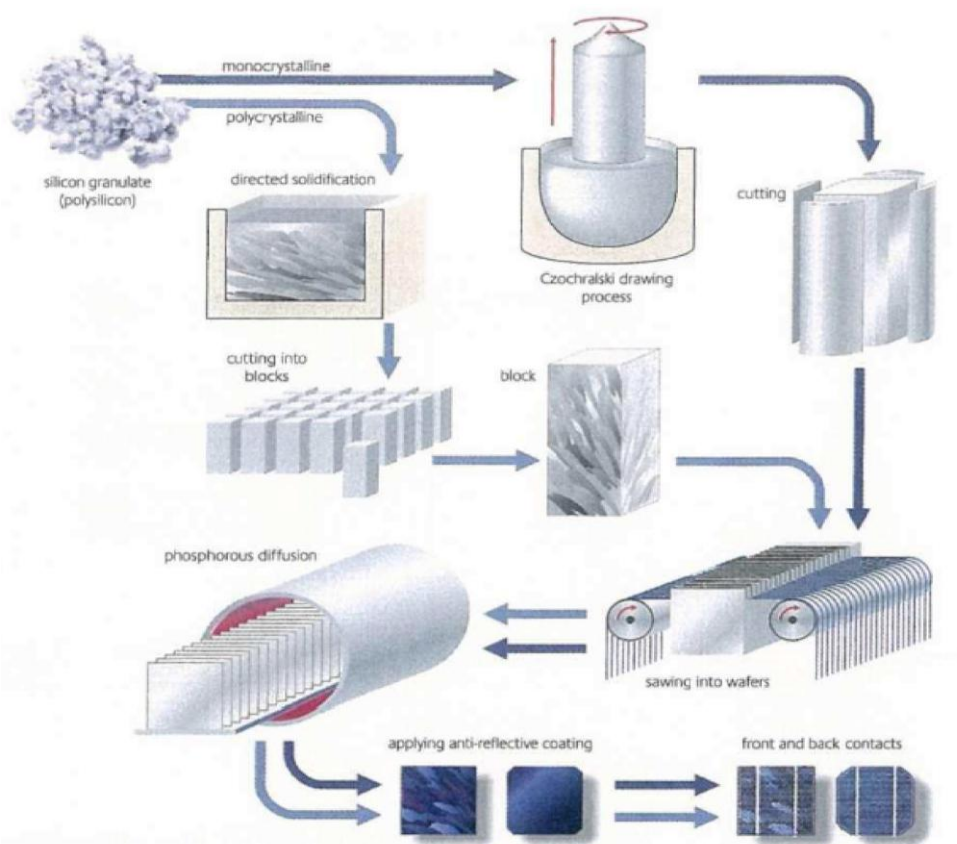
Οι τεχνικές που χρησιμοποιούν ορισμένοι κατασκευαστές πυριτίου για ηλιακές εφαρμογές είναι εξής: η μέθοδος με αντιδραστήρα ρευστοποίησης, με αντιδραστήρα σωλήνα και με εναπόθεση ατμών. Στους αντιδραστήρες ρευστοποίησης εισάγονται μικροσκοπικά σωματίδια πυριτίου μαζί με τριχλωροσιλάνιο (SiHCl_3) ή σιλάνιο (SiH_4) και υδρογόνο (H). Στους 1000°C για τριχλωροσιλάνιο ή 700°C για σιλάνιο, το πυρίτιο αυτών των υλικών εναποτίθεται στα σωματίδια, τα οποία γίνονται όλο και μεγαλύτερα μέχρι να βαρύνουν τόσο ώστε να πέσουν στον πυθμένα του αντιδραστήρα και να αφαιρεθούν ως κόκκοι πυριτίου. Η μέθοδος αντιδραστήρα σωλήνα, σε αντίθεση, είναι παρόμοια με τη διαδικασία Siemens. Αλλά αντί των ράβδων, χρησιμοποιείται ένας κοίλος κύλινδρος πυριτίου ο οποίος θερμαίνεται στους 800°C ενώ το σιλάνιο χρησιμοποιείται ως πηγή πυριτίου. Στην διαδικασία εναπόθεσης ατμών (VLD), πυρίτιο από αέριο τριχλωροσιλάνιο το οποίο εισάγεται μέσα σε ένα αντιδραστήρα μαζί με υδρογόνο, εναποτίθεται σε σωλήνα από γραφίτη που θερμαίνεται στους 1500°C . Το πυρίτιο, το οποίο υγροποιείται σε θερμοκρασία μεταξύ 1410°C και 1420°C , πέφτει στον πυθμένα του αντιδραστήρα όπου στερεοποιείται σε κόκκους [12].

2.2.1.1 Φ/Β Μονοκρυσταλλικού Πυριτίου (Single Crystalline Silicon, sc-Si)

Η τεχνική Czochralski (crucible drawing process) έχει καθιερωθεί στην παραγωγή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου, κατά την οποία τα άτομα του πυριτίου σχηματίζουν τέσσερις ομοιοπολικούς δεσμούς με τα γειτονικά τους άτομα διαμορφώνοντας μία τέλεια κρυσταλλική δομή. Σε αυτή τη διαδικασία, το αρχικά πολυκρυσταλλικό υλικό (πολυπυρίτιο) τήκεται σε χοάνη χαλαζία στους 1420°C και παράγεται ράβδος καθαρού μονοκρυσταλλικού πυριτίου, η οποία τεμαχίζεται μηχανικά ή με χρήση laser σε δισκία (wafers) πάχους περίπου 0,3mm. Έπειτα ακολουθεί η διαδικασία καθαρισμού των wafers, όπου βυθίζονται σε χημικά υγρά για να απομακρυνθούν τα υπολείμματα υλικού [12].

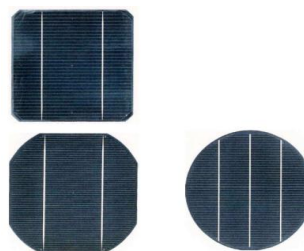
Η υψηλή τους ομοιομορφία έχει ως αποτέλεσμα τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία να χαρακτηρίζονται από πολύ καλή σχέση απόδοσης-επιφάνειας (ενεργειακής πυκνότητας), αλλά παράλληλα και από υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά [12].

- Απόδοση: 15%-18%, το ποσοστό αυτό οφείλεται κυρίως στην μεγαλύτερη ευαισθησία των μονοκρυσταλλικών κυττάρων στην υπέρυθη ακτινοβολία της οποίας το ενεργειακό περιεχόμενο είναι σχετικά χαμηλό [25]. Εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7% [21].
- Μορφή: ανάλογα τον τρόπο κοπής της μονοκρυσταλλικής ράβδου, κατασκευάζονται στρόγγυλα, ημιστρόγγυλα και τετράγωνα ηλιακά στοιχεία. Τα στρόγγυλα είναι πιο φθηνά από τα ημιστρόγγυλα και τα τετράγωνα, εξαιτίας της μικρότερης ποσότητας υλικού που χάνεται κατά την κατασκευή τους. Παρά το γεγονός αυτό, σπάνια χρησιμοποιούνται σε τυποποιημένα φωτοβολταϊκά πλαίσια διότι όταν τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο σε ένα πλαίσιο, εμφανίζονται κενά λόγω του σχήματός τους, χωρίς να αξιοποιείται ολόκληρη η επιφάνεια του πλαισίου. Ωστόσο, σε ειδικές περιπτώσεις, όπως σε κτίρια όπου είναι επιθυμητή μερική διαφάνεια των πλαισίων ή σε οικιακά ηλιακά συστήματα, τα στρόγγυλα στοιχεία είναι μια απολύτως βιώσιμη εναλλακτική λύση.



Σχήμα 2.3. Διαδικασία κατασκευής Φ/Β στοιχείων κρυσταλλικού πυριτίου [12].

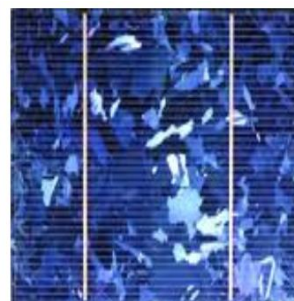
- Συνήθη μεγέθη: 10cm x 10cm, 12.5cm x 12.5cm, 15cm x 15cm.
- Πάχος: 0,2mm έως 0,3 mm.
- Εμφάνιση: ομοιογενής.
- Χρώμα: σκούρο μπλε με μαύρο (με αντι-ανακλαστικό στρώμα), γκρι (χωρίς αντι-ανακλαστικό στρώμα).



2.2.1.2 Φ/Β Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου (*Multicrystalline Silicon, mc-Si*)

Σε αντίθεση με τα μονοκρυσταλλικά, τα πολυκρυσταλλικά κύτταρα στο πλέγμα τους περιλαμβάνουν κρυστάλλους ποικίλων προσανατολισμών. Αιτία αυτής της διαφοροποίησης είναι η μαζική και λιγότερο ελεγχόμενη ψύξη του πυριτίου, κάτι που μειώνει αισθητά το κόστος παραγωγής [25]. Επιπρόσθετα, η διαδικασία αυτή έχει ως στόχο το σχηματισμό μεγάλου αριθμού ομοιογενών κρυστάλλων, με μεγέθη από λίγα χιλιοστά έως αρκετά εκατοστά, όπου τα άκρα τους συνιστούν ατέλειες της δομής και δρουν ως κέντρα επανασύνδεσης των φωτοδιεγερμένων φορέων, έχοντας έτσι δυσμενή επίδραση στην αποδοτικότητα του πολυκρυσταλλικού ηλιακού κυττάρου. Όπως και στην προηγούμενη τεχνολογία, μετά τη ψύξη το πολυκρυσταλλικό πλέγμα κόβεται σε λεπτά Φ/Β στοιχεία. Η ύπαρξη διαφόρων κρυστάλλων μέσα στο πλέγμα αυξάνει την εσωτερική αντίσταση στα σημεία σύνδεσής τους, με αποτέλεσμα ο συνολικός βαθμός απόδοσης να είναι μειωμένος σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά [12].

- Απόδοση: 13% έως 16%.
- Μορφή: Τετραγωνική.
- Συνήθη μεγέθη: 10cm x 10cm, 12.5cm x 12.5cm, 15cm x 15cm, 15.6cm x 15.6cm, 21cm x 21cm.
- Πάχος: 0,24mm έως 0,3 mm.
- Εμφάνιση: έντονη ανομοιογένεια με ευδιάκριτους μεμονωμένους κρυστάλλους.
- Χρώμα: μπλε (με αντι-ανακλαστικό στρώμα), ασημί-γκρι (χωρίς αντι-ανακλαστικό στρώμα).



2.2.1.3 Φ/Β Ταινιών Πυριτίου (*Ribbon Silicon*)

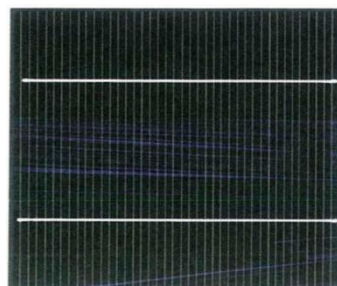
Το ελάχιστο πάχος που προβλέπεται για κρυσταλλικά στοιχεία είναι 0.3mm. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι κατασκευής οι οποίες προσφέρουν έως και 50% μείωση στην χρήση του ακατέργαστου πυριτίου, ώστε να μειωθούν οι μεγάλες απώλειες και χρήση υλικού κατά την κατασκευή. Σύμφωνα με αυτές, λωρίδες εξέρχονται απευθείας από το λιωμένο πυρίτιο, έχοντας ήδη το κατάλληλο πάχος των μελλοντικών κυττάρων και το μόνο που απομένει να γίνει είναι να κοπούν με τη χρήση laser σε κομμάτια. Αυτή η τεχνολογική ανάπτυξη δημιούργησε προσδοκίες πως μελλοντικά θα είναι δυνατή η μείωση του πάχους των ταινιών πυριτίου κάτω από 0.1mm. Σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής, η μέθοδος των ταινιών πυριτίου είναι πιο οικονομική από άποψη ενέργειας και υλικού, επιτυγχάνοντας έτσι μια σημαντική μείωση του κόστους. Τρεις τεχνολογίες που χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο στην παραγωγή εμπορικών ηλιακών κυττάρων παρουσιάζονται στη συνέχεια [12].

2.2.1.3.1 Φ/Β Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου EFG (*Edge-Defined Film-Fed Growth*)

Η διαδικασία EFG έχει χρησιμοποιηθεί στη μαζική παραγωγή για χρόνια, κατά την οποία ένα οκταγωνικό καλούπι κατασκευασμένο από γραφίτη βυθίζεται σε τήγμα πυριτίου. Έτσι δημιουργούνται οκταγωνικοί σωλήνες έως 6,5m σε μήκος, με πλευρές πλάτους 10cm ή

12,5cm και μέσο πάχος τοιχώματος 0,3mm. Τα τελικά κύτταρα κόβονται από τις οκτώ πλευρές τους με απώλειες υλικού λιγότερο από 10%. Τα EFG στοιχεία πυριτίου είναι πολυκρυσταλλικά αλλά με αρκετά μικρότερη πυκνότητα ατελειών στους κρυστάλλους. Η εμφάνιση και οι ηλεκτρικές ιδιότητες των κύτταρων μοιάζουν περισσότερο με αυτές των μονοκρυσταλλικών.

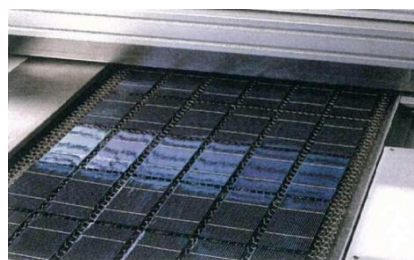
- Απόδοση: 14%, ενώ εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.
- Μορφή: Τετραγωνική.
- Μέγεθος: 12.5cm x 12.5cm.
- Πάχος: 0,24mm κατά μέσο όρο.
- Εμφάνιση: χαμηλή ανομοιογένεια με δυσδιάκριτους μεμονωμένους κρυστάλλους.
- Χρώμα: μπλε (με αντι-ανακλαστικό στρώμα) [12].



2.2.1.3.2 Φ/Β Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου String Ribbon

Κατά την παραγωγή στοιχείων string ribbon, δύο υπερθερμασμένες ίνες άνθρακα ή χαλαζία (strings) εισέρχονται κάθετα μέσα από μια επίπεδη χοάνη τήγματος πυριτίου. Το υγρό πυρίτιο σχηματίζει μια λωρίδα υλικού ανάμεσα στις ίνες και κρυσταλλώνεται σε μια λωρίδα πυριτίου πλάτους 8cm (ribbon), η οποία έπειτα κόβεται σε ορθογώνια κομμάτια.

- Απόδοση: 12% έως 13%.
- Μορφή: ορθογώνιο.
- Μέγεθος: 8cm x 15cm.
- Πάχος: 0,3mm.
- Εμφάνιση: ίδια με τα EFG κύτταρα.
- Χρώμα: μπλε (με αντι-ανακλαστικό στρώμα), ασημί-γκρι (χωρίς αντι-ανακλαστικό στρώμα).



2.2.1.3.3 Φ/Β Πολυκρυσταλλικού Πυριτίου APex

Τα APex κύτταρα αποτελούν την πρώτη εφαρμογή της τεχνολογίας thin-film με κρυσταλλικό πυρίτιο κατά το στάδιο της παραγωγής. Ένα ηλεκτρικά αγώγιμο κεραμικό υπόστρωμα που περιέχει πυρίτιο αντικαθιστά το παχύ δισκίο πυριτίου (wafer) και προσδίδεται σε αυτό ένα κάλυμμα λεπτού πολυκρυσταλλικού πυριτίου πάχους 0,03mm έως 0,1mm, το οποίο λειτουργεί ως φωτοβολταϊκό στρώμα (layer). Με τον τρόπο αυτό μεγάλου μεγέθους ηλιακά κύτταρα παράγονται, τα οποία έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τα συμβατικά πολυκρυσταλλικά στοιχεία. Υψηλές θερμοκρασίες απαιτούνται ακόμα κατά τη διαδικασία παραγωγής, 900°C έως 1000°C, αλλά η μικρή ποσότητα υψηλής ποιότητας ημιαγωγικού υλικού και η ταχύτερη παραγωγή κυττάρων οδηγούν σε χαμηλότερο κόστος παραγωγής.

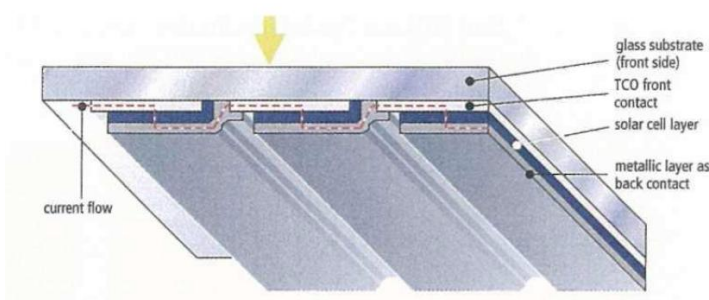
- Απόδοση: 9,5%.
- Μορφή: Τετραγωνική.
- Μέγεθος: 20.8cm x 20.8cm.
- Πάχος: 0,03mm έως 0,01mm επιπλέον του πάχους του κεραμικού υποστρώματος.

- Εμφάνιση: ίδια με τα πολυκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα.
- Χρώμα: μπλε (με αντι-ανακλαστικό στρώμα), ασημί-γκρι (χωρίς αντι-ανακλαστικό στρώμα) [12].

2.2.2 Τεχνολογία Λεπτών Υμενίων (*Thin Film*)

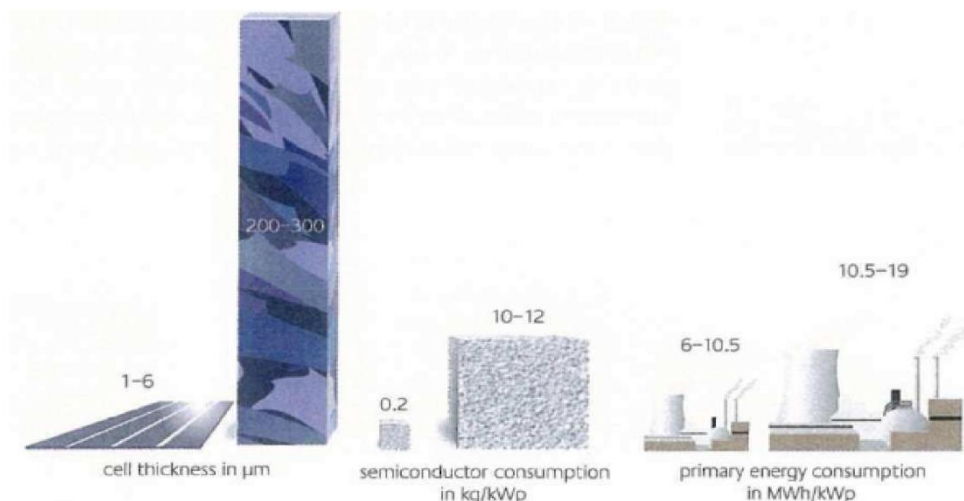
Τα thin-film πλαίσια διαφέρουν σημαντικά από τα κρυσταλλικά, από την αρχική φάση κατασκευής τους. Αντί τα ημιαγώγιμα υλικά να χυτευθούν και στη συνέχεια να καταταμηθούν σε στοιχεία, στην thin-film εναποτίθενται σαν μια λεπτή ημιαγώγιμη μεμβράνη πάνω σε ένα χαμηλού κόστους υπόστρωμα, συνήθως γυαλί. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι: εναπόθεση ατμών (vapour deposition), διαδικασίες ψεκασμού (sputter processes) και ηλεκτρολυτικά λουτρά (electrolytic baths). Τα ημιαγώγιμα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι άμορφο πυρίτιο (a-Si), δισεληνιούχος χαλκός με ίνδιο (CIS) και τελουριούχο κάδμιο (CdTe) [25]. Λόγω της υψηλής απορροφητικότητας της ακτινοβολίας αυτών των υλικών, στρώματα με πάχη μικρότερα από 0,001mm είναι θεωρητικώς ικανοποιητικά για τη μετατροπή του ηλιακού φωτός. Κατά την παραγωγή των thin film στοιχείων οι θερμοκρασίες που απαιτούνται είναι 200°C-600°C μόνο, έναντι των θερμοκρασιών των κρυσταλλικών που κυμαίνονται περί τους 1500°C. Η χαμηλότερη κατανάλωση υλικού και ενέργειας, καθώς και η ικανότητα για μια ιδιαίτερα αυτοματοποιημένη παραγωγή καθιστούν την τεχνολογία thin film πιο συμφέρουσα από άποψη κόστους σε σύγκριση με τη συμβατική τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου [12].

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία thin film δεν έχουν καθορισμένο σχήμα όπως τα κρυσταλλικά που κατασκευάζονται σε τυποποιημένα μεγέθη (wafers). Θεωρητικά, το υπόστρωμα τους μπορεί να κοπεί σε οποιοδήποτε μέγεθος. Εντούτοις, επειδή μόνο στοιχεία του ίδιου σχήματος μπορούν να συνδεθούν σε σειρά, χρησιμοποιούνται μόνο ορθογώνια σχήματα για πρακτικούς λόγους.



Σχήμα 2.4 Σε σειρά συνδεδεμένα Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου [12].

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που τα διαφοροποιεί από τα κρυσταλλικά είναι ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται μεταξύ τους. Ενώ τα κρυσταλλικά συνδέονται κύτταρο με κύτταρο με εξωτερικούς ακροδέκτες, η ηλεκτρική σύνδεση των στοιχείων thin film είναι αναπόσπαστο κομμάτι της κατασκευής τους, και γίνεται μονολιθικά κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης τους στο υπόστρωμα. Τα κύτταρα κόβονται σε λωρίδες πλάτους 0,5cm έως 2cm και μεγάλου μήκους, που μπορεί να ξεπερνά το 1 m, με ταυτόχρονο ηλεκτρικό διαχωρισμό από τις λεπτές αυλακώσεις που δημιουργούνται μεταξύ των κυττάρων. Το πλάτος των αυλακώσεων καθορίζει την απόδοση και συνάμα το βαθμό διαφάνειας του πλαισίου, και προσδιορίζεται ανάλογα την εφαρμογή.



Σχήμα 2.5. Σύγκριση κρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων (δεξιά) με στοιχεία thin film (αριστερά) [12].

Η ηλεκτρική επαφή του στοιχείου επιτυγχάνεται στο πίσω μέρος με ένα αδιαφανές επίστρωμα μετάλλων. Στην πρόσθια πλευρά όπου προσπίπτει η ακτινοβολία τοποθετείται ένα ιδιαίτερα διαφανές αγώγιμο στρώμα οξειδίων (transparent conductive oxide, TCO). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο αγώγιμο στρώμα οξειδίων είναι το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO), οξείδιο του κασσιτέρου (SnO_2) και το οξείδιο του κασσιτέρου-ινδίου (ITO) [12]. Το τελικό προϊόν προστατεύεται από ατμοσφαιρικούς παράγοντες (σκόνη, ρύποι, νερό) με ενθυλάκωση των στοιχείων με χρήση πολυμερούς EVA (ethylene vinyl acetate) πάνω στο οποίο τοποθετείται τμήμα γυαλιού [17].

Στην τεχνολογία thin film ο όρος στοιχείο και πλαίσιο πρέπει να συμπληρωθεί από τον όρο, *στοιχειοσειρά* (cellstring). Τα thin film στοιχεία συνίστανται ουσιαστικά σε στενόμακρες λωρίδες ημιαγώγιμου υλικού πάνω στο γυαλί υποστρώματος. Με το όρο *στοιχειοσειρά* περιγράφουμε τα εντελώς επικαλυμμένα στρώματα γυαλιού, με πολλαπλές λωρίδες στοιχείων που συνδέονται σε σειρά. Εντούτοις, η συνηθισμένη διάκριση μεταξύ της απόδοσης στοιχείου και πλαισίου δεν ισχύει στην παρούσα τεχνολογία, διότι τα thin film στοιχεία δεν παράγονται και δεν μετριοούνται χωριστά [12].

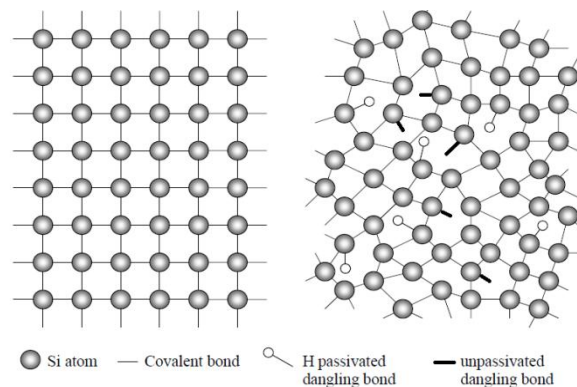
Παρά τη σχετικά χαμηλή απόδοση, η ενεργειακή παραγωγή τους μπορεί υπό ορισμένες συνθήκες να είναι αρκετά σημαντική. Η αξιοποίηση της διάχυτης και χαμηλής ακτινοβολίας είναι καλύτερη με τα στοιχεία thin-film και έχουν και πιο ευνοϊκό συντελεστή θερμοκρασίας, η μείωση δηλαδή της απόδοσης σε υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας είναι μικρότερη σε σχέση με άλλες τεχνολογίες. Επιπλέον, λόγω της μορφής των κυττάρων τους, οι μακριές στενές λωρίδες είναι λιγότερο ευαίσθητες στη σκίαση [12].

2.2.2.1 Φ/Β Άμορφο Πυρίτιο (Amorphous Silicon, a-Si)

2.2.2.1.1 Η δομή και το ενεργειακό διάκενο του a-Si

Το άμορφο πυρίτιο (a-Si) είναι μία αλλοτροπική μορφή του κρυσταλλικού πυρίτιου (c-Si). Στο κρυσταλλικό πυρίτιο κάθε άτομο φτιάχνει ομοιοπολικούς δεσμούς με 4 γειτονικά του άτομα, παίρνοντας τετραεδρική κρυσταλλική δομή στο χώρο. Όλοι οι δεσμοί έχουν το ίδιο μήκος και οι γωνίες μεταξύ τους είναι ίσες. Στο c-Si ο αριθμός συνδιάταξης όλων των ατόμων, δηλαδή το πλήθος των δεσμών που πραγματοποιούν με τα γειτονικά άτομα, είναι

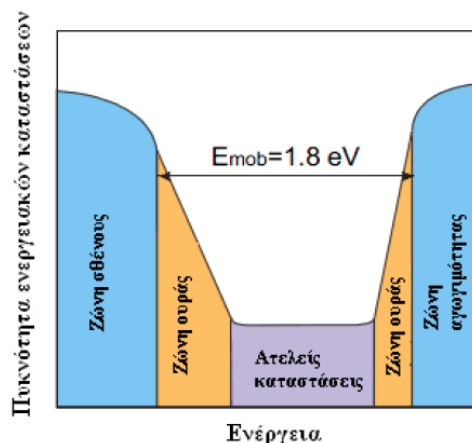
τέσσαρα. Αυτή η αυστηρή δομή δεν ισχύει για το άμορφο πυρίτιο. Υπάρχει μεν ομοιότητα στην ατομική σύνθεση όπου τα περισσότερα άτομα πυριτίου φτιάχνουν ομοιοπολικούς δεσμούς με 4 γειτονικά άτομα, αλλά αυτή η δομή δεν επεκτείνεται σε όλο τον όγκο. Οι μικρές αποκλίσεις στις γωνίες μεταξύ των δεσμών καθώς και στα μήκη τους, οδηγούν στην κατάρρευση του αυστηρού κρυσταλλικού πλέγματος. Αν οι αποκλίσεις αυτές αυξηθούν, τότε δημιουργούνται αδύναμοι δεσμοί που εύκολα καταστρέφονται και προκαλούν ατέλειες στο πλέγμα. Αυτές οι ατέλειες είναι τα άτομα που βρίσκονται εκτός θέσης, δηλαδή εκτός πλέγματος. Σε ένα συνεχές τυχαίο πλέγμα, όπως αυτό του a-Si, ένα άτομο πυριτίου δεν μπορεί να είναι εκτός θέσης. Η μοναδική ατέλεια που μπορεί να υπάρξει είναι η ατέλεια συνδιάταξης όπου ένα άτομο πυριτίου έχει παραπάνω ή λιγότερους δεσμούς. Στο a-Si οι ατέλειες αφορούν κατά πλειονότητα τα άτομα πυριτίου που συνδέονται μόνο με τρία γειτονικά άτομα, αφήνοντας ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο το οποίο σχηματίζει έναν μετέωρο ή αιωρούμενο δεσμό. Στο καθαρό άμορφο πυρίτιο, δηλαδή όταν υπάρχουν στο πλέγμα μόνο άτομα πυριτίου, η συγκέντρωση των ατελειών (μετέωροι δεσμοί) είναι περίπου 10^{21} ανά cm^3 . Ένα υλικό με τόσο μεγάλη συγκέντρωση ατελειών δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές καθότι οι ατέλειες λειτουργούν ως κέντρα επανασύνδεσης των φωτοδιεγερμένων φορέων. Σε περίπτωση όμως που το a-Si εναποτεθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να εισαχθούν στο πλέγμα άτομα υδρογόνου, αυτά καλύπτουν τις κενές θέσεις στα άτομα πυριτίου με τον ατελή δεσμό. Η παθητικοποίηση των ατελών δεσμών με υδρογόνο μειώνει τη συγκέντρωση των σφαλμάτων στο 10^{15} - 10^{16} ανά cm^3 στο a-Si:H καθιστώντας το υλικό αυτό ικανό για ηλεκτρονικές εφαρμογές. Στο άμορφο πυρίτιο, το οποίο κατασκευάζεται με ηλεκτρική εκκένωση μέσω ατμών σιλανίου (SiH_4), μπορούν να δημιουργηθούν n και p τμήματα απλώς διοχετεύοντας επιπρόσθετα αέρια στον θάλαμο κατασκευής του a-Si. Έτσι, εισάγοντας φωσφίνη (PH_3) τοποθετούνται άτομα φωσφόρου στο πλέγμα του άμορφου πυριτίου, ενώ με την εισαγωγή διβορανίου (B_2H_6) άτομα βορίου.



Σχήμα 2.6. Δομή μονοκρυσταλλικού πυριτίου με τους ομοιοπολικούς δεσμούς στο πλέγμα του (αριστερά), δομή υδρογονομένου άμορφου πυριτίου (a-Si:H) (δεξιά) [17].

Στο άμορφο πυρίτιο, το ενεργειακό διάκενο δεν έχει προκαθορισμένη σταθερή τιμή εξαιτίας της αταξίας του πλέγματος και των τεταμένων δεσμών μεταξύ των ατόμων, και η ζώνη σθένους και αγωγιμότητας επεκτείνονται με τις ζώνες ουράς εντός της απαγορευμένης ενεργειακής περιοχής. Επίσης, οι ατέλειες προκαλούν την εμφάνιση ενεργειακών καταστάσεων εντός της απαγορευμένης ενεργειακής ζώνης ανάμεσα στη ζώνη σθένους και τη ζώνη αγωγιμότητας. Τα ηλεκτρόνια και οπές που βρίσκονται σε αυτές τις επιπλέον ενεργειακές καταστάσεις χαρακτηρίζονται από μειωμένη κινητικότητα. Έτσι στο a-Si:H δεν ορίζεται το ενεργειακό διάκενο όπως στο c-Si, αλλά ως η διαφορά των ενεργειακών καταστάσεων με μεγάλη διαφορά κινητικότητας φορέων. Το ενεργειακό διάκενο

κινητικότητας στο a-Si:H είναι μεγαλύτερο από το ενεργειακό διάκενο του c-Si και παίρνει τιμές στο εύρος 1.75eV έως 1.80eV.



Σχήμα 2.7. Διάγραμμα ενεργειακών καταστάσεων υδρογονομένου άμορφου πυριτίου (a-Si:H) [17].

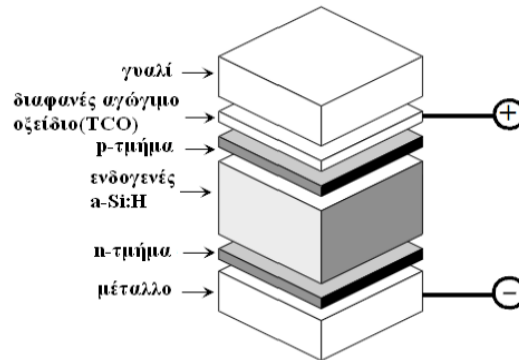
Οι ζώνες ουράς λειτουργούν ως κέντρα παγίδευσης των φορέων και προκαλούν τη δημιουργία χωρικών φορτίων στο στοιχείο, ενώ οι ατελείς ενεργειακές καταστάσεις συμπεριφέρονται ως ιδανικά σημεία επανασύνδεσης των φορέων επηρεάζοντας παράλληλα τον χρόνο ζωής τους [17].

2.2.2.1.2 Δομή του Φ/Β στοιχείου άμορφου πυριτίου

Μεταξύ των φωτοβολταϊκών στοιχείων c-Si και a-Si:H υπάρχει μία βασική διαφορά. Ένα συνηθισμένο Φ/Β στοιχείο κρυσταλλικού πυριτίου αποτελείται από ένα τμήμα p πάχους 300μm έως 500μm πάνω στο οποίο τοποθετείται ένα τμήμα n για να σχηματιστεί η διόδος p-n. Η διέγερση των φορέων γίνεται στον όγκο του ηλεκτρικά ουδέτερου τμήματος p (σε απόσταση ίση περίπου με το μήκος διάχυσης από την περιοχή της διόδου) από όπου τα φωτοδιεγερμένα ηλεκτρόνια διαχέονται προς τη ζώνη εξάντλησης της διόδου και ολισθαίνουν προς το n τμήμα μέσω της επίδρασης του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Στο a-Si:H τα μήκη διάχυσης των φορέων είναι πολύ μικρότερα. Σε ένα ενδογενές τμήμα υδρογονομένου άμορφου πυριτίου το μήκος διάχυσης είναι 0.1μm έως 0.3μm. Στα νοθευμένα τμήματα όπου η συγκέντρωση των ατελειών είναι πολύ μεγαλύτερη, το μήκος διάχυσης μειώνεται αισθητά.

Μία δομή Φ/Β στοιχείου βασισμένη στην διάχυση των φορέων μειονότητας στις ηλεκτρικά ουδέτερες νοθευμένες περιοχές, όπως στο κρυσταλλικό πυρίτιο, δεν θα ήταν αποδοτική. Όλοι οι φωτοδιεγερμένοι φορείς θα επανασυνδέονταν στους μετέωρους δεσμούς προτού φτάσουν στη ζώνη εξάντλησης της διόδου p-n λόγω του πολύ μικρού μήκους διάχυσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η δομή p-i-n που αποτελείται από τρία τμήματα: ένα τμήμα p a-SiC:H, ένα ενδογενές τμήμα a-Si:H (i-layer) και ένα τμήμα n a-Si:H. Το τμήμα p a-SiC:H έχει συνήθως πάχος 10nm, το ενδογενές τμήμα a-Si:H 300-500nm και το τμήμα n a-Si:H 20nm. Το ενδογενές τμήμα τοποθετείται ανάμεσα στα νοθευμένα τμήματα έτσι ώστε να παρουσιάζεται ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που δημιουργούνται εντός του i τμήματος, υπό την επίδραση του πεδίου διαχωρίζονται και τα μεν ηλεκτρόνια ολισθαίνουν προς το n τμήμα ενώ οι οπές προς το p τμήμα όπου συλλέγονται από

τους εξωτερικούς ακροδέκτες. Έτσι, η βέλτιστη δομή ενός a-Si:H είναι η ένωση p-i-n, η οποία έχει μια διάφανη αγώγιμη επαφή στο p τμήμα και μια ωμική επαφή στο n-τμήμα.

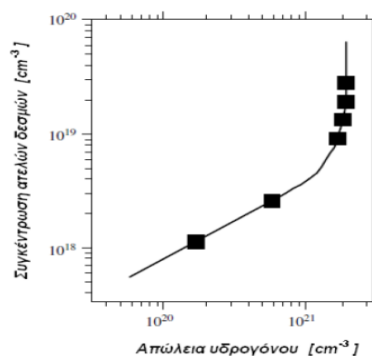


Σχήμα 2.8. Δομή τυπικού Φ/Β στοιχείου άμορφου πυριτίου [17].

Τέλος, στα περισσότερα φ/β στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου η επιφάνεια ακτινοβολίας είναι το τμήμα n. Στα στοιχεία άμορφου πυριτίου η ακτινοβολήση μέσω του τμήματος αυτού, θα ανάγκαζε τις δημιουργούμενες οπές να ταξιδέψουν μέχρι τον ακροδέκτη του p τμήματος διαμέσου του ενδογενούς τμήματος. Οι οπές όμως, όπως έχει ήδη αναφερθεί, έχουν πολύ μικρότερη κινητικότητα σε σχέση με τα ηλεκτρόνια και σε συνδυασμό με τις ατέλειες του υλικού δεν θα μπορούσαν να συλληθθούν αποτελεσματικά. Για αυτό το λόγο έχει επικρατήσει τα στοιχεία αυτά να ακτινοβολούνται πάντα από την p περιοχή [17].

2.2.2.1.3 Το φαινόμενο Staebler-Wronski

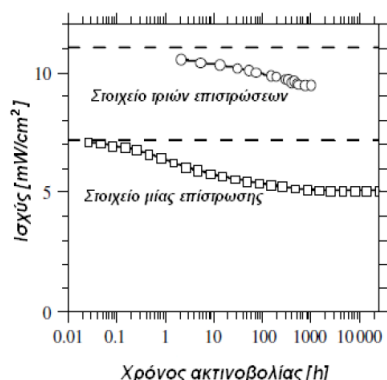
Το φαινόμενο Staebler-Wronski αφορά τις αλλαγές που προκαλούνται στο υλικό λόγω της ακτινοβολίας. Η πυκνότητα των ατελειών του υδρογονωμένου άμορφου πυριτίου αυξάνεται, διότι η ακτινοβολία παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για την απομάκρυνση του υδρογόνου από τους δεσμούς. Άμεση συνέπεια είναι η αύξηση του ρεύματος επανασύνδεσης που οδηγεί σε μείωση της απόδοσης των κυττάρων άμορφου πυριτίου κατά τη διάρκεια των πρώτων 6 έως 12 μηνών, πριν σταθεροποιηθεί στην τελική της τιμή [23].



Σχήμα 2.9. Διάγραμμα της συγκέντρωσης των ατελών δεσμών του υλικού ως προς το αφαιρούμενο υδρογόνο λόγω θέρμανσης [17].

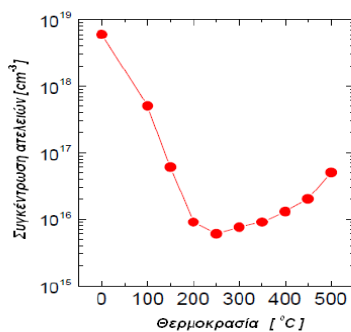
Από το σχήμα 2.10 είναι εμφανές πως κατά τις πρώτες 1000 ώρες ακτινοβολίας ένα στοιχείο μιας επίστρωσης (single junction) a-Si χάνει περίπου το 30% της αρχικής του

απόδοσης, ενώ ένα στοιχείο τριών επιστρώσεων (triple junction), με 3 στρώματα διαφορετικού φ/β υλικού, το 15%.



Σχήμα 2.10. Η μείωση της ισχύος εξόδου υπό ακτινοβολία ηλιακού προσομοιωτή ($100\text{mW}/\text{cm}^2$) για ένα στοιχείο μίας επίστρωσης πάχους 260nm και ενός στοιχείου τριών επιστρώσεων. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι οι αρχικές τιμές της ισχύος εξόδου [17].

Η κατανόηση του φαινομένου Staebler–Wronki θα μπορούσε να οδηγήσει σε πλήρη εξάλειψή του, με την κατάλληλη τροποποίηση των τεχνικών παραγωγής των στοιχείων a-Si:H. Η μείωση της απόδοσης των στοιχείων όμως δεν είναι αμετάκλητη. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα η συγκέντρωση των ατελειών σχετίζεται με τη θερμοκρασία του υλικού. Η θέρμανση των στοιχείων στους 150°C - 200°C έχει σαν συνέπεια την επαναφορά του συστήματος στις αρχικές του συνθήκες απόδοσης [17].



Σχήμα 2.11. Διάγραμμα της συγκέντρωσης των ατελών δεσμών με την αύξηση της θερμοκρασίας [17].

Επιπρόσθετα, τα Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου παρουσιάζουν μια ακόμη ιδιαιτερότητα αναφορικά με την απόδοσή τους. Κατά τη διάρκεια του χειμώνα εμφανίζουν μείωση στην απόδοσή η οποία επανέρχεται τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω των υψηλών θερμοκρασιών. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως θερμική αναγέννηση.

Συχνά στα στοιχεία άμορφου πυριτίου εναποτίθενται πολλαπλές δομές p-i-n ή μια πάνω στην άλλη, σχηματίζονται έτσι πολυστρωματικά ηλιακά κύτταρα. Τα *tandem* κύτταρα αποτελούνται από δύο τέτοιες επιστρώσεις και τα *triple* από τρεις. Η εν λόγω δομή επιτρέπει να επιτυγχάνονται υψηλότερες αποδόσεις, δεδομένου ότι κάθε τμήμα του κυττάρου μπορεί να βελτιστοποιηθεί για διαφορετική ζώνη μήκους κύματος του ηλιακού φάσματος. Επιπλέον, στα πολυστρωματικά κύτταρα το φαινόμενο της γήρανσης μειώνεται δεδομένου πως το κάθε

i-στρώμα είναι λεπτότερο και συνεπώς λιγότερο ευαίσθητο στην υποβάθμιση λόγω της έκθεσης στο φως (light degradation) [12].

- Απόδοση: 5% έως 7% απόδοση πλαισίου στη σταθεροποιημένη κατάσταση.
- Μέγεθος: τυπικά πλαίσια, μέγιστες διαστάσεις 0.79m x 2.44m, ειδικά πλαίσια, μέγιστες διαστάσεις 2m x 3m.
- Πάχος: 1mm έως 3mm υλικού υποστρώματος (γυαλί, μέταλλο, περιστασιακά 0,05mm πλαστικό), με περίπου 0,001mm (1nm) πάχος στρώματος, από το οποίο περίπου 0.3nm είναι άμορφο πυρίτιο.
- Εμφάνιση: ομοιογενής.
- Χρώμα: κοκκινωπό καφέ με μπλε ή μπλε-ιώδες.

Συνοψίζοντας, τα thin film και τα κρυσταλλικά φ/β πλαίσια διαφέρουν ως προς την απόδοση, την εξάρτηση από τη θερμοκρασία, τη φασματική απορρόφηση και την ανοχή στη σκίαση. Η χαμηλότερη απόδοση των πρώτων ουσιαστικά σημαίνει ότι για να επιτευχθεί η επιθυμητή παραγωγή ενέργειας απαιτείται μεγαλύτερη επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά. Πέραν αυτών, αξιοσημείωτη είναι η εμφάνιση πιο επίπεδων χαρακτηριστικών καμπυλών ρεύματος-τάσης ($I-V$) στα thin film, που οδηγεί σε μικρότερους συντελεστές πλήρωσης (FF). Η περιορισμένη επίδραση της θερμοκρασίας οφείλεται στις υψηλότερες στάθμες των ενεργειακών διάκενων συμβάλλοντας καθοριστικά σε αποδοτικότερη λειτουργία [12].

2.2.2.2 Φ/Β Δισεληνιούχου ινδιούχου χαλκού (*Copper Indium diSelenide, CIS*)

Ο δισεληνιούχος ινδιούχος χαλκός είναι ημιαγώγιμο υλικό, τύπου-n ή τύπου-p, με τον υψηλότερο συντελεστή απορρόφησης που έχει μετρηθεί μέχρι σήμερα. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των CIS εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον λόγο χαλκού/ινδίου. Πλεονεκτούν σε σχέση με τα στοιχεία άμορφου πυριτίου, καθώς δεν εμφανίζουν μείωση στην απόδοσή τους λόγω της ακτινοβολίας (light degradation), και προσφέρουν επίσης μεγάλη οικονομία στα ημιαγώγιμα υλικά [12]. Μειονέκτημα της τεχνολογίας είναι οι περιορισμένες ποσότητες ινδίου που είναι διαθέσιμες στη φύση, καθώς επίσης και τα αυξημένα μέτρα ασφαλείας που λαμβάνονται κατά την κατασκευή, εξαιτίας και της παραγωγής σεληνιούχου υδρογόνου, ενός εξαιρετικά τοξικού αερίου. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), χύτευση πυριτίου και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC [22].

- Απόδοση: 9% έως 11 % απόδοση πλαισίου.
- Μέγεθος: τυπικά πλαίσια, μέγιστες διαστάσεις 1,2m x 0,6 m.
- Πάχος: 2mm έως 4mm υλικό υποστρώματος (γυαλί) με 3nm έως 4nm πάχος στρώματος, εκ των οποίων περίπου 1nm έως 2nm CIS.
- Εμφάνιση: ομοιογενής.
- Χρώμα: σκούρο γκρι, μαύρο.

2.2.2.3 Φ/Β Τελλουριούχου καδμίου (*Cadmium Telluride, CdTe*)

Το τελλουριούχο κάδμιο είναι ένα ημιαγώγιμο υλικό που αποτελείται από κάδμιο και τελλούριο, το οποίο διακρίνεται για τον υψηλό βαθμό απορρόφησης της ηλιακής

ακτινοβολίας και το ενεργειακό του διάκενο ($\sim 1\text{eV}$) που είναι πολύ κοντά στο ιδανικό. Αρκεί πάχος $1\mu\text{m}$ ώστε να απορροφηθεί το 90 % του ηλιακού φάσματος. Υπάρχουν τεχνικές χαμηλού κόστους, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόθεση του CdTe, και αφού υποστεί μια επεξεργασία, να παραχθεί υλικό υψηλής ποιότητας και αποδοτικά ηλιακά στοιχεία. Τα πλαίσια CdTe έχουν το χαμηλότερο κόστος παραγωγής σε σχέση με τα άλλα thin-film πλαίσια. Μειονέκτημα όμως της συγκεκριμένης τεχνολογίας αποτελεί το γεγονός πως το κάδμιο είναι τοξικό υλικό απαιτώντας τη λήψη αυξημένων μέτρων προστασίας κατά την παραγωγή του. Το κάδμιο (βαρύ μέταλλο), σύμφωνα με κάποιες έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του, το οποίο βέβαια θα οδηγούσε σε μείωση του κόστους παραγωγής. Βέβαια, δεδομένου ότι το κάδμιο που χρησιμοποιείται λαμβάνεται από την εξόρυξη ψευδαργύρου ως απόβλητο προϊόν, η μεταποίησή του σε αβλαβές CdTe στα ηλιακά πλαίσια μπορεί να θεωρηθεί ως οικολογικά επωφελής διαδικασία. Το CdTe είναι μη τοξική και πολύ σταθερή ένωση, διασπάται σε θερμοκρασίες άνω των 1000°C και δεν υπάρχει φόβος για το περιβάλλον και την υγεία, καθώς ακόμη και στο ενδεχόμενο πυρκαγιάς το βαρύ μέταλλο θα παραμείνει εγκλωβισμένο στο γυαλί του πλαισίου, το οποίο τήκεται σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία [12]. Οι κατασκευαστές ανακυκλώνουν τα πλαίσια που έχουν φθάσει στο τέλος ζωής τους με μια φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία.

- Απόδοση: 8,5% απόδοση πλαισίου.
- Πάχος: 3mm υλικό υποστρώματος (γυαλί) με 0,005mm στρώμα CdTe.
- Μέγεθος: τυπικά πλαίσια 1,2 x 0,6 m.
- Εμφάνιση: ομοιογενής.
- Χρώμα: αντανακλαστικό σκούρο πράσινο σε μαύρο.

2.2.2.4 Φ/Β Λεπτών υμενίων με κρυσταλλικό πυρίτιο

Τα thin-film ηλιακά κύτταρα από κρυσταλλικό πυρίτιο είναι μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση για το μέλλον. Δεν επωφελούνται μόνο από τα πλεονεκτήματα του κρυσταλλικού πυριτίου, αλλά και από τα πλεονεκτήματα κατασκευής της τεχνολογίας thin-film, φθηνή αυτοματοποιημένη μαζική παραγωγή με ελάχιστη κατανάλωση υλικού. Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά δυο τύποι κυττάρων της εν λόγω τεχνολογίας.

2.2.2.4.1 Φ/Β μικροκρυσταλλικού και άμορφου πυριτίου (a-Si / $\mu\text{c-Si}$)

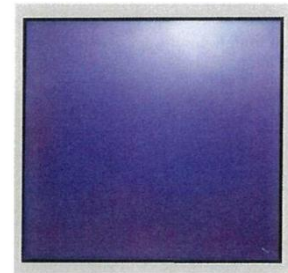
Η κατασκευή των μικροκρυσταλλικών και μικροάμορφων ηλιακών στοιχείων πραγματοποιείται αντίστοιχα με την τεχνολογία λεπτών υμενίων, με εναπόθεση υλικού όπως στο άμορφο πυρίτιο. Η εναπόθεση γίνεται σε θερμοκρασίες μεταξύ 200°C και 600°C και παράγονται ταινίες πυριτίου με μικροκρυσταλλικές δομές. Οι χαμηλές θερμοκρασίες επιτρέπουν τη χρήση φθηνών υποστρωμάτων κατασκευασμένα από γυαλί, μέταλλο ή πλαστικό. Προκειμένου να δημιουργηθούν στρώματα κρυσταλλικού πυριτίου πάχους μικρότερου των 10nm , που παρά τη χαμηλή ικανότητα απορρόφησής τους να είναι αποδοτικά, η επιφάνεια του διαφανούς αγωγίμου υλικού (transparent conductive oxide, TCO) διαμορφώνεται ανάγλυφα, ώστε να βελτιστοποιηθεί η δέσμευση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Τα μικροκρυσταλλικά κύτταρα έχουν παρόμοιες οπτικές ιδιότητες με τα κρυσταλλικά και οι αποδόσεις τους ξεπερνούν το 8,5%.

Καλύτερα αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν με συνδυασμό άμορφου πυριτίου σε κύτταρα δύο στρωμάτων (tandem). Αυτά τα κύτταρα ονομάζονται μικροάμορφα, όρος

προερχόμενος από τις λέξεις μικροκρυσταλλικό και άμορφο. Όταν συνδυάζονται, αξιοποιούν αποδοτικότερα το ηλιακό φάσμα από ό,τι μπορούν μεμονωμένα, καθώς απορροφούν ακτινοβολία ευρύτερου φάσματος, ενώ παράλληλα υφίστανται ηπιότερη υποβάθμιση από ακτινοβόληση, σε αντίθεση με τα καθαρά άμορφα στοιχεία. Η απόδοση εμπορικών πλαϊσιών αγγίζει το 9%, ενώ η μέγιστη απόδοση που έχει επιτευχθεί είναι 12%. Συχνά αναφέρονται και ως υβριδικά (hybrid) πλαϊσια, όρος που δεν πρέπει να συγχέεται με τα HIT ηλιακά κύτταρα, τα οποία βασίζονται σε γκοφρέτες και περιγράφονται ακολούθως [12].

2.2.2.4.2 Φ/Β Κρυσταλλικού πυριτίου σε γυαλί (Crystalline Silicon on Glass, CSG)

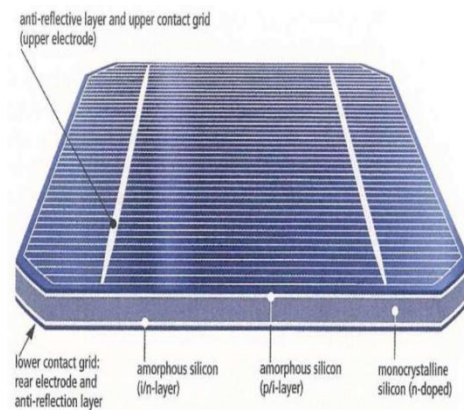
Τα thin-film ηλιακά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου σε γυαλί (CSG) δημιουργήθηκαν με σκοπό να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματα των δισκίων (wafers) πυριτίου, δηλαδή ανθεκτικότητα και αντοχή των καλών ηλεκτρικών ιδιοτήτων τους, με τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα της thin-film τεχνολογίας, μικρή ποσότητα υλικού, μεγάλη μονολιθική δομή και υπόστρωμα φθηνού υλικού, γυαλί. Η πρόκληση της τεχνολογίας CGS είναι να ταιριάζουν οι διαφορετικές θερμοκρασίες επεξεργασίας πυριτίου και γυαλιού, και ταυτόχρονα να υπάρξει ικανοποιητική εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας στο μειωμένης απορροφητικότητας μικρού πάχους στρώμα πυριτίου (1,4nm). Τα πρώτα πλαϊσια μαζικής παραγωγής έχουν αποδόσεις της τάξεως του 9%, ενώ οι προβλέψεις για τα επόμενα χρόνια αναφέρουν αύξηση στο 12% με 13%. Η εκτίμηση αυτή για tandem κύτταρα είναι στο 16% με 17% ενώ για triple αγγίζει το 18% με 19% [8].



2.2.3 Υβριδικά Φ/Β στοιχεία (Heterojunction with Intrinsic Thin layer-HIT)

Τα υβριδικά ηλιακά στοιχεία (HIT) είναι συνδυασμός ενός κρυσταλλικού και ενός thin-film άμορφου πυριτίου κυττάρου που είναι συνδεδεμένα με ένα επιπλέον μη-νοθευμένο thin film (i-στρώμα). Το μονοκρυσταλλικό κύτταρο (wafer) συνιστά τον πυρήνα του HIT κυττάρου και επικαλύπτεται και από τις δύο πλευρές του με ένα λεπτό στρώμα από άμορφο πυρίτιο (a-Si). Ως ενδιάμεσο τμήμα χρησιμοποιείται, μια εξαιρετικά λεπτή μη νοθευμένη μεμβράνη άμορφου πυριτίου που ενώνει το κρυσταλλικό με τα άλλα στρώματα άμορφου πυριτίου.

Η διαφορά με τα συμβατικά ηλιακά στοιχεία πυριτίου, έγκειται στο γεγονός πως στα συμβατικά το ίδιο ημιαγώγιμο υλικό νοθεύεται με διαφορετικό τρόπο ώστε να δημιουργηθεί μια p-n ένωση, ενώ στα HIT αυτό συμβαίνει μεταξύ των δύο διαφορετικών υλικών (heterojunction). Έτσι το άμορφο p/i τμήμα και το n τμήμα του κρυσταλλικού στοιχείου δημιουργούν μια δομή p-i-n όπως τα κύτταρα άμορφου πυριτίου. Επιπλέον, δεν παρουσιάζουν το φαινόμενο της υποβάθμισης από την ακτινοβολία όπως τα άμορφο πυριτίου,



ενώ εν συγκρίσει με τα κρυσταλλικά παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποδόσεις σε υψηλές θερμοκρασίες και αποδοτικότερη αξιοποίηση του ηλιακού φάσματος. Για κάθε βαθμό Κελσίου αύξηση της θερμοκρασίας, η απόδοση μειώνεται τυπικά μόνο κατά 0,33% σε σύγκριση με το 0,45% του κρυσταλλικού πυριτίου. Επίσης, κατά την κατασκευή των HIT απαιτούνται μικρότερα ποσά ενέργειας και υλικού, ενώ η απαιτούμενη θερμοκρασία εναπόθεσης είναι μόλις 200 ° C [12].

- Απόδοση: 18,5%.
- Μορφή: τετράγωνη (στρογγυλεμένες γωνίες).
- Μέγεθος: 10,4cm x 10,4cm, 12,5cm x 12,5 cm.
- Πάχος: 0,2 mm.
- Εμφάνιση: ομοιογενής.
- Χρώμα: σκούρο μπλε σχεδόν μαύρο.

2.2.4 Πλαίσια τεχνολογίας III-IV ομάδας του περιοδικού πίνακα

Το όνομα των τεχνολογιών αυτών έχει προκύψει από το βασικό υλικό κατασκευής τους, το οποίο κατατάσσεται στην τρίτη ή τέταρτη ομάδα του περιοδικού πίνακα. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν μεν υψηλή ικανότητα μετατροπής αλλά συγχρόνως παρουσιάζουν και υψηλό κόστος. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται έχουν ικανότητα μετατροπής γύρω στο 25%, όπως το αρσενιούχο γάλιο, το οποίο συνδυάζεται με άλλες ουσίες για τη δημιουργία ημιαγωγών που αποκρίνονται σε διαφορετικούς τύπους ηλιακής ενέργειας. Ωστόσο, η χρήση τους περιορίζεται μόνο σε αεροδιαστημικές εφαρμογές εξαιτίας του υψηλού κόστους όπως προαναφέρθηκε [19].

2.2.5 Ηλεκτροχημικά Φ/Β (Electrochemical photovoltaics, ECPV)

Σε αντίθεση με τα ημιαγωγικά Φ/Β στοιχεία που προαναφέρθηκαν τα οποία ακολουθούν τις αρχές λειτουργίας που συναντούμε στις ημιαγωγικές διατάξεις p-n, η λειτουργία των ηλεκτροχημικών (ή φωτοηλεκτροχημικών) Φ/Β στηρίζεται σε οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις και φαινόμενα διάχυσης. Τα φωτοηλεκτροχημικά στοιχεία μειονεκτούν έναντι των ημιαγωγικών σε αποδόσεις, υπερτερούν όμως σε θέματα χαμηλού κόστους, ευκολίας κατασκευής και χρήσης τους σε ειδικές εφαρμογές. Χωρίζονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες [15]:

2.2.5.1 Φ/Β Ευαισθητοποιημένων ηλιακών κυψελών (Dye-sensitized nanocrystalline)

Τα πρώτα ηλιακά στοιχεία αυτής της τεχνολογίας αποτελούνταν από ένα μεμονωμένο στρώμα οξειδίου του τιτανίου και δεν παρουσίαζαν υψηλές αποδόσεις επειδή το TiO₂ απορροφά μόνο την υπεριώδη ακτινοβολία. Με την κατασκευή των ευαισθητοποιημένων ηλιακών κυττάρων (Dye-sensitized solar cells, DSSCs) η απόδοση αυξήθηκε καθώς η χρωστική ουσία που χρησιμοποιείται απορροφά στο ορατό φάσμα και έτσι σε συνδυασμό με

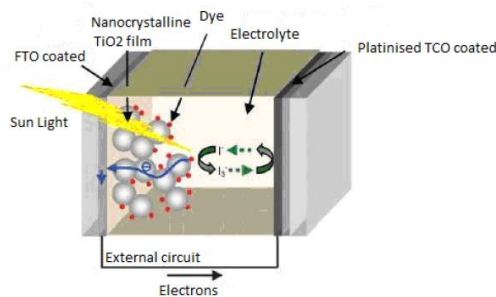
τον ημιαγωγό, το φάσμα απορρόφησης του κυττάρου διευρύνεται. Μια ευαισθητοποιημένη ηλιακή κυψέλη απαρτίζεται από τα τέσσερα ακόλουθα μέρη:

α) Ένα διαφανές γυαλί με αγώγιμη επίστρωση FTO (Fluorine-doped tin oxide) πάνω στο οποίο εναποτίθεται λεπτή στρώση ημιαγωγού TiO_2 (φωτοηλεκτρόδιο).

β) Μία μοριακή χρωστική ουσία που λειτουργεί ως ευαισθητοποιητής του ημιαγωγού και προσροφάτε χημικά στην επιφάνεια του.

γ) Έναν ηλεκτρολύτη, δηλαδή έναν οργανικό διαλύτη που περιέχει ένα οξειδοαναγωγικό ζεύγος και βρίσκεται σε επαφή με τον φωτοευαισθητοποιημένο ημιαγωγό.

δ) Ένα αγώγιμο πλακίδιο επικαλυμμένο με κάποιο καταλυτικό υλικό, συνήθως πλατίνα, το οποίο έρχεται σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη και κλείνει το κύκλωμα (Σχήμα 2.12).



Σχήμα 2.12. Δομή ευαισθητοποιημένης ηλιακής κυψέλης [15].

Οι αποδόσεις των συμβατικών πλαισίων της συγκεκριμένης τεχνολογίας κυμαίνονται κοντά στο 5%, ενώ η μέγιστη απόδοση που έχει επιτευχθεί στο εργαστήριο αγγίζει το 12% [15].

2.2.5.2 Οργανικές Φ/Β κυψέλες (Organic Solar Cells)

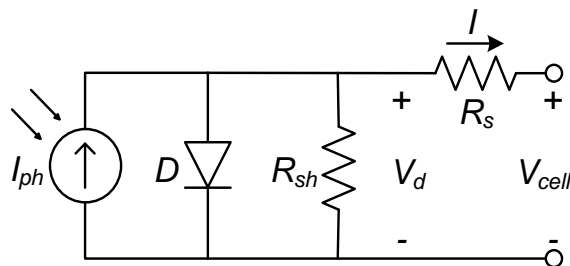
Οι οργανικές κυψέλες διαφοροποιούνται από τις DSSCs ως προς τον τρόπο κατασκευής και λειτουργίας τους. Το στρώμα ημιαγωγού TiO_2 αντικαθίσταται από μείγματα αγώγιμων πολυμερών και φουλερενίων που διαθέτουν ενεργειακά χαρακτηριστικά τα οποία καθιστούν περιττή την χρήση χρωστικής, καθώς απορροφούν από μόνα τους και το ορατό φάσμα της ακτινοβολίας. Επίσης, ο ηλεκτρολύτης αντικαθίσταται από άλλα μείγματα πολυμερών που διευκολύνουν την μεταφορά των ηλεκτρονίων. Η προσθήκη κάποιων επιπλέον υλικών έγχυσης οπών προκαλεί αύξηση της απόδοσης του κυττάρου όπως ακριβώς συμβαίνει και με το νόθευση των ημιαγωγών. Αν αντί για αγώγιμο γυαλί χρησιμοποιηθεί φιλμ πολυμερούς με αγώγιμη επίστρωση, τότε η διάταξη ονομάζεται πλαστική ηλιακή κυψέλη (PSC, Plastic Solar Cell). Τα κύτταρα αυτής της κατηγορίας έχουν απόδοση 5-6% [15].

Κεφάλαιο 3

Μοντελοποίηση Φ/Β πλαισίων άμορφου πυριτίου

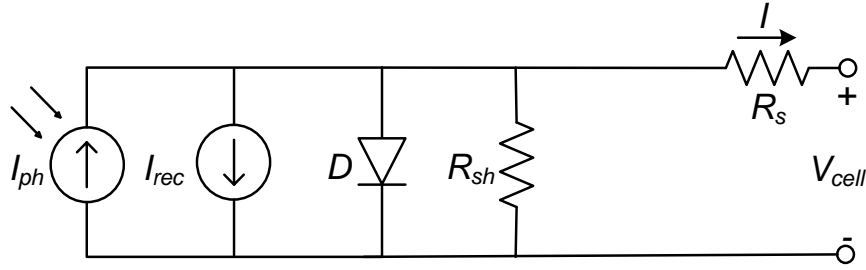
3.1 Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείων άμορφου πυριτίου

Η ηλεκτρική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων περιγράφεται συνήθως με το συμβατικό μοντέλο 5 παραμέτρων (ή μοντέλο 1 διόδου) [3]. Σύμφωνα με αυτό, το Φ/Β στοιχείο μπορεί να αναπαρασταθεί με το ηλεκτρικό ισοδύναμο μιας ιδανικής πηγής ρεύματος (I_{ph}) παράλληλα συνδεδεμένης με μια ηλεκτρική δίοδο (D) (Σχήμα 3.1). Οι αναπόφευκτες αντιστάσεις στον ημιαγωγό και στις επαφές με τα ηλεκτρόδια συνιστούν μια σειριακής φύσης αντίσταση (R_s), ενώ οι διαρροές ρεύματος λόγω κατασκευαστικών ατελειών στην κυψέλη μοντελοποιούνται από την εγκάρσια αντίσταση (R_{sh}). Πιο πολύπλοκη και ακριβής μοντελοποίηση μπορεί να επιτευχθεί προσθέτοντας μια επιπλέον δίοδο στο μοντέλο των 5 παραμέτρων, παράλληλα με την ήδη υπάρχουσα, η οποία μοντελοποιεί την επανασύνδεση φορέων στο Φ/Β στοιχείο για χαμηλές τιμές τάσης, γνωστή ως μοντέλο δύο διόδων.



Σχήμα 3.1. Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου μοντέλου 5 παραμέτρων.

Σύμφωνα με το [7], τα συμβατικά μοντέλα μίας και δύο διόδων δεν μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά την απόκριση των Φ/Β στοιχείων άμορφου πυριτίου. Σε αυτά, η επανασύνδεση των φορέων είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι στα κρυσταλλικά εξαιτίας των μετέωρων δεσμών στο πλέγμα, και για το λόγο αυτό προστίθεται ένας επιπλέον όρος που μοντελοποιεί τις απώλειες επανασύνδεσης στο ήδη γνωστό μοντέλο των 5 παραμέτρων [6]. Η εν λόγω προσθήκη συνίσταται σε μία πηγή ρεύματος που αντιτίθεται στο φωτόρευμα, της οποίας η τιμή εξαρτάται από την συγκέντρωση των φορέων και συνεπώς από το παραγόμενο φωτόρευμα.



Σχήμα 3.2. Ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου άμορφου πυριτίου.

Η επανασύνδεση στο ενδογενές τμήμα (i-layer) περιγράφεται από την εξίσωση:

$$F(x) = \frac{n_f}{\tau_n} + \frac{p_f}{\tau_p} \quad \text{Εξ. 3.1}$$

,όπου τ_n και τ_p είναι ο χρόνος παγίδευσης των ηλεκτρονίων (n_f) και των οπών (p_f) στους μετέωρους δεσμούς. Υποθέτοντας ότι το ηλεκτρικό πεδίο είναι σταθερό κατά μήκος του i-τμήματος και οι φορείς δημιουργούνται με ομοιογένεια, η παραπάνω σχέση μπορεί να ολοκληρωθεί κατά μήκος του i-τμήματος, από $x=0$ έως $x=di$, ώστε να υπολογιστεί το ολικό ρεύμα απωλειών λόγω επανασύνδεσης I_{rec} :

$$I_{rec} = \int_0^{di} F(x) dx \quad \text{Εξ. 3.2}$$

Με την ολοκλήρωση της παραπάνω σχέσης προκύπτει ο όρος των συνολικών απωλειών επανασύνδεσης:

$$I_{rec} = I_{ph} \cdot \frac{di^2}{(\mu\tau)_{eff} \cdot [V_{bi} - V - I \cdot R_s]} \quad \text{Εξ. 3.3}$$

,όπου:

$$(\mu\tau)_{eff} = 2 \cdot \frac{\mu_n^o \tau_n^o \cdot \mu_p^o \tau_p^o}{\mu_n^o \tau_n^o + \mu_p^o \tau_p^o} \quad \text{Εξ. 3.4}$$

- Το πάχος του i-τμήματος (di) του στοιχείου.
- Το εσωτερικό δυναμικό (V_{bi}) που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του, το οποίο λαμβάνει τυπική τιμή 0,9V σύμφωνα με το [6].
- Η κινητικότητα (μ^o) και ο χρόνος παγίδευσης (τ^o) των ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών αντίστοιχα.
- Η τάση (V) και το ρεύμα (I) του στοιχείου.

Η σχέση η οποία συνδέει το ρεύμα (I) με την τάση (V) του στοιχείου άμορφου πυριτίου για δεδομένη θερμοκρασία και ακτινοβολία προσδιορίζεται από την Εξ. 3.5 [6]:

$$I(V) = I_{ph} - I_{ph} \cdot \frac{di^2}{(\mu\tau)_{eff} \cdot [V_{bi} - V - I \cdot R_s]} - I_o \cdot \left[e^{\frac{V+I \cdot R_s}{\alpha}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad \text{Εξ. 3.5}$$

Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στην παραπάνω εξίσωση και περιγράφουν τη λειτουργία της κυψέλης είναι:

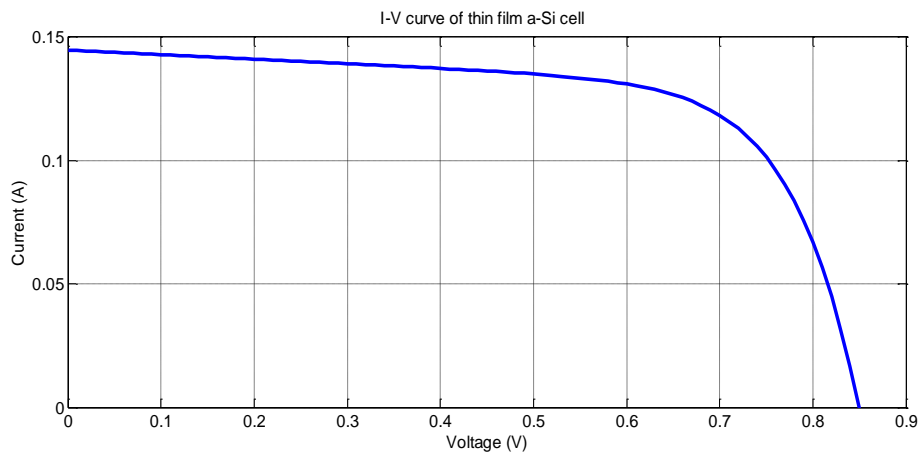
- Το φωτόρρευμα (I_{ph}) που είναι η ένταση της πηγής ρεύματος ανάλογη με το επίπεδο ακτινοβολίας.

- Το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού της διόδου (I_o), είναι χαρακτηριστικό της διόδου και εξαρτάται σημαντικά από τη θερμοκρασία.
- Ο τροποποιημένος συντελεστής της διόδου (a), ο οποίος συμπίπτει ουσιαστικά με τη θερμική τάση ($k \cdot T_c / q$) προσαυξημένη κατά το συντελεστή ιδανικότητας n της διόδου:

$$a = \frac{n \cdot k \cdot T_c}{q}$$

Εξ. 3.6

- n ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου.
- k η σταθερά Boltzmann $1,38066 \times 10^{-23}$ (J/K).
- T_c η θερμοκρασία της κυψέλης ($^{\circ}\text{C}$).
- q το φορτίο του ηλεκτρονίου $1,60218 \times 10^{-19}$ (Cb).
- Η σειριακή αντίσταση (R_s), που επηρεάζει τη λειτουργία έντονα στο σημείο μέγιστης παραγωγής.
- Η εγκάρσια αντίσταση (R_{sh}), που επηρεάζει την απόκριση της Φ/Β κυψέλης κυρίως σε υψηλές τιμές ρεύματος.
- Οι d_i , V_{bi} , μτ όπως προαναφέρθηκαν.



Σχήμα 3.3. Χαρακτηριστική καμπύλη I-V Φ/Β στοιχείου a-Si (Εξ. 3.5).

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η χαρακτηριστική $I-V$ ενός Φ/Β στοιχείου του πλαισίου Schuco MPE85 AL01 για θερμοκρασία 36°C και ακτινοβολία 590 W/cm^2 . Οι παράμετροι του μοντέλου περιέχουν την πληροφορία των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών και των συνθηκών λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου. Επομένως, η λειτουργία του μπορεί να προσδιοριστεί σε οποιοσδήποτε συνθήκες αρκεί να είναι γνωστές οι τιμές τους.

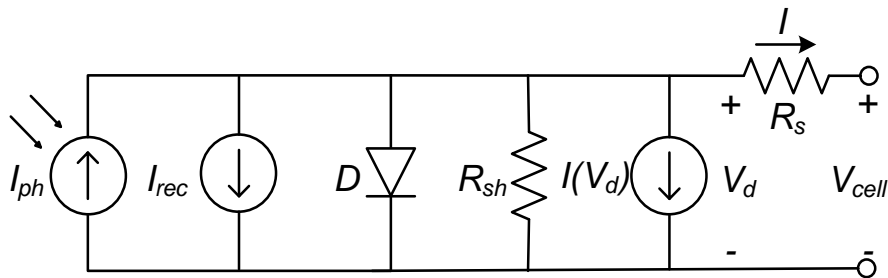
3.2 Ηλεκτρικό ισοδύναμο με προσθήκη όρου για την αρνητική τάση

Στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκε το μοντέλο του Φ/Β στοιχείου που περιγράφει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του σε φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας. Στην περίπτωση όμως που κάποια στοιχεία του πλαισίου σκιαστούν, λόγω ανομοιόμορφης ακτινοβολίας στο πλαίσιο, είναι πιθανό να λειτουργούν σε αρνητική τάση λόγω του υψηλότερου ρεύματος που

διέρχεται από αυτά. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητο να προστεθεί ένας επιπλέον όρος στην εξίσωση του υπάρχοντος μοντέλου, ο οποίος θα περιγράφει την συμπεριφορά των Φ/Β στοιχείων στην αρνητική τάση.

Στο [2] περιγράφονται διάφορες προσεγγίσεις για τον πρόσθετο όρο της αρνητικής τάσης. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η συνηθέστερη προσέγγιση, προσθήκης εγκάρσιας πηγής ρεύματος εξαρτημένης από τάση, όπως αναφέρεται στα [18],[4] και για Φ/Β στοιχεία άμορφου πυριτίου στα [1],[13]:

$$I_{Vd} = b \cdot (V + I \cdot R_s) \left(1 - \frac{V + I \cdot R_s}{V_{br}} \right)^{-n} \quad \text{Εξ. 3.7}$$

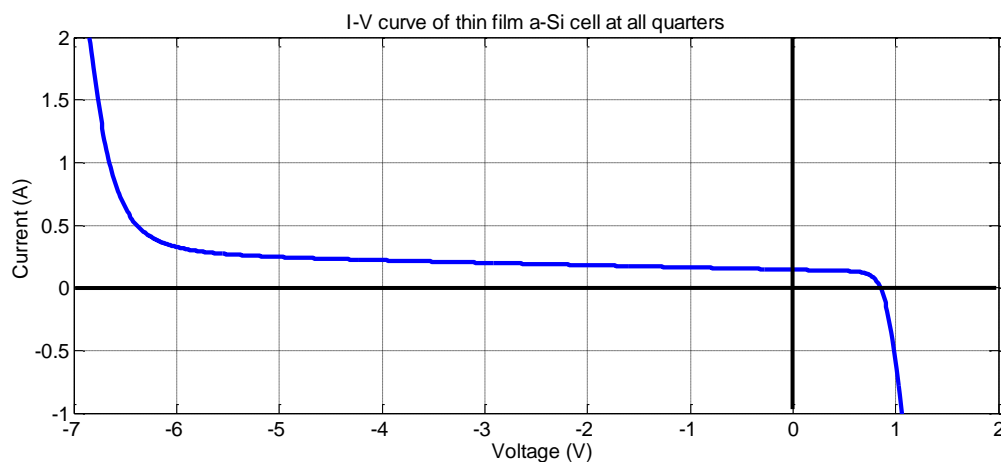


Σχήμα 3.4. Ηλεκτρικό ισοδύναμο Φ/Β στοιχείου με τον πρόσθετο όρο για τη μοντελοποίηση στην αρνητική τάση.

Το πλήρες μοντέλο της Φ/Β κυψέλης a-Si αποτυπώνεται στην Εξ. 3.8:

$$I(V) = I_{ph} - I_{ph} \cdot \frac{d_i^2}{(\mu\tau)_{eff} \cdot [V_{bi} - V - I \cdot R_s]} - I_o \cdot \left[e^{\frac{V + I \cdot R_s}{a}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} - b \cdot (V + I \cdot R_s) \left(1 - \frac{V + I \cdot R_s}{V_{br}} \right)^{-n} \quad \text{Εξ. 3.8}$$

- I_{ph} , I_o , a , R_s , R_{sh} , V_{bi} , d_i , $\mu\tau$, συντελεστές του αναλυτικού μοντέλου
- b , ο συντελεστής διόρθωσης
- V_{br} , η τάση κατάρρευσης
- n , ο συντελεστής κατάρρευσης



Σχήμα 3.5. Χαρακτηριστική I-V Φ/Β στοιχείου a-Si σε όλα τα τεταρτημόρια.

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η καμπύλη του στοιχείου με το πλήρες μοντέλο σε όλα τα τεταρτημόρια, με χρήση της εξίσωσης 3.8. Η κλίση κοντά στην περιοχή βραχυκυκλώσεως λαμβάνει ίδια τιμή σε θετική και αρνητική τάση, αλλά καθώς αυξάνεται η αρνητική τάση και η χαρακτηριστική μπαίνει στην περιοχή κατάρρευσης, η κλίση της καμπύλης αυξάνεται απότομα. Από την άλλη, για θετικές τάσεις μεγαλύτερες της τάσης ανοικτοκύκλωσης η κυψέλη αναγκάζεται να λειτουργήσει σε αρνητικό ρεύμα, στο 4ο τεταρτημόριο, και σε αυτή την περίπτωση, όπως και πριν, καταναλώνεται ισχύς.

3.3 Εύρεση παραμέτρων μοντέλου

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δυο πλαίσια άμορφου πυριτίου μονής επίστρωσης (single-junction), το Schuco MPE85 AL01 και το Kaneka GEA060. Οι μετρήσεις έγιναν σε επίπεδο πλαισίου, διότι λόγω της δομής των thin film πλαισίων, όπου τα κύτταρα συνδέονται κατά την παραγωγή και καλύπτονται με δύο στρώματα από γυαλί, δεν υπάρχει η δυνατότητα λήψης μετρήσεων σε επίπεδο κυψέλης.

Οι παράμετροι υπολογίστηκαν με προσαρμογή των καμπύλων (curve fitting), που δίνονται από την εξίσωση 3.8 και αυτών που προέκυψαν από τις μετρήσεις. Οι παράμετροι που προκύπτουν περιγράφουν τη συμπεριφορά του πλαισίου στις εκάστοτε συνθήκες που λήφθηκαν οι μετρήσεις. Με χρήση των παραμέτρων αυτών και της εξίσωσης 3.8 επιτυγχάνεται μια άκρως ρεαλιστική προσέγγιση της λειτουργίας του πλαισίου, μόνο όμως για ομοιόμορφες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Η μελέτη όμως της λειτουργίας του πλαισίου υπό συνθήκες μερικής σκίασης προϋποθέτει πλήρη ανομοιομορφία στην ελάχιστη μονάδα που είναι η Φ/Β κυψέλη. Συμπεραίνεται λοιπόν, ότι οι εξαχθείσες παράμετροι, πρέπει να αναχθούν στο επίπεδο της κυψέλης. Στο [14] παρουσιάζονται οι τύποι αναγωγής των παραμέτρων του μοντέλου μίας διόδου (5 παραμέτρων):

$$I_{ph,mod} = N_p \cdot I_{ph,cell}$$

$$I_{o,mod} = N_p \cdot I_{o,cell}$$

$$R_{s,mod} = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_{s,cell}$$

$$R_{sh,mod} = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_{sh,cell}$$

$$a_{mod} = N_s \cdot a_{cell}$$

,όπου:

- $I_{ph,mod}$, $I_{o,mod}$, $R_{s,mod}$, $R_{sh,mod}$, a_{mod} αφορούν το πλαίσιο.
- $I_{ph,cell}$, $I_{o,cell}$, $R_{s,cell}$, $R_{sh,cell}$, a_{cell} αφορούν την κυψέλη.
- N_s είναι το πλήθος των εν σειρά συνδεδεμένων κυψέλων.
- N_p είναι το πλήθος των παράλληλα συνδεδεμένων στοιχειοσειρών.

Παρακάτω αποδεικνύονται οι αναγωγικοί τύποι των υπόλοιπων παραμέτρων που εμπεριέχονται στους επιπρόσθετους όρους απωλειών επανασύνδεσης και αρνητικής τάσης:

- Οι εξισώσεις 3.3 και 3.7 για το πλαίσιο:

$$\left. \begin{aligned} I_{Vd,mod} &= b_{mod} \cdot (V_{mod} + I_{mod} \cdot R_{s,mod}) \cdot \left(I - \frac{V_{mod} + I_{mod} \cdot R_{s,mod}}{V_{br,mod}} \right)^{-n_{mod}} \\ I_{rec,mod} &= I_{ph,mod} \cdot \frac{di_{mod}^2}{(\mu\tau)_{eff,mod} \cdot [V_{bi,mod} - V_{mod} - I_{mod} \cdot R_{s,mod}]} \end{aligned} \right\} \text{ Από Ν. Kirchhoff}$$

$$\left. \begin{aligned} N_p \cdot I_{Vd,cell} &= b_{mod} \cdot (N_s \cdot V_{cell} + N_p \cdot I_{cell} \cdot R_{s,mod}) \cdot \left(I - \frac{N_s \cdot V_{cell} + N_p \cdot I_{cell} \cdot R_{s,mod}}{V_{br,mod}} \right)^{-n_{mod}} \\ N_p \cdot I_{rec,cell} &= I_{ph,mod} \cdot \frac{di_{mod}^2}{(\mu\tau)_{eff,mod} \cdot [V_{bi,mod} - N_s \cdot V_{cell} - N_p \cdot I_{cell} \cdot R_{s,mod}]} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} I_{Vd,cell} &= \frac{b_{mod} \cdot N_s}{N_p} \cdot (V_{cell} + I_{cell} \cdot \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{s,mod}) \cdot \left(I - \frac{V_{cell} + I_{cell} \cdot \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{s,mod}}{\frac{V_{br,mod}}{N_s}} \right)^{-n_{mod}} \\ I_{rec,cell} &= \frac{I_{ph,mod}}{N_p} \cdot \frac{di_{mod}^2}{N_s \cdot (\mu\tau)_{eff,mod} \cdot \left[\frac{V_{bi,mod}}{N_s} - V_{cell} - I_{cell} \cdot \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{s,mod} \right]} \end{aligned} \right\} (1)$$

- Οι εξισώσεις 3.3 και 3.7 για τη κυψέλη:

$$\left. \begin{aligned} I_{Vd,cell} &= b_{cell} \cdot (V_{cell} + I_{cell} \cdot R_{s,cell}) \cdot \left(I - \frac{V_{cell} + I_{cell} \cdot R_{s,cell}}{V_{br,cell}} \right)^{-n_{cell}} \\ I_{rec,mod} &= I_{ph,cell} \cdot \frac{di_{cell}^2}{(\mu\tau)_{eff,cell} \cdot [V_{bi,cell} - V_{cell} - I_{cell} \cdot R_{s,cell}]} \end{aligned} \right\} (2)$$

Εξισώνοντας τους συντελεστές των εξισώσεων (1) και (2) αντίστοιχα παίρνουμε τους αναγωγικούς τύπους για τις παραμέτρους. Συγκεντρωτικά οι αναγωγικοί τύποι όλων των παραμέτρων του μοντέλου για τη μετατροπή τους από το επίπεδο πλαισίου σε αυτό της κυψέλης:

$$I_{ph,mod} = N_p \cdot I_{ph,cell}$$

$$I_{o,mod} = N_p \cdot I_{o,cell}$$

$$R_{s,mod} = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_{s,cell}$$

$$R_{sh,mod} = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_{sh,cell}$$

$$a_{mod} = N_s \cdot a_{cell}$$

$$(\mu\tau)_{eff,mod} = \frac{(\mu\tau)_{eff,cell}}{N_s}$$

$$V_{bi,mod} = \frac{V_{bi,cell}}{N_s}$$

$$b_{mod} = \frac{N_p}{N_s} \cdot b_{cell}$$

$$V_{br,mod} = N_s \cdot V_{br,cell}$$

Εξ. 3.9

,όπου:

- Οι παράμετροι με δείκτη $_{mod}$ αφορούν το πλαίσιο.
- Οι παράμετροι με δείκτη $_{cell}$ αφορούν την κυψέλη.
- N_s είναι το πλήθος των εν σειρά συνδεδεμένων κυψέλων.
- N_p είναι το πλήθος των παράλληλα συνδεδεμένων στοιχειοσειρών.

Προφανείς είναι οι ισότητες που ισχύουν για τις παρακάτω παραμέτρους:

$$di_{mod} = di_{cell} \text{ και } n_{mod} = n_{cell}$$

Οι παρακάτω παράμετροι θεωρήθηκε ότι παίρνουν τις εξής τυπικές τιμές:

- $V_{bi,cell} = 0,9V$ σύμφωνα με το [6].
- $V_{br,cell} = -7V$.
- $b_{cell} = 4,85 \times 10^{-6} \Omega^{-1}cm^{-2}$.
- $n_{cell} = 2,5$.
- $di_{cell} = 0,3\mu m$.

3.4 Δομή πλαισίων άμορφου πυριτίου

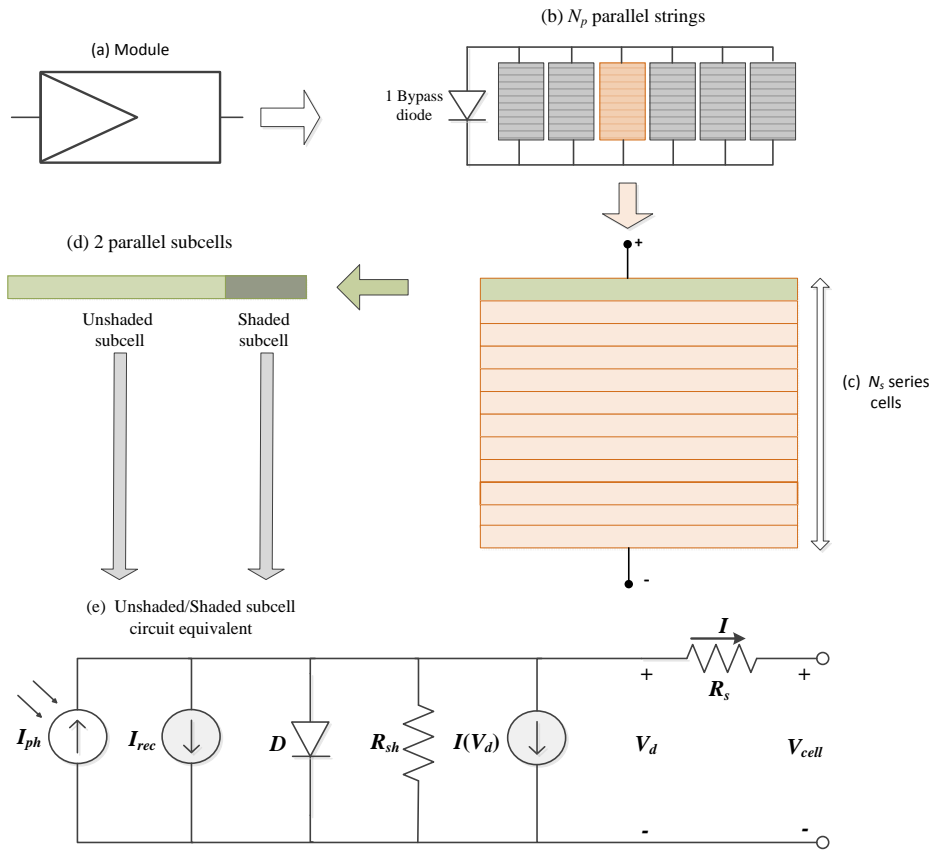
Στα συμβατικά πλαίσια άμορφου πυριτίου συναντώνται δύο διαφορετικές δομές στη διάταξη των κυψελών τους. Τα πλαίσια της πρώτης δομής έχουν μόνο μία στοιχειοσειρά (single-string), ενώ αυτά της δεύτερης έχουν έναν αριθμό παράλληλων στοιχειοσειρών (multi-string). Ο τρόπος διασύνδεσης των παράλληλων στοιχειοσειρών περιγράφεται στο [11], ενώ η εν λόγω δομή χρησιμοποιείται συνήθως σε πλαίσια με μεγάλη ονομαστική ισχύ. Οι στοιχειοσειρές όλων των πλαισίων έχουν μεγάλο αριθμό στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά και, καθώς κάθε thin film στοιχείο αποδίδει μια τάση ανοικτοκύκλωσης της τάξης 0.7V-0,9V, κατασκευάζονται πλαίσια με εμφανώς μεγαλύτερη τάση ανοικτοκύκλωσης σε σχέση με την κρυσταλλική τεχνολογία. Ένα επιπλέον σημαντικό χαρακτηριστικό της δομής των thin film πλαισίων είναι ο περιορισμός που υπάρχει στον αριθμό των διόδων διαφυγής (bypass diodes) που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια. Όπως αναφέρεται και στο [10], λόγω της κατασκευής των πλαισίων, της μονολιθικής σύνδεσης των Φ/Β στοιχείων κατά την παραγωγή και την αδυναμία σύνδεσης διόδων στα στοιχεία με χρήση ακροδεκτών όπως στα κρυσταλλικά, μία μόνο bypass διάδος τοποθετείται στο junction box των thin film πλαισίων. Έτσι, δεν επηρεάζεται σε καμία περίπτωση η απόκριση του πλαισίου υπό συνθήκες μερικής σκίασης, σε αντίθεση με την κρυσταλλική τεχνολογία όπου οι bypass δίοδοι των πλαισίων είναι η αιτία εμφάνισης τοπικών μεγίστων στη χαρακτηριστική $P-V$.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν δύο Φ/Β πλαίσια άμορφου πυριτίου, το Kaneka GEA060 δομής single-string και το Schuco MPE85 AL01 δομής multi-string.

3.4.1 Schuco MPE85 AL01

Πίνακας 3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά πλαισίου Schuco MPE85 AL01.

Μέγιστη ονομαστική ισχύς (P_{max})	85 W
Τάση μέγιστης ισχύος (V_{mpp})	72,1 V
Ρεύμα μέγιστης ισχύος (I_{mpp})	1,19 A
Τάση ανοικτοκύκλωσης (V_{oc})	93.1 V
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc})	1.49 A
Αριθμός Φ/Β στοιχείων πλαισίου	636 (6 strings x 106 series cells)

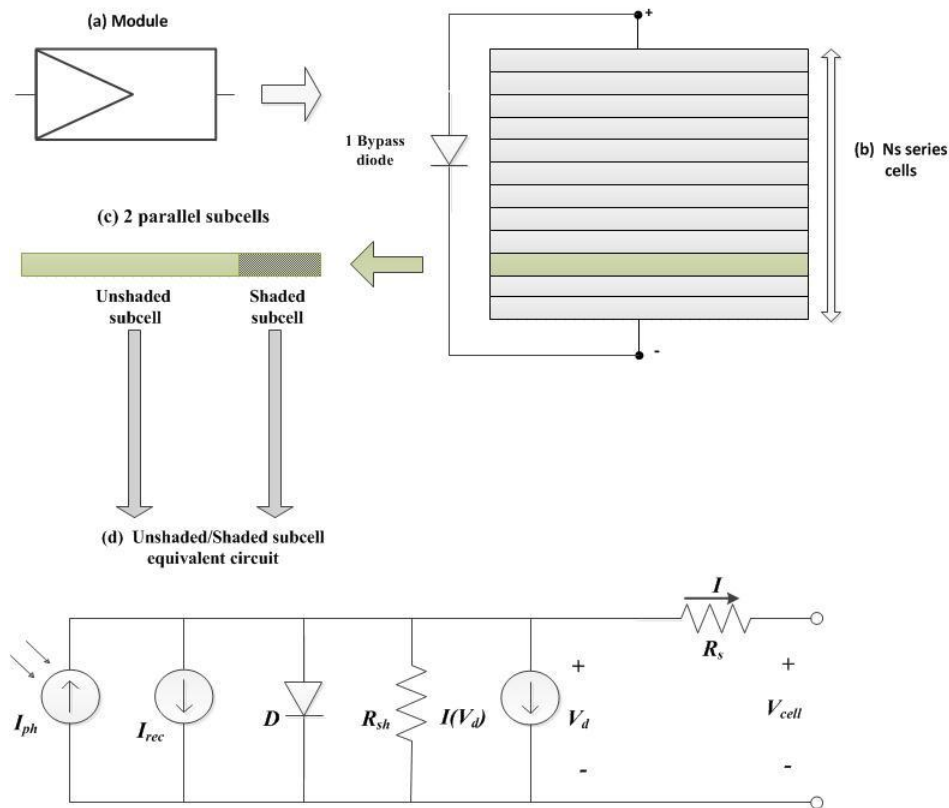


Σχήμα 3.6. Δομή πλαισίου Schuco MPE85 AL01 (multi-string.)

3.4.2 Kaneka GEA060

Πίνακας 3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά Kaneka GE060

Μέγιστη ονομαστική ισχύς (P_{max})	60 W
Τάση μέγιστης ισχύος (V_{mp})	67 V
Ρεύμα μέγιστης ισχύος (I_{mp})	0.9 A
Τάση ανοικτοκύκλωσης (V_{oc})	92 V
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc})	1.19 A
Αριθμός Φ/Β στοιχείων πλαισίου	108 (series cells)



Σχήμα 3.7. Δομή πλαισίου Kaneka GEA060 (single-string).

3.5 Μοντελοποίηση φ/β πλαισίου

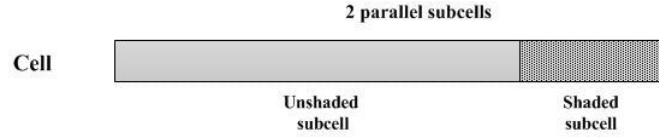
Στις παρακάτω σελίδες θα περιγραφούν οι δομές και οι συμβάσεις που υιοθετήθηκαν καθώς και η μοντελοποίησή τους σε συστήματα εξισώσεων, η οποία είναι βασισμένη στα [18],[9],[5], αλλά προσαρμοσμένη στις απαιτήσεις της παρούσας εργασίας.

3.5.1 Φ/Β κυψέλη (cell) και υποκυψέλη (subcell)

Στα Φ/Β στοιχεία λεπτών υμενίων, είναι αυξημένη η πιθανότητα να σκιάζονται μερικώς σε αντίθεση με τα κρυσταλλικά, εξαιτίας της μορφής τους σε μακριές στενές λωρίδες. Επομένως, αναγκαία είναι η χρήση κατάλληλης προσέγγισης η οποία θα περιγράψει ικανοποιητικά την απόκριση των μερικώς σκιασμένων στοιχείων. Μια απλοποιητική προσέγγιση αναφέρεται στο [1], η οποία βασίζεται στη χρήση του μέσου όρου της ακτινοβολίας των μερικώς σκιασμένων στοιχείων. Η συγκεκριμένη προσέγγιση όπως συμπεραίνεται και στο [1], παρουσιάζει αποκλίσεις με τις μετρήσεις και δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη.

Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε μια προσέγγιση παρόμοια με αυτή του [10], κατά την οποία, κάθε κυψέλη (cell) υποδιαιρείται σε δύο υποκυψέλες (subcells) παράλληλα συνδεδεμένες μεταξύ τους, εκ των οποίων η μία θεωρείται ολικά σκιασμένη και η άλλη ασκίαστη. Η υπόθεση αυτή βασίζεται στην παραδοχή της μονοεπίπεδης σκίασης, εξαιτίας του πολύ μικρού πλάτους που έχουν τα thin film Φ/Β στοιχεία και της διασύνδεσής τους, που

γίνεται από την μακρόστενη επιφάνεια. Κάθε subcell περιγράφεται από την Εξ. 3.8 με τις κατάλληλες παραμέτρους για τις αντίστοιχες συνθήκες. Η τάση των δύο subcells είναι κοινή και αντιστοιχεί σε αυτήν του cell, ενώ το ρεύμα του cell προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους ρευμάτων των subcells πολλαπλασιασμένα με τον ανά μονάδα συντελεστή της σκιασμένης και της ασκίαστης επιφάνειας αντίστοιχα.



Σχήμα 3.8. Υποδιαίρεση cell σε 2 subcells.

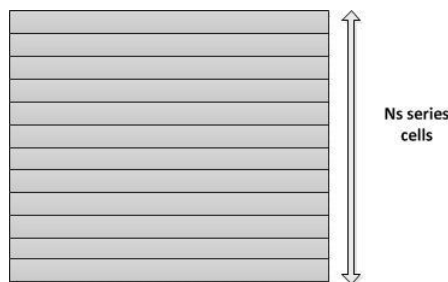
Επομένως, καταλήγουμε σε ένα σύστημα 3 εξισώσεων το οποίο περιγράφει το στοιχείο:

$$\left. \begin{aligned} f_{sh}(V_{cell}, I_{sh}) &= 0 \\ f_{un}(V_{cell}, I_{un}) &= 0 \\ I_{cell} &= S \cdot I_{sh} + (1 - S) \cdot I_{un} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow f_{cell}(V_{cell}, I_{cell}) = 0 \quad \text{Εξ.3.10}$$

- V_{cell} η κοινή τάση των δύο subcells και του cell.
- I_{sh} το ρεύμα του σκιασμένου subcell.
- I_{un} το ρεύμα του ασκίαστου subcell.
- I_{cell} το συνολικό ρεύμα του cell.
- S ο ανά μονάδα συντελεστής σκιασμένης επιφάνειας.
- $f_{sh}(V_{cell}, I_{sh}) = 0$ η εξίσωση που περιγράφει την σκιασμένη κυψέλη.
- $f_{un}(V_{cell}, I_{un}) = 0$ η εξίσωση που περιγράφει την ασκίαστη κυψέλη.
- $f_{cell}(V_{cell}, I_{cell}) = 0$ το σύστημα εξισώσεων που περιγράφει την κυψέλη.

3.5.2 Φ/Β στοιχειοσειρά (string)

Σε κάθε Φ/Β πλαίσιο, ένα πλήθος N_s Φ/Β κυψελών συνδέονται σε σειρά σχηματίζοντας μια στοιχειοσειρά (string). Οι εξισώσεις που περιγράφουν μια στοιχειοσειρά διαμορφώνουν ένα σύστημα εξισώσεων:



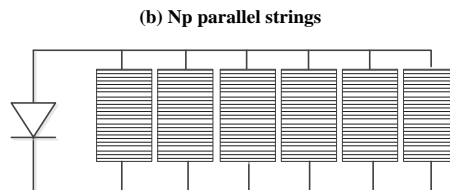
Σχήμα 3.9. Τυπική δομή στοιχειοσειράς Φ/Β στοιχείων thin film.

$$\left. \begin{array}{l}
 f_{cell_1}(V_{cell_1}, I_{string}) = 0 \\
 f_{cell_2}(V_{cell_2}, I_{string}) = 0 \\
 \vdots \\
 f_{cell_Ns}(V_{cell_Ns}, I_{string}) = 0 \\
 \sum_{i=1}^{N_s} V_{cell_i} - V_{string} = 0
 \end{array} \right\} \Leftrightarrow f_{string}(V_{string}, I_{string}) = 0 \quad \text{Εξ.3.11}$$

- V_{cell_i} η τάση της i κυψέλης.
- V_{string} η συνολική τάση της στοιχειοσειράς.
- I_{string} το ρεύμα της στοιχειοσειράς, κοινό για όλες τις κυψέλες.
- $f_{cell_i}(V_{cell_i}, I_{string}) = 0$ η εξίσωση που περιγράφει την i κυψέλη.
- $f_{string}(V_{string}, I_{string}) = 0$ το σύστημα εξισώσεων που περιγράφει τη στοιχειοσειρά.
- $\sum_{i=1}^{N_s} V_{cell_i} - V_{string} = 0$ η εξίσωση που προκύπτει από την εφαρμογή του Νόμου Τάσεων του Kirchhoff για τη στοιχειοσειρά.

3.5.3 Φ/B πλαίσιο (module)

Ένας πλήθος N_p στοιχειοσειρών μπορούν να συνδεθούν παράλληλα σχηματίζοντας έτσι ένα Φ/B πλαίσιο (στην παρούσα ανάλυση η δίοδος διαφυγής αμελείται καθώς παραμένει ανάστροφα πολωμένη). Το σύστημα εξισώσεων που περιγράφει το Φ/B πλαίσιο είναι της μορφής:



Σχήμα 3.10. Τυπική δομή Φ/B πλαίσιων thin film με N_p παράλληλες στοιχειοσειρές.

$$\left. \begin{array}{l}
 f_{string_1}(V_{mod}, I_{string_1}) = 0 \\
 f_{string_2}(V_{mod}, I_{string_2}) = 0 \\
 \vdots \\
 f_{string_Np}(V_{mod}, I_{string_Np}) = 0 \\
 \sum_{i=1}^{N_p} I_{string_i} - I_{mod} = 0
 \end{array} \right\} \iff f_{mod}(V_{mod}, I_{mod}) = 0 \quad \text{Εξ.3.12}$$

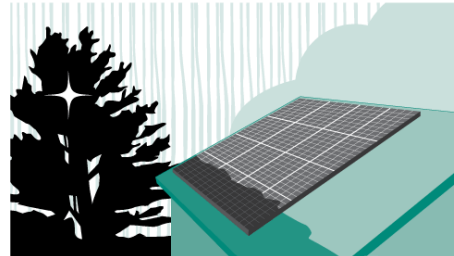
- V_{mod} η τάση του Φ/Β πλαισίου κοινή για όλες τις παράλληλες στοιχειοσειρές.
- I_{string_i} το ρεύμα της i στοιχειοσειράς (string).
- I_{mod} το ρεύμα του πλαισίου.
- $f_{string_i}(V_{mod}, I_{string_i}) = 0$ το σύστημα εξισώσεων που περιγράφει την i στοιχειοσειρά.
- $f_{mod}(V_{mod}, I_{mod}) = 0$ το σύστημα εξισώσεων που περιγράφει το Φ/Β πλαίσιο.
- $\sum_{i=1}^{N_p} I_{string_i} - I_{mod} = 0$ η εξίσωση που προκύπτει από την εφαρμογή του Νόμου Ρευμάτων του Kirchhoff στο πλαίσιο.

Κεφάλαιο 4

Μελέτη σκίασης Φ/Β πλαισίων άμορφου πυριτίου

4.1 Γενικά για σκίαση

Οι Φ/Β γεννήτριες κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους μπορεί να βρεθούν υπό ορισμένες δυσχερείς μη επιθυμητές καταστάσεις, κατά τις οποίες οι προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνειά τους είναι μειωμένη ή ανομοιόμορφη. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τμήμα του Φ/Β πλαισίου ή ακόμη και ένα μόνο στοιχείο του, μπορεί να σκιάζεται από παράγοντες που δεν υπολογίστηκαν κατά την εγκατάσταση. Τέτοιοι παράγοντες μπορεί να είναι παρακείμενα στην εγκατάσταση κτήρια, δέντρα, στύλοι ή καλώδια της ΔΕΗ καθώς και τμήμα της ίδιας της εγκατάστασης, εάν οι πλαισιοσειρές της έχουν εγκατασταθεί σε μικρότερες αποστάσεις από τα προβλεπόμενα όρια. Ακόμη, θα μπορούσε να οφείλεται σε ανομοιόμορφη ρύπανση των πλαισίων από χιόνι, χώμα, φύλλα ακόμα και από περιττώματα πουλιών και ακόμη από νέφωση και άλλα καιρικά φαινόμενα τα οποία βέβαια δεν είναι δυνατό να προβλεφθούν [5].



© E SOURCE



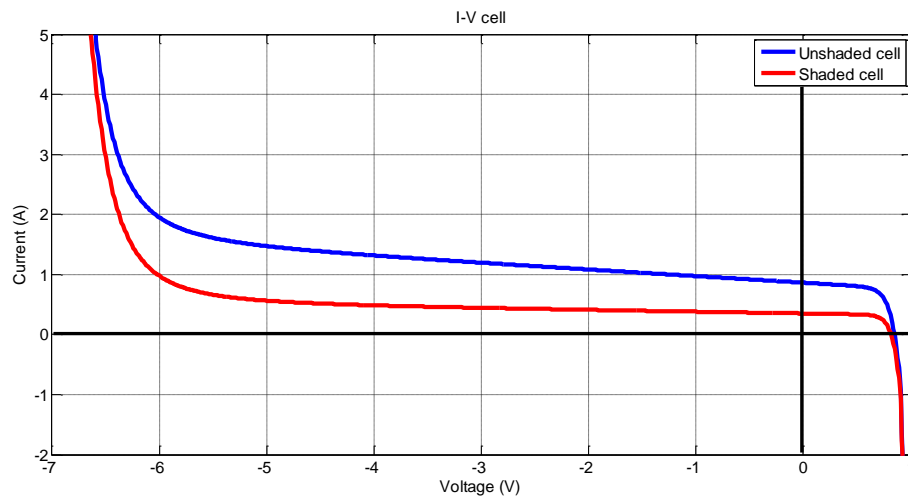
Η μοντελοποίηση της σκίασης γεωμετρικά και οι επιπτώσεις της στην ηλεκτρική απόδοση ενός Φ/Β σταθμού αποτελεί δημοφιλές αντικείμενο έρευνας τα τελευταία χρόνια. Η εκ των προτέρων γνώση της μπορεί να δώσει ακριβέστερη εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης μιας υπό μελέτη Φ/Β εγκατάστασης και να συμβάλλει έτσι στην επιλογή κατάλληλων σχεδιαστικών παραμέτρων για ορθότερη χωροθέτηση [18].

4.2 Λειτουργία Φ/Β κυψέλης υπό μερική σκίαση

Η Φ/Β κυψέλη αποτελεί την μικρότερη Φ/Β δομή και η λειτουργία της εξαρτάται από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, η οποία περιγράφεται από τις παραμέτρους του αναλυτικού μοντέλου που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και κυρίως από το

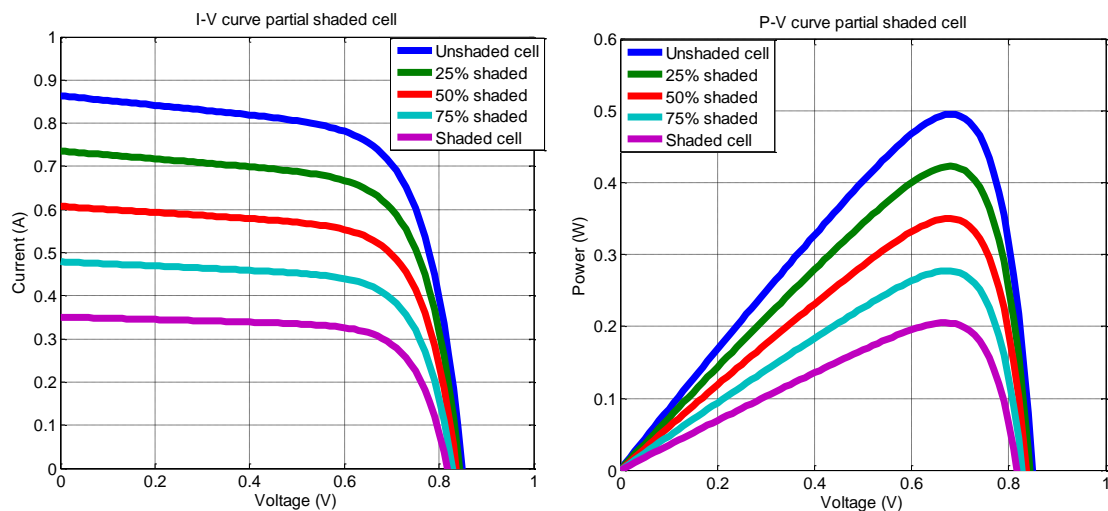
φωτόρευμα I_{ph} . Το ρεύμα του Φ/Β στοιχείου εξαρτάται αναλογικά από την ακτινοβολία ενώ η εξάρτηση της τάσης είναι λογαριθμική.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκε η μοντελοποίηση της κυψέλης από ένα σύστημα τριών εξισώσεων. Δύο εξισώσεις, μία για τη σκιασμένη υποκυψέλη και μία για την ασκίαστη, καθώς και μια τρίτη εξίσωση από την οποία προκύπτει το ρεύμα της μερικώς σκιασμένης κυψέλης ως άθροισμα των δύο επιμέρους ρευμάτων προσαρμοσμένα με τον ανά μονάδα συντελεστή σκιασμένης επιφάνειας (Εξ. 3.10). Ο ανά μονάδα συντελεστής S λαμβάνει τιμές από $S=1$ έως $S=0$, με τις ακραίες τιμές για το πλήρως σκιασμένο και ασκίαστο σενάριο αντίστοιχα. Στο ακόλουθο διάγραμμα αποτυπώνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες $I-V$ του σκιασμένου και ασκίαστου cell οι οποίες προκύπτουν από την επίλυση των δύο αντίστοιχων εξισώσεων των subcells.



Σχήμα 4.1. Χαρακτηριστικές καμπύλες $I-V$ σκιασμένου κατά 60% και ασκίαστου cell

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων μερικώς σκιασμένης κυψέλης κατά 60%, για διάφορα ποσοστά σκιασμένης επιφάνειας της κυψέλης.



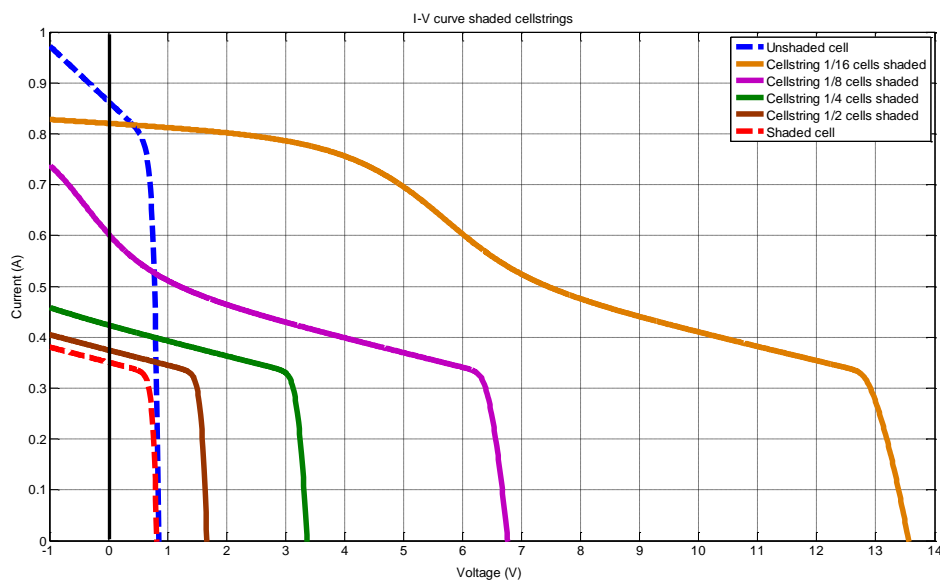
Σχήμα 4.2. Χαρακτηριστικές καμπύλες $I-V$ και $P-V$ μερικά σκιασμένης Φ/Β κυψέλης.

Από τις καμπύλες του σχήματος 4.2 παρατηρείται αναλογικότητα του ρεύματος βραχυκύκλωσης της μερικώς σκιασμένης κυψέλης με τη σκιασμένη επιφάνειά της. Αποτέλεσμα το οποίο είναι αναμενόμενο, διότι σύμφωνα με την προτεινόμενη προσέγγιση των 2 subcells στην περιοχή βραχυκύκλωσης γίνεται άθροιση των παραγόμενων ρευμάτων της σκιασμένης και ασκίαστης επιφάνειας της κυψέλης. Ανάλογη συμπεριφορά παρουσιάζει και η τάση ανοικτοκύκλωσης, η οποία οφείλεται στην αλληλεπίδραση των 2 subcells, λόγω της κοινής τους τάσης.

4.3 Λειτουργία Φ/B πλαισίου μιας στοιχειοσειράς (single-string) υπό μερική σκίαση

Όταν η σκίαση είναι ομοιόμορφη σε όλες τις κυψέλες της στοιχειοσειράς η απόκρισή της έχει παρόμοια μορφή με αυτή του σχήματος 4.1, όταν όμως η σκίαση είναι ανομοιόμορφη, τότε προκαλείται διαφοροποίηση στην απόκριση της κάθε κυψέλης. Αυτό συμβαίνει διότι κυψέλες υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας καλούνται να λειτουργήσουν στο ίδιο ρεύμα επειδή είναι συνδεδεμένες σε σειρά.

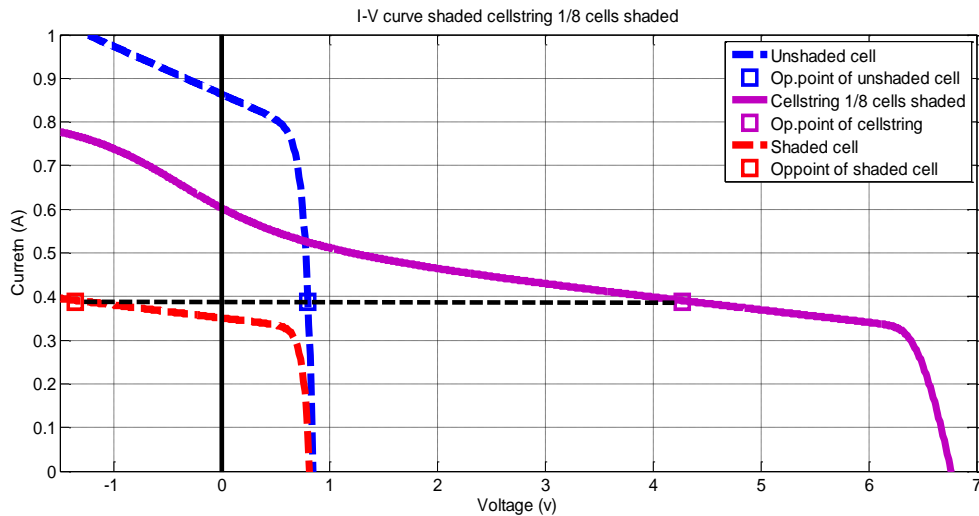
Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές $I-V$ στοιχειοσειρών διαφορετικού πλήθους κυψελών, με μια από αυτές σκιασμένη κατά 60%. Η καμπύλη της σκιασμένης κυψέλης είναι μειωμένη κατά 60% ως προς ρεύμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η χαρακτηριστική όλης της στοιχειοσειράς να προσαρμόζεται στις μειωμένες δυνατότητες της σκιασμένης κυψέλης, εξαιτίας της εν σειρά σύνδεσης που επιβάλλει κοινό ρεύμα μεταξύ των κυψελών, και λειτουργεί προσεγγιστικά σαν να ήταν ολικά σκιασμένη [18].



Σχήμα 4.3. Χαρακτηριστικές $I-V$ Φ/B στοιχειοσειρών 2, 4, 8 και 16 στοιχείων με ένα από αυτά σκιασμένο κατά 60%.

Επιπλέον, παρατηρώντας τις καμπύλες των στοιχειοσειρών με 8 και 16 κυψέλες στο παραπάνω σχήμα, βλέπουμε ότι λειτουργούν σε ελαφρώς μεγαλύτερο ρεύμα από το ρεύμα βραχυκύκλωσης της σκιασμένης κυψέλης. Αυτό οφείλεται στον μεγαλύτερο αριθμό ασκίαστων κυψελών που εξαναγκάζουν τη σκιασμένη να δουλέψει πάνω από το ρεύμα

βραχυκύκλωσής της, οδηγώντας την έτσι σε αρνητική τάση, όπως επισημαίνεται και στο σχήμα 4.4.



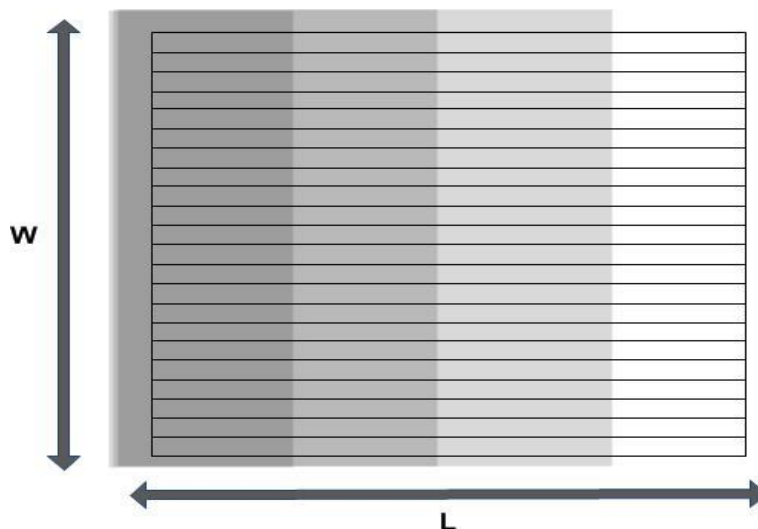
Σχήμα 4.4. Χαρακτηριστική I-V Φ/Β στοιχειοσειράς 8 στοιχείων με ένα από αυτά σκιασμένο κατά 60%.

Επομένως οι σκιασμένες κυψέλες υπό αρνητική τάση λειτουργούν σαν φορτία πλέον και καταναλώνουν ισχύ αντί να παράγουν. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας τους η οποία μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή τους. Η κατάσταση αυτή αποκαλείται φαινόμενο της θερμής κηλίδας (hot spot effect), το οποίο όπως αναφέρεται και στο [1] παρουσιάζει μια διαφοροποίηση στη thin film τεχνολογία. Στην κρυσταλλική τεχνολογία τα hot spot εμφανίζονται ως μικρές κουκίδες σε οποιοδήποτε σημείο της επιφάνεια της κυψέλης. Ενώ στα thin film άμορφου πυριτίου αντί κουκίδων εμφανίζονται λωρίδες (hot strips) στις αυλακώσεις των πλαισίων, όπου γίνεται η διασύνδεση των Φ/Β στοιχείων [1].

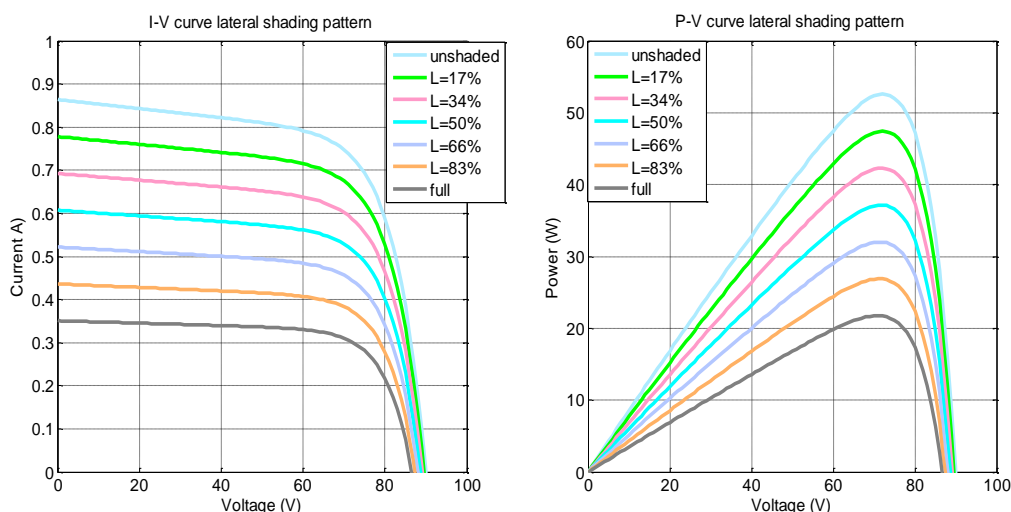
Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες μιας μερικώς σκιασμένης στοιχειοσειράς 106 κυψελών, πλαισίου δομής single-string, κατά 60% για τρία διαφορετικά σενάρια σκίασης.

4.3.1 Οριζόντια σκίαση

Στο συγκεκριμένο σενάριο σκίασης η σκίαση προσβάλλει το πλαίσιο όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.5, οριζόντια, από αριστερά προς τα δεξιά, σκιάζοντας όλα τα Φ/Β στοιχεία της στοιχειοσειράς του πλαισίου σε ένα ποσοστό της επιφάνειάς τους.



Σχήμα 4. 5. Σχήμα Φ/Β πλαισίου single string υπό οριζόντια σκίαση.

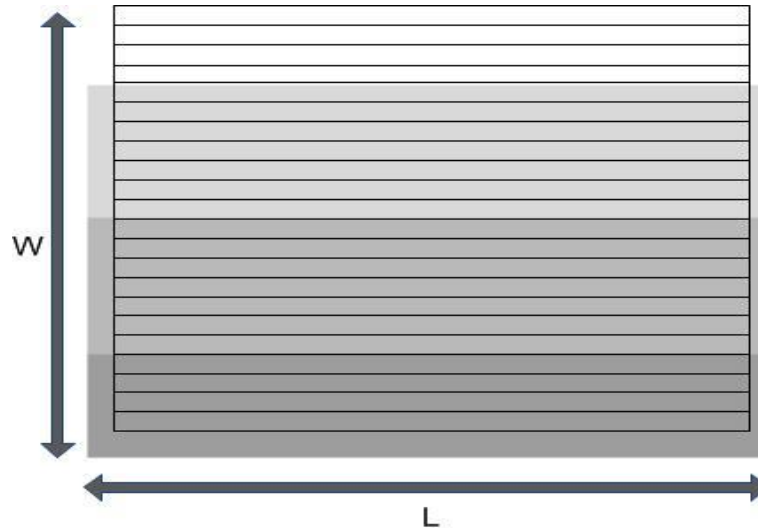


Σχήμα 4. 6. Καμπύλες I-V, P-V οριζόντια σκιασμένου single string πλαισίου.

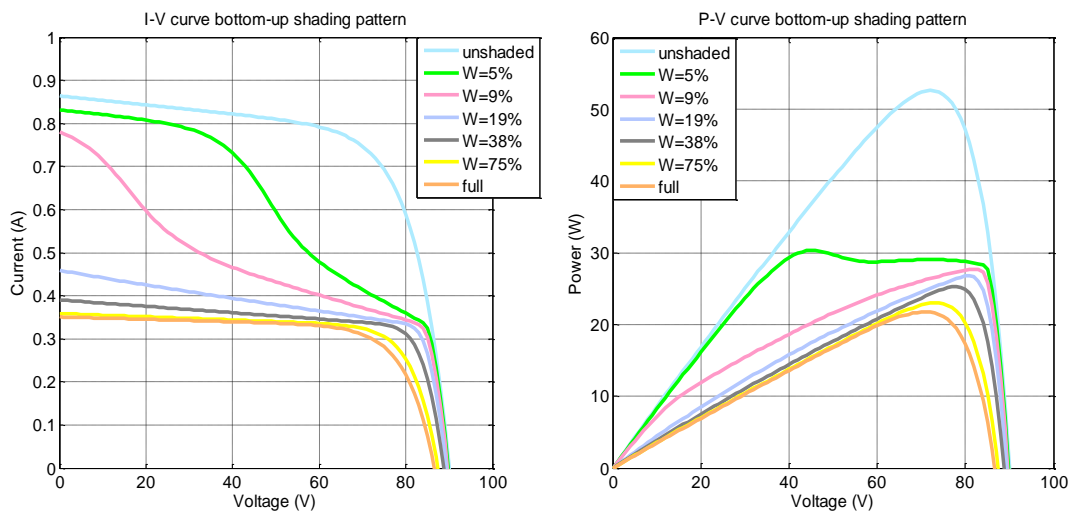
Από τις καμπύλες συμπεραίνεται μια αναλογικότητα της μείωσης των καμπύλων σε σχέση με τη σκιασμένη επιφάνεια των κυψελών. Επίσης η απόκριση του πλαισίου ακόμα και όταν έχει σκιαστεί το 83% της ολικής του επιφάνειας δεν ταυτίζεται με την αυτή στην ολική σκίαση. Η τάση ανοικτοκύκλωσης παίρνει ενδιάμεσες τιμές μεταξύ τάσεων ανοικτοκύκλωσης της σκιασμένης και ασκίαστης στοιχειοσειράς. Συγκρίνοντας της καμπύλες με αυτές του σχήματος 4.2 παρατηρούμε ότι έχουν παρόμοια μορφή και ουσιαστικά η στοιχειοσειρά στο συγκεκριμένο σενάριο σκίασης μπορεί να παρομοιαστεί με μία μερικώς σκιασμένη κυψέλη ανάλογου μεγέθους, όπου το ένα subcell θα περιγράφει την απόκριση της σκιασμένης επιφάνειας του πλαισίου και το άλλο την ασκίαστη.

4.3.2 Κατακόρυφη σκίαση

Σε αυτό το σενάριο η σκίαση προσβάλλει το πλαίσιο από κάτω προς τα πάνω, σκιάζοντας διάφορα πλήθη κυψέλων.



Σχήμα 4. 7. Σχήμα Φ/Β πλαισίου single string υπό κατακόρυφη σκίαση.



Σχήμα 4. 8. Καμπύλες I-V,P-V single-string πλαισίου για διάφορα πλήθη σκιασμένων κυψέλων.

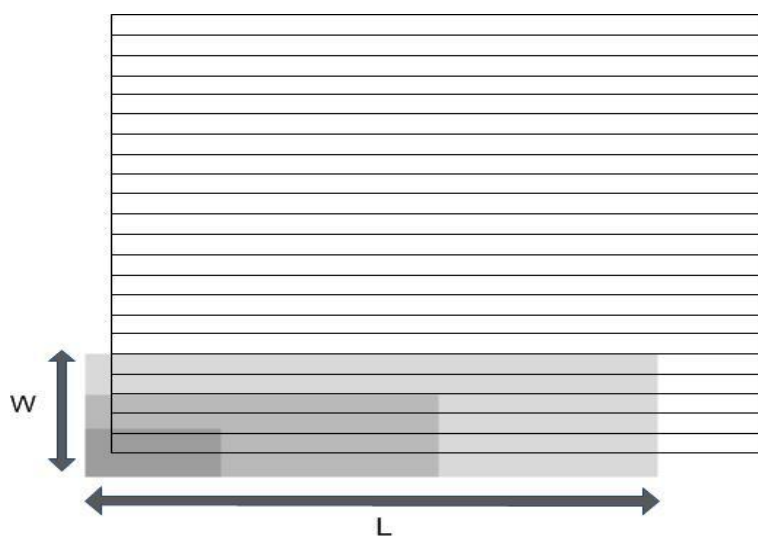
Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνονται οι χαρακτηριστικές I-V, P-V καμπύλες λειτουργίας στοιχειοσειράς για διάφορα πλήθη σκιασμένων κυψέλων, τα οποία έχουν εκφραστεί ως προς το ποσοστό του ύψους της σκίασης στην επιφάνεια του πλαισίου. Παρατηρείται ότι για μικρό αριθμό σκιασμένων Φ/Β στοιχείων η μορφή των καμπυλών επηρεάζεται από το φαινόμενο της χιονοστιβάδας, έχοντας μια αφύσικη καμπυλότητα. Όπως αναφέρθηκε και για το σχήμα

4.3, όταν το ρεύμα της στοιχειοσειράς υπερβαίνει αυτό των σκιασμένων κυψελών, τότε αυτές λειτουργούν σε αρνητική τάση. Η τιμή της αρνητικής τάσης εξαρτάται από την αναλογία των σκιασμένων και ασκίαστων κυψελών και όταν η αναλογία είναι αρκετά μικρή οι σκιασμένες κυψέλες οδηγούνται σε μεγάλη αρνητική τάση, στην περιοχή απότομης αύξησης του ρεύματος.

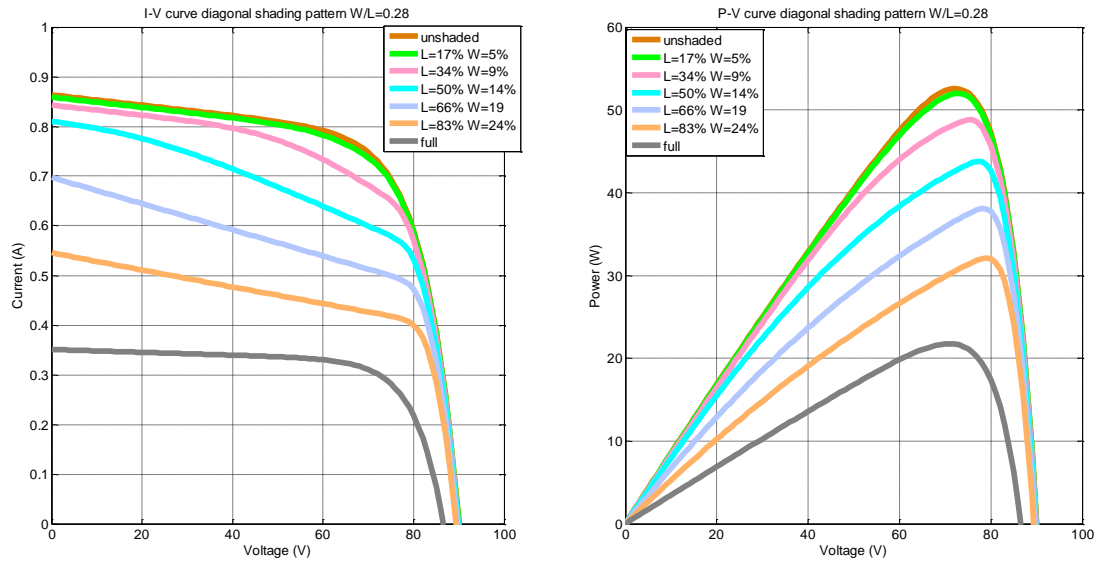
Επίσης από την I-V καμπύλη παρατηρείται ότι για σκίαση μεγαλύτερη του 40% της επιφάνειας της στοιχειοσειράς, η λειτουργία της σχεδόν ταυτίζεται με αυτή της ολικά σκιασμένης. Παρότι για σκίαση 5 (W=5%) και 10 (W=11%) κυψελών η μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι σχετικά μικρή, παρατηρείται μεγάλη μείωση της παραγόμενης ισχύος αναλογικά με την επιφάνεια σκίασης και έτσι συμπεραίνεται ότι το συγκεκριμένο σενάριο σκίασης είναι το δυσμενέστερο για την παραγωγή ισχύος του πλαισίου.

4.3.3 Διαγώνια σκίαση

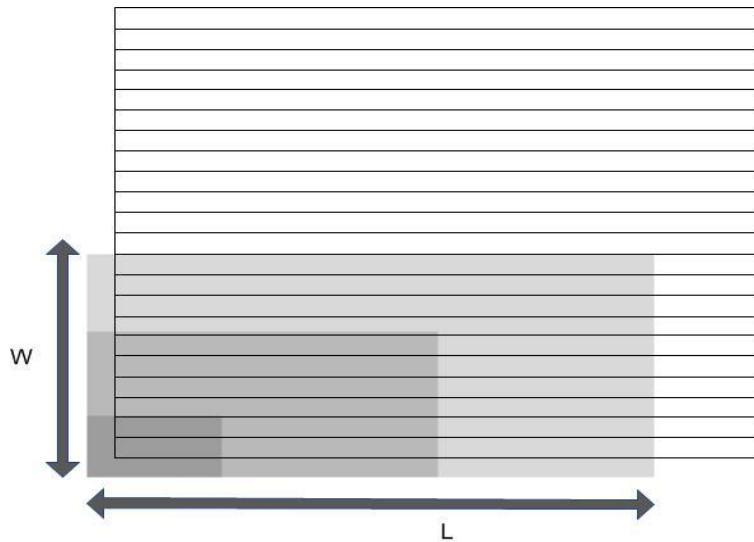
Στο συγκεκριμένο σενάριο σκίασης θα εξεταστούν 3 διαφορετικές περιπτώσεις διαγώνιας σκίασης με διαφορετικό λόγο W/L.



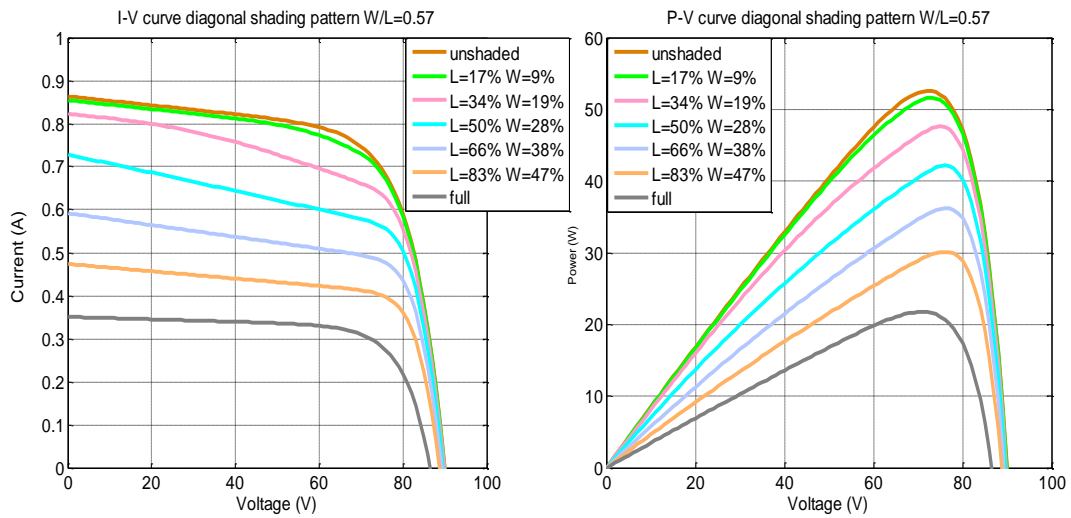
Σχήμα 4. 9. Σχήμα Φ/B πλαισίου single string υπό διαγώνια σκίαση με $W/L=0,28$.



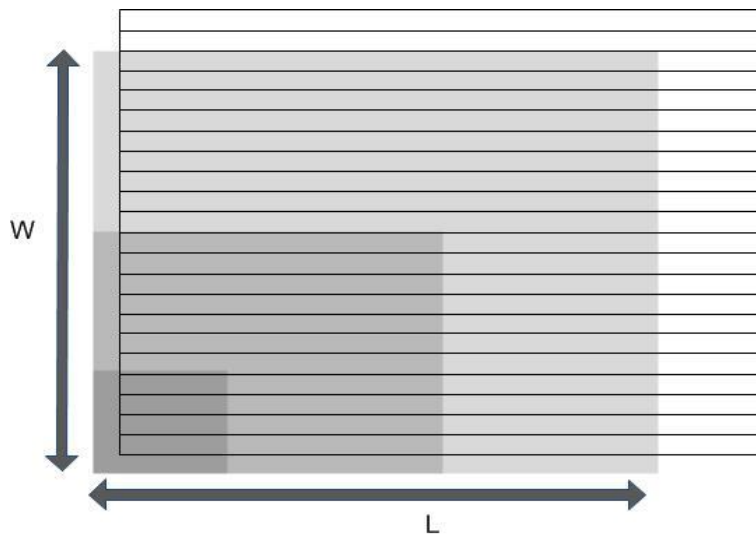
Σχήμα 4. 10. Καμπύλες I-V,P-V Φ/B πλαίσιου single string υπό διαγώνια σκίαση με $W/L=0,28$.



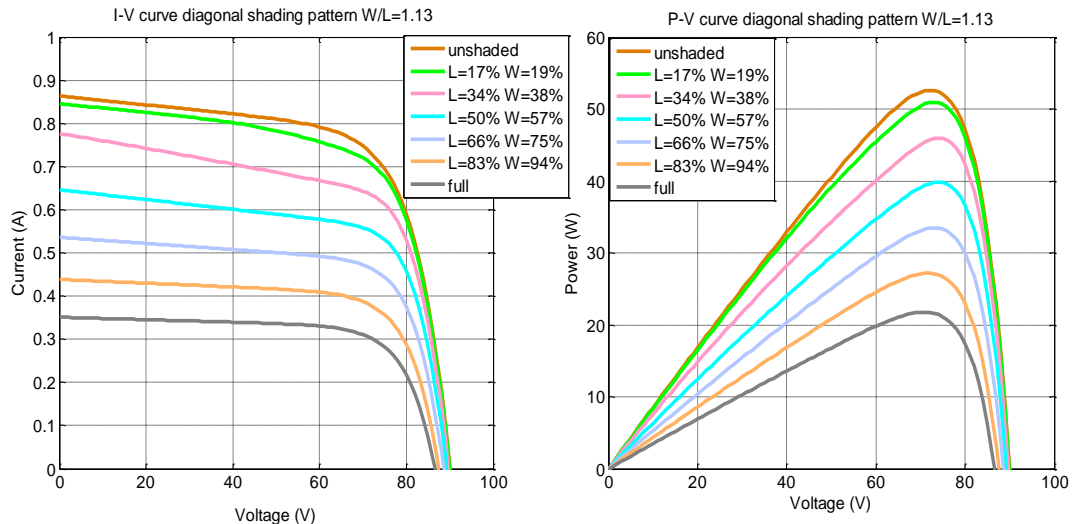
Σχήμα 4. 11. Σχήμα Φ/B πλαίσιου single string υπό διαγώνια σκίαση με $W/L=0,57$.



Σχήμα 4. 12. Καμπύλες I-V,P-V Φ/B πλασιού single string υπό διαγώνια σκίαση με $W/L=0,57$.



Σχήμα 4. 13. Σχήμα Φ/B πλασιού single string υπό διαγώνια σκίαση με $W/L=1,13$.



Σχήμα 4. 14. Καμπύλες I-V, P-V Φ/B πλαισίου υπό διαγώνια σκίαση με $W/L=1,13$.

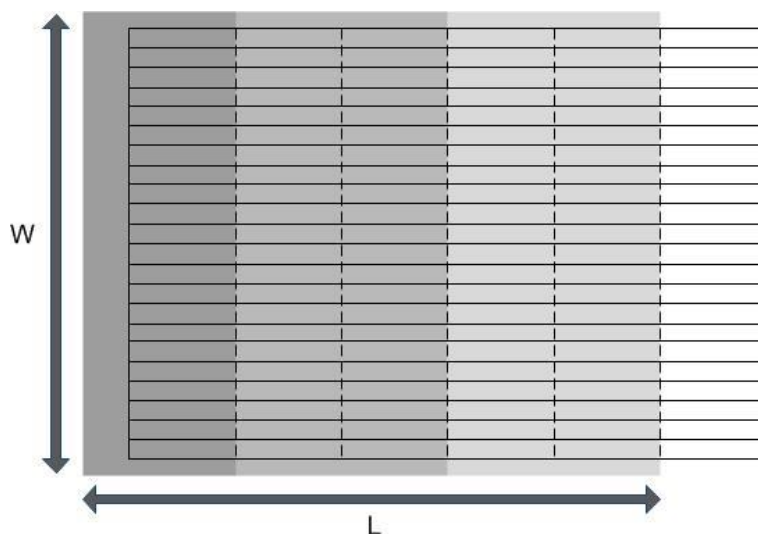
Από τα παραπάνω διαγράμματα και για τις τρεις περιπτώσεις γίνεται αντιληπτό, ότι η οριζόντια σκίαση είναι ένα ενδιάμεσο σενάριο μεταξύ των δύο ακραίων, που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες υποενότητες, όσο αναφορά την παραγόμενη ισχύ του πλαισίου. Σημαντική παρατήρηση για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις που μελετήθηκαν στην οριζόντια σκίαση είναι ότι στην πρώτη περίπτωση εμφανίζεται η μεγαλύτερη μείωση ισχύος αναλογικά με τη σκιασμένη επιφάνεια. Επομένως είναι προτιμότερο να σκιάζεται μεγαλύτερος αριθμός κυψελών σε μικρότερο ποσοστό, παρά μικρότερος αριθμός κυψελών σε μεγάλο ποσοστό όταν το πλαίσιο σκιάζεται διαγώνια.

4.4 Λειτουργία Φ/B πλαισίου παράλληλων στοιχειοσειρών (multi-string) υπό μερική σκίαση

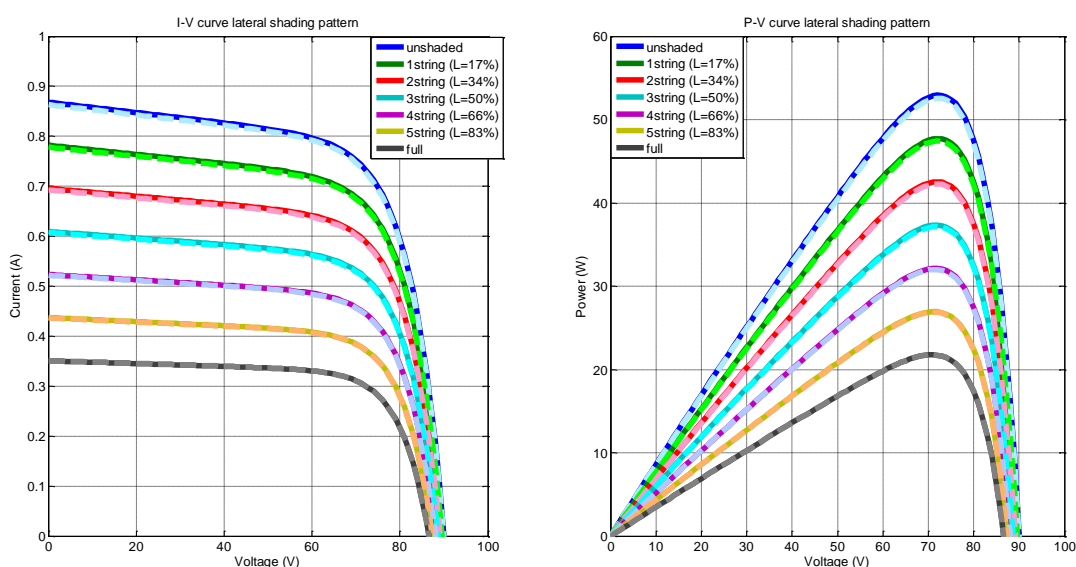
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των ίδιων σεναρίων σκίασης με αυτά της ενότητας 4.3, για πλαίσιο με ίδια χαρακτηριστικά αλλά με δομή 6 παράλληλων στοιχειοσειρών (multi-string). Το μέγεθος δηλαδή των Φ/B στοιχείων των στοιχειοσειρών είναι το 1/6 του μεγέθους των στοιχείων της single string δομής. Ο συνήθης αριθμός παράλληλων στοιχειοσειρών σε πλαίσια άμορφου πυριτίου δομής multi-string είναι έξι, όπως και στο πλαίσιο Schuco MPE85 AL01. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις είναι ίδιες με αυτές τις προηγούμενης ενότητας για το single-string πλαίσιο, αλλά προσαρμοσμένες για τη multi-string με χρήση των αναγωγικών τύπων που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες του μερικώς σκιασμένου πλαισίου, κατά 60%, με 6 στοιχειοσειρές των 106 κυψελών σε σειρά η κάθε μια (συνεχείς καμπύλες) για τρία διαφορετικά σενάρια σκίασης, συγκριτικά και με τις καμπύλες των αντίστοιχων σεναρίων για τη single-string δομή του πλαισίου (διακεκομμένες καμπύλες).

4.4.1. Οριζόντια σκίαση



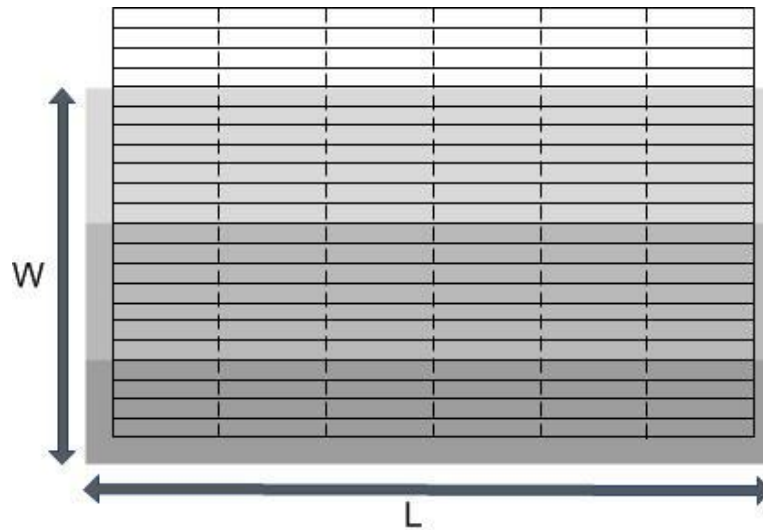
Σχήμα 4. 15. Σχήμα Φ/Β πλαισίου multi-string υπό οριζόντια σκίαση.



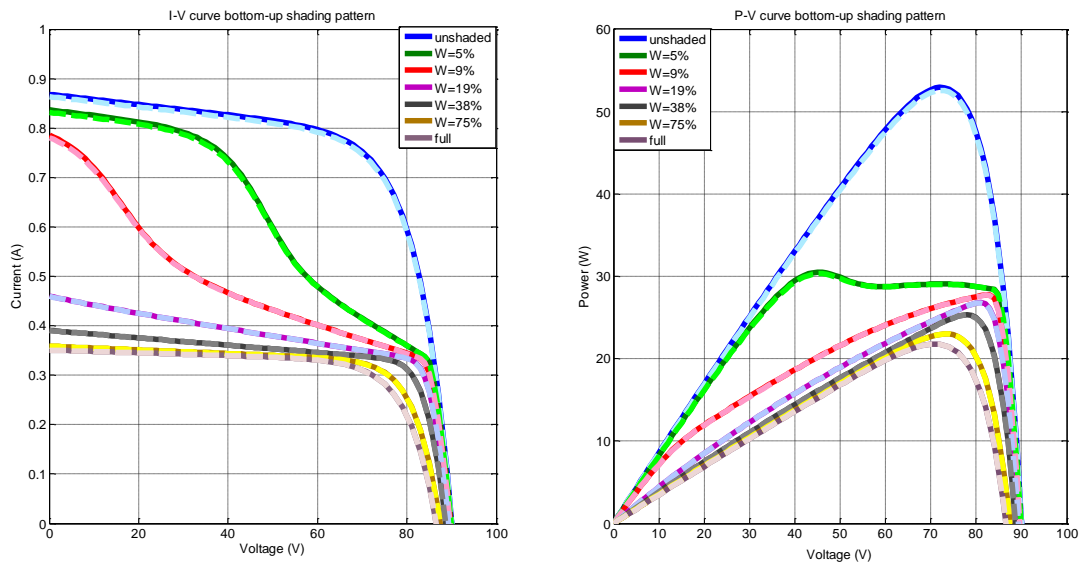
Σχήμα 4. 16. Καμπύλες I-V,P-V οριζόντια σκιασμένου multi-string πλαισίου.

Όλες οι στοιχειοσειρές του πλαισίου αποτελούνται από μεγάλο αριθμό πανομοιότυπων κυψελών. Η απόκριση των 5 ασκίαστων, πανομοιότυπων και παράλληλα συνδεδεμένων στοιχειοσειρών του multi-string πλαισίου μπορεί να παρομοιαστεί με αυτή, μιας στοιχειοσειράς Φ/Β στοιχείων πενταπλάσιου μεγέθους. Καταλήγοντας έτσι σε μια ισοδύναμη δομή με αυτή του single-string πλαισίου, για την οριζόντια σκίαση. Με τον τρόπο αυτό, δικαιολογείται η τέλεια σύγκλιση που παρουσιάζουν οι καμπύλες των δυο δομών στο συγκεκριμένο σενάριο, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.16.

4.4.2 Κατακόρυφη Σκίαση



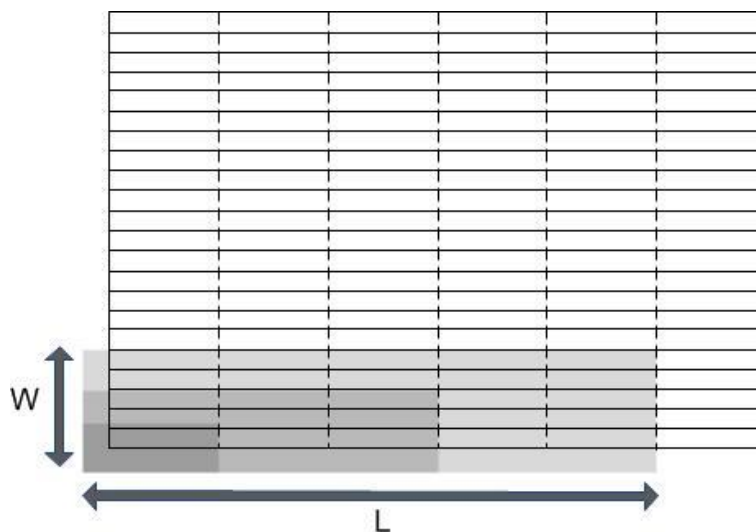
Σχήμα 4. 17. Σχήμα Φ/Β πλαισίου multi-string υπό κατακόρυφη σκίαση.



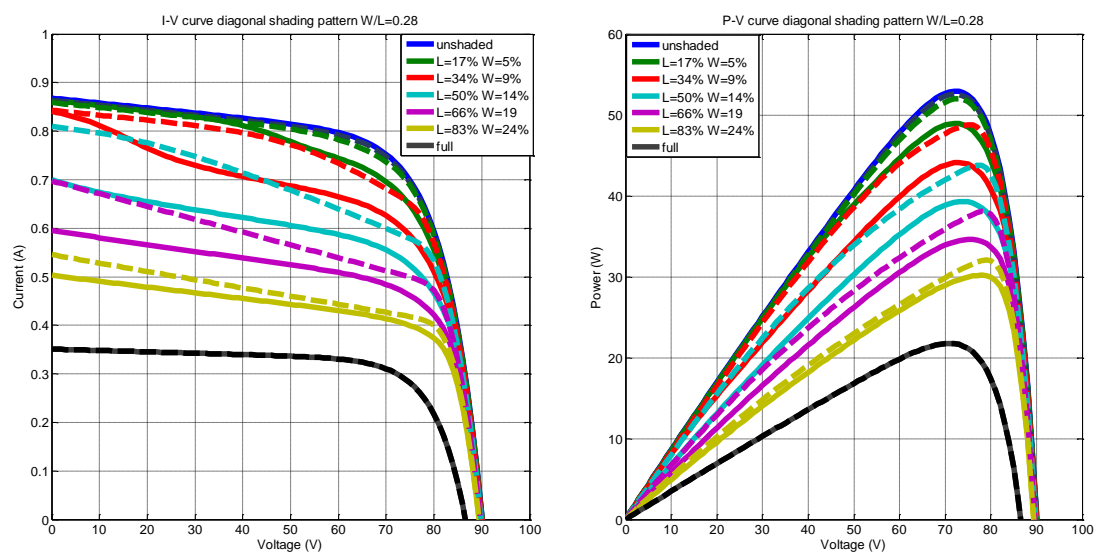
Σχήμα 4. 18. Καμπύλες I-V, P-V multi-string πλαισίου για διάφορα πλήθη σκιασμένων κυψελών.

Όπως και στην προηγούμενη ενότητα και εδώ οι καμπύλες των δύο δομών ταυτίζονται απόλυτα. Λόγω της ομοιομορφίας της σκίασης όλων των παράλληλων στοιχειοσειρών της multi-string δομής, η απόκριση του πλαισίου μπορεί να παρομοιαστεί με μία στοιχειοσειρά εξαπλάσιου μεγέθους από αυτό των επιμέρους στοιχειοσειρών, ισοδύναμη με αυτή του single-string πλαισίου για το συγκεκριμένο σενάριο σκίασης.

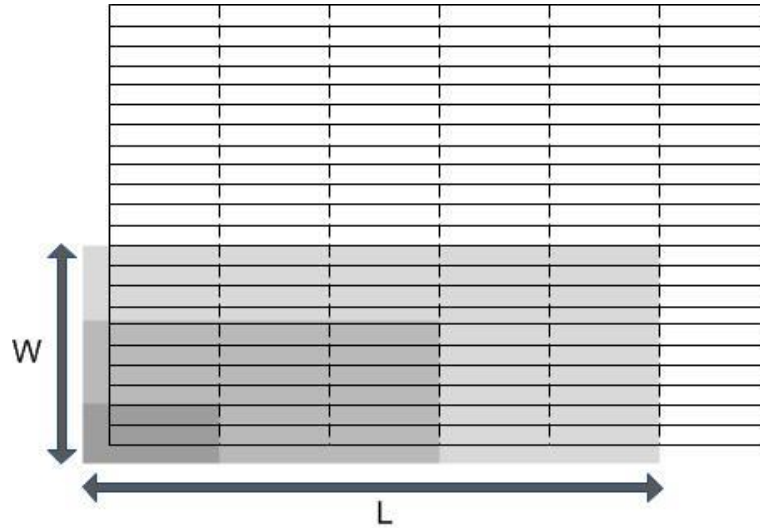
4.4.3 Διαγώνια σκίαση



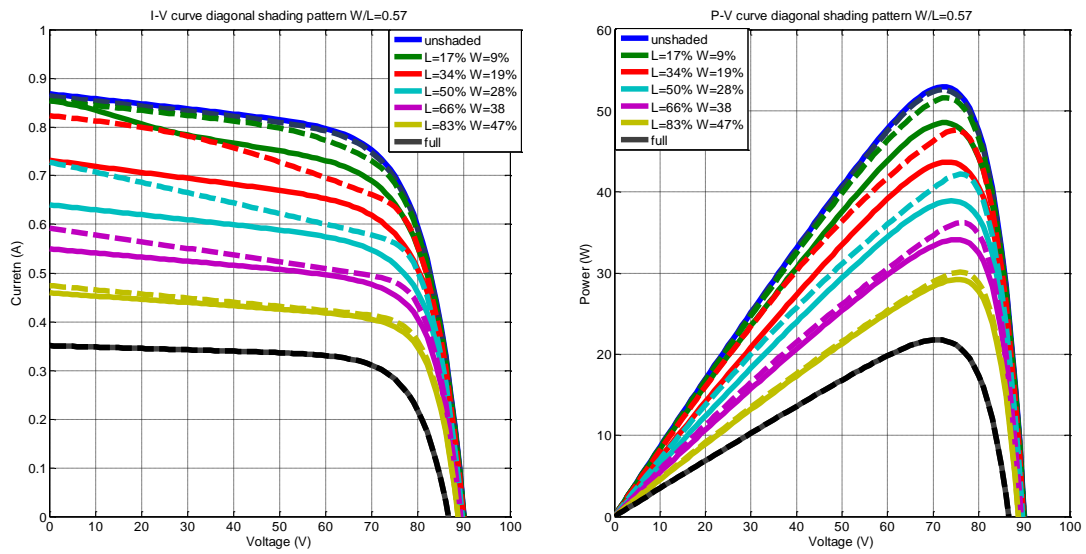
Σχήμα 4. 19. Σχήμα Φ/B πλαισίου multi-string υπό διαγώνια σκίαση με $W/L=0,28$.



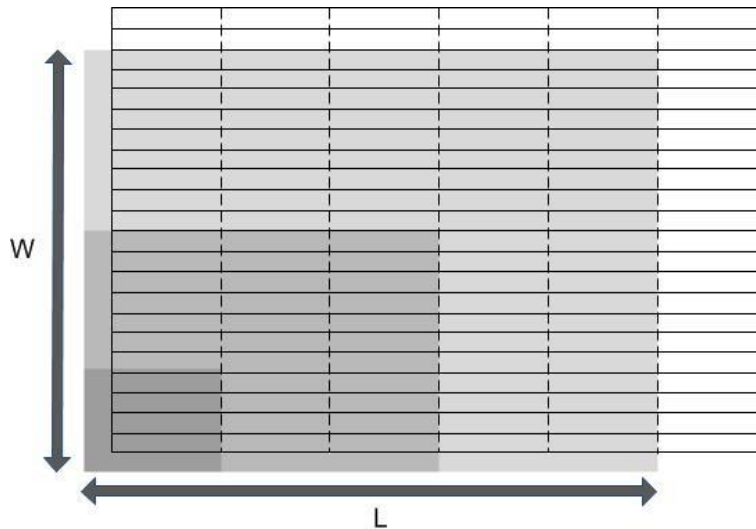
Σχήμα 4. 20. Καμπύλες I-V, P-V Φ/B πλαισίου υπό διαγώνια σκίαση με $W/L=0,28$.



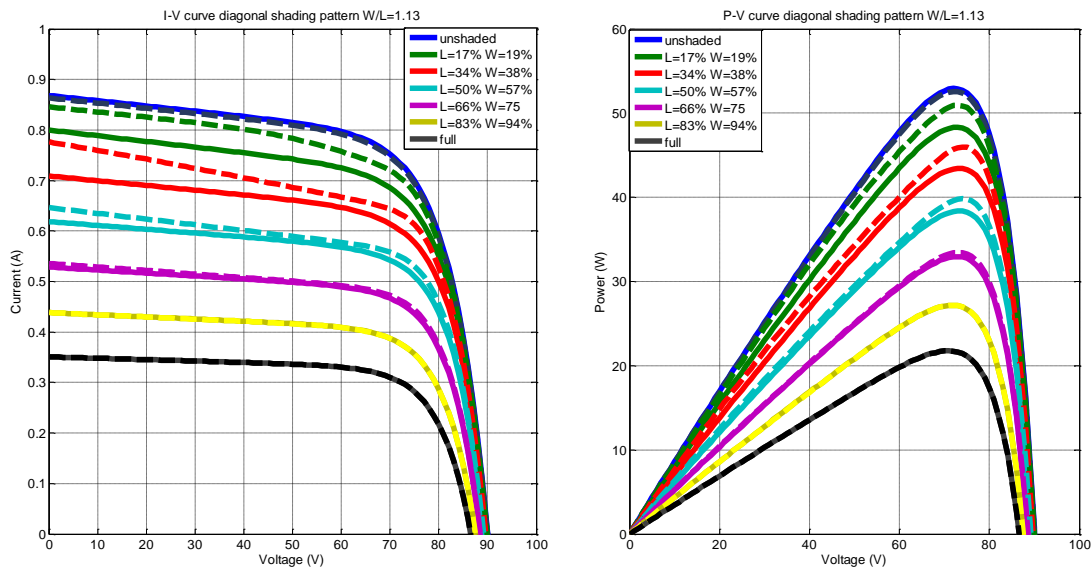
Σχήμα 4. 21. Σχήμα Φ/Β πλαισίου multi-string υπό διαγώνια σκίαση με $W/L=0,57$.



Σχήμα 4. 22. Καμπύλες I-V, P-V Φ/Β πλαισίου υπό διαγώνια σκίαση με $W/L=0,57$.



Σχήμα 4. 23. Σχήμα Φ/Β πλαισίου υπό διαγώνια σκίαση με $W/L=1,13$.

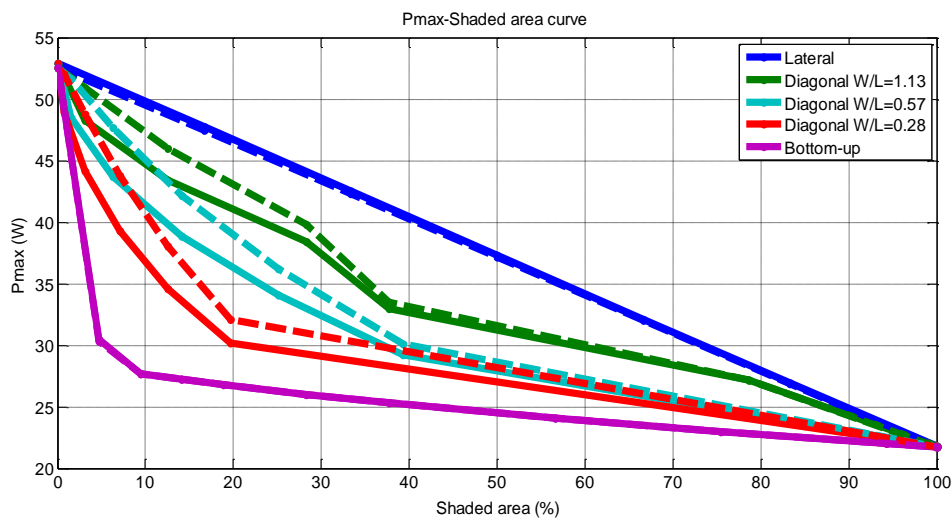


Σχήμα 4. 24. Καμπύλες I-V, P-V Φ/Β πλαισίου υπό διαγώνια σκίαση με $W/L=1,13$.

Στο συγκεκριμένο σενάριο και για τις τρεις περιπτώσεις παρουσιάζονται αποκλίσεις μεταξύ των περισσότερων καμπυλών για τις δυο δομές, με τη multi-string (συνεχής γραμμή) να εμφανίζει μεγαλύτερες απώλειες ισχύος. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εμφανίζονται για τις περιπτώσεις που σκιάζεται μικρός αριθμός κυψελών σε μικρή έκταση για τη single-string δομή και σε μικρό αριθμό στοιχειοσειρών για τη multi-string. Οι επιφάνειες σκίασης των κυψελών του single-string αντιστοιχούν σε σκίαση στοιχειοσειρών στη multi-string δομή. Όσο δηλαδή η διαγώνια σκίαση τείνει προς τα δύο ακραία σενάρια, οριζόντιας και κατακόρυφης σκίασης, τόσο μικρότερες αποκλίσεις παρατηρούνται στις καμπύλες. Οι αποκλίσεις αυτές αποδίδονται στην καλύτερη απόκριση των μερικώς σκιασμένων κυψελών του single-string πλαισίου, λόγω της μικρότερης αρνητικής τάσης που εμφανίζουν, σε σχέση με αυτή των ολικά σκιασμένων του multi-string. Συμπεραίνεται έτσι, η πιο αποδοτική συμπεριφορά της single-string δομής στην διαγώνια σκίαση.

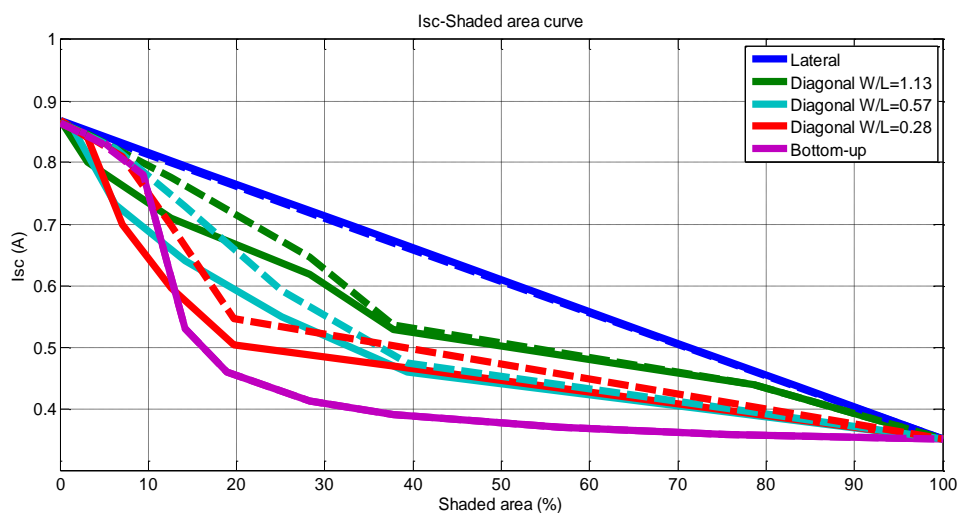
4.5 Σύγκριση δομών Φ/Β πλαισίων άμορφου πυριτίου *single-string* και *multi-string*

Από το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα.4.25) μέγιστης ισχύος ως προς το ποσοστό της σκιασμένης επιφάνειας συμπεραίνεται ότι το βέλτιστο σενάριο σκίασης για τα πλαίσια είναι αυτό της οριζόντιας σκίασης, στο οποίο παρατηρείται αναλογικότητα της μείωσης της ισχύος με τη σκιασμένη επιφάνεια. Ενώ το δυσμενέστερο σενάριο είναι αυτό της σκίασης του πλαισίου από κάτω προς τα πάνω, όπου για σκιασμένη επιφάνεια 10% και άνω η μείωση της ισχύος είναι μεγάλη και τα πλαίσια σχεδόν αποδίδουν ισχύ σαν να ήταν ολικά σκιασμένα. Ενδιάμεσο σενάριο αποτελεί η διαγώνια σκίαση, το οποίο βέβαια επηρεάζεται από την τιμή του όρου W/L και συγκρίνοντας τις τρεις περιπτώσεις του, συμπεραίνεται ότι είναι προτιμότερο να σκιάζεται μεγάλος αριθμός κυψελών (W) σε μικρότερη έκταση (L) (σύγκλιση προς την οριζόντια σκίαση).

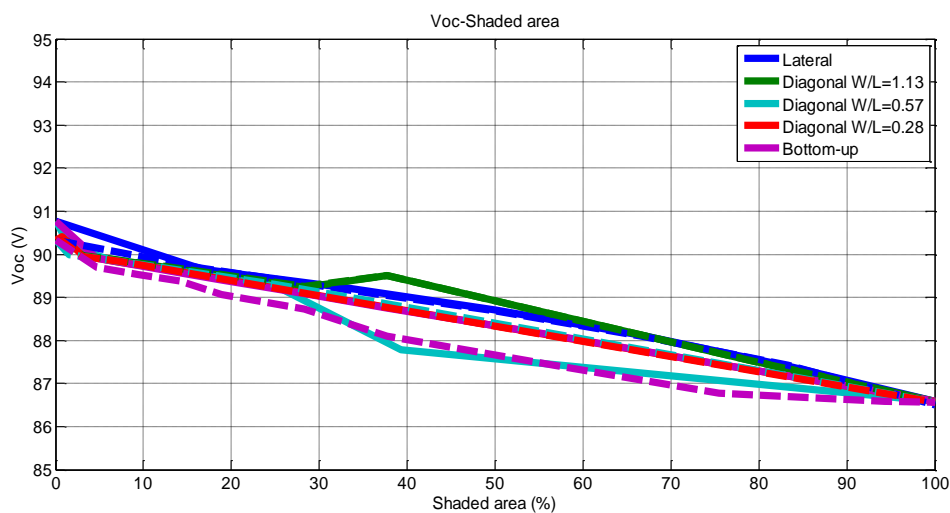


Σχήμα 4. 25. Καμπύλες Pmax-Shaded area για όλα τα σενάρια σκίασης και για τις δυο δομές πλαισίων.

Σημαντικά συμπεράσματα προκύπτουν και από το διάγραμμα ρεύματος βραχυκύκλωσης των πλαισίων με το ποσοστό σκιασμένης επιφάνειας. Στην οριζόντια σκίαση παρατηρείται, όπως και για την ισχύ, αναλογικότητα με την σκιασμένη επιφάνεια. Στο σενάριο κατακόρυφης σκίασης φαίνεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης μέχρι το 10% να μειώνεται ελαφρώς, από 10%-20% μειώνεται ραγδαία, καταλήγοντας άνω του 20% να παίρνει τιμές κοντά σε αυτό, του πλήρως σκιασμένου. Τέλος για το σενάριο της διαγώνιας σκίασης, παρατηρείται ότι η πτώση του ρεύματος βραχυκύκλωσης για τη multi-string δομή είναι μεγαλύτερη, εν συγκρίσει με την κατακόρυφη σκίαση του πλαισίου, για μικρό ποσοστό της σκιασμένης επιφάνειας. Αυτό οφείλεται στην κατακόρυφη σκίαση, υπό την οποία λειτουργούν οι επιμέρους στοιχειοσειρές του multi-string πλαισίου.



Σχήμα 4. 26. Καμπύλες Isc-Shaded area για όλα τα σενάρια σκίασης και για τις δυο δομές πλαισίων.



Σχήμα 4. 27. Καμπύλες Voc-Shaded area για όλα τα σενάρια σκίασης και για τις δυο δομές πλαισίων.

Τέλος από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνεται ότι η τάση ανοικτοκύκλωσης, για τα διάφορα σενάρια σκίασης, παίρνει ενδιάμεσες τιμές μεταξύ των τάσεων ανοικτοκύκλωσης ασκίαστου και σκιασμένου πλαισίου. Η μείωση της τάσης φαίνεται να παρουσιάζει αναλογικότητα με το ποσοστό της σκιασμένης επιφάνειας.

Κεφάλαιο 5

Επιβεβαίωση Φ/Β μοντέλου

Στα κεφάλαια 3 και 4 παρουσιάστηκε αναλυτικά το μοντέλο προσομοίωσης της ηλεκτρικής απόκρισης Φ/Β πλαισίων άμορφου πυριτίου υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Το μοντέλο περιλαμβάνει το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου άμορφου πυριτίου, την προσέγγιση για το μερικώς σκιασμένο στοιχείο με την υπόθεση των δύο subcells, καθώς και την μοντελοποίηση της δομής του πλαισίου σε συστήματα εξισώσεων. Ωστε να επιβεβαιωθεί το προαναφερθέν μοντέλο και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν βάση αυτού, απαραίτητη είναι η επιβεβαίωσή του, συγκρίνοντάς το με μετρήσεις ενός πραγματικού πλαισίου. Στην παρούσα εργασία μετρήθηκαν δύο Φ/Β πλαίσια, ένα για κάθε δομή πλαισίων άμορφου πυριτίου, για τα αντιπροσωπευτικότερα σενάρια σκίασης.



Τα Φ/Β πλαίσια που μετρήθηκαν, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, είναι τα Schuco MPE85 AL01 (multi-string) και Kaneka GEA060 (single-string). Κατά την πειραματική διαδικασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένα ποτενσιόμετρο ισχύος ως μεταβλητό φορτίο για τη σάρωση της χαρακτηριστικής καμπύλης $I-V$, ο μετρητικός εξοπλισμός του λογισμικού LabView για την καταγραφή των σημείων λειτουργίας στον H/Y και δύο ημιδιαπερατά υλικά για την προσομοίωση των σεναρίων σκίασης με βαθμούς διαπερατότητας 40% (Material 1) και 26% (Material 2). Οι μετρήσεις λήφθηκαν υπό συνθήκες καθαρού ουρανού κατά το ηλιακό μεσημέρι στις 31 Ιανουαρίου και 1 Μαρτίου 2013. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά τις μετρήσεις είναι:

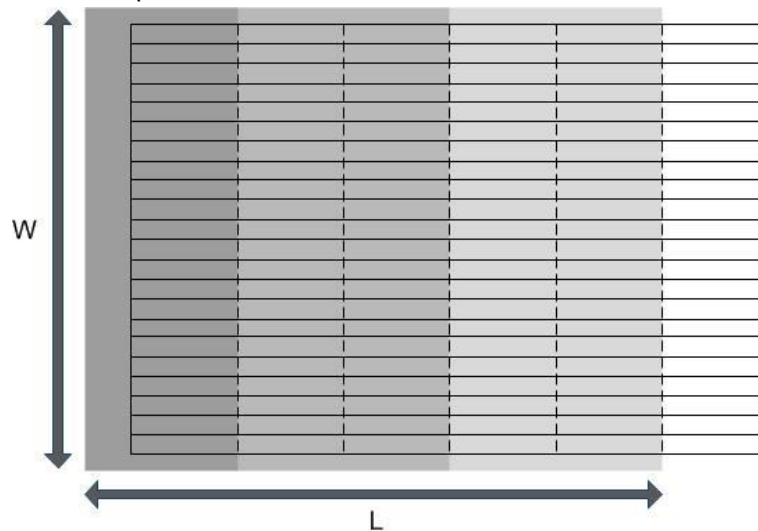
- Διαμόρφωση των ανομοιόμορφων συνθηκών ακτινοβολίας του εκάστοτε σεναρίου σκίασης, με κατάλληλη τοποθέτηση ημιδιαπερατού υλικού (ύφασμα) στην επιφάνεια του πλαισίου.

- Καταγραφή της λειτουργίας βραχυκύκλωσης συνδέοντας τους ακροδέκτες του πλαισίου μεταξύ τους.
- Σάρωση της χαρακτηριστικής καμπύλης σε όλο το εύρος του ποτενσιόμετρου.
- Μέτρηση στην περιοχής ανοικτοκύκλωσης κρατώντας τους ακροδέκτες αποσυνδεδεμένους από το ποτενσιόμετρο.

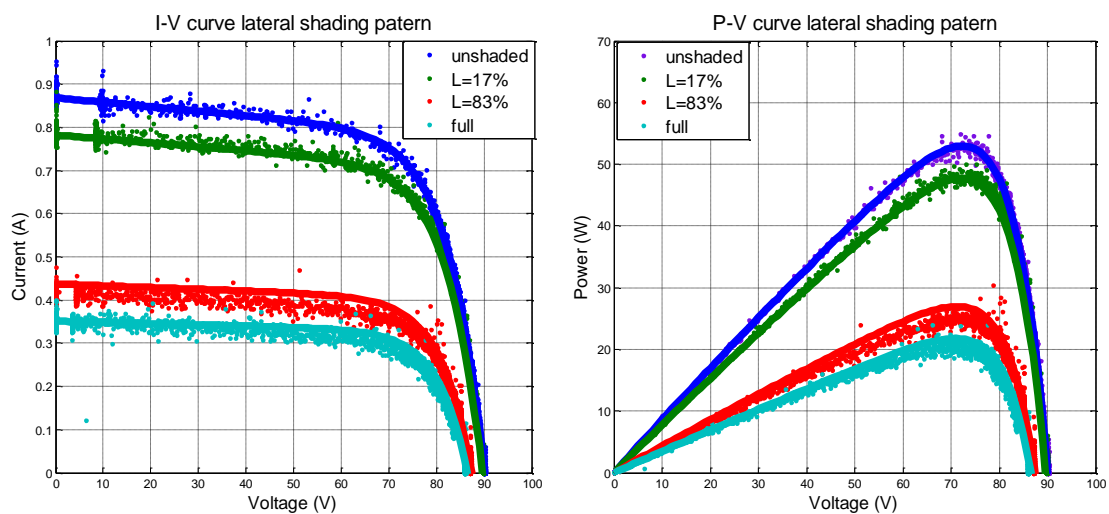
Οι αποκλίσεις που εμφανίζονται στις παρακάτω καμπύλες, κυρίως σε αυτές της κατακόρυφης σκίασης, αποδίδονται στην όχι και τόσο μεγάλη ακρίβεια του όρου περιγραφής της λειτουργίας των κυψέλων στην αρνητική τάση. Καθώς επίσης και στην μη ιδανική διαμόρφωση των σεναρίων σκίασης του πλαισίου, λόγω του πολύ μικρού μεγέθους των κυψελών και της διάχυτης ακτινοβολία που επιδρά στα ακριανά σημεία του

5.1 Μετρήσεις Φ/B πλαισίου Schuco MPE85 AL01

➤ Οριζόντια σκίαση



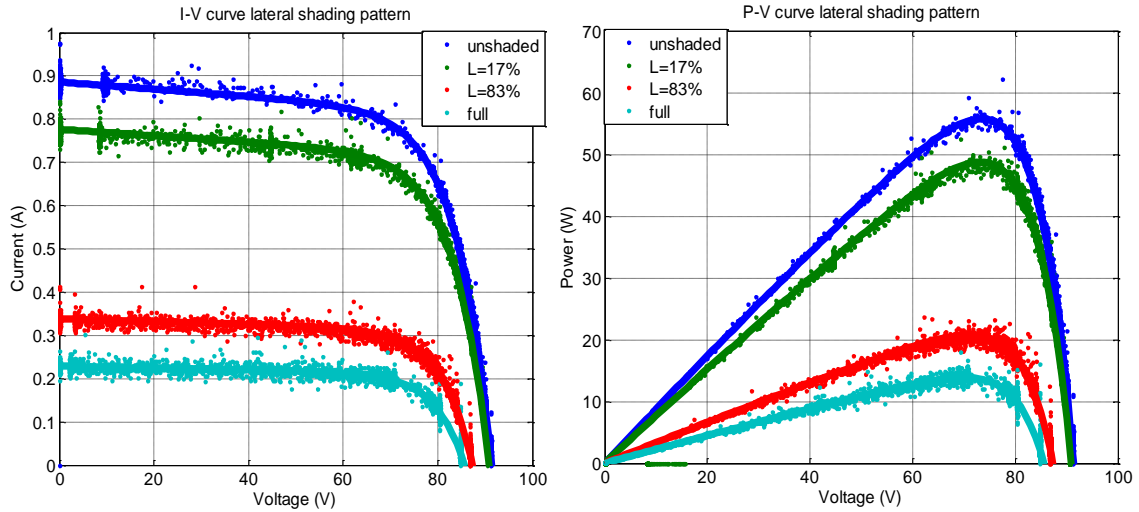
Σχήμα 5. 1. Σχήμα Φ/B πλαισίου Schuco υπό οριζόντια σκίαση.



Σχήμα 5. 2. Χαρακτηριστικές I-V, P-V μετρήσεων υπό οριζόντια σκίαση με το Material 1.

Πίνακας 5. 1. Σφάλματα μέγιστης ισχύος καμπυλών σχήματος 5.2.

Unshaded	1.8%
L=17%	2.4%
L=83%	5.9%
Full shaded	2.8%

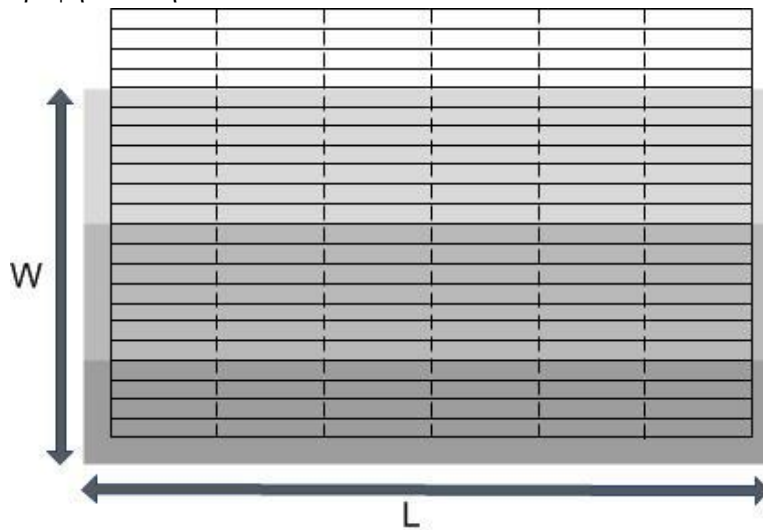


Σχήμα 5. 3. Χαρακτηριστικές I-V, P-V μετρήσεων υπό οριζόντια σκίαση με το Material 2.

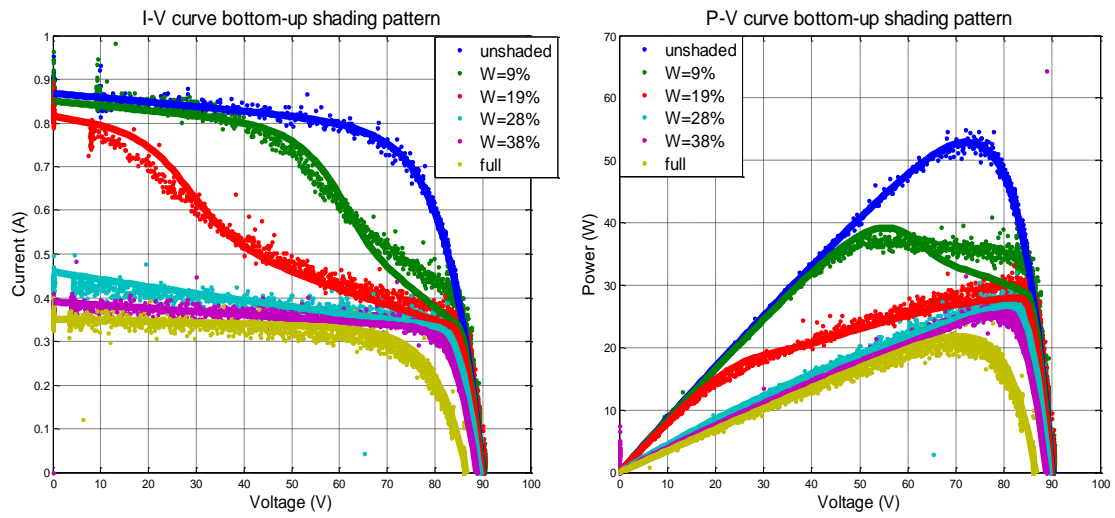
Πίνακας 5. 2. Σφάλματα μέγιστης ισχύος καμπυλών σχήματος 5.3.

Unshaded	1.20%
L=17%	0.07%
L=83%	2.00%
Full shaded	1.00%

➤ Κατακόρυφη σκίαση



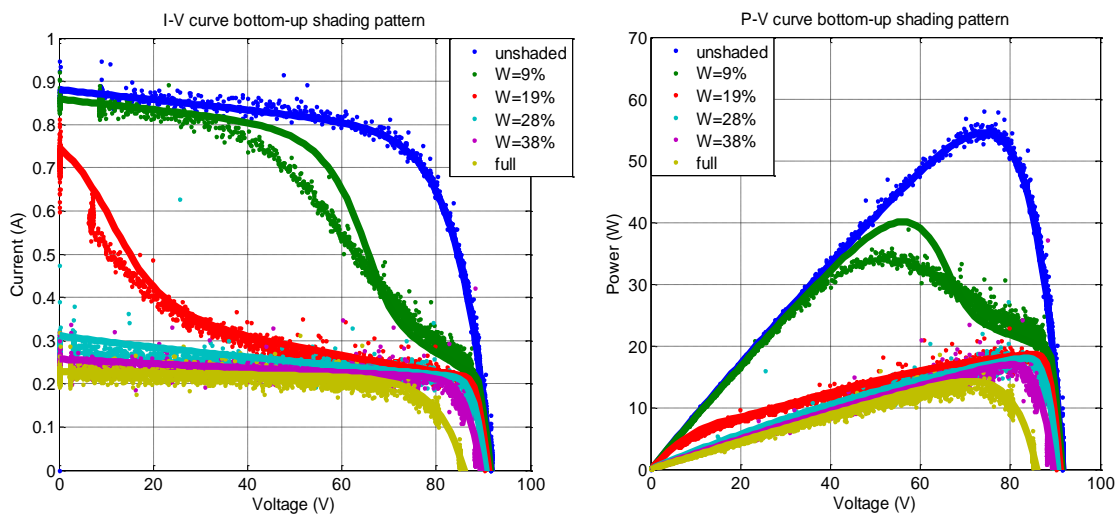
Σχήμα 5. 4. Σχήμα Φ/B πλαισίου Schuco υπό κατακόρυφη σκίαση.



Σχήμα 5. 5. Χαρακτηριστικές I-V,P-V μετρήσεων για διάφορα πλήθη σκιασμένων κυψελών με το Material 1.

Πίνακας 5. 3. Σφάλματα μέγιστης ισχύος καμπυλών σχήματος 5.5.

Unshaded	1.84%
W=9%	5.30%
W=19%	3.70%
W=28%	3.21%
W=38%	0.50%
Full shaded	2.80%

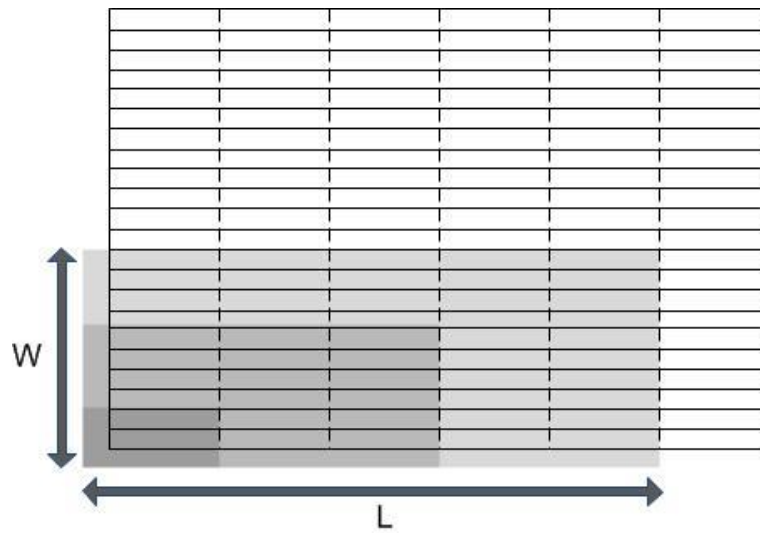


Σχήμα 5. 6. Χαρακτηριστικές I-V,P-V μετρήσεων για διάφορα πλήθη σκιασμένων κυψελών με το Material 2.

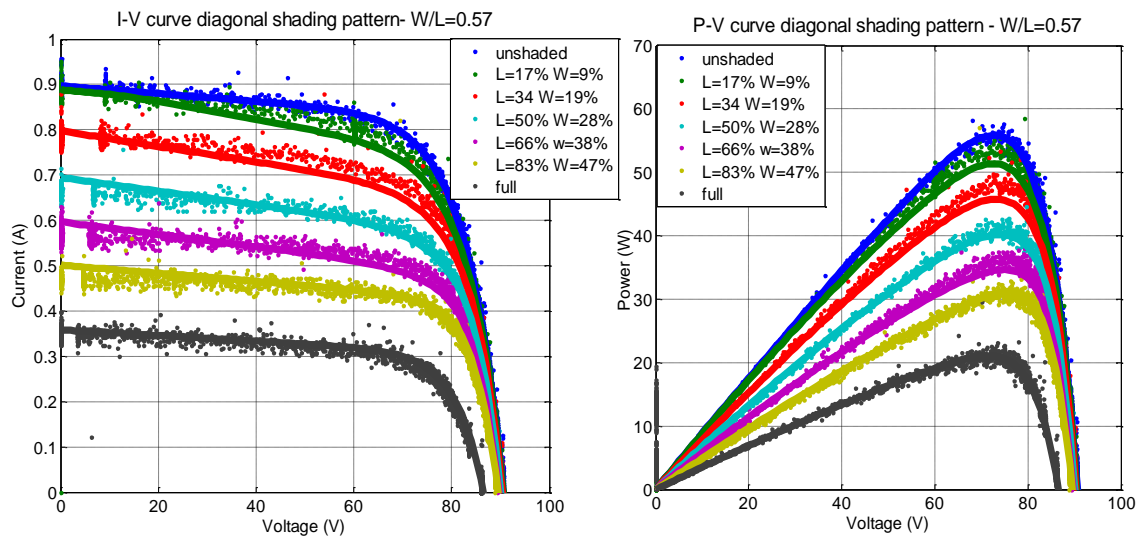
Πίνακας 5. 4. Σφάλματα μέγιστης ισχύος καμπυλών σχήματος 5.6

Unshaded	1.60%
W=9%	14.00%
W=19%	3.00%
W=28%	1.80%
W=38%	0.80%
Full shaded	2.80%

➤ Διαγώνια σκίαση



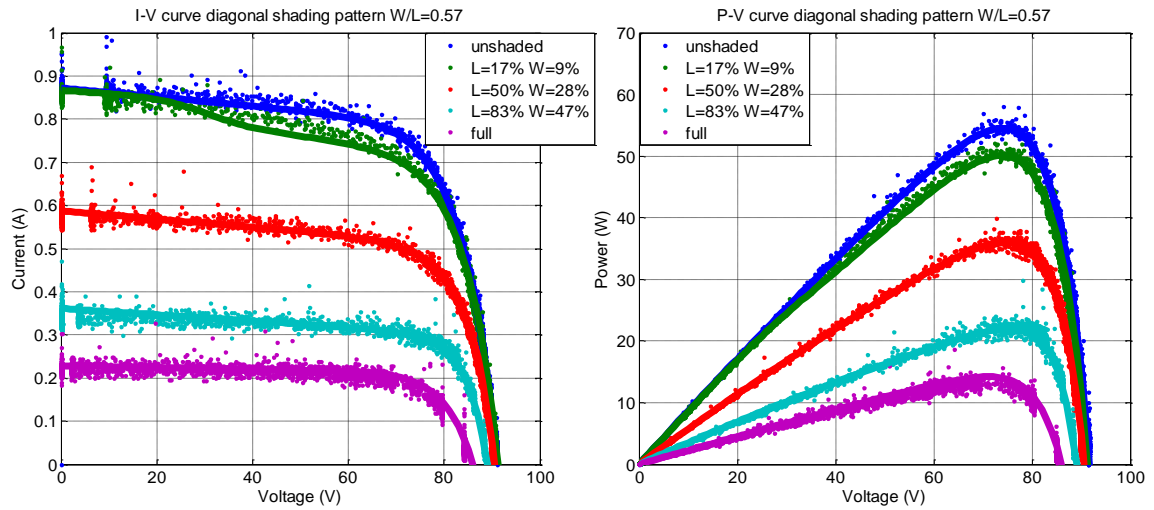
Σχήμα 5. 7. Σχήμα Φ/Β πλαισίου Schuco υπό διαγώνια σκίαση με $W/L=0,57$.



Σχήμα 5. 8. Χαρακτηριστικές I-V,P-V μετρήσεων υπό διαγώνια σκίαση με το Material 1.

Πίνακας 5. 5. Σφάλματα μέγιστης ισχύος καμπυλών σχήματος 5.8.

<i>Unshaded</i>	<i>0.07%</i>
<i>L=17% W=9%</i>	<i>3.70%</i>
<i>L=34% W=19%</i>	<i>5.00%</i>
<i>L=50% W=28%</i>	<i>3.20%</i>
<i>L=66 W=38%</i>	<i>4.90%</i>
<i>L=83 W=47%</i>	<i>3,40%</i>
<i>Full shaded</i>	<i>2.90%</i>



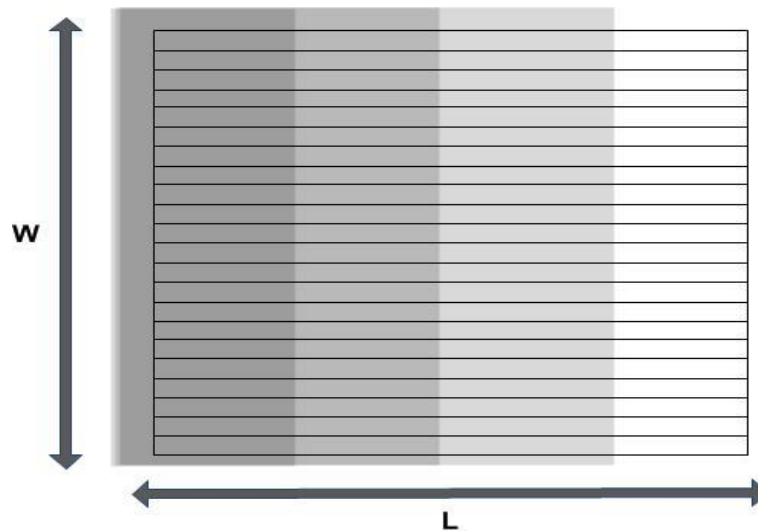
Σχήμα 5. 9. Χαρακτηριστικές I-V,P-V μετρήσεων υπό διαγώνια σκίαση με το Material 2.

Πίνακας 5. 6. Σφάλματα μέγιστης ισχύος καμπυλών σχήματος 5.9.

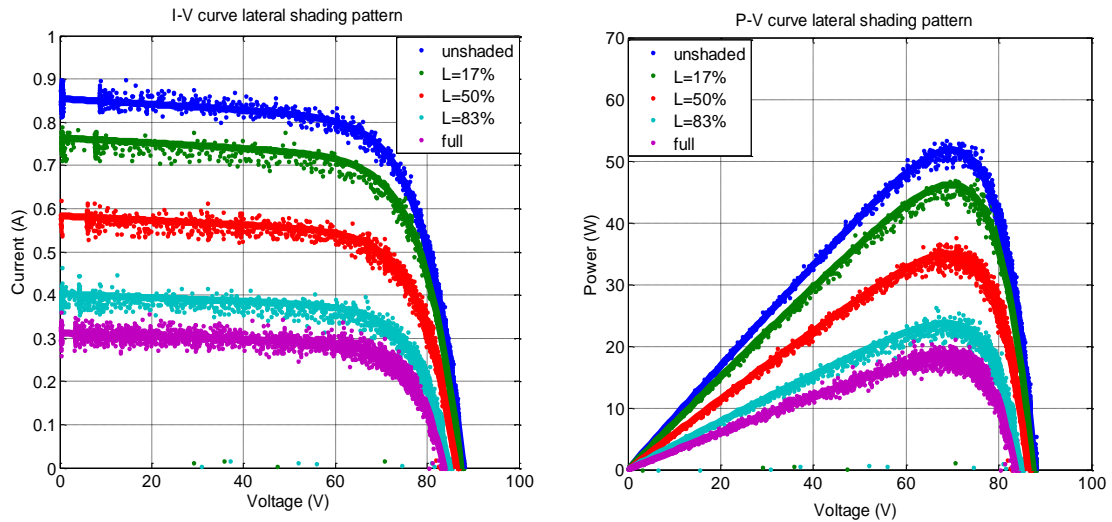
<i>Unshaded</i>	1.05%
<i>L=17% W=9%</i>	2.10%
<i>L=50% W=28%</i>	0.24%
<i>L=83 W=47%</i>	2.40%
<i>Full shaded</i>	2.10%

5.2 Μετρήσεις Φ/Β πλαισίου Kaneka GEA060

- Οριζόντια σκίαση



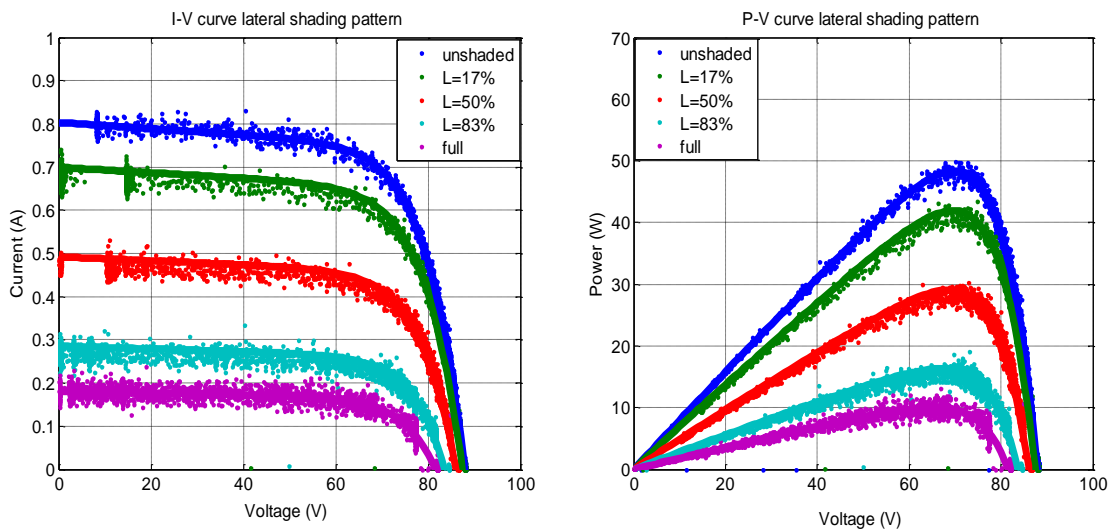
Σχήμα 5. 10. Σχήμα Φ/Β πλαισίου Kaneka υπό οριζόντια σκίαση.



Σχήμα 5. 11. Χαρακτηριστικές I-V,P-V μετρήσεων υπό οριζόντια σκίαση με το Material 1.

Πίνακας 5. 7. Σφάλματα μέγιστης ισχύος καμπυλών σχήματος 5.11.

<i>Unshaded</i>	0.07%
<i>L=17%</i>	0.40%
<i>L=50%</i>	0.08%
<i>L=83%</i>	1.30%
<i>Full shaded</i>	2.60%

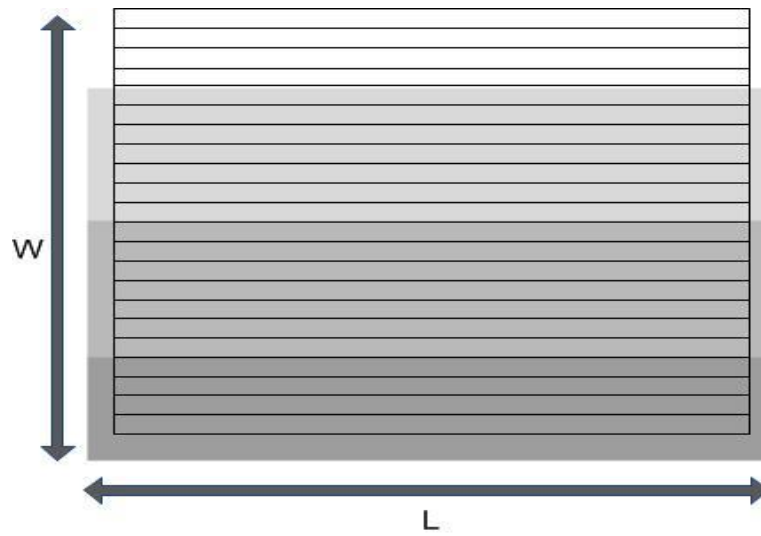


Σχήμα 5. 12. Χαρακτηριστικές I-V,P-V μετρήσεων υπό οριζόντια σκίαση με το Material 2.

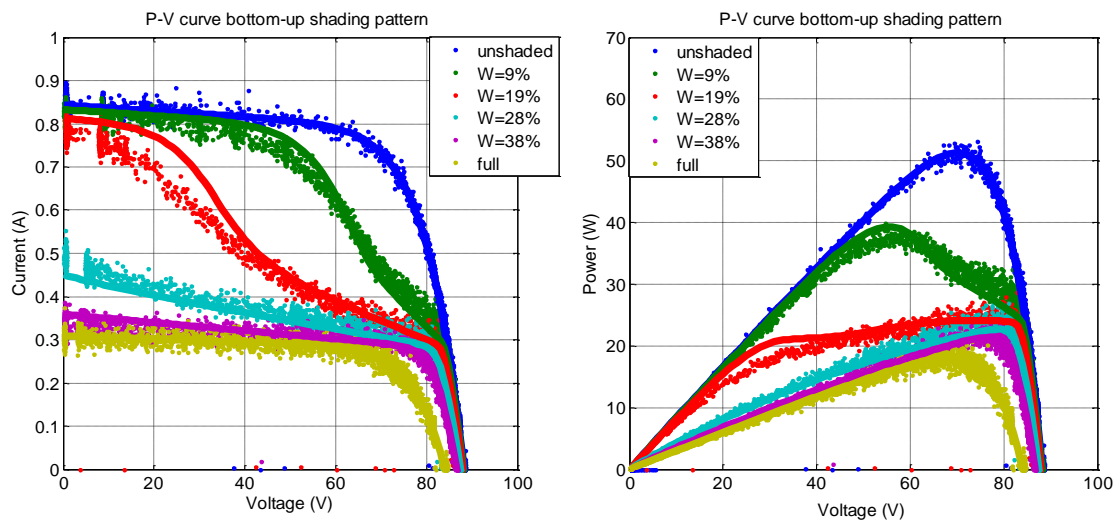
Πίνακας 5. 8. Σφάλματα μέγιστης ισχύος καμπυλών σχήματος 5.12.

<i>Unshaded</i>	0.50%
<i>L=17%</i>	1.50%
<i>L=50%</i>	0.64%
<i>L=83%</i>	1.30%
<i>Full shaded</i>	2.60%

➤ Κατακόρυφη σκίαση



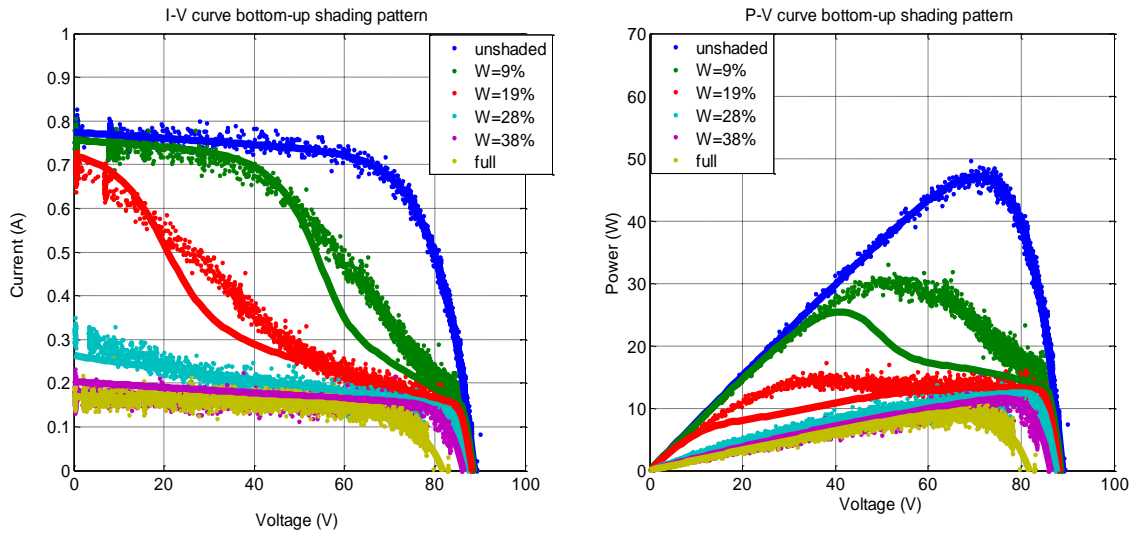
Σχήμα 5. 13. Σχήμα Φ/Β πλαισίου Kaneka υπό κατακόρυφη σκίαση.



Σχήμα 5. 14. Χαρακτηριστικές I-V, P-V μετρήσεων για διάφορα πλήθη σκιασμένων κυψελών με το Material 1.

Πίνακας 5. 9. Σφάλματα μέγιστης ισχύος καμπυλών σχήματος 5.14.

Unshaded	1.30%
W=9%	5.20%
W=19%	4.10%
W=28%	3.20%
W=38%	3.70%
Full shaded	0.50%

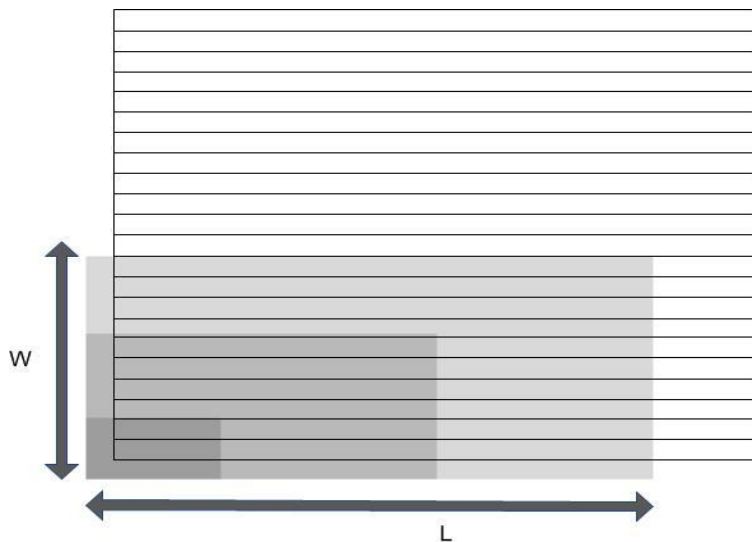


Σχήμα 5. 15. Χαρακτηριστικές I-V,P-V μετρήσεων για διάφορα πλήθη σκιασμένων κυμαλών με το Material 2.

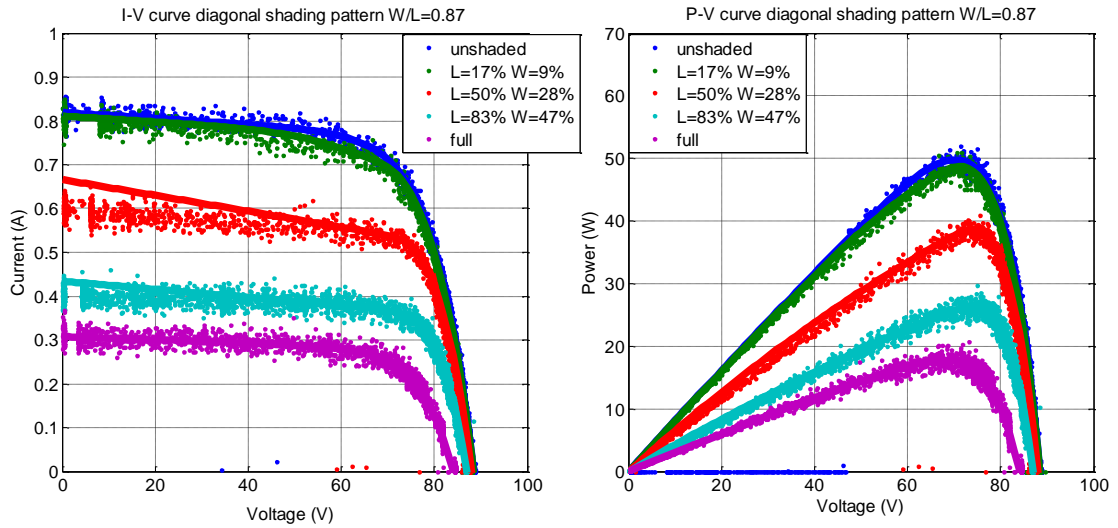
Πίνακας 5. 10. Σφάλματα μέγιστης ισχύος καμπυλών σχήματος 5.15.

Unshaded	0.10%
W=9%	11.40%
W=19%	5.10%
W=28%	4.50%
W=38%	1.20%
Full shaded	6.50%

➤ Διαγώνια σκίαση



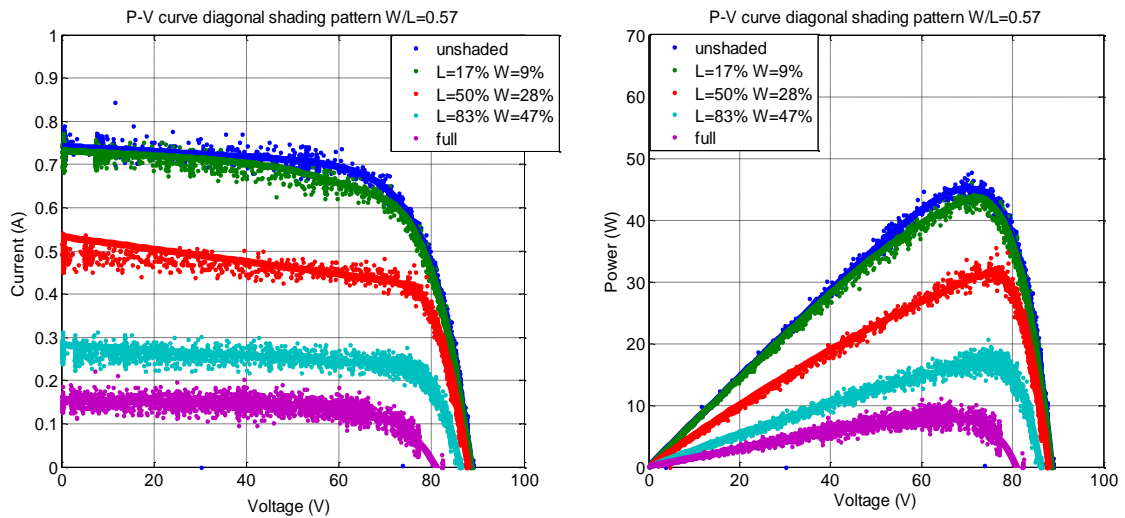
Σχήμα 5. 16. Σχήμα Φ/Β πλαισίου Kaneka υπό διαγώνια σκίαση με $W/L=0,57$.



Σχήμα 5.17. Χαρακτηριστικές I-V, P-V μετρήσεων υπό διαγώνια σκίαση με το Material 1.

Πίνακας 5.11. Σφάλματα μέγιστης ισχύος καμπυλών σχήματος 5.17.

Unshaded	2.20%
L=17% W=9%	0.35%
L=50% W=28%	3.20%
L=83% W=47%	3.20%
Full shaded	3.70%



Σχήμα 5.18. Χαρακτηριστικές I-V, P-V μετρήσεων υπό διαγώνια σκίαση με το Material 2.

Πίνακας 5.11. Σφάλματα μέγιστης ισχύος καμπυλών σχήματος 5.18.

Unshaded	2.54%
L=17% W=9%	1.73%
L=50% W=28%	2.34%
L=83% W=47%	2.71%
Full shaded	3.40%

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

6.1 Συμβολή έρευνας

Η μελέτη του φαινομένου της μερικής σκίασης αποτελεί πρόσφατο αντικείμενο έρευνας και ειδικότερα για την τεχνολογία λεπτών υμενίων βρίσκεται σε αρχικό στάδιο. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία συνεισφέρει, παρουσιάζοντας μια διαφορετική προσέγγιση για την λειτουργία της μερικώς σκιασμένης Φ/Β κυψέλης, συγκριτικά με αυτές που έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα, η οποία βασίζεται στην υπόθεση της υποδιαίρεσης της κυψέλης σε δύο υποκυψέλες, μια απλοϊκότερη προσέγγιση σε σχέση με αυτή της αναφοράς [10]. Παράλληλα, αξιοσημείωτα είναι τα συμπεράσματα που προκύπτουν, από τη σύγκριση της ηλεκτρικής απόκρισης των δύο δομών των Φ/Β πλαισίων άμορφου πυριτίου υπό συνθήκες μερικής σκίασης. Τέλος, η σπουδαιότητα της συνεισφοράς της παρούσας έρευνας, έγκειται κυρίως στο γεγονός της επιβεβαίωσης του προτεινόμενου μοντέλου και των συμπερασμάτων που εξήχθησαν, από πειραματικά δεδομένα, κάτι που την καθιστά πρωτοπόρα στο συγκεκριμένο ερευνητικό τομέα, της μερικής σκίασης των Φ/Β πλαισίων άμορφου πυριτίου.

6.2 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα υλικά, οι τρόποι κατασκευής και τα κύρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων σήμερα φωτοβολταϊκών τεχνολογιών. Επίσης παρουσιάζεται το προτεινόμενο μοντέλο περιγραφής της λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων thin film άμορφου πυριτίου, με χρήση του οποίου μελετάται το φαινόμενο της μερικής σκίασης των συγκεκριμένων πλαισίων. Όλες οι προσομοιώσεις της ερευνητικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκαν στο υπολογιστικό περιβάλλον της Matlab.

Αρχικά, για την μοντελοποίηση των πλαισίων σημαντικός παράγοντας αποτελεί η επιλογή του κατάλληλου ηλεκτρικού ισοδύναμου κυκλώματος για την περιγραφή της λειτουργίας του Φ/Β στοιχείου άμορφου πυριτίου. Εξαιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της συγκεκριμένης τεχνολογίας, η προσέγγιση της ηλεκτρικής απόκρισης της Φ/Β κυψέλης από τα ισοδύναμα κυκλώματα που συνήθως χρησιμοποιούνται για τα Φ/Β στοιχεία της κρυσταλλικής τεχνολογίας, δεν είναι ικανοποιητική. Έτσι, χρησιμοποιείται ένα εξειδικευμένο ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα, το οποίο αναπτύχθηκε στο [6] αποκλειστικά για τα Φ/Β στοιχεία και Φ/Β πλαίσια άμορφου πυριτίου και είναι βασισμένο στην προσθήκη ενός επιπλέον όρου στο γνωστό μοντέλο των 5 παραμέτρων, ώστε να μοντελοποιεί τις αυξημένες απώλειες λόγω επανασύνδεσης. Εξίσου σημαντική είναι και η προσέγγιση που χρησιμοποιείται για την απόκριση της μερικώς σκιασμένης Φ/Β κυψέλης, η οποία βασίζεται στην θεώρηση δυο υποκυψέλων (subcells) που περιγράφουν την απόκριση της σκιασμένης και ασκίαστης επιφάνειας της κυψέλης αντίστοιχα.

Εκτός από τις δύο δομές, *multi-string* και *single-string* που συναντώνται στα συμβατικά Φ/Β πλαίσια άμορφου πυριτίου, σημαντικός είναι και ο περιορισμός στη χρήση μόνο μίας διόδου διαφυγής (bypass diode) σε αυτά, εξαιτίας του τρόπου διασύνδεσης των Φ/Β στοιχείων κατά την κατασκευή, που δεν επιτρέπει την χρήση ακροδεκτών για τη σύνδεση επιπλέον διόδων.

Τέλος, από την μελέτη της ηλεκτρικής απόκρισης των Φ/Β πλαισίων και των δύο δομών υπό συνθήκες σκίασης για διάφορα ρεαλιστικά σενάρια, συμπεραίνεται η παρόμοια απόκριση τους στην οριζόντια και κατακόρυφη σκίαση. Αντίθετα, στην περίπτωση της διαγώνιας σκίασης η δομή μιας στοιχειοσειράς (single-string) κρίνεται πιο αποδοτική από τη δομή παράλληλων στοιχειοσειρών (multi-string), η οποία χρησιμοποιείται σε μεγάλες δομές πλαισίων, λόγω του μικρότερου κινδύνου καταστροφής των Φ/Β στοιχείων της. Συγκρίνοντας τις τρεις περιπτώσεις της διαγώνιας σκίασης, συμπεραίνεται ότι είναι προτιμότερο να σκιάζεται μεγάλος αριθμός κυψελών σε μικρότερη έκταση, ενώ αντίθετα στην κρυσταλλική τεχνολογία είναι προτιμότερο να σκιάζεται μικρός αριθμός κυψελών σε μεγάλη ένταση, ώστε να παρακαμφθούν από τις άγουσες διόδους διαφυγής (bypass diode). Ακόμη, αξιοσημείωτη είναι η διαφορετική σε κάθε σενάριο επίδραση της σκιασμένης επιφάνειας στην απόδοση των Φ/Β πλαισίων, καταδεικνύοντας ως δυσμενέστερο το σενάριο της κατακόρυφης σκίασης. Πιο συγκεκριμένα στην κατακόρυφη σκίαση η επίδραση της σκιασμένης επιφάνειας στην απόδοση του πλαισίου είναι άκρως δυσανάλογη, τέτοια ώστε, για σκιασμένη επιφάνεια άνω του 10%, το πλαίσιο αποδίδει σχεδόν σαν είναι ολικά σκιασμένο. Αντίθετα, στο βέλτιστο σενάριο, οριζόντιας σκίασης, το ποσοστό της επιφάνεια σκίασης παρουσιάζει αναλογικότητα με την απόδοση του πλαισίου, έτσι, ακόμα και για σκιασμένη επιφάνεια της τάξεως του 80%, η απόκριση του πλαισίου συνεχίζει να μην ταυτίζεται με αυτή του ολικά σκιασμένου. Ενώ, στο ενδιάμεσο σενάριο, της διαγώνιας σκίασης όπως προαναφέρθηκε, η επίδραση της εξαρτάται από το λόγο του πλήθους των σκιασμένων κυψελών, προς την έκταση σκίασης τους.

6.3 Περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης των Φ/Β πλαισίων άμορφου πυριτίου. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις εξήχθησαν με προσαρμογή του μοντέλου στις μετρήσεις, περιγράφοντας έτσι τη λειτουργία του πλαισίου στις συγκεκριμένες συνθήκες που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Ένα επιπλέον βήμα θα ήταν η άρση αυτού του περιορισμού, με τον προσδιορισμό των κατάλληλων σχέσεων προσαρμογής των παραμέτρων του μοντέλου σε οποιεσδήποτε συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Επιπλέον όσον αναφορά στη μελέτη της μερικής σκίασης ενδιαφέρουσα προοπτική αποτελεί η εξαγωγή μιας απλουστευμένης φόρμουλας για τον προσδιορισμό του σημείου μέγιστης ισχύος, παρόμοια με αυτή που εξήχθη για κρυσταλλικά πλαίσια στην αναφορά [18], η οποία αποτέλεσε και πηγή έμπνευσης της παρούσας εργασίας.

Βιβλιογραφία

- [1] A. Johansson, R. Gottschalg, D. G. Infield, “Modelling shading on amorphous silicon single and double junction modules,” in *Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of 3rd World Conference on*, 2004, vol. 2, pp. 1934–1937.
- [2] Alonso-Garsia M.C., Ruiz J.M. “Analysis and modeling the reverse characteristic of photovoltaic cells”, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90 (2006) 1105-1120.
- [3] De Soto W., Klein S.A., Beckman W.A., “Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance”, *Solar Energy* 80 (2006) 78-88.
- [4] E. Paraskevadaki, S.A. Papathanassiou, “Estimation of MPP Voltage and Power of mc-Si PV Modules in Partial Shading Conditions”. *IEEE Trans. on Energy Conversion* Vol. 26, No. 3, Sept. 2011, pp. 923-932.
- [5] Guangyu Liu, Sing Kiong Nguang, Ashton Partridge, “A general modeling method for I–V characteristics of geometrically and electrically configured photovoltaic arrays”, *Energy Conversion and Management* 2011;52:3439–3445.
- [6] J. Merten, J. M. Asensi, C. Voz, A. V. Shah, R. Platz, J. Andreu, “Improved equivalent circuit and analytical model for amorphous silicon solar cells and modules,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 45, no. 2, pp. 423-429, 1998.
- [7] M. Prorok, B. Werner, T. Zdanowicz, “Applicability of equivalent diode models to modeling various thin-film photovoltaic modules in a wide range of temperature and irradiance conditions”, *Electron Technology*, vol. 37-38, pp. 1-4, 2006.
- [8] M. Green, P.A. Basore, N. Chang, D. Clugston, R. Egan, R. Evans, D. Hogg, S. Jarnason, M. Keevers, P. Lasswell, J. O’Sullivan, U. Schubert, A. Turner, S.R. Wenham, T. Young, “Crystalline silicon on glass (CSG) thin-film solar cell modules”, *Energy Materials and Solar Cells*, 77 (2004), pp. 857–863.
- [9] Quaschnig V., Hanitsch R., “Numerical simulation of photovoltaic generators with shaded cells”, *30th Universities Power Engineering Conference*, Greenwich, Sept. 5-7, 1995, pp. 583-586.
- [10] Sourabh Dongaonkar, Muhammad A. Alam, “A shaded tolerant panel design for thin film photovoltaics”, *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2012 38th IEEE, pp.2416-2420.
- [11] Taecho Moon, Heonmin Lee, Sehwon Ahn, Youngjoo Eo, “Thin film solar cell module”, *U.S. Patent* 8158878 Apr-2012.
- [12] The German Energy Society, “Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects, and engineers”, 2nd ed., *Earthscan*, London, 2008, pp. 23-51.
- [13] Y.N. Qiu, T.R. Betts, R. Gottschalg, “Electrical mismatch within single junction amorphous silicon and micromorph tandem thin film PV modules”, *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2009 34th IEEE, pp. 911-916.
- [14] Αποστολοπούλου Δ., “Αναλυτικό μοντέλο ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκών συστημάτων με ενσωμάτωση εμπειρικών δεδομένων”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα, 2009.

- [15] Καπογιάννη Ι., “Ευαισθητοποίηση διοξειδίου του τιτανίου με κβαντικές τελείες ημιαγώγιμων σουλφιδίων PbS και CdS”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών & Φυσικών Επιστημών ΕΜΠ, Αθήνα, 2011.
- [16] Κτενίδης Γ., “Μελέτη διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των 100kW”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα, 2008.
- [17] Λαγόπουλος Ι., “Πειραματική Μελέτη Φωτοβολταϊκών Στοιχείων Λεπτών Υμενίων”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα, 2011.
- [18] Μπατζέλης Ε., “Ενεργειακό μοντέλο φωτοβολταϊκής συστοιχίας με χρήση της συνάρτησης LAMBERT-W και διερεύνηση των επιπτώσεων της σκίασης”, Μεταπτυχιακή εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα, 2012.
- [19] Πέππα Α., “Μοντέλο ενεργειακής απόδοσης φωτοβολταϊκής συστοιχίας”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα, 2008.
- [20] Ρουτσόλιας Ι. “Επιδράσεις σκίασης και ρύπανσης στην ενεργειακή απόδοση φωτοβολταϊκού σταθμού”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα, 2008.
- [21] Τετελένης Σ., “Προσδιορισμός παραμέτρων γήρανσης φωτοβολταϊκών στοιχείων”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα, 2011.
- [22] <http://www.energotechniki.gr/site/xpage.asp?sid=211&page=banner2>.
- [23] http://en.wikipedia.org/wiki/Staebler-Wronski_effect.
- [24] <http://www.pveducation.org/pvc/drom/solar-cell-operation/light-generated-current>.
- [25] <http://www.solarpv.gr/page/φβ-συστηματα>.