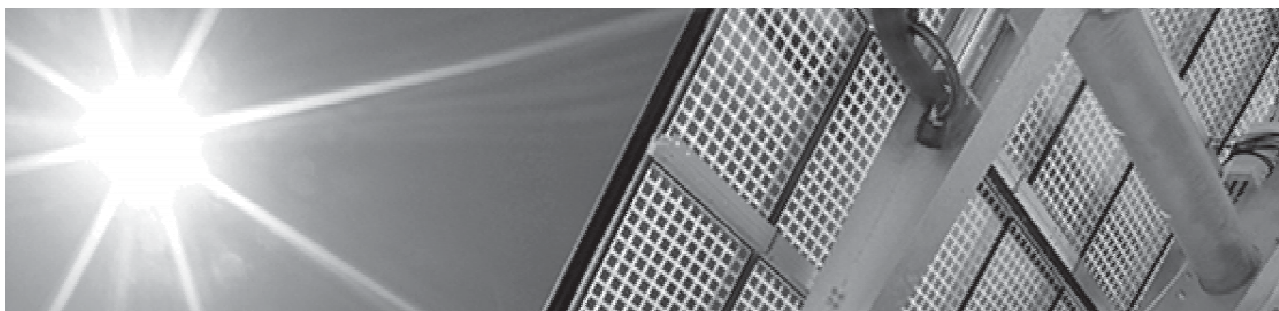




4 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ



4.1 Εισαγωγή

Φωτοβολταϊκή τεχνολογία [PV Technology] ονομάζεται η τεχνολογία που επιτρέπει την απευθείας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας (ή άλλης τεχνητής φωτεινής ενέργειας) σε ηλεκτρική μέσω του φωτοβολταϊκού στοιχείου¹ [pn cell]. Η φυσική διαδικασία που συμβαίνει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο (Φ/Β) ονομάζεται *φωτοβολταϊκό φαινόμενο*.

Ο όρος φωτοβολταϊκός προέρχεται από τη σύνθεση των λέξεων *φως* και *βολτ* και υπονοεί τη μετατροπή του φωτός σε ηλεκτρεγερτική δύναμη [emf]-τάση και στη συνέχεια σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η ανακάλυψη του φωτοβολταϊκού φαινομένου αποδίδεται στο φυσικό Edmond Becquerel, ο οποίος το 1839 δημοσίευσε μια εργασία στην οποία περιέγραφε την αύξηση της τάσης ανάμεσα στα πλακίδια αργύρου όταν αυτά φωτίζονταν άμεσα από το ηλιακό φως. Η μεγάλη επανάσταση στη δημιουργία των σύγχρονων Φ/Β στοιχείων έγινε στη δεκαετία του 1950, όταν ομάδα ερευνητών, αξιοποιώντας προγενέστερη έρευνα που είχε γίνει πάνω στη δημιουργία των τρανζίστορ από ημιαγωγούς, κατόρθωσε να δημιουργήσει ημιαγωγούς πρόσμειξης [doped semiconductors] πυριτίου με πολύ μεγαλύτερη αποδοτικότητα μετατροπής του φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια απ' όση υπήρχε μέχρι τότε. Σε ερ-

¹ Ο όρος cell στα ελληνικά μεταφράζεται στη βιβλιογραφία είτε ως *στοιχείο*, είτε ως *κυψέλη*, είτε ως *κελί*. Σ' αυτό το βιβλίο η συνηθέστερη μετάφραση για τον όρο cell είναι *στοιχείο*. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις που για λόγους συγκεκριμένους (που διευκολύνουν την απόδοση του νοήματος συγκεκριμένων προτάσεων ή παραγράφων) χρησιμοποιούνται εναλλακτικά οι όροι *κυψέλη* ή *κελί*. Σε κάθε περίπτωση, στα πλαίσια του βιβλίου, οι όροι *στοιχείο*, *κυψέλη* και *κελί* σημαίνουν το ίδιο πράγμα.



γασία τους οι Chapin et al. (1954)² ανέφεραν συντελεστή απόδοσης της φωτεινής σε ηλεκτρική ενέργεια από Φ/Β στοιχεία πυριτίου ίσο με 6%. Από το 1958 Φ/Β στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για την τροφοδότηση μικρών σταθμών ραδιοεκπομπής στο δεύτερο αμερικανικό δορυφόρο Vanguard I. Από τότε μέχρι σήμερα έχει επιτευχθεί εντυπωσιακή πρόοδος τόσο στη μείωση του κόστους κατασκευής των Φ/Β όσο και στην αύξηση της απόδοσής τους³, με συνέπεια την ολοένα και μεγαλύτερη διείσδυσή τους στην παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και σε σειρά από εφαρμογές μικρής, μεσαίας και μεγάλης κλίμακας (μόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση η συνολικά εγκατεστημένη Φ/Β ισχύς αυξήθηκε από το 2007 (1.833 MW_p) στο 2008 (4.747 MW_p) κατά 159%⁴.

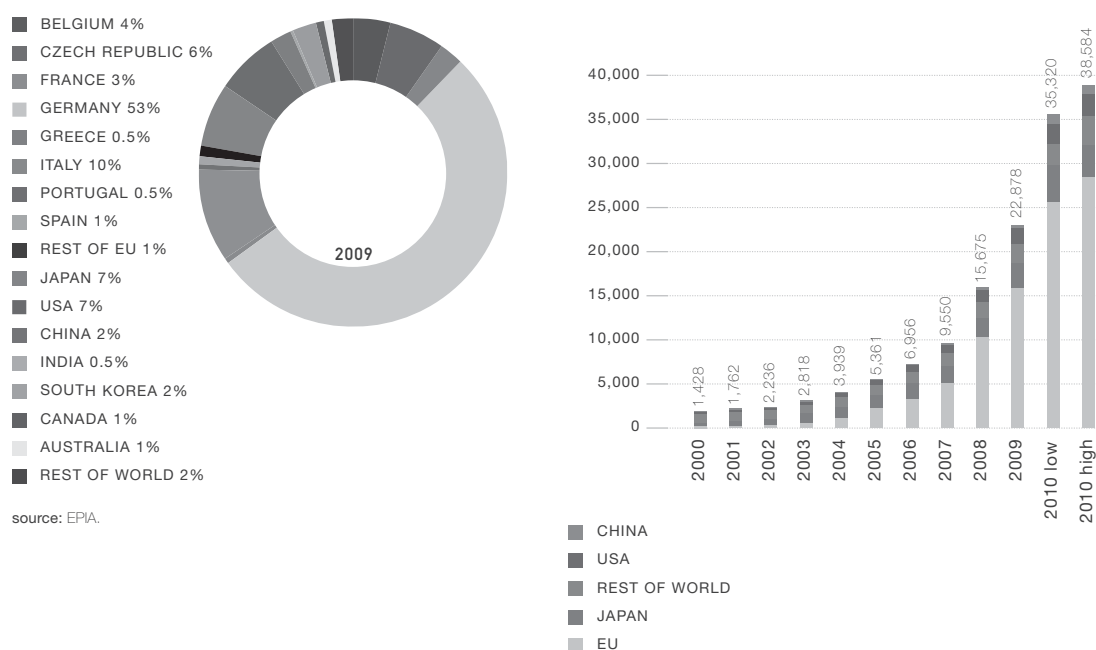
Η τεράστια ανάπτυξη της Φ/Β τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια οφείλεται ανάμεσα σε άλλους παράγοντες και σε ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των Φ/Β συστημάτων που τα διακρίνουν από άλλες ΑΠΕ, όπως τα παρακάτω:

- Δεν παράγουν *αέρια του θερμοκηπίου* κατά τη λειτουργία τους και είναι *αθόρυβα*, γεγονός που κάνει την εγκατάστασή τους ακόμα και στον αστικό ιστό (σπίτια, δημόσια κτίρια κ.λπ.) επιθυμητή. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα να τοποθετηθούν στην οροφή των κτισμάτων ή ακόμη να *ενσωματωθούν στη δομή των κτιρίων* (φωτοβολταϊκά συστήματα ενσωματωμένα σε κτίρια, Building Integrated PV – BIPV), με αποτέλεσμα τη μείωση (ή εξάλειψη) της αισθητικής όχλησης. Χρειάζονται *ελάχιστη συντήρηση*, καθώς δεν έχουν κινούμενα μέρη. Αυτό *αυξάνει* επίσης την *αξιοπιστία* τους και τη *διάρκεια ζωής* τους (20-30 έτη).
- Μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως *αυτόνομα συστήματα* [stand alone] είτε *συνδεδεμένα στο δίκτυο* [grid connected].

² D.M. Chapin, C.S. Fuller, G.L. Pearson, 1954, *A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power*, Journal of Applied Physics, 25, σελ. 676.

³ Η απόδοση Φ/Β πυριτίου μονής επαφής (single junction) σε συνθήκες εργαστηρίου έφτασε το 2004 στο 25%, ενώ τα πλαίσια (modules) που κυκλοφορούν στο εμπόριο πλησιάζουν σε απόδοση το 20% σε ορισμένες περιπτώσεις (R.W. Miles, K.M. Hynes, I. Forbes, 2005, *Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues*, Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials 51, 1-42). Κάθε χρόνο στη βιβλιογραφία αναφέρονται νέες εξελίξεις στη δημιουργία νέου τύπου Φ/Β στοιχείων με βελτιωμένη απόδοση. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι για λόγους που έχουν σχέση με τη δομή της ύλης, στα πλαίσια της σημερινής τεχνολογίας, υπάρχουν όρια στην απόδοση των Φ/Β στοιχείων (βλέπε παρακάτω σελ. 143 παρόντος βιβλίου).

⁴ <http://www.eurobserv-er.org> (9th EurObserv'ER Report) (20/01/2011).



Σχήμα 4.1 Η κατανομή της εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β παγκόσμια το 2009 και η ανάπτυξη στην εγκατεστημένη ισχύ Φ/Β την περίοδο 2001-2009. Οι στήλες 2010 high, 2010 low δείχνουν το αισιόδοξο και απαισιόδοξο σενάριο αντίστοιχα. Επειδή τα στοιχεία ενημερώνονται συνεχώς, για ακριβέστερη πληροφόρηση επισκεφτείτε το διαδίκτυο.

(Πηγή: *European Photovoltaic Industry Association (EPIA)*)

- Μπορούν να συνδυαστούν σε διάφορους αριθμούς μεταξύ τους [modular] και έτσι να δώσουν ποικιλία ισχύος από λίγα mW έως δεκάδες MW (γεγονός που αυξάνει απεριόριστα το εύρος των εφαρμογών τους).
- Μπορούν να συνδυαστούν με άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ΑΠΕ, όπως ανεμογεννήτριες) και να λειτουργήσουν ως υβριδικά συστήματα.

Μια λογική ακολουθία Φ/Β όρων που θα βοηθήσει στην κατανόηση του κεφαλαίου της Φ/Β τεχνολογίας είναι η παρακάτω: ημιαγωγοί πρόσμειξης, επαφή p-n, Φ/Β στοιχείο, Φ/Β πλαίσιο (πάνελ)⁵, Φ/Β σύστημα.

⁵ Ο αγγλικός όρος *panel* ή *module* μεταφράζεται στην ελληνική βιβλιογραφία είτε ως *πλαίσιο* είτε ως *πάνελ*. Σ' αυτό το βιβλίο χρησιμοποιείται κυρίως ο όρος *πλαίσιο*.

Οι *ημιαγωγοί πρόσμειξης* (π.χ., πυρίτιο-αρσενικό Si-As ή πυρίτιο-ίνδιο Si-In) είναι το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται τα Φ/Β στοιχεία. Η *επαφή p-n* (η καρδιά του Φ/Β στοιχείου) δημιουργείται από τους ημιαγωγούς πρόσμειξης. Το Φ/Β φαινόμενο δημιουργείται στο Φ/Β στοιχείο όταν εκείνο φωτίζεται από την ηλιακή ακτινοβολία (ή άλλη τεχνητή φωτεινή ακτινοβολία) και έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφοράς δυναμικού (τάσης ή ηλεκτρεγερτικής δύναμης emf) στις άκρες του στοιχείου ίσης περίπου με 0,6 V. Η τάση αυτή είναι πολύ μικρή για τις περισσότερες εφαρμογές, γι' αυτό τα Φ/Β στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους δημιουργώντας το *φωτοβολταϊκό πλαίσιο* που μπορεί να δώσει ηλεκτρικές τάσεις πολύ μεγαλύτερες και συνεπώς μεγαλύτερη ηλεκτρική ισχύ. Πολλά Φ/Β πλαίσια συνδέονται μεταξύ τους και δημιουργούν *φωτοβολταϊκά συστήματα* της τάξης των kW, ενώ πολλά Φ/Β συστήματα μπορούν να δημιουργήσουν *φωτοβολταϊκά πάρκα* της τάξεως των MW.

Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφονται τα στοιχεία της Φ/Β τεχνολογίας. Αρχικά αναφέρονται οι *βασικές φυσικές αρχές* που διέπουν τη λειτουργία των ημιαγωγών και των ημιαγωγών πρόσμειξης. Στη συνέχεια περιγράφεται η λειτουργία της *επαφής p-n* [p-n junction] και του Φ/Β φαινομένου. Ακολουθεί η περιγραφή του ίδιου του Φ/Β στοιχείου (κατασκευή, είδη-προσαρμογές, απόδοση, ηλεκτρικό κύκλωμα). Στη συνέχεια, ανεβαίνοντας ένα επίπεδο πάνω, περιγράφεται το Φ/Β πλαίσιο [module] –κατασκευή, απόδοση, ηλεκτρικό κύκλωμα, είδη– και, ανεβαίνοντας ακόμα ένα επίπεδο, περιγράφονται τα Φ/Β συστήματα [systems] ή Φ/Β συστοιχίες [arrays]. Εδώ γίνεται αναφορά και στα υπόλοιπα συστατικά στοιχεία μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, που περιλαμβάνει αντιστροφείς [inverters], συσσωρευτές [batteries] και ρυθμιστές φόρτισης [charge controllers], ιχνηλάτες [trackers], συστήματα στερέωσης [mounting systems] κ.λπ. Επίσης εδώ γίνεται ο διαχωρισμός στα απομονωμένα ή μη συνδεδεμένα [stand alone systems], στα συνδεδεμένα [grid connected] και στα υβριδικά [hybrid] Φ/Β συστήματα.

4.2 Βασικές αρχές

Τα Φ/Β στοιχεία βασίζονται ουσιαστικά στο μηχανισμό επαφής p-n που, στην απλούστερη μορφή της, δημιουργείται μεταξύ δύο στρωμάτων ημιαγωγίμων υλικών τα οποία είναι δύο διαφορετικοί ημιαγωγοί πρόσμειξης, ο ένας τύπου p [positive] και ο άλλος τύπου n [negative]. Το βασικό ημιαγωγίμο στοιχείο, το οποίο χρησιμοποιείται στις περισσότερες εμπορικές εφαρμογές φωτοβολταϊκών στοιχείων, είναι το πυρίτιο (85-90% των Φ/Β είναι κατασκευασμένα με πρώτη ύλη το πυρίτιο)⁶ που είναι από τα πιο άφθονα ημιαγωγίμα υλικά στη γη και με επιθυμητές φυσικοχημικές ιδιότητες⁷. Για να γίνει κατανοητός ο φυσικός μηχανισμός δημιουργίας του Φ/Β φαινομένου στο Φ/Β στοιχείο θα πρέπει αρχικά να γίνει αναφορά (με συντομία και με αρκετή απλούστευση) στη θεωρία-υπόδειγμα του ενεργειακού χάσματος [energy gap theory-model] που εξηγεί –από φυσική άποψη– τη συμπεριφορά των ημιαγωγών και των ημιαγωγών πρόσμειξης.

4.2.1 Θεωρία (υπόδειγμα) του ενεργειακού χάσματος

Είναι γνωστό ότι τα άτομα των στοιχείων αποτελούνται από το θετικά φορτισμένο πυρήνα (πρωτόνια και νετρόνια) και τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια, τα οποία μπορούν να βρίσκονται σε *διακριτές (κβαντισμένες) ενεργειακές στάθμες [levels]*⁸. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που μπορεί να καταλαμβάνει κάθε ενεργειακή στάθμη είναι καθορισμένος⁹. Όταν πολλά άτομα δημιουργούν έναν *κρύσταλλο* σε έναν ημιαγωγό (όπως, π.χ., το πυρίτιο) τότε οι ενεργειακές στάθμες κάθε ξεχωριστού ατόμου επικαλύπτονται με αυτές των άλλων (εξαιτίας των αλληλεπιδράσεων) και δημιουργούνται έτσι *ενεργειακές ζώνες [bands]*. Ανάμεσα σε αυτές τις ενεργειακές ζώνες (όπου επιτρέπεται να βρίσκονται τα ηλεκτρόνια του κρυστάλλου) υπάρχουν απαγορευμένες (ενεργειακά) ζώνες στις οποίες δεν μπορούν να υπάρχουν ηλεκτρόνια. Για να περάσει ένα ηλεκτρόνιο από μια επιτρεπτή ενεργειακή ζώνη κατώ-

⁶ <http://www.epia.org> (Solar generation 6, Solar photovoltaic electricity empowering the world 2011) (20/05/2011).

⁷ Δύο επιπλέον λόγοι της μαζικής χρησιμοποίησης του πυριτίου είναι: 1) ότι αποτελεί ημιαγωγίμο στοιχείο που η επιστήμη έχει μελετήσει πολύ και κατανοεί θεωρητικά σε βάθος τη δομή και τη συμπεριφορά του και 2) ότι είναι σχετικά εύκολα κατεργάσιμο για την κατασκευή των Φ/Β στοιχείων (Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 244).

⁸ Είναι γνωστό ότι στο μοντέλο του Bohr τα ηλεκτρόνια κινούνται σε συγκεκριμένες ενεργειακές τροχιές γύρω από τον πυρήνα. Οι πιο σύγχρονες θεωρίες απέχουν αρκετά από το μοντέλο του Bohr, αλλά υιοθετούν ουσιαστικά την ύπαρξη διακριτών ενεργειακών σταθμών για τα ηλεκτρόνια με μια κατανομή πιθανοτήτων για την παρουσία τους σε κάθε τέτοια στάθμη.

⁹ Καθορίζεται από απαγορευτικές αρχές, όπως η απαγορευτική αρχή του Pauli.

τερης ενέργειας σε μια ανώτερης ενέργειας πρέπει να προσλάβει ενέργεια ίση με τη διαφορά αυτών των ενεργειακών ζωνών, που είναι ουσιαστικά η ενέργεια του χάσματος [energy gap]¹⁰.

$$E_g = E_f - E_i$$

E_f : Τελική [final] ενεργειακή ζώνη

E_i : Αρχική [initial] ενεργειακή ζώνη

Το εύρος αυτών των ενεργειακών χασμάτων εξαρτάται από το υλικό του κρυστάλλου (δηλαδή είναι διαφορετικό για διαφορετικά υλικά). Σε κάθε κρύσταλλο υπάρχουν δύο βασικές διακριτές επιτρεπτές ενεργειακές ζώνες. Μια κατώτερη ενεργειακή ζώνη που ονομάζεται ζώνη σθένους E_v [valence band], και μια ανώτερη ενεργειακή ζώνη που ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας E_c [conductivity band]. Η διαφορά ανάμεσα στην ενέργεια της ζώνης αγωγιμότητας και της ζώνης σθένους είναι η ενέργεια χάσματος E_g [energy gap] και έχει χαρακτηριστικές τιμές για κάθε στοιχείο. Δηλαδή η ενέργεια χάσματος E_g είναι η ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να πάρει ένα ηλεκτρόνιο για να μεταπηδήσει από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας (Σχήμα 4.2).

Τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ζώνη σθένους καθορίζουν τη χημική συμπεριφορά του στοιχείου, ενώ τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας καθορίζουν την ηλεκτρική συμπεριφορά (αγωγιμότητα) του στοιχείου¹¹. Κι αυτό γίνεται γιατί, μόνο τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας μπορούν να κινηθούν ελεύθερα κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου και να συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα του κρυστάλλου. Με άλλα λόγια η αγωγιμότητα του κρυστάλλου οποιουδήποτε υλικού (στη συγκεκριμένη περίπτωση ημιαγώγιμων υλικών όπως το πυρίτιο, το γερμάνιο, το γάλιο κ.λπ.) εξαρτάται από τον αριθμό των ηλεκτρονίων που βρίσκονται (ή μπορούν να βρεθούν) στη ζώνη αγωγιμότητας.

4.2.2 Αγωγοί, μονωτές, ημιαγωγοί

Σύμφωνα με το υπόδειγμα του ενεργειακού χάσματος που παρουσιάστηκε παραπάνω μπορούν να οριστούν (με συντομία) τρεις βασικές κατηγορίες υλικών ανάλογα με την αγωγιμότητά τους, δηλαδή οι αγωγοί, οι μονωτές και οι ημιαγωγοί.

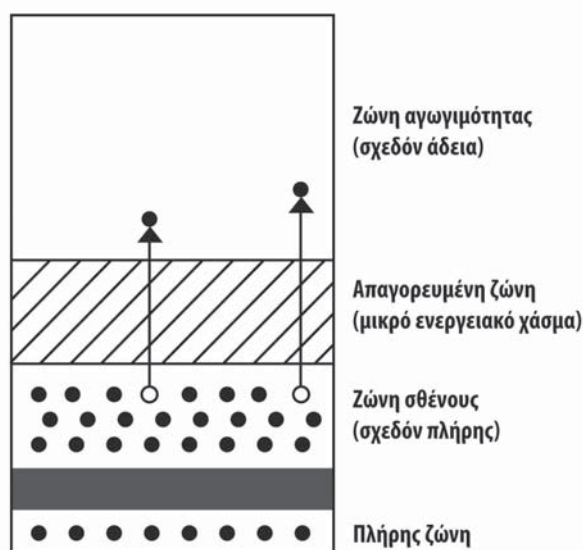
¹⁰ Στην πραγματικότητα το υπόδειγμα είναι πιο πολύπλοκο, καθώς σε κάθε επιτρεπτή ενεργειακή ζώνη υπάρχουν διακριτά ενεργειακά επίπεδα στα οποία μπορεί να υπάρχει συγκεκριμένος αριθμός ηλεκτρονίων.

¹¹ Η παραπάνω διατύπωση είναι απλούστευση που όμως δεν αλλάζει την ουσία της περιγραφής που γίνεται για τους σκοπούς του συγκεκριμένου κεφαλαίου.

Αγωγοί ονομάζονται τα υλικά (όπως τα μέταλλα) που έχουν υψηλή αγωγιμότητα. Σε αυτά τα υλικά η ζώνη αγωγιμότητας περιέχει μεγάλο πλήθος ηλεκτρονίων και το ενεργειακό χάσμα είναι πολύ μικρό, με αποτέλεσμα η ζώνη σθένους με τη ζώνη αγωγιμότητας να αλληλοεπικαλύπτονται.

Μονωτές είναι τα υλικά στα οποία η ζώνη αγωγιμότητας είναι άδεια (ή σχεδόν άδεια) και το ενεργειακό χάσμα είναι πολύ μεγάλο (με συνέπεια τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους να χρειάζονται τεράστια ποσά ενέργειας για να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας)¹².

Ημιαγωγοί (όπως, π.χ., πυρίτιο, γάλιο, γερμάνιο κ.λπ.) είναι τα υλικά με σχετικά μικρό ενεργειακό χάσμα και σχεδόν μηδενικό αριθμό ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας. Ως συνέπεια, σε χαμηλές θερμοκρασίες, αυτά τα υλικά λειτουργούν ως μονωτές. Όταν όμως αρχίζουν να θερμαίνονται (ή απορροφούν ενέργεια από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως το φως), μπορούν αρκετά ηλεκτρόνια να μεταπηδήσουν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας (καθώς το ενεργειακό χάσμα είναι σχετικά μικρό) και έτσι να παρουσιάσουν αυξημένη αγωγιμότητα¹³.



Σχήμα 4.2 Σχηματικό διάγραμμα των ενεργειακών ζωνών ενός ημιαγωγού.

¹² Μόνο σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες είναι δυνατόν λίγα ηλεκτρόνια (λόγω θερμικής ταλάντωσης) να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας, με συνέπεια να εμφανιστεί μικρή τιμή αγωγιμότητας σ' αυτά τα υλικά (π.χ., κεραμικά).

¹³ Ο τρόπος πρόσληψης ενέργειας από τους ημιαγωγούς που ενδιαφέρει στα Φ/Β στοιχεία είναι εκείνος όπου τα ηλεκτρόνια απορροφούν ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία (δηλαδή φωτόνια) με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα.

4.2.3 Μηχανισμοί αγωγιμότητας των ημιαγωγών

Σε καθαρό [pure] ημιαγωγό υπάρχουν δύο μηχανισμοί αύξησης της αγωγιμότητάς του. Ο ένας συντελείται με την αύξηση της θερμοκρασίας του και τότε η αγωγιμότητα ονομάζεται *ενδογενής αγωγιμότητα* [intrinsic conductivity]. Ο άλλος (με περισσότερο ενδιαφέρον για την περίπτωση των Φ/Β στοιχείων) συντελείται με την πρόσμειξη [doping] των καθαρών ημιαγωγών και τη δημιουργία *ημιαγωγών πρόσμειξης*, διαδικασία που αναφέρεται ως *εξωγενής αγωγιμότητα* [extrinsic conductivity].

α) Ενδογενής αγωγιμότητα

Η αύξηση της θερμοκρασίας σε έναν ημιαγωγό οδηγεί στην απελευθέρωση ορισμένων ηλεκτρονίων του κρυστάλλου από τους χημικούς δεσμούς (δηλαδή τη μεταπήδησή τους από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας) και την ελεύθερη κυκλοφορία τους μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Αυτό συνιστά αύξηση της αγωγιμότητας (ενδογενής αγωγιμότητα). Κάθε ηλεκτρόνιο (αρνητικό φορτίο) που φεύγει από το χημικό δεσμό στον κρύσταλλο του ημιαγωγού δημιουργεί στη θέση του μια οπή [hole] που ισοδυναμεί με ένα θετικό φορτίο. Έτσι, εκτός από την αγωγιμότητα που οφείλεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια, εμφανίζεται και αγωγιμότητα που οφείλεται στην παρουσία των οπών [hole conduction]. Κάθε φορά που ένα ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει τη ζώνη σθένους για να μεταπηδήσει στη ζώνη αγωγιμότητας, δημιουργείται στη ζώνη σθένους μια οπή που συνεισφέρει ισοδύναμα με τα ηλεκτρόνια στην ενδογενή αγωγιμότητα του ημιαγωγού (δηλαδή αυξάνει την αγωγιμότητα). Η αύξηση της αγωγιμότητας που μόλις περιγράφηκε μειώνεται κατά ένα μέρος, καθώς ένα ποσοστό των φορέων της αγωγιμότητας (ζευγάρι ηλεκτρόνιο-οπή) επανασυνδέεται (δηλαδή κάποιο ηλεκτρόνιο καταλαμβάνει τη θέση κάποιας οπής). Ως αποτέλεσμα των δύο αντίστροφων διαδικασιών (δηλαδή της δημιουργίας ζευγών ελεύθερου ηλεκτρονίου-οπής και της επανασύνδεσης αυτών) δημιουργείται σε κάθε θερμοκρασία συγκεκριμένη ενδογενής αγωγιμότητα σε κάθε ημιαγωγό που είναι χαρακτηριστική του υλικού. Εάν εφαρμοστεί εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο σ' αυτό το υλικό, θα εμφανιστεί ηλεκτρικό ρεύμα στο οποίο συνεισφέρουν τόσο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας όσο και οι οπές της ζώνης σθένους.

β) Εξωγενής αγωγιμότητα – Ημιαγωγοί πρόσμειξης

Η (ενδογενής) αγωγιμότητα ενός κρυστάλλου ημιαγωγού μπορεί να αυξηθεί με μια διαδικασία εμφύτευσης [doping] ελάχιστης ποσότητας ατόμων ενός άλλου ημι-

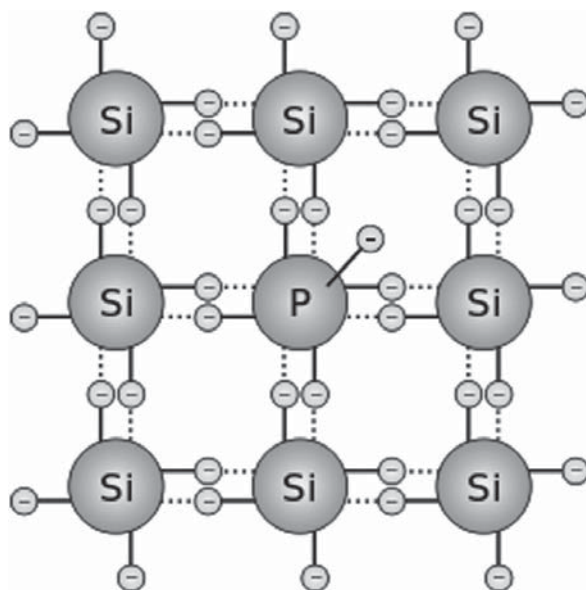
αγωγού στο κρυσταλλικό πλέγμα του πρώτου ημιαγωγού¹⁴. Αυτή η διαδικασία προκαλεί τη λεγόμενη *εξωγενή αγωγιμότητα* των ημιαγωγών και έτσι μπορεί να αυξηθεί η συνολική αγωγιμότητα του κρυστάλλου. Οι ημιαγωγικοί κρύσταλλοι που προκύπτουν με αυτό τον τρόπο ονομάζονται *ημιαγωγοί πρόσμειξης* και αποτελούν τη βάση για τη δημιουργία της επαφής p-n και της κατασκευής του Φ/Β στοιχείου. Παρακάτω θα εξηγηθεί περισσότερο ο μηχανισμός δημιουργίας εξωγενούς αγωγιμότητας σε έναν ημιαγωγό έχοντας ως παράδειγμα τους ημιαγωγούς πρόσμειξης που έχουν ως βασικό ημιαγωγικό στοιχείο το πυρίτιο.

Το πυρίτιο [Si] είναι στοιχείο με τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους. Αν στον κρύσταλλο του πυριτίου «εμφυτευτούν» κάποια άτομα ενός πεντασθενούς στοιχείου (π.χ., αρσενικό [As] ή φώσφορος [P])¹⁵, τότε δημιουργούνται κάποιες ατέλειες [impurities] στο κρυσταλλικό πλέγμα στα σημεία που βρίσκονται τα άτομα της εμφύτευσης (του As ή P). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο του αρσενικού που δε θα συμμετέχει στο δεσμό του κρυσταλλικού πλέγματος (καθώς μόνο τα τέσσερα ηλεκτρόνια του As θα δημιουργήσουν χημικούς δεσμούς με τα διπλανά άτομα του πυριτίου) να είναι ελεύθερο να κινηθεί στον κρύσταλλο του πυριτίου και να συνεισφέρει στην αγωγιμότητα του καινούριου ημιαγωγικού κρυστάλλου που δημιουργήθηκε. Συνεπώς, δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια που αυξάνουν την αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Ισοδύναμα μπορεί να ειπωθεί ότι κάποια από τα ηλεκτρόνια που δε συμμετέχουν στους δεσμούς βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας [conductivity band] του κρυστάλλου¹⁶. Αυτός ο καινούριος κρύσταλλος πυριτίου-αρσενικού [Si-As] (ή πυριτίου-φωσφόρου [Si-P] που δημιουργήθηκε με τον τρόπο που περιγράφηκε είναι ένας *ημιαγωγός πρόσμειξης τύπου n [negative]*, καθώς οι φορείς αγωγιμότητάς του είναι τα ηλεκτρόνια (αρνητικό φορτίο – negative).

¹⁴ Τα άτομα του δεύτερου ημιαγωγού που εμφυτεύονται στο κρυσταλλικό πλέγμα του πρώτου ημιαγωγού ονομάζονται ατέλειες [impurities].

¹⁵ Τα στοιχεία (όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση το αρσενικό ή ο φώσφορος) που προσφέρουν στην αγωγιμότητα του κρυστάλλου με τα ηλεκτρόνια ονομάζονται δότες [donors].

¹⁶ Ή μπορούν σχετικά εύκολα να μετακινηθούν στη ζώνη αγωγιμότητας.



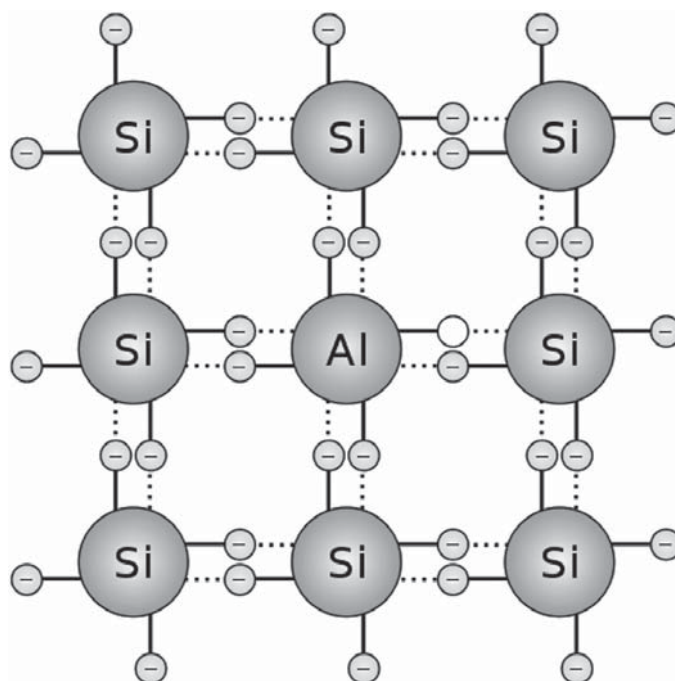
Σχήμα 4.3 Σχηματική αναπαράσταση ημιαγωγού πρόσμειξης πυριτίου-φωσφόρου [Si-P] τύπου n [negative].

(Πηγή: commons.wikimedia.org)

Αν στον κρύσταλλο του πυριτίου (που είναι το υπόστρωμα¹⁷) εμφυτευτούν κάποια άτομα ενός τρισθενούς στοιχείου (π.χ., Βόριο [B] ή αργίλιο [Al])¹⁸ τότε οι ατέλειες [impurities] που θα δημιουργηθούν στο κρυσταλλικό πλέγμα θα προκαλέσουν οπές. Κι αυτό γιατί τα τρία ηλεκτρόνια του τρισθενούς στοιχείου θα δημιουργήσουν χημικούς δεσμούς με τα τρία ηλεκτρόνια των γειτονικών ατόμων του πυριτίου. Το τέταρτο ηλεκτρόνιο του πυριτίου δε θα έχει άλλο ηλεκτρόνιο από το τρισθενές στοιχείο για να δημιουργήσει δεσμό και στη θέση του ηλεκτρονίου που λείπει θα σχηματιστεί μια οπή. Οι οπές που εμφανίζονται με τον τρόπο αυτό μπορούν να μετακινηθούν μέσα στον καινούριο κρύσταλλο που δημιουργήθηκε (π.χ., πυριτίου-βορίου [Si-B] ή πυριτίου-αργιλίου [Si-Al]) και να συνεισφέρουν στην αγωγιμότητά του (η οποία ονομάζεται θετική αγωγιμότητα p-conductivity). Ο καινούριος κρύσταλλος (π.χ., πυριτίου-βορίου [Si-B] ή πυριτίου-αργιλίου [Si-Al]) ονομάζεται ημιαγωγός πρόσμειξης τύπου p [positive], καθώς οι φορείς της αγωγιμότητας είναι οι οπές.

¹⁷ Στη βιβλιογραφία ο ημιαγωγός που αποτελεί τη βάση για τη δημιουργία του ημιαγωγού πρόσμειξης (στη συγκεκριμένη περίπτωση το πυρίτιο) ονομάζεται ενδογενές βασικό υλικό [intrinsic basic material].

¹⁸ Τα στοιχεία (όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση το Βόριο ή το αργίλιο Al) που προσφέρουν στην αγωγιμότητα του κρυστάλλου με τις οπές ονομάζονται λήπτες [acceptors].

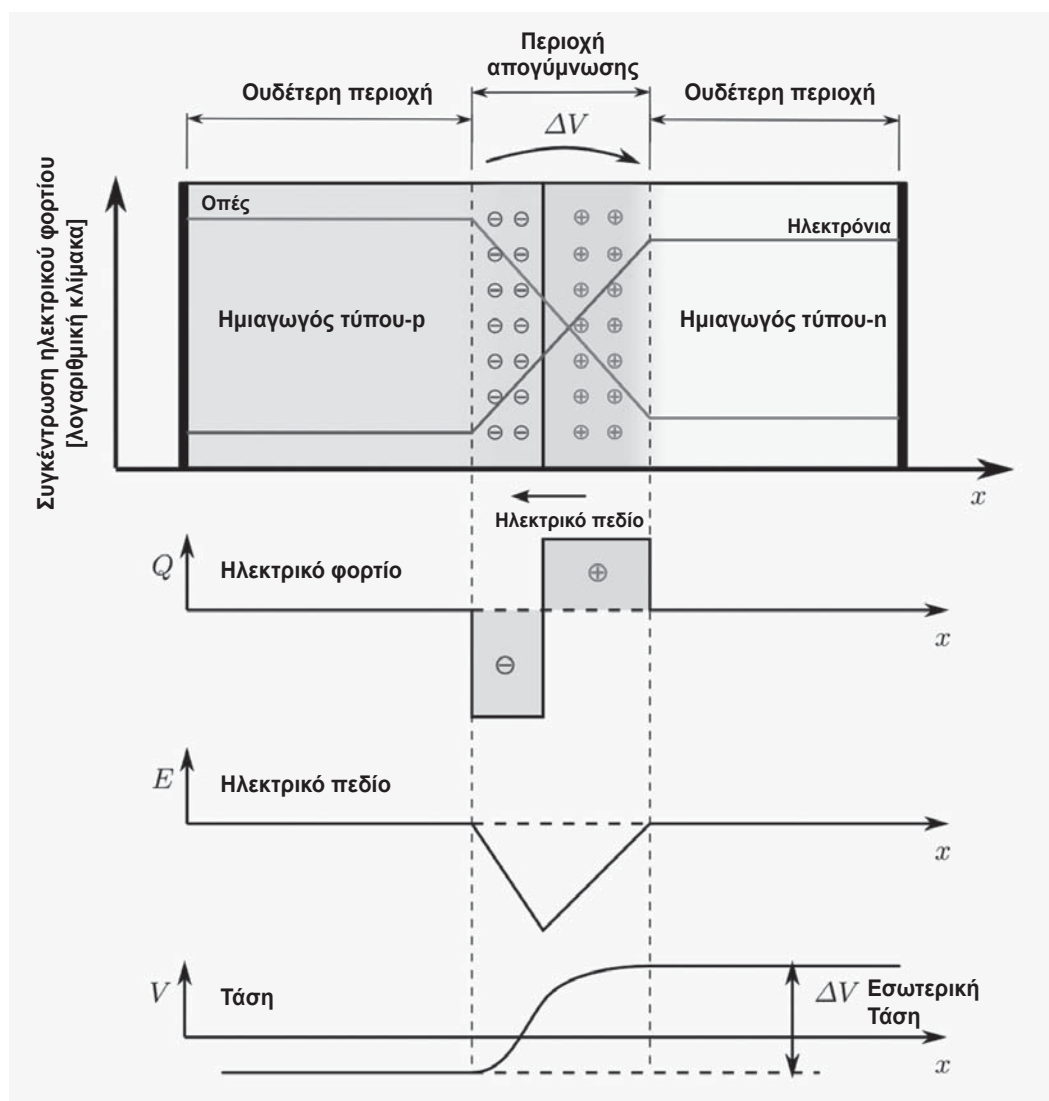


Σχήμα 4.4 Σχηματική αναπαράσταση ημιαγωγού πρόσμειξης πυριτίου-αργιλίου [Si-Al] τύπου p [positive].
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

4.2.4 Επαφή p-n [p-n junction]

Μια επαφή p-n δημιουργείται αν ενωθούν δυο ημιαγωγοί πρόσμειξης τύπου-p και τύπου-n. Αυτό που θα συμβεί τότε είναι το εξής: Αρκετά από τα πλεονάζοντα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού τύπου-n θα κινηθούν προς την πλευρά του ημιαγωγού τύπου-p και θα γεμίσουν κάποιες από τις πλεονάζουσες οπές του που βρίσκονται κοντά στην επαφή. Ταυτόχρονα κάποιες οπές του ημιαγωγού τύπου-p θα κινηθούν αντίθετα προς την πλευρά του ημιαγωγού τύπου-n και θα επανασυνδεθούν με κάποια από τα ηλεκτρόνια που πλεονάζουν σ' αυτή την πλευρά της επαφής και βρίσκονται κοντά στην επαφή. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διάχυση [diffusion] των φορέων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας περιοχής δεξιά και αριστερά της επαφής p-n στην οποία δεν υπάρχουν ελεύθερα φορτία (ηλεκτρόνια ή οπές), η οποία ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης [depletion region-layer], καθώς είναι απογυμνωμένη από ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς. Σε αυτή την περιοχή θα δημιουργηθεί ηλεκτρικό πεδίο (ενδογενές ηλεκτρικό πεδίο) και μια επακόλουθη διαφορά δυναμικού, καθώς στην πλευρά του ημιαγωγού τύπου-n (και κοντά στην επαφή) με την είσοδο των οπών, η πολικότητα της περιοχής θα γίνει ελαφρώς θετική, ενώ

το αντίθετο θα συμβεί στην πλευρά του ημιαγωγού τύπου-p, που με την είσοδο των ηλεκτρονίων θα φορτιστεί ελαφρώς αρνητικά. Η διαφορά δυναμικού (τάση) που δημιουργείται στα άκρα του ηλεκτρικού πεδίου ονομάζεται τάση διάχυσης [diffusion potential] ή εσωτερική τάση [build-in potential]. Η τιμή αυτής της τάσης εξαρτάται από τα υλικά κατασκευής των ημιαγωγών πρόσμειξης, καθώς κι από το ποσοστό πρόσμειξης των ημιαγωγών.¹⁹



Σχήμα 4.5 Επαφή p-n [p-n junction].
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

¹⁹ Στην πραγματικότητα η κατασκευή στο εργαστήριο ή στη βιομηχανία μιας επαφής p-n δε γίνεται με τον απλουστευτικό τρόπο που περιγράφηκε, αλλά είναι μια πολύ πιο σύνθετη διαδικασία. Η περιγραφή όμως που δόθηκε είχε σκοπό την κατανόηση της βασικής δομής μιας επαφής p-n.

4.2.5 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο [photovoltaic effect]

Αν μια επαφή p-n φωτιστεί από μια φωτεινή πηγή (π.χ., ηλιακή ακτινοβολία), τότε κάποια από τα φωτόνια της ακτινοβολίας θα απορροφηθούν από τα άτομα του υλικού των ημιαγωγών πρόσμειξης που βρίσκονται στην περιοχή απογύμνωσης δημιουργώντας έτσι ζεύγη ηλεκτρονίου-οπής. Τα ηλεκτρόνια θα κινηθούν (εξαιτίας του ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου) προς την πλευρά του ημιαγωγού τύπου-n, αυξάνοντας έτσι την πυκνότητα των ελεύθερων φορέων αγωγιμότητάς του (ηλεκτρόνια). Αντίθετα οι οπές θα κινηθούν προς την πλευρά του ημιαγωγού τύπου-p, αυξάνοντας την πυκνότητα των δικών του φορέων αγωγιμότητας (οπές). Με αυτό τον τρόπο ο ημιαγωγός τύπου-n φορτίζεται ισχυρότερα αρνητικά, ενώ ο ημιαγωγός τύπου-p φορτίζεται ισχυρότερα θετικά²⁰. Η κίνηση των ηλεκτρονίων, μαζί με την αντίθετη κίνηση των οπών, συνιστούν ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο ονομάζεται **φωτορεύμα** και αποτελεί συνέπεια του φωτισμού της επαφής p-n από την ηλιακή (ή άλλη φωτεινή ακτινοβολία). Η δημιουργία του φωτορεύματος με τη διαδικασία αυτή, όπως περιγράφηκε σε μικροσκοπικό επίπεδο, είναι αποτέλεσμα της εμφάνισης, σε μακροσκοπικό επίπεδο, ηλεκτρεγερτικής δύναμης (τάσης emf) στα άκρα της επαφής p-n (που μπορεί να μετρηθεί με το βολτόμετρο)²¹. Αυτό σημαίνει ότι με την παρουσία του φωτός η επαφή p-n λειτουργεί ως γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος (μπαταρία), δηλαδή λειτουργεί ως Φ/Β γεννήτρια.

Η διαδικασία που μόλις περιγράφηκε είναι το *Φ/Β φαινόμενο*. Δηλαδή θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας μιας φωτεινής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια, όταν η φωτεινή ακτινοβολία απορροφάται από μια διάταξη ημιαγωγικών υλικών (όπως η επαφή p-n), ονομάζεται *φωτοβολταϊκό φαινόμενο*.

Στην παραπάνω περιγραφή δεν έγινε ξεκάθαρο αν όλη η φωτεινή ακτινοβολία απορροφάται από το υλικό της επαφής p-n²² κι αν όχι από ποιους παράγοντες εξαρτάται το ποσοστό της απορρόφησης. Για να απαντηθούν τα παραπάνω ερωτήματα είναι χρήσιμη η προσφυγή στο υπόδειγμα του ενεργειακού χάσματος. Στο παράδειγμα του ατόμου του πυριτίου μπορεί να δει κάποιος ότι το ενεργειακό χάσμα (ενέργεια χάσματος) E_g του πυριτίου είναι 1,14 eV (27°C), που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος $\lambda = 1,09 \mu\text{m} = 1.090 \text{ nm}$ ²³. Αυτό σημαίνει ότι για να απορροφηθεί

²⁰ Προφανώς η διαδικασία που περιγράφεται είναι μια δυναμική διαδικασία κατά την οποία συμβαίνουν διαρκώς και επανασυνδέσεις ηλεκτρονίων-οπών όχι μόνο στην περιοχή απογύμνωσης αλλά και στις πλευρές των ημιαγωγών τύπου p και n, όπου επίσης προσπίπτουν φωτόνια της ακτινοβολίας.

²¹ Η οποία είναι της τάξης των 0,6 V για ένα Φ/Β στοιχείο.

²² Προφανώς δεν απορροφάται όλη η φωτεινή ακτινοβολία από το ημιαγωγικό υλικό της επαφής p-n.

²³ Η ενέργεια χάσματος E_g εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Στους ~200°C είναι 1,11 eV ($\lambda = 1,12 \mu\text{m}$).

ένα φωτόνιο από ένα άτομο πυριτίου και ένα ηλεκτρόνιό του να μεταβεί από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας (συνεισφέροντας έτσι στη δημιουργία του Φ/Β φαινομένου) το φωτόνιο θα πρέπει να έχει ελάχιστη ενέργεια:

$$E = hf = hc/\lambda \geq 1,14 \text{ eV}^{24}$$

Συνεπώς, δεν μπορούν να απορροφηθούν όλα τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας από τα άτομα του πυριτίου, αλλά μόνο αυτά που η ενέργειά τους πληροί την παραπάνω συνθήκη. Αυτή είναι και η φυσική εξήγηση για το γεγονός της απορρόφησης μικρού τμήματος²⁵ του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία²⁶. Αν τα φωτόνια έχουν μικρότερη ενέργεια από την E_g , δε συνεισφέρουν στη δημιουργία του φωτοβολταϊκού φαινομένου αλλά, όταν απορροφηθούν από τα άτομα του πυριτίου, αυξάνουν την κινητική ενέργεια ταλάντωσης των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στη ζώνη σθένους και συνεπώς αυξάνουν τη θερμοκρασία του υλικού. Αν όμως τα φωτόνια έχουν *μεγαλύτερη (ή ίση) ενέργεια από την E_g* και απορροφηθούν από τα ηλεκτρόνια σθένους, τότε τα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν στη ζώνη αγωγιμότητας και η υπόλοιπη ενέργεια που προσλαμβάνουν μετατρέπεται σε θερμική-κινητική ενέργεια που (μακροσκοπικά) αυξάνει τη θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου. Ανακεφαλαιώνοντας χρειάζεται να τονιστεί ότι μόνο ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας είναι δυνατόν να απορροφηθεί από το Φ/Β στοιχείο και ότι ο βασικός παράγοντας εξάρτησης αυτού του ποσοστού είναι το είδος του φωτοαγώγιμου υλικού (δηλαδή των ημιαγωγών πρόσμειξης που αποτελούν την επαφή p-n ή το Φ/Β στοιχείο).

Στη συνέχεια του βιβλίου θα περιγραφούν πιο αναλυτικά η *κατασκευή*, τα *είδη* και η *λειτουργία* του Φ/Β στοιχείου, καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή [efficiency] του. Επίσης θα περιγραφεί η λειτουργία του Φ/Β πλαισίου [panel] που αποτελεί ουσιαστικά την πιο απλή εμπορικά διαθέσιμη έκδοση της Φ/Β τεχνολογίας. Τέλος θα γίνει αναφορά στους συνδυασμούς των Φ/Β πλαισίων που συνιστούν τα Φ/Β συστήματα [arrays-systems].

²⁴ Όπου h η σταθερά του Planck = $6,63 \cdot 10^{-34}$ Js και c η ταχύτητα του φωτός στο κενό = $3 \cdot 10^8$ m/s.

²⁵ Έχει υπολογιστεί ότι μόνο το 47% της ενέργειας του ηλιακού φάσματος μπορεί (θεωρητικά) να απορροφηθεί από Φ/Β στοιχεία μονής επαφής [single junction] (δηλαδή κατασκευασμένα από συγκεκριμένο ζευγάρι ημιαγωγών πρόσμειξης, ενώ πρακτικά, εξαιτίας άλλων κατασκευαστικών παραγόντων του Φ/Β στοιχείου, μόνο το 35% (maximum) είναι διαθέσιμο για απορρόφηση (Twidell & Weir, 2006, σελ. 199).

²⁶ Περισσότερα για το θέμα της απορρόφησης και της σχέσης της με την απόδοση των Φ/Β στοιχείων θα αναφερθούν στη συνέχεια.

4.3 Το φωτοβολταϊκό στοιχείο

4.3.1 Εισαγωγή

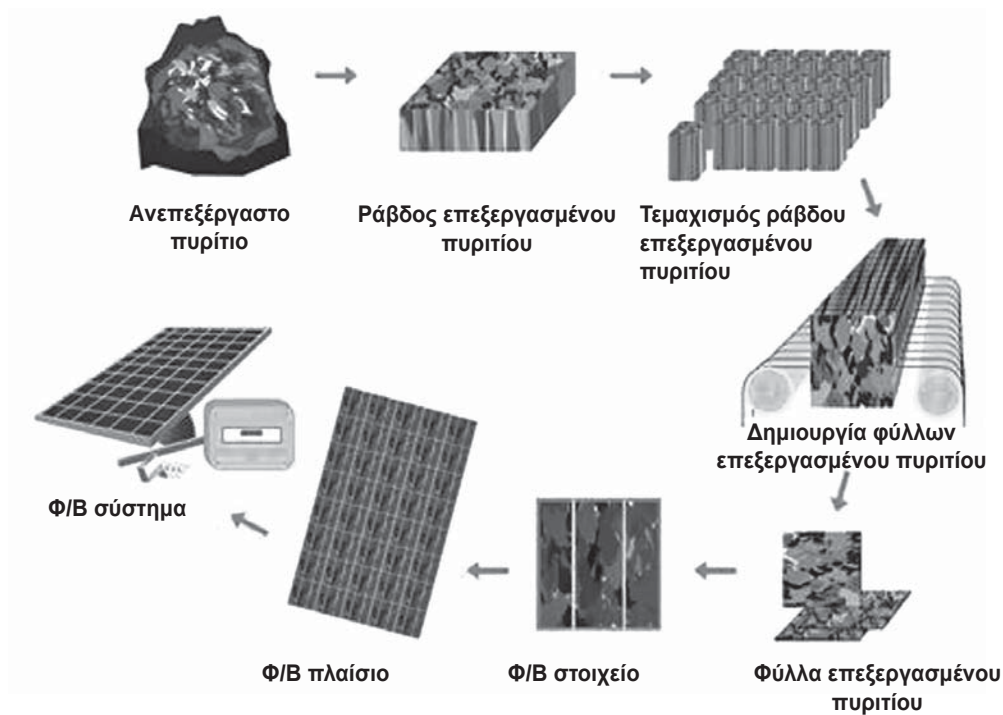
Η καρδιά του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι ουσιαστικά μια επαφή p-n στην οποία δημιουργείται το Φ/Β φαινόμενο όταν προσπίπτει επάνω του ηλιακή ακτινοβολία. Το βασικό φωτοαγωγίμο υλικό (ημιαγωγός πρόσμειξης) από το οποίο είναι κατασκευασμένο το Φ/Β στοιχείο είναι συνήθως το πυρίτιο. Υπάρχουν πολλές τεχνικές με τις οποίες από την πρώτη ύλη (δηλαδή την άμμο πυριτίου και το οξείδιο του πυριτίου SiO_2 που είναι το βασικό συστατικό της) κατασκευάζεται ο τελικός ημιαγωγός πρόσμειξης του κρυσταλλικού πυριτίου και δημιουργείται η επαφή p-n. Ενδεικτικά αναφέρονται τεχνικές όπως: Μέθοδος ανάπτυξης μονοκρυστάλλου [Czochralski technique], μέθοδος επιπλέουσας ζώνης [float zone method, FZ], μέθοδος κράματος [alloying technique] κ.λπ.²⁷

Τα βασικά στάδια κατασκευής ενός Φ/Β πλαισίου κρυσταλλικού πυριτίου φαίνονται στο Σχήμα 4.6



Σχήμα 4.6 Τα βασικά στάδια κατασκευής Φ/Β στοιχείου κρυσταλλικού πυριτίου.
(Πηγή: European Photovoltaic Industry Association (EPIA))

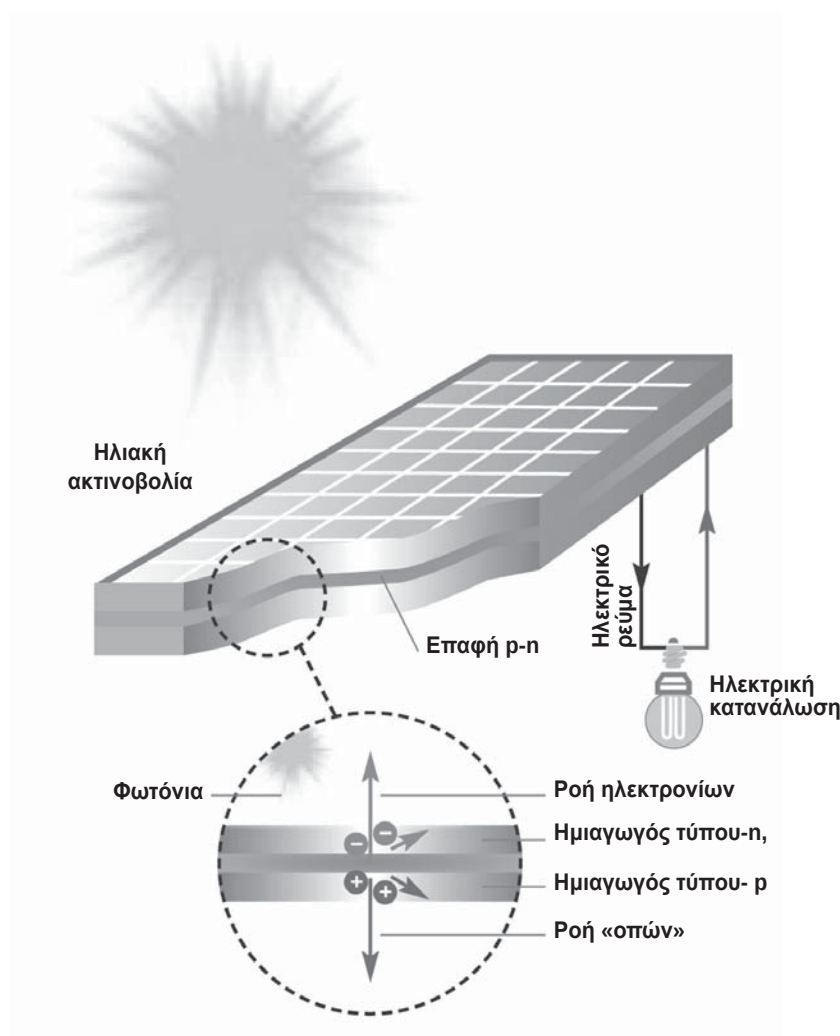
²⁷ Για περισσότερες λεπτομέρειες βλ. Φραγκιαδάκης, 2004, σελ. 162-165, Twidell & Weir, 2006 σελ. 208-210.



Σχήμα 4.7 Η διαδικασία κατασκευής Φ/Β συστήματος κρυσταλλικού πυριτίου ξεκινώντας από το ακατέργαστο πυρίτιο.
(Πηγή: *European Photovoltaic Industry Association*)

Το τελικό προϊόν κάθε μεθόδου είναι η δημιουργία φωτοαγώγιμου υλικού (δηλαδή του ημιαγωγού πρόσμειξης) και η κατασκευή επαφής p-n στην οποία προσαρμόζονται με τον κατάλληλο τρόπο τα ηλεκτρόδια κι έτσι δημιουργείται το Φ/Β στοιχείο-κυψέλη. Ένα τυπικό Φ/Β στοιχείο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8²⁸.

²⁸ Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλά σχήματα που δείχνουν τις διατάξεις πολλών διαφορετικών τύπων Φ/Β στοιχείων που η δομή τους είναι πολύ πιο πολύπλοκη ή διαφορετική απ' αυτή που παρουσιάζεται εδώ. Η παρουσίαση ανταποκρίνεται σε τυπικό Φ/Β στοιχείο και στις βασικές αρχές λειτουργίας του.

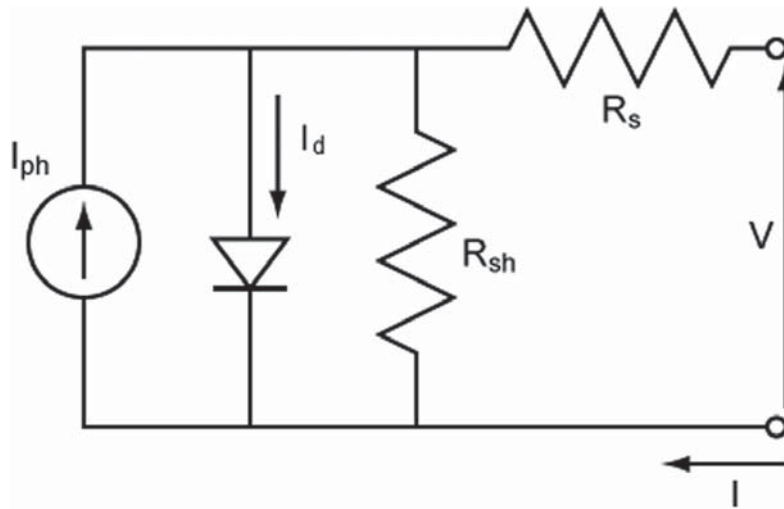


Σχήμα 4.8 Σχηματική αναπαράσταση τρόπου λειτουργίας φωτοβολταϊκού στοιχείου.
(Πηγή: European Photovoltaic Industry Association)

Στην πάνω πλευρά (όπου είναι τυπωμένο το μεταλλικό πλέγμα των ηλεκτροδίων) βρίσκεται ο ημιαγωγός τύπου-n, ενώ στην κάτω βρίσκεται ο ημιαγωγός τύπου-p. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ουσιαστικά η επαφή p-n. Η κάτω πλευρά του Φ/Β στοιχείου είναι καλυμμένη με μεταλλική αγωγή επιφάνεια. Επίσης για να μειώνονται οι απώλειες λόγω ανάκλασης το πάνω τμήμα καλύπτεται από διαφανές αντι-ανακλαστικό υλικό. Το φως που εισέρχεται από την πάνω πλευρά δημιουργεί το Φ/Β φαινόμενο και τη Φ/Β τάση [emf] ανάμεσα στην πάνω και την κάτω επιφάνεια της Φ/Β κυψέλης. Αν εξωτερική αντίσταση (ωμικός καταναλωτής) συνδεθεί στα άκρα της Φ/Β κυψέλης, τότε δημιουργείται ηλεκτρικό κύκλωμα που διαρρέεται από ρεύμα I (το Φ/Β ή φωτοηλεκτρικό ρεύμα).

4.3.2 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα Φ/Β στοιχείου

Ένα φωτιζόμενο Φ/Β στοιχείο μπορεί, ιδανικά, να θεωρηθεί ως πηγή ρεύματος συνδεδεμένη παράλληλα με μια δίοδο. Το ηλεκτρικό κύκλωμα που αντιστοιχεί σε μια τέτοια περιγραφή φαίνεται στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα Φ/Β στοιχείου.

Υπάρχουν τρία ρεύματα στο κύκλωμα:

- Το ρεύμα I_{ph} που παράγεται από το φωτιζόμενο Φ/Β στοιχείο και θεωρείται ότι είναι ανάλογο με τη ροή των φωτονίων που προσπίπτουν πάνω στην επιφάνειά του.
- Το ρεύμα I_D που κυκλοφορεί στη δίοδο και περιγράφεται από την εξίσωση Shockley:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{e_0 V}{kT}} - 1 \right) \quad (4.1)$$

- Το ρεύμα I που κυκλοφορεί στο κύκλωμα και δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_{ph} - I_D \quad (4.2)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{e_0 V}{kT}} - 1 \right)$$

όπου

I_0 : το ρεύμα κόρου [saturation current] της διόδου (A)

- I_{ph} : το φωτοηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από το φωτιζόμενο Φ/Β στοιχείο (A)
 V : η τάση στα άκρα του Φ/Β στοιχείου (V)
 e_0 : το στοιχειώδες φορτίο του ηλεκτρονίου ($1,602 \cdot 10^{-19}$ Cb)
 k : η σταθερά Boltzmann ($1,3806$ J/K)
 T : η απόλυτη θερμοκρασία (K).

Στο ηλεκτρικό κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα, η δίοδος D έχει συνδεθεί παράλληλα με το Φ/Β στοιχείο. Έτσι, όταν το Φ/Β στοιχείο δε φωτίζεται, λειτουργεί ως συνηθισμένη δίοδος, ενώ, όταν φωτίζεται, λειτουργεί ταυτόχρονα και ως πηγή ρεύματος. Η εσωτερική ωμική σειριακή αντίσταση R_s [Series Resistance] αφορά την αντίσταση που έχει η ίδια η δίοδος (όταν το εσωτερικό της διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα), καθώς και τις αντιστάσεις των μεταλλικών επαφών και καλωδίων²⁹. Η παράλληλα συνδεδεμένη αντίσταση διαρροής R_{sh} ή R_p [Shunt Resistance] αφορά τις διαρροές ρεύματος μεταξύ των άκρων της διόδου (επαφής p-n)³⁰.

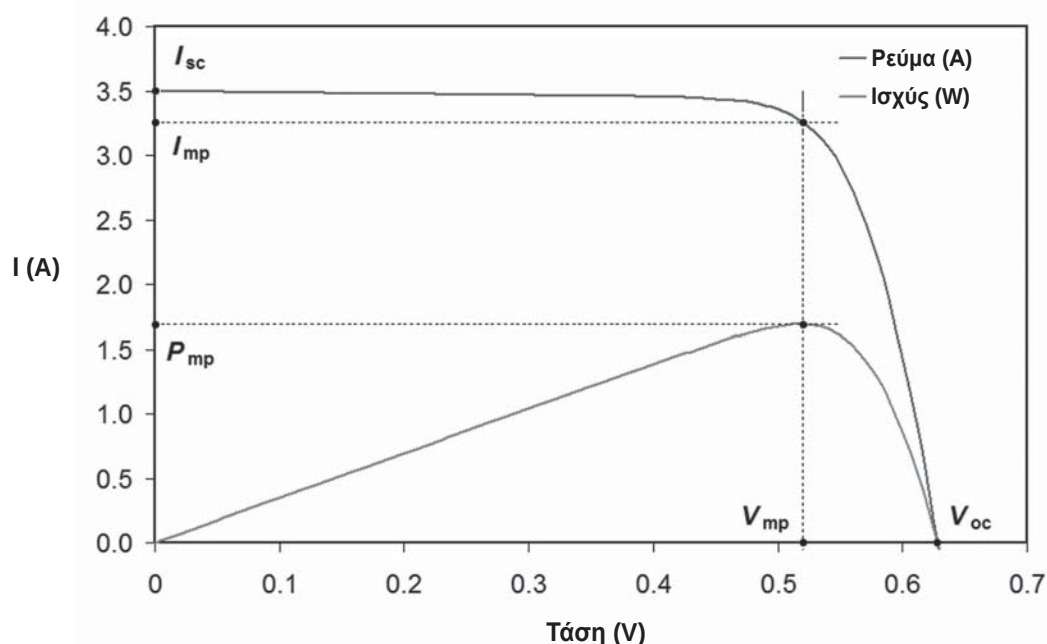
4.3.3 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός Φ/Β στοιχείου – καμπύλη ισχύος

Το παρακάτω σχήμα δείχνει την εξάρτηση του ρεύματος I που διαρρέει το κύκλωμα Φ/Β στοιχείου σε συνάρτηση με την τάση V που δημιουργείται στα άκρα του. Αυτή η γραφική παράσταση είναι τυπική χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός φωτιζόμενου Φ/Β στοιχείου³¹ και αποτελεί την ταυτότητά του.

²⁹ Αύξηση της αντίστασης R_s συνεπάγεται ελάττωση της μέγιστης ισχύος που αποδίδει το Φ/Β στοιχείο. Τυπικές τιμές για τη R_s σε καλής ποιότητας Φ/Β στοιχεία είναι 0,1 έως 0,3 Ω (Φραγκιαδάκης, 2004, σελ. 174).

³⁰ Οι τιμές της R_{sh} σε πολύ καλής απόδοσης Φ/Β είναι της τάξης των k Ω (Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 240, Φραγκιαδάκης, 2004, σελ. 173). Σε τιμές τέτοιας τάξης μεγέθους (k Ω) η R_{sh} δεν επιδρά στη χαρακτηριστική I-V του Φ/Β στοιχείου. Αν όμως η τιμή της είναι μικρότερη από 500 Ω , τότε προκαλείται έντονη μείωση του ρεύματος (του κυκλώματος), καθώς αυξάνεται η τάση (όπως θα φανεί παρακάτω στη χαρακτηριστική I-V του Φ/Β στοιχείου υπάρχει πιο απότομη κλίση-πτώση του οριζόντιου τμήματος της χαρακτηριστικής). Η ελάττωση είναι εντονότερη όσο η τιμή της R_{sh} μειώνεται. Συνέπεια αυτού του γεγονότος είναι ότι όσο μικρότερη είναι η τιμή της R_{sh} τόσο μικρότερη είναι η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς P_m του Φ/Β και τόσο μικρότερος ο παράγοντας πλήρωσης FF (για τα κρίσιμα μεγέθη P_m και FF του Φ/Β στοιχείου-πάνελ βλέπε παρακάτω σελ. 138-139).

³¹ Το οποίο δέχεται ακτινοβολία συγκεκριμένης πυκνότητας ισχύος G και βρίσκεται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία T .



Σχήμα 4.10 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V και καμπύλη ισχύος Φ/B στοιχείου.

Όπως φαίνεται από την παραπάνω γραφική παράσταση, το ρεύμα I ξεκινά από μια μέγιστη τιμή (I_{sc}), παραμένει σχεδόν σταθερό (με μια μικρή μείωση) για αυξανόμενες τιμές της τάσης μέχρι ενός σημείου (που είναι λίγο πριν από το σημείο μέγιστης ισχύος [maximum power point - mpp]) (V_{mp} , I_{mp}) και στη συνέχεια αρχίζει να μειώνεται έντονα μέχρις ότου η τάση να αποκτήσει τη μέγιστη τιμή της V_{oc} , όπου το ρεύμα μηδενίζεται.

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος ονομάζεται *ρεύμα βραχυκυκλώματος* [short-circuit current] I_{sc} και είναι η τιμή που έχει το ρεύμα στην ιδανική περίπτωση που η τιμή των αντιστάσεων είναι μηδενική (τότε το ρεύμα διόδου $I_D = 0$ και το I είναι ίσο με I_{ph} , δηλαδή ουσιαστικά $I_{sc} = I_{ph}$ (βλέπε εξίσωση 4.2). Η μέγιστη τιμή της τάσης ονομάζεται *τάση ανοικτού κυκλώματος* [open circuit voltage] V_{oc} και είναι ίση με την τάση που υπάρχει στα άκρα του Φ/B στοιχείου όταν το φωτορεύμα I_{ph} γίνει ίσο με το ρεύμα της διόδου I_D . Τότε το ρεύμα μηδενίζεται $I = 0$ και η τάση στο κύκλωμα είναι η V_{oc} . Αυτή είναι και η τάση που υπάρχει στα άκρα του Φ/B στοιχείου όταν εκείνο δε φωτίζεται (όπως, για παράδειγμα, τις νυχτερινές ώρες).

Η ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να παράγει ένα Φ/B στοιχείο (όπως και κάθε ηλεκτρική πηγή) εξαρτάται από το γινόμενο τάσης V και της έντασης I του ρεύματος, δηλαδή:

$$P = V \cdot I \quad (4.3)$$

Συνεπώς, σε κάποιο σημείο της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V οι τιμές της τάσης και της έντασης θα είναι τέτοιες που η ισχύς η οποία παράγεται (ως το γινόμενο $V \cdot I$) θα παίρνει τη μέγιστη τιμή της P_m [maximum power]. Αυτό το χαρακτηριστικό σημείο λειτουργίας του Φ/B κυκλώματος ονομάζεται σημείο μέγιστης ισχύος – ΣΜΙ [MPP Maximum Power Point], ενώ οι τιμές V και I που αντιστοιχούν στην P_m ονομάζονται τάση μέγιστης ισχύος (V_m ή V_{mp}) και ρεύμα μέγιστης ισχύος (I_m ή I_{mp}) αντίστοιχα³². Η γραφική παράσταση που δίνει την εξάρτηση της ισχύος που παράγει ένα Φ/B στοιχείο από την τάση η οποία υπάρχει στα άκρα του φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα 4.10.

Με βάση τις τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών I_{sc} , V_{oc} , I_m , V_m ενός Φ/B στοιχείου ορίζεται ένας αριθμός που ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF [Fill Factor] και ισούται με:

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (4.4)$$

Ο αριθμητής του κλάσματος δίνει τη μέγιστη ισχύ P_m που παράγει το συγκεκριμένο Φ/B στοιχείο (σε συγκεκριμένες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας), ενώ ο παρονομαστής τη μέγιστη θεωρητικά ισχύ που θα μπορούσε να παράγει το συγκεκριμένο Φ/B στοιχείο αν η τάση και η ένταση έπαιρναν τις μέγιστες τιμές τους. Ο συντελεστής πλήρωσης είναι δείκτης ποιότητας ενός Φ/B στοιχείου, καθώς μεγάλες τιμές³³ του συντελεστή πλήρωσης (σίγουρα μεγαλύτερες από 0,7) δείχνουν ότι το Φ/B έχει καλή ενεργειακή απόδοση.

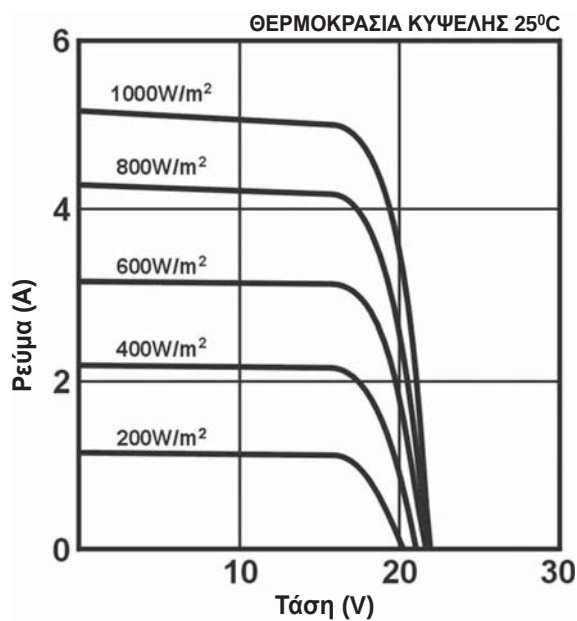
4.3.4 Εξάρτηση χαρακτηριστικής καμπύλης I-V από την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία του Φ/B στοιχείου

Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός Φ/B στοιχείου εξαρτάται βασικά από δύο παραμέτρους: την *πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας* G που προσπίπτει στην επιφάνειά του και τη *θερμοκρασία* θ που έχει η επιφάνειά του³⁴. Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι με την αύξηση της G αυξάνεται ανάλογα και το ρεύμα I_{sc} , ενώ η V_{oc} αυξάνεται, όχι όμως ανάλογα, αλλά με πολύ μικρότερο ρυθμό (λογαριθμικά) (βλ. Σχήμα 4.11). Ταυτόχρονα αυξάνεται και η ποσότητα της μέγιστης ισχύος P_m που παρέχει το Φ/B στοιχείο στο κύκλωμα.

³² Το παραλληλόγραμμο με πλευρές V_m και I_m έχει εμβαδόν που αντιστοιχεί στην P_m .

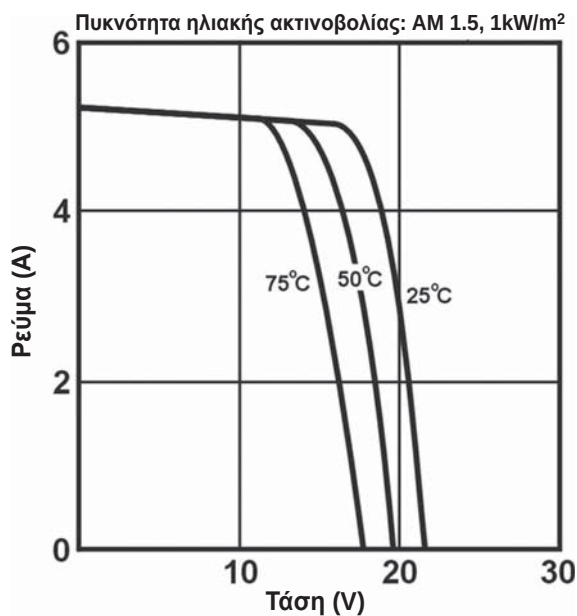
³³ Οι τιμές που μπορεί να πάρει είναι προφανώς μεταξύ 0 και 1.

³⁴ Επίσης εξαρτάται από το φορτίο που υπάρχει στα άκρα του Φ/B και τροφοδοτείται απ' αυτό.



Σχήμα 4.11 Εξάρτηση χαρακτηριστικής καμπύλης I-V από την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η αύξηση της θερμοκρασίας της Φ/Β κυψέλης (στοιχείου) αυξάνει ελαφρώς το ρεύμα I_{sc} ³⁵, ενώ μειώνει με ισχυρότερο τρόπο τη V_{oc} (βλ. Σχήμα 4.12). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μέγιστης ισχύος P_m που δίνει το Φ/Β.



Σχήμα 4.12 Εξάρτηση χαρακτηριστικής καμπύλης I-V από τη θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου.

³⁵ Η αύξηση αυτή είναι τόσο μικρή που δεν διακρίνεται στο Σχήμα 4.12.

Συνεπώς, μπορεί να ειπωθεί ότι η μέγιστη ισχύς P_m που μπορεί να δώσει ένα Φ/Β στοιχείο, αυξάνεται με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

4.3.5 Απόδοση Φ/Β στοιχείου και απώλειες

Η απόδοση [efficiency] ενός Φ/Β στοιχείου είναι δείκτης που σχετίζεται με το ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (δηλαδή ενέργειας) που μπορεί να μετατρέψει σε ηλεκτρική ενέργεια το Φ/Β στοιχείο.

Συνήθως η απόδοση ενός Φ/Β στοιχείου (η) ορίζεται ως το πηλίκο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που μπορεί να προσφέρει το στοιχείο προς την προσπίπτουσα φωτεινή-ηλιακή ισχύ.

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{in}} = \frac{(FF) I_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \quad (4.5)$$

όπου

P_{in} : η προσπίπτουσα φωτεινή ισχύς στο Φ/Β

$I_m V_m$: μέγιστη ηλεκτρική ισχύς

και τα υπόλοιπα φυσικά μεγέθη είναι όπως έχουν οριστεί προηγουμένως.

Οι αποδόσεις των Φ/Β στοιχείων μεγαλώνουν συνεχώς με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και της έρευνας³⁶. Σήμερα οι αποδόσεις των *εμπορικών Φ/Β στοιχείων* κατασκευασμένων από πυρίτιο φτάνουν περίπου το 18%, ενώ από άλλα ημιαγώγιμα υλικά ξεπερνούν το 20%. Στον Πίνακα 4.1 φαίνονται οι αποδόσεις συγκεκριμένων Φ/Β στοιχείων τόσο στο εργαστήριο όσο και σε εμπορικές εφαρμογές. Πλέον οι αποδόσεις έχουν μεγαλώσει.

³⁶ Στη βιβλιογραφία υπάρχει πλήθος άρθρων και πληροφοριών για αποδόσεις συγκεκριμένων Φ/Β στοιχείων. Θα πρέπει να γίνει ξεκάθαρο ότι οι αποδόσεις δεν είναι ίδιες όταν πρόκειται για Φ/Β κυψέλες που κατασκευάζονται πειραματικά σε ένα εργαστήριο και κυψέλες που κυκλοφορούν σε εμπορικές εφαρμογές (ενσωματωμένες σε Φ/Β πλαίσια). Προφανώς η απόδοση στις δεύτερες είναι μικρότερη από ό,τι τις πρώτες. Στις περισσότερες περιπτώσεις, για να μεταφερθεί μια τεχνολογία κατασκευής ενός συγκεκριμένου Φ/Β στοιχείου από το εργαστήριο στην παραγωγή, περνάει μακρύ χρονικό διάστημα αρκετών μηνών ή χρόνων (υπάρχουν και περιπτώσεις πειραματικών Φ/Β στοιχείων που για διάφορους λόγους απέτυχαν να μεταφερθούν στην παραγωγή). Επίσης υπάρχουν Φ/Β στοιχεία με μεγάλες αποδόσεις που όμως λόγω τεχνικών χαρακτηριστικών ή (και) κόστους κατασκευής μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε συγκεκριμένους τομείς ή εφαρμογές (για, π.χ., διαστημικές εφαρμογές). Πρέπει λοιπόν να είναι ξεκάθαρο, όταν γίνεται αναφορά σε αποδόσεις, αν πρόκειται για εργαστηριακές ή εμπορικές εφαρμογές. Επίσης αν πρόκειται για Φ/Β στοιχεία που αξιοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία χωρίς συγκέντρωση της ακτινοβολίας και σε Φ/Β στοιχεία που δουλεύουν μέσω διατάξεων συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας κατά δεκάδες ή εκατοντάδες φορές. Τα δεύτερα, προφανώς, έχουν μεγαλύτερη απόδοση αλλά παρουσιάζουν άλλα μειονεκτήματα (περισσότερα για το θέμα βλ. Sarah Kurtz, 2012, *Opportunities and Challenges for Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry (Revised August 2012)*, Technical Report NREL).

Πίνακας 4.1 Η απόδοση συγκεκριμένων Φ/Β στοιχείων στο εργαστήριο.
(Πηγή: Markvart et al, 2003)

	Απόδοση (%)	I_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)
Κρυσταλλικό πυρίτιο μονής επαφής (c-Si) [Crystalline: single junction (c-Si)]	24,7	42,2	0,706	82,8
GaAs	25,1	28,2	1,022	87,1
InP	21,9	29,3	0,878	85,4
Κρυσταλλικό πυρίτιο πολλαπλής επαφής GaInP/GaAs/Ge tandem [Crystalline: multi junction GaInP/GaAs/Ge tandem]	31,0	14,11	2,548	86,2
Φ/Β στοιχεία λεπτού υμένα μονής επαφής [Thin-film: single junction]				
GdTe	16,5	25,9	0,845	75,5
CIGS	18,9	34,8	0,696	78,0
Φ/Β στοιχεία λεπτού υμένα πολλαπλής επαφής [Thin-film: single junction]				
a-Si/a-SiGe tandem	13,5	7,72	2,375	74,4
Φωτοηλεκτροχημικά ευαίσθητης βαφής TiO ₂ [Photoelectrochemical Dye-sensitised TiO ₂]	11,0	19,4	0,795	71,0

Η απόδοση ενός Φ/Β στοιχείου εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Οι κυριότερες από αυτές είναι το *ημιαγωγίμο υλικό* από το οποίο κατασκευάζεται το Φ/Β στοιχείο, η *πυκνότητα της φωτεινής (ηλιακής) ακτινοβολίας* και η *θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου* (που συνδέεται στενά με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος). Παρακάτω εξετάζονται αναλυτικά αυτοί οι παράγοντες. Πριν από αυτό όμως θα γίνει αναφορά στους φυσικούς μηχανισμούς που εμφανίζονται κατά την απορρόφηση της φωτεινής ακτινοβολίας από το Φ/Β στοιχείο, οι οποίοι θέτουν *φυσικά όρια*³⁷ στο ποσοστό της φωτεινής ακτινοβολίας που είναι δυνατόν να απορροφηθεί.

³⁷ Δηλαδή περιορίζουν εγγενώς το ποσοστό της φωτεινής ακτινοβολίας που μπορεί να απορροφήσει ένα υλικό. Για Φ/Β στοιχεία μονής επαφής [single junction], δηλαδή για Φ/Β στοιχεία που αποτελούνται από ένα είδος ημιαγωγίμου υλικού η μέγιστη θεωρητική απόδοση έχει υπολογιστεί στο 40,7% (Luque et al, 2003, σελ. 148).

Η φωτεινή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια του Φ/Β έχει μια φασματική κατανομή, που στην περίπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει ήδη παρουσιαστεί στο 2^ο κεφάλαιο³⁸. Ποσοστό των φωτονίων που προσπίπτει ανακλάται στην επιφάνεια των Φ/Β στοιχείων³⁹. Για να μειωθεί αυτή η ανακλαστικότητα, η επιφάνεια καλύπτεται με αντιανακλαστικό επίστρωμα⁴⁰ και το πλέγμα των ηλεκτρικών επαφών που υπάρχει στην επιφάνεια γίνεται προσπάθεια να λεπτύνει όσο το δυνατόν περισσότερο⁴¹. Τα φωτόνια που εισέρχονται στο εσωτερικό της κυψέλης δεν είναι δυνατόν να απορροφηθούν όλα. Απορροφούνται μόνο όσα έχουν ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση από την ενέργεια χάσματος E_g των συγκεκριμένων ημιαγωγικών υλικών⁴². Χρειάζεται να τονιστεί ξανά ότι η Φ/Β κυψέλη δεν μπορεί να αξιοποιήσει ενεργειακά όλη την ενέργεια των φωτονίων που απορροφά αλλά ουσιαστικά μόνο αυτή που είναι ίση με το E_g . Η επιπλέον ενέργεια των φωτονίων που απορροφούνται μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια των ηλεκτρονίων⁴³ και έτσι αυξάνεται η θερμοκρασία της Φ/Β κυψέλης.

Επίσης υπάρχουν φωτόνια που απορροφούνται σε λεπτό εξωτερικό στρώμα της Φ/Β κυψέλης πριν φτάσουν στην καρδιά της (δηλαδή στην επαφή p-n) και έτσι δε συμβάλλουν στο Φ/Β φαινόμενο (δηλαδή στη δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας)⁴⁴. Τέλος ποσοστό των ζευγών οπών-ηλεκτρονίων που δημιουργούνται στην επαφή p-n επανασυνδέεται μειώνοντας και μ' αυτό τον τρόπο το ποσοστό της ενέργειας των φωτονίων που συνεισφέρουν στη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος.

Οι φυσικοί μηχανισμοί που μόλις περιγράφηκαν *μειώνουν σημαντικά* το ποσοστό της φωτεινής ακτινοβολίας που είναι δυνατόν να απορροφηθεί από μια Φ/Β κυψέλη για να συνεισφέρει στο Φ/Β φαινόμενο. Αν ληφθεί υπόψη μόνο το ποσοστό των φωτονίων που δεν απορροφούνται ή απορροφούνται αλλά δεν προσφέρουν όλη τους

³⁸ Αν η φωτεινή ακτινοβολία είναι τεχνητή, τότε πιθανώς έχει διαφορετικό φάσμα, ενώ, αν προέρχεται από συγκεντρωση φωτός με συγκεντρωτικά κάτοπτρα, έχει το ίδιο φάσμα με πολλαπλάσια όμως πυκνότητα ισχύος.

³⁹ Το ποσοστό της ανάκλασης εξαρτάται από το μήκος κύματος και το υλικό του Φ/Β στοιχείου. Συνεπώς δεν είναι το ίδιο για κάθε υλικό.

⁴⁰ Με αυτό τον τρόπο η ανακλαστικότητα από ~30% μειώνεται στο ~3% για τα Φ/Β στοιχεία πυριτίου (Φραγκιαδάκης, 2004, σελ. 182-183).

⁴¹ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 242.

⁴² Όσο μικρότερο είναι το ενεργειακό χάσμα E_g τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των φωτονίων που απορροφούνται και συμμετέχουν στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 241-242). Αυτό όμως δε σημαίνει απαραίτητα ότι αυξάνεται η απόδοση του Φ/Β στοιχείου, καθώς αυξάνεται το Φ/Β ρεύμα αλλά μειώνεται η τάση ανοικτού κυκλώματος και το γινόμενο ρεύματος-τάσης που δίνει την ισχύ δεν είναι σίγουρο ότι θα αυξηθεί.

⁴³ Και των άλλων δομικών στοιχείων του κρυσταλλικού πλέγματος.

⁴⁴ Φραγκιαδάκης, 2004, σελ. 183-184.

την ενέργεια στη δημιουργία του Φ/Β φαινομένου, τότε η θεωρητική απόδοση των Φ/Β κυψελών-στοιχείων πέφτει κάτω από 50%⁴⁵. Αν συνυπολογιστούν και οι άλλοι παράγοντες (όπως ποσοστό επανασύνδεσης, ανάκλαση, θερμότητα στις αντιστάσεις της κυψέλης κ.λπ.), τότε η θεωρητική απόδοση για τις Φ/Β κυψέλες πυριτίου κυμαίνεται περίπου στο 14-25%.

Για να μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους οι αποδόσεις των Φ/Β στοιχείων που αναφέρονται σε διάφορους πίνακες στη βιβλιογραφία, θα πρέπει οι συνθήκες μέτρησης να είναι ίδιες κάθε φορά. Για να επιτευχθεί αυτό έχουν καθοριστεί διεθνώς οι *πρότυπες συνθήκες ελέγχου* [Standard Test Conditions – STC] των χαρακτηριστικών ενός Φ/Β στοιχείου. Αυτές περιλαμβάνουν την *πυκνότητα* και το *φάσμα* της ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω σε Φ/Β στοιχείο, καθώς και τη *θερμοκρασία* του, και είναι οι παρακάτω:

Πρότυπες συνθήκες ελέγχου [Standard Test Conditions – STC]

- Πυκνότητα ηλιακής ακτινοβολίας: $1.000 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ kW/m}^2$
- Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας: AM1,5⁴⁶
- Θερμοκρασία Φ/Β στοιχείου: $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$

α) Εξάρτηση απόδοσης από το ημιαγώγιμο υλικό

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, το ποσοστό των φωτονίων που είναι δυνατόν να απορροφηθούν από μια Φ/Β κυψέλη εξαρτάται από το ενεργειακό χάσμα E_g του ημιαγώγιμου υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η Φ/Β κυψέλη⁴⁷. Τα διαφορετικά ημιαγώγιμα υλικά έχουν διαφορετικά ενεργειακά χάσματα E_g . Συνεπώς, είναι προφανές ότι η απόδοση μιας Φ/Β κυψέλης θα εξαρτάται πρωταρχικά από το ημιαγώγιμο υλικό⁴⁸.

β) Εξάρτηση της απόδοσης από την πυκνότητα της ηλιακής ακτινοβολίας

Η απόδοση ενός Φ/Β στοιχείου εξαρτάται επίσης από την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Αρχίζοντας από το μηδέν και μέχρι περίπου τα 200 W/m^2 η απόδοση του Φ/Β στοιχείου αυξάνεται με υψηλό ρυθμό και στη συνέχεια σταθεροποιείται.

⁴⁵ Φραγκιαδάκης, 2004, σελ. 186-187 και Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 241-244.

⁴⁶ Βλέπε κεφάλαιο 2, σελ. 12-13.

⁴⁷ Υπενθυμίζεται ότι οι όροι Φ/Β κυψέλη, Φ/Β κελί, Φ/Β στοιχείο χρησιμοποιούνται με την ίδια σημασία στο κείμενο.

⁴⁸ Επίσης από το υλικό εξαρτάται το ποσοστό επανασύνδεσης οπών-ηλεκτρονίων που συμβαίνουν στην επαφή p-n.

Στην προσπάθεια να αυξηθεί η απόδοση των Φ/Β στοιχείων έχουν κατασκευαστεί Φ/Β πλαίσια που χρησιμοποιούν *συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία*, η οποία έχει δεκάδες ή εκατοντάδες φορές (δηλαδή μία ή δύο τάξεις μεγέθους) μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος από την ηλιακή⁴⁹. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ανακλαστικών υλικών, φακών ή καθρεπτών. Η απόδοση των Φ/Β στοιχείων αυξάνεται σε τέτοια συστήματα⁵⁰. Όμως η συνολική σύγκριση των οικονομικο-τεχνικών πλεονεκτημάτων (π.χ., αντικατάσταση ακριβών ημιαγωγικών υλικών με υλικά συγκεντρωσης ακτινοβολίας χαμηλού κόστους, αύξηση της απόδοσης) τέτοιων συστημάτων με τα μειονεκτήματά τους (π.χ., η ανάγκη για ύπαρξη ιχνηλατών [trackers]⁵¹, η μειωμένη αξιοπιστία τους λόγω πολλών κινούμενων μερών, η ανάγκη για ψύξη τους σε υψηλές θερμοκρασίες κ.λπ.) δεν έχει ευνοήσει μέχρι τώρα την ανάπτυξη και την εμπορική διάδοσή τους⁵².

γ) Εξάρτηση της απόδοσης από τη θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου

Η θερμοκρασία της Φ/Β κυψέλης αυξάνεται καθώς προσπίπτει πάνω στην επιφάνειά της η φωτεινή ακτινοβολία λόγω και της μετατροπής μέρους της ενέργειας των φωτονίων σε εσωτερική θερμική ενέργεια του ημιαγωγικού υλικού. Η αύξηση της θερμοκρασίας μεγαλώνει λίγο το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} , αλλά μειώνει αρκετά την τάση ανοικτού κυκλώματος V_{oc} . Ως αποτέλεσμα αυτών των αντίστροφων μεταβολών μειώνεται η μέγιστη ισχύς που μπορεί να δώσει η Φ/Β κυψέλη και συνεπώς και η απόδοση του Φ/Β στοιχείου.

δ) Άλλοι παράγοντες εξάρτησης της απόδοσης του Φ/Β στοιχείου

Κατασκευαστικοί παράγοντες του Φ/Β στοιχείου αλλά και παράγοντες που συνδέονται με τη λειτουργία του συνεισφέρουν στην περαιτέρω μείωση της απόδοσης του στοιχείου. Τέτοιοι παράγοντες είναι και οι παρακάτω:

⁴⁹ Μια μέση τιμή για την πυκνότητα της μέγιστης ηλιακής ισχύος σε έναν τόπο είναι το $1.000 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ kW/m}^2$ (τιμή που χρησιμοποιείται και στις δοκιμές των Φ/Β στοιχείων). Αυτή η τιμή ονομάζεται και τιμή ενός ήλιου [one sun]. Στις περιπτώσεις της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας οι τιμές που επιτυγχάνονται είναι πολλαπλάσιες του ενός ήλιου (δεκάδες ή εκατοντάδες ήλιοι).

⁵⁰ Για τα Φ/Β στοιχεία πυριτίου η απόδοση αυξάνεται μέχρι περίπου την πυκνότητα των 20 ήλιων και στη συνέχεια μειώνεται λόγω της αύξησης της σειριακής αντίστασης (αύξηση θερμοκρασίας του υλικού). Για Φ/Β στοιχεία GaAs η αύξηση της απόδοσης είναι συνεχής. Στη βιβλιογραφία έχει αναφερθεί η κατασκευή πειραματικών εργαστηριακών Φ/Β στοιχείων που έχουν απόδοση ~40% σε συγκεντρωμένη πυκνότητα ηλιακής ισχύος 10 ήλιων (Noun, B., 2007, Solar Power, Renewable Energy 2007/2008, WREN, σελ. 62, 63).

⁵¹ Συσκευές παρακολούθησης της πορείας του Ήλιου έτσι ώστε τα Φ/Β πλαίσια να είναι συνεχώς κάθετα στις προσπίπτουσες ακτίνες του Ήλιου.

⁵² Για περισσότερα βλ. Kalogirou, 2009, σελ. 511-512 και Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 245.

- Η ανάκλαση του φωτός που συμβαίνει πάνω στην *επιφάνεια* του Φ/Β στοιχείου και στο *μεταλλικό πλέγμα* που υπάρχει στην επιφάνειά του με αποτέλεσμα μέρος των φωτονίων να μην εισέρχεται στην κυψέλη.
- Η απορρόφηση φωτονίων που συμβαίνει πολύ κοντά στην επιφάνεια του Φ/Β στοιχείου (πριν φτάσουν στην επαφή p-n) και τα οποία δε συνεισφέρουν στη δημιουργία του Φ/Β φαινομένου.
- Η απορρόφηση των φωτονίων μειώνεται από κατασκευαστικές ατέλειες (των μονάδων παραγωγής) στη δημιουργία του ημιαγώγιμου υλικού που βρίσκεται στην επιφάνεια της Φ/Β κυψέλης.
- Η απώλεια ενέργειας που συμβαίνει κατά τη διέλευση του Φ/Β ρεύματος διαμέσου των μεταλλικών επαφών και των ηλεκτροδίων της Φ/Β κυψέλης.

Για τα Φ/Β στοιχεία πυριτίου (μονοκρυσταλλικά-πολυκρυσταλλικά)⁵³ η μείωση στην απόδοσή τους εξαιτίας των φωτονίων που δεν απορροφούνται ή δε δίνουν όλη τους την ενέργεια για τη δημιουργία του Φ/Β φαινομένου είναι της τάξης του 56%. Η υπόλοιπη μείωση της τάξης του 22-30% (που καταλήγει στην απόδοση 14-22%) προέρχεται από τους άλλους παράγοντες που αναφέρθηκαν⁵⁴.

4.3.6 Τύποι Φ/Β στοιχείων

Παρ' όλο που, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα Φ/Β στοιχεία πυριτίου αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία των εμπορικών Φ/Β πλαισίων, αναπτύσσονται συνεχώς καινοτόμα και διαφορετικά είδη Φ/Β όσον αφορά τόσο το ημιαγώγιμο υλικό όσο και την κατεργασία αλλά και τον τρόπο κατασκευής. Αυτή είναι μια συνεχής διαδικασία που σκοπό έχει να μειώσει το κόστος κατασκευής και λειτουργίας των Φ/Β στοιχείων και να αυξήσει την απόδοσή τους⁵⁵. Παρακάτω θα παρουσιαστούν με συντομία διαφορετικοί τύποι Φ/Β στοιχείων χωρίς να εξαντληθεί ο αριθμός τους, καθώς οι αλλαγές και οι εξελίξεις σ' αυτό τον τομέα είναι συνεχείς. Για την καλύτερη ταξινόμηση των διαφορετικών τύπων Φ/Β στοιχείων μπορούν αυτά να διαχωριστούν ανάλογα με:

⁵³ Που έχουν εργαστηριακή απόδοση ~14-22%

⁵⁴ Φραγκιαδάκης, 2004, σελ. 187.

⁵⁵ Η ιδανική περίπτωση είναι η δημιουργία (σε εμπορικό επίπεδο) Φ/Β στοιχείων με μεγάλη απόδοση και μικρό κόστος κατασκευής. Συνήθως όμως (όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει διαβάζοντας προσεκτικά τα εξειδικευμένα περιοδικά ή βιβλία) η κατασκευή ενός Φ/Β στοιχείου με μεγάλη απόδοση συνοδεύεται (τουλάχιστον στα αρχικά στάδια) από αυξημένο κόστος κατασκευής ή λειτουργίας ή μη σταθεροποιημένη απόδοση. Για παραδείγματα βλ. Kalogirou, 2009, σελ. 511-512 ή Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 247-249.

- α) το βασικό ημιαγώγιμο υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα
- β) τον τύπο της επαφής
- γ) τον τρόπο κατασκευής τους
- δ) με τη διάταξη που αξιοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία.

Η παραπάνω κατηγοριοποίηση δεν μπορεί να είναι αυστηρή γιατί πολλά Φ/Β στοιχεία μπορούν να ενταχθούν σε παραπάνω από μία κατηγορίες ανάλογα με το χαρακτηριστικό τους που λαμβάνεται ως κρίσιμο. Αυτός είναι και ο λόγος που στη βιβλιογραφία δεν είναι συνηθισμένη μια τέτοια κατηγοριοποίηση. Στο παρόν βιβλίο όμως γίνεται, καθώς θεωρείται χρήσιμη ως καθοδηγητικό νήμα στο λαβύρινθο των πολλαπλών και διαφορετικών τύπων Φ/Β στοιχείων που υπάρχουν και συνεχώς δημιουργούνται⁵⁶.

α) Τύποι Φ/Β στοιχείων ανάλογα με το ημιαγώγιμο υλικό

Τα πιο διαδεδομένα Φ/Β στοιχεία είναι αυτά που είναι κατασκευασμένα από πυρίτιο⁵⁷.

● Φ/Β στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου [*single-crystal Silicon*]

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο σε μεγάλα ποσοστά καθαρότητας χρησιμοποιείται από τη δεκαετία του 1950 στη βιομηχανία των ημιαγωγών (για ηλεκτρονικές εφαρμογές) και αυτή η μέθοδος κατασκευής κληροδοτήθηκε στη βιομηχανία κατασκευής Φ/Β. Είναι μέθοδος υψηλού κόστους⁵⁸, γι' αυτό και το ποσοστό των Φ/Β στοιχείων μονοκρυσταλλικού πυριτίου στην αγορά είναι ιδιαίτερα μικρό (καθώς τα πολυκρυσταλλικά ή τα άμορφου πυριτίου Φ/Β είναι από οικονομοτεχνική άποψη πιο συμφέροντα). Το πάχος του υλικού στο πλακίδιο [*wafer*]⁵⁹ είναι σχετικά μεγάλο (~300 μm). Η απόδοσή τους σε συνθήκες εργαστηρίου είναι ~20-24%, ενώ σε εμπορικές εφαρμογές ~14-18%⁶⁰. Το χρώμα των Φ/Β στοιχείων είναι συνήθως σκούρο μπλε.

⁵⁶ Λεπτομέρειες και πιο ειδική πληροφόρηση υπάρχουν στα εξειδικευμένα βιβλία ή περιοδικά (*journals*) που ασχολούνται με το θέμα των φωτοβολταϊκών.

⁵⁷ Για μια εκτεταμένη περιγραφή όλων των τύπων Φ/Β στοιχείων πυριτίου βλ. Miles R., Hynes K., Forbes I., 2005, *Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues*, Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials Volume 51, Issues 1-3, σελ. 1-42.

⁵⁸ Σχέση κόστους και απόδοσης.

⁵⁹ Αποτελεί το τελικό προϊόν της επεξεργασίας του πυριτίου (είναι μια τετραγωνική ή κυκλική στήλη) πριν κοπεί στα λεπτά φύλλα που αποτελούν τη βάση του Φ/Β στοιχείου.

⁶⁰ Βλ. Φραγκιαδάκης, 2004, σελ. 166 και Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 244.

- **Φ/B στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου**
[Polycrystalline or Multicrystalline Silicon mc-Si]

Σε αυτά τα Φ/B στοιχεία το ημιαγώγιμο υλικό είναι πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, με συνέπεια η μέθοδος κατασκευής των πλακιδίων να είναι διαφορετική και φτηνότερη από αυτήν της κατασκευής των μονοκρυσταλλικών Φ/B στοιχείων. Η απόδοσή τους όμως είναι μικρότερη, γιατί οι ασυνέχειες στο κρυσταλλικό πλέγμα τους λόγω της δομής τους αυξάνουν το ποσοστό επανασύνδεσης οπών-ηλεκτρονίων. Παρ' όλα, αυτά τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη της έρευνας έχει μεγαλώσει την απόδοσή τους και σε συνδυασμό με το σχετικά χαμηλό κόστος κατασκευής έχουν καταλάβει πολύ μεγάλο μερίδιο της αγοράς⁶¹. Η απόδοσή τους σε συνθήκες εργαστηρίου είναι ~17-20%, ενώ σε εμπορικές εφαρμογές ~10-14%⁶². Το χρώμα των Φ/B στοιχείων είναι συνήθως γαλάζιο.

- **Φ/B στοιχεία άμορφου πυριτίου** [Amorphous Silicon, a-Si]

Το άμορφο πυρίτιο, που χρησιμοποιείται σε αυτά τα Φ/B στοιχεία, κατασκευάζεται ώστε το υλικό (πυρίτιο) να χάνει σε μεγάλο βαθμό την κρυσταλλική δομή του (για αυτό και ονομάζεται άμορφο κι όχι κρυσταλλικό), αλλά διατηρεί σε ικανοποιητικό βαθμό τις ημιαγώγιμες ιδιότητές του. Βέβαια, η δομή που έχει ευνοεί σε μεγάλο βαθμό τις επανασυνδέσεις οπών-ηλεκτρονίων, με συνέπεια τη χαμηλότερη απόδοση του Φ/B στοιχείου⁶³. Όμως, ό,τι χάνεται σε απόδοση το κερδίζει κανείς σε κόστος και ευκολία κατεργασίας, καθώς το υλικό (άμορφο πυρίτιο) είναι εύπλαστο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή Φ/B στοιχείων *λεπτού υμένα* [thin-films solar cells] τα οποία έχουν πολύ μικρό πάχος και άλλα πλεονεκτήματα (όπως ότι είναι ελαστικά-εύκαμπτα και έχουν πολλές εμπορικές εφαρμογές σε στέγες κ.λπ.). Επίσης η τεχνολογία παρασκευής των Φ/B στοιχείων άμορφου πυριτίου χρησιμοποιείται για την κατασκευή σύνθετων Φ/B στοιχείων (π.χ., Tandem) που αποτελούνται από δύο ή τρεις στρώσεις διαφορετικών ημιαγώγιμων συνθέσεων που η καθεμία έχει διαφορετικό ενεργειακό χάσμα έτσι ώστε να μπορεί να αξιοποιήσει μεγαλύτερο εύρος του ηλιακού φάσματος. Για παράδειγμα, Φ/B στοιχεία τριών επαφών από πυρίτιο, άνθρακα και γερμάνιο a-SiGe($E_g \sim 1,4\text{eV}$), a-SiC($E_g = 1,85\text{eV}$) έχουν σταθεροποιημένη απόδοση ~13%⁶⁴. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα είναι ότι η απόδοσή τους επηρεάζεται ελάχιστα από τη θερμοκρασία⁶⁵.

⁶¹ Το 2004 αποτελούσαν το 50% της συνολικής εμπορικής παραγωγής (Twidell & Weir, 2006, σελ. 211).

⁶² Βλ. Φραγκιαδάκης, 2004, σελ. 166 και Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 244.

⁶³ Η προσθήκη υδρογόνου σε υψηλή περιεκτικότητα κατά τη διάρκεια κατασκευής του υλικού αυξάνει την απόδοση του υλικού.

⁶⁴ Φραγκιαδάκης, 2004, σελ. 166.

⁶⁵ Twidell & Weir, 2006, σελ. 211.

- **Φ/Β στοιχεία λεπτού υμένα χαλκού, ινδίου, γαλίου, σεληνίου**
[thin film Cu(InGa)Se₂ [CIGS]

Το ημιαγώγιμο υλικό που αποτελείται από τα παραπάνω χημικά στοιχεία έχει επιλεγεί με κριτήριο τη μεγαλύτερη δυνατότητά του να αξιοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία εξαιτίας της τιμής του ενεργειακού χάσματος που έχουν τα συγκεκριμένα υλικά και που έχει οδηγήσει σε αποδόσεις 20% στο εργαστήριο⁶⁶ (μεγαλύτερες των αντίστοιχων Φ/Β στοιχείων λεπτού υμένα που είναι κατασκευασμένα από πυρίτιο με εργαστηριακή απόδοση ~12%)⁶⁷.

- **Φ/Β στοιχεία λεπτού υμένα καδμίου-τελούριου** [thin film CdTe]

Ο ημιαγωγός που δημιουργείται από αυτά τα δύο χημικά στοιχεία έχει ενεργειακό χάσμα E_g 1,5 eV που βρίσκεται πολύ κοντά στο ιδανικό ενεργειακό χάσμα για την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας φάσματος AM1. Τα Φ/Β στοιχεία λεπτού υμένα που κατασκευάζονται έχουν εργαστηριακή απόδοση που φτάνει το 16%. Πλεονέκτημα αυτών των Φ/Β κυψελών (πέρα από την απόδοσή τους) είναι ότι για την κατασκευή τους χρησιμοποιείται πολύ λιγότερο ημιαγώγιμο υλικό απ' ό,τι στην περίπτωση του πυριτίου⁶⁸ (το πάχος του υμένα είναι πολύ μικρότερο) με προφανή οικονομοτεχνικά πλεονεκτήματα. Όμως έχουν δύο σοβαρά μειονεκτήματα: την ασταθή απόδοσή τους και τους περιβαλλοντικούς κινδύνους που σχετίζονται με το κάδμιο-τελούριο.

β) Τύποι Φ/Β στοιχείων ανάλογα με τον τύπο της επαφής

Οι δύο βασικές κατηγορίες στις οποίες μπορούν να διαχωριστούν τα Φ/Β στοιχεία είναι τα Φ/Β στοιχεία ομοειδούς επαφής [homojunctions] και τα Φ/Β στοιχεία ετεροεπαφής [heterojunctions]. Με τον όρο επαφή εννοείται η επαφή p-n.

- **Φ/Β στοιχεία ομοειδούς επαφής** [homojunctions]

Σ' αυτές τις Φ/Β κυψέλες το ημιαγώγιμο υλικό βάσης παραμένει το ίδιο σε όλη την έκταση της επαφής p-n και μπορούν να υπάρξουν μόνο αλλαγές στη συγκέντρωση της πρόσμειξης. Συνεπώς, το ενεργειακό χάσμα είναι σταθερό σε όλο το

⁶⁶ Τα πρώτα Φ/Β στοιχεία αυτού του είδους που κατασκευάστηκαν δεν είχαν στη σύστασή τους το γάλιο (Ga) και ονομάζονταν (συντομογραφικά) CIS. Είχαν μικρότερη απόδοση (που έφτανε ~16%). Η προσθήκη του γαλίου μεγιστοποίησε την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας και έτσι καλυτέρευσε την απόδοσή τους.

⁶⁷ Twidell & Weir, 2006, σελ. 202 και 215.

⁶⁸ Αυτό συμβαίνει καθώς το CdTe είναι άμεσος [direct] ημιαγωγός (ενώ το πυρίτιο είναι έμμεσος [indirect]), με αποτέλεσμα το CdTe να απορροφά αποτελεσματικά μεγαλύτερα τμήματα της ηλιακής ακτινοβολίας σε μικρό πάχος. Περισσότερα για τη διάκριση άμεσων - έμμεσων ημιαγωγών βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 234.

μήκος της επαφής p-n. Τέτοιου είδους Φ/Β στοιχεία είναι τα Φ/Β στοιχεία πυριτίου που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

- **Φ/Β στοιχεία ετεροεπαφής [heterojunctions]**

Σ' αυτές τις Φ/Β κυψέλες το ημιαγώγιμο υλικό βάσης αλλάζει κατά την έκταση της επαφής p-n και συνεπώς το ενεργειακό χάσμα είναι διαφορετικό σε διαφορετικές (χωρικά) περιοχές της επαφής p-n. Αυτό σημαίνει ότι η απορρόφηση της ακτινοβολίας (φωτονίων) μπορεί να γίνει σε δύο διαφορετικές συχνότητες (αυτές που αντιστοιχούν στα διαφορετικά ενεργειακά χάσματα). Έτσι, το ποσοστό των φωτονίων (της ηλιακής ακτινοβολίας) που μπορεί (θεωρητικά) να απορροφηθεί είναι μεγαλύτερο από αυτό μιας ομοειδούς επαφής⁶⁹. Συνήθως το υλικό με ευρύτερο ενεργειακό χάσμα βρίσκεται (κατασκευαστικά) στην κορυφή του Φ/Β στοιχείου και ακολουθεί αυτό με το στενότερο ενεργειακό χάσμα. Αρχικά κατασκευάστηκαν Φ/Β στοιχεία ετεροεπαφής με δύο διαφορετικά ενεργειακά χάσματα (όπως Φ/Β στοιχεία Cd/CdTe ή $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}/\text{GaAs}$), αλλά τελευταία έχουν ανακοινωθεί και ετεροεπαφές με τρία διαφορετικά ενεργειακά χάσματα⁷⁰.

γ) Τύποι Φ/Β στοιχείων ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους

Με βάση τον τρόπο κατασκευής οι βασικότεροι τύποι Φ/Β στοιχείων είναι τα Φ/Β στοιχεία λεπτού υμένα [thin films], τα Φ/Β στοιχεία συσσωρεύσης [stacked cells] και τα Φ/Β στοιχεία κατακόρυφης ετεροεπαφής [vertical multijunction cells-VMI].

- **Φ/Β στοιχεία λεπτού υμένα [thin films]**

Ένας τύπος τέτοιου Φ/Β στοιχείου αναφέρθηκε παραπάνω (π.χ., Φ/Β άμορφου πυριτίου). Το ημιαγώγιμο υλικό κατασκευής αυτών των Φ/Β στοιχείων μπορεί να είναι το άμορφο πυρίτιο (τέτοια Φ/Β στοιχεία αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία των εμπορικών εφαρμογών) ή άλλοι ημιαγωγοί, όπως CdTe, CuInSe_2 (CIS) κ.λπ.⁷¹ Τα βασικά χαρακτηριστικά τους είναι το μικρότερο βάρος τους (λόγω και της μικρότερης ποσότητας ημιαγώγιμου υλικού που χρειάζονται), η ποικιλία των εφαρμογών που χρησιμοποιούνται (λόγω και της ευκαμψότητας που μπορούν να

⁶⁹ Βέβαια σε σύγκριση με τα Φ/Β στοιχεία ομοεπαφής τα Φ/Β στοιχεία ετεροεπαφής έχουν μεγαλύτερη απόδοση, αλλά ασύγκριτα μεγαλύτερες δυσκολίες στην κατασκευή τους και μεγαλύτερη αστάθεια στην απόδοσή τους.

⁷⁰ Twidell & Weir, 2006, σελ. 216, όπου αναφέρονται σε περίπτωση Φ/Β τριπλής ετεροεπαφής με απόδοση ~35% με φάσμα όμως συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας (πάνω από 10 ήλιους). Επίσης πιο εκτεταμένη πληροφόρηση βλ. Miles et al, 2005, σελ. 15-20. Επίσης <http://sharp-solar.com/solutions/index.html> (10/12/2010) για την τεχνολογία τριπλής επαφής Tandem.

⁷¹ Τα Φ/Β στοιχεία τους εμπορικά δεν έχουν μεγάλη εξάπλωση.



παρουσιάσουν) και η αυξημένη δυσκολία που παρουσιάζουν στις διάφορες τεχνικές κατασκευής τους (ιδιαίτερα όταν το υλικό δεν είναι το πυρίτιο).

- **Φ/Β στοιχεία συσσώρευσης [stacked cells]**

Είναι Φ/Β στοιχεία τα οποία είναι στοιχεία ετεροεπαφής. Δηλαδή κατά μήκος της επαφής p-n τοποθετούνται κατά σειρά δύο (ή περισσότεροι) ημιαγωγοί με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα (εξωτερικά τοποθετείται αυτό με το ευρύτερο ενεργειακό χάσμα και στη συνέχεια αυτό(α) με το στενότερο).

- **Φ/Β κυψέλες κατακόρυφης ετεροεπαφής [vertical multijunction cells – VMI]**

Είναι Φ/Β στοιχεία στα οποία δημιουργούνται εκατοντάδες μικροεπαφές p-n τοποθετημένες η μία δίπλα στην άλλη.

δ) Τύποι Φ/Β στοιχείων ανάλογα με τη διάταξη του συστήματος που αξιοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία

- **Φ/Β στοιχεία σε διάταξη συγκέντρωσης ακτινοβολίας**

Σε αυτά τα Φ/Β στοιχεία η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει έπειτα από συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας (κατά πολλούς ήλιους) μέσω συστημάτων συγκέντρωσής της από κάτοπτρα και πρίσματα. Η συγκεντρωμένη (συμπυκνωμένη) ηλιακή ακτινοβολία αυξάνει την απόδοση των Φ/Β κυψελών. Για να μεγιστοποιηθεί η απόδοση αυτών των συστημάτων θα πρέπει η ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει κάθετα στην επιφάνεια των Φ/Β στοιχείων. Για αυτό είναι αναγκαία η παρουσία ικνηλατών Ήλιου [trackers]. Επίσης απαιτούνται συστήματα ψύξης για να μη μειώνεται η απόδοση από την αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλεί η συγκεντρωμένη ηλιακή δέσμη. Η παρουσία ικνηλατών και συστημάτων ψύξης αυξάνει το συνολικό κόστος κατασκευής και συντήρησης αυτών των συστημάτων και μειώνει την αξιοπιστία τους. Η σύγκριση αυτών των μειονεκτημάτων με το βασικό πλεονέκτημα της αυξημένης απόδοσής τους είναι το βασικό κριτήριο για την πετυχημένη διάδοσή τους στο μέλλον.

- **Θερμοφωτοβολταϊκά στοιχεία [thermophotovoltaic TPV]⁷²**

Αυτά τα Φ/Β στοιχεία έχουν σχεδιαστεί σε διατάξεις έτσι ώστε να αξιοποιούν την ακτινοβολία χαμηλής συχνότητας που εκπέμπει μια επιφάνεια όταν θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται και δεν προσπίπτει πάνω στα Φ/Β στοιχεία αλλά σε μια επιφάνεια υψηλής απορροφητικό-

⁷² Για μια πιο λεπτομερή παρουσίαση βλ. Miles et al, 2005, σελ. 20-21.



τητας που απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία και θερμαίνεται. Η επιφάνεια (ανάλογα και με τη θερμοκρασία της) εκπέμπει χαμηλής συχνότητας ακτινοβολία (που έχει μέγιστο στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος). Αυτή η ακτινοβολία προσπίπτει στη Φ/Β κυψέλη η οποία έχει ως φωτοαγωγίμο υλικό ημιαγωγό με μικρό ενεργειακό χάσμα που ταιριάζει ενεργειακά με την ενέργεια των φωτονίων της υπέρυθρης ακτινοβολίας (που προσπίπτει πάνω του), και έτσι απορροφάται ισχυρότερα. Η απόδοση που έχει αναφερθεί σε εργαστηριακές εφαρμογές είναι ~40%⁷³. Αυτά τα συστήματα (πιθανώς) μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε περιπτώσεις αξιοποίησης της θερμότητας που «απορρίπτεται» σε βιομηχανικές εφαρμογές⁷⁴.

- **Οργανικά ή ευαίσθητης βαφής Φ/Β στοιχεία**
[organic or dye sensitive cells]

Η ουσία της λειτουργίας αυτών των Φ/Β στοιχείων βρίσκεται στο γεγονός ότι αξιοποιούν τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης, όπως το κάνουν και οι φυτικοί οργανισμοί [π.χ., *dye sensitive cells*]⁷⁵.

- **Nano-Φ/Β στοιχεία [nano-pv cells]**

Αποκαλούνται συχνά Φ/Β στοιχεία τρίτης γενιάς. Σύμφωνα μ' αυτή τη θεώρηση, Φ/Β στοιχεία πρώτης γενιάς θεωρούνται αυτά του κρυσταλλικού πυριτίου, ενώ δεύτερης γενιάς τα Φ/Β στοιχεία λεπτού υμένα [thin film]. Στα nano-Φ/Β στοιχεία δεν υπάρχει ο διαχωρισμός των στρωμάτων που είναι χαρακτηριστικό των δύο πρώτων γενεών Φ/Β στοιχείων. Αντίθετα το υλικό κατασκευής των nano-Φ/Β στοιχείων είναι ενιαίο και προκύπτει από τη μείξη εκτυπώσιμων [printable] και εύκαμπτων πολυμερών υλικών με αγωγίμα nano-υλικά. Αυτός ο τύπος Φ/Β στοιχείων αναμένεται να γίνει εμπορικά διαθέσιμος τα επόμενα χρόνια μειώνοντας εντυπωσιακά το υψηλό κόστος των Φ/Β στοιχείων⁷⁶.

⁷³ Twidell & Weir, 2006, σελ. 219.

⁷⁴ Για περισσότερα βλ. Twidell & Weir, 2006, σελ. 219 και Kalogirou, 2009, σελ. 487.

⁷⁵ Για περισσότερα βλ. Twidell & Weir, 2006, σελ. 219-220, Miles et al, 2005, σελ. 25-26, Φραγκιαδάκης, 2004, σελ. 168-170.

⁷⁶ Για περισσότερα βλ. Kalogirou, 2009, σελ. 487.

4.4 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

4.4.1 Εισαγωγή

Η τάση που μπορεί να δώσει ένα ξεχωριστό Φ/Β στοιχείο είναι πολύ μικρή ($\sim 0,6V$), όπως επίσης και η ηλεκτρική ισχύς. Γι' αυτό πολλά Φ/Β στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους δημιουργώντας το Φ/Β πλαίσιο⁷⁷ που είναι η βασική μονάδα ενός Φ/Β συστήματος.



Εικόνα 4.1 Εγκατάσταση Φ/Β πλαισίων σε στέγη.
(Πηγή: U.S Department of Energy)

Τα ξεχωριστά Φ/Β στοιχεία συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους σε σειρά και οι σειρές μεταξύ τους παράλληλα, δημιουργώντας έτσι την επιθυμητή ηλεκτρική τάση, ισχύ και ρεύμα. Συνήθως αυτός ο συνδυασμός Φ/Β στοιχείων περικλείεται από μεταλλικό ή πλαστικό πλαίσιο (κάλυμμα-περίβλημα), που στο πάνω μέρος του

⁷⁷ Ο όρος στην αγγλική γλώσσα είναι module ή panel. Η συνήθης απόδοσή του στα ελληνικά είναι πλαίσιο. Ο όρος πλαίσιο μερικές φορές συγχέεται με το πλαίσιο-περίβλημα που περικλείει το συνδυασμό των Φ/Β στοιχείων και για αυτό πολλές φορές χρησιμοποιείται ο (εξελληνισμένος) όρος πάνελ.

προστατεύεται από γυάλινη επιφάνεια. Αν δεν υπάρχει πλαίσιο (όπως συμβαίνει σε Φ/Β πλαίσια συγκεκριμένων εφαρμογών), τότε θα πρέπει να υπάρχουν στις άκρες του συστήματος μονωτικές ραφές [edge sealing measures]. Οι προδιαγραφές που πρέπει να πληροί το κάλυμμα-περίβλημα του πλαισίου είναι αυστηρές, καθώς το πλαίσιο θα πρέπει να προστατεύεται από τις καιρικές συνθήκες (βροχή, σκόνη, υγρασία, ακραίες θερμοκρασίες⁷⁸) για χρονικό διάστημα 20-30 ετών (κι ακόμα περισσότερο) που είναι η διάρκεια ζωής του. Επίσης είναι απαραίτητη η ηλεκτρική μόνωση ως βασικό στοιχείο για την ασφαλή λειτουργία του πλαισίου.

Επειδή οι εφαρμογές των Φ/Β πλαισίων είναι πολυάριθμες, η ονομαστική ισχύς [nominal power] αυτών που κυκλοφορούν στην αγορά έχει μια ποικιλία τιμών που ξεκινά από λίγα W και φτάνει μέχρι μερικές εκατοντάδες W (π.χ., 300 W). Συνηθισμένο εμπορικό Φ/Β πλαίσιο με 36 Φ/Β στοιχεία και επιφάνεια 100 cm² έχει ισχύ 50-75 W⁷⁹.

4.4.2 Τάση και ένταση ρεύματος σε Φ/Β πλαίσιο

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα Φ/Β πλαίσιο αποτελείται από συνδυασμό Φ/Β στοιχείων συνδεδεμένων μεταξύ τους σε σειρά και παράλληλα. Ο αριθμός των Φ/Β στοιχείων από τα οποία αποτελείται το πλαίσιο και ο τρόπος σύνδεσής τους εξαρτάται από την ισχύ, το ρεύμα και την τάση που επιθυμούμε να έχει το συγκεκριμένο πλαίσιο. Τυπικές τιμές ισχύος για εμπορικά Φ/Β πλαίσια είναι από μερικά W_p έως ~150 W_p. Η τάση λειτουργίας ενός πλαισίου που προορίζεται για απομονωμένα συστήματα (εκτός δικτύου) είναι της τάξης των 20 V, καθώς μια τέτοια τάση είναι κατάλληλη για τη φόρτιση των 12 V συσσωρευτών (μπαταριών) που συνήθως αποτελούν το μέσο αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας (ιδιαίτερα στα Φ/Β συστήματα εκτός δικτύου [off-grid]). Στα πλαίσια που προορίζονται για εφαρμογές δικτύου [in-grid systems] οι τιμές της τάσης είναι μεγαλύτερες⁸⁰.

Στο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός Φ/Β πλαισίου υπάρχουν τα Φ/Β στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα, καθώς και δίοδοι που συνδέονται για την αποφυγή προβλημάτων απωλειών που μπορούν να συμβούν λόγω σκίασης των πλαισίων (ιδιαίτερα όταν είναι συνδεδεμένα πολλά μαζί σε συστοιχίες) ή λόγω άλλων ανωμαλιών που μπορούν να προκληθούν κατά τη λειτουργία τους⁸¹.

⁷⁸ Οι προδιαγραφές είναι συνήθως για εύρος θερμοκρασιών -40°C έως +80°C.

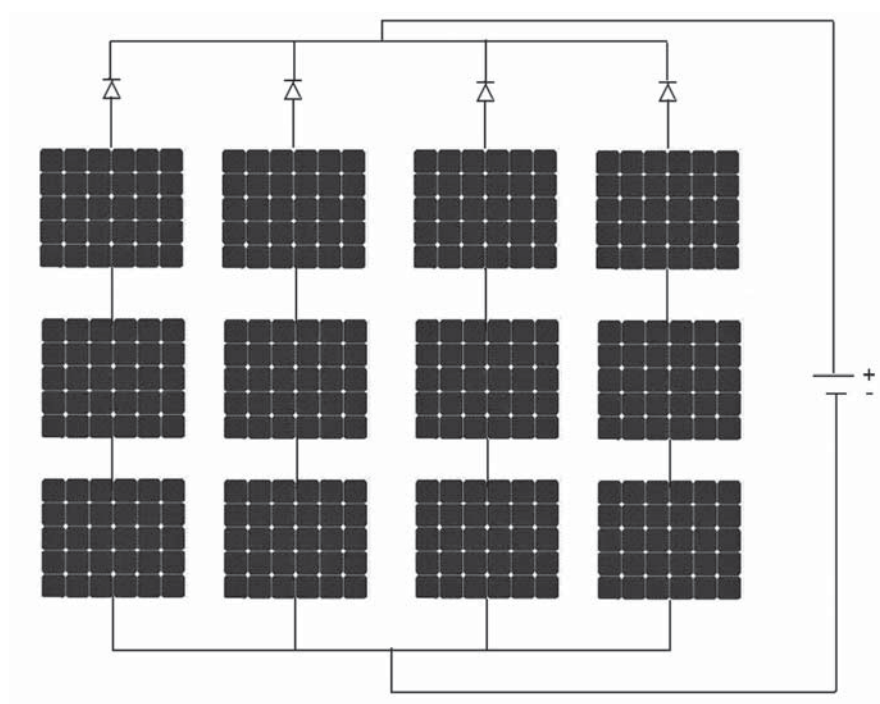
⁷⁹ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 258-259.

⁸⁰ Για παράδειγμα, για ένα Φ/Β άμορφου πυριτίου ονομαστικής ισχύος 115 W τα στοιχεία λειτουργίας του είναι V_{oc} = 58.6V, V_m = 44.5, I_{sc} = 3.26A, I_m = 2.59A.

⁸¹ Περισσότερα για αυτό το θέμα βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 259-260.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας I-V και P-V ενός Φ/Β πλαισίου είναι στη μορφή τους ίδιες με αυτές ενός Φ/Β στοιχείου, ενώ παρόμοια είναι και η εξάρτησή τους από τη θερμοκρασία και την πυκνότητα ηλιακής ισχύος⁸².

Έστω ότι σε ένα Φ/Β πλαίσιο υπάρχουν τρία (3) ίδια Φ/Β στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και τέσσερις (4) τέτοιες σειρές Φ/Β που συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα.



Σχήμα 4.13 Φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεόμενα μεταξύ τους για τη δημιουργία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Τότε θα ισχύει:

Για τα τρία Φ/Β στοιχεία που είναι συνδεδεμένα σε σειρά το ρεύμα που τα διαρρέει είναι το ίδιο, ενώ η τάση στα άκρα της σειράς είναι το άθροισμα των ξεχωριστών τάσεων που υπάρχουν στ' άκρα του καθενός⁸³. Συνεπώς, η τάση V_{Σ} στα άκρα της σειράς είναι:

$$V_{\Sigma} = 3 \cdot V \quad (4.6)$$

⁸² Για ευκολία, ένα Φ/Β πλαίσιο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα Φ/Β στοιχείο μεγάλου μεγέθους.

⁸³ Όπως θα ίσχυε αν είχαμε αντιστάσεις (R) συνδεδεμένες σε σειρά.

Ενώ το ρεύμα της σειράς είναι:

$$I_Z = I \quad (4.7)$$

όπου

I : το ρεύμα που διαρρέει κάθε ξεχωριστό Φ/Β στοιχείο

V : η τάση στα άκρα του κάθε ξεχωριστού Φ/Β στοιχείου.

Αφού τέσσερις (4) σειρές Φ/Β στοιχείων συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα, τότε η τάση της συνολικής διάταξης θα είναι η ίδια

$$V_{\Pi} = V_Z \quad (4.8)$$

ενώ το τελικό ρεύμα I_{Π} θα είναι το άθροισμα των ρευμάτων κάθε ξεχωριστής σειράς⁸⁴, δηλαδή

$$I_{\Pi} = 4 \cdot I_Z = 4 \cdot I \quad (4.9)$$

Οι χαρακτηριστικές τιμές ρεύματος I , τάσης V και ισχύος P για ένα Φ/Β πλαίσιο ορίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως αυτές στο Φ/Β στοιχείο.

4.4.3 Απόδοση-συντελεστής απόδοσης Φ/Β πλαισίου

Ο (στιγμιαίος) συντελεστής απόδοσης (ή η απόδοση-efficiency)⁸⁵ ενός Φ/Β πλαισίου ορίζεται με τον ίδιο τρόπο που ορίζεται και στο Φ/Β στοιχείο, δηλαδή:

$$\eta_{\text{module}}: P_m / G \cdot A \quad (4.10)$$

όπου

P_m : η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που αποδίδει το πλαίσιο.

G : η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επίπεδο του πλαισίου.

A : εμβαδόν επιφάνειας του πλαισίου.

Η απόδοση του Φ/Β πλαισίου βασικά εξαρτάται (όπως και στο Φ/Β στοιχείο) από την πυκνότητα της ηλιακής ισχύος, τη θερμοκρασία του πλαισίου και το ημιαγώγιμο υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένα τα Φ/Β στοιχεία του πλαισίου. Όμως η απόδοση του Φ/Β πλαισίου είναι μικρότερη απ' αυτήν των ξεχωριστών Φ/Β στοιχείων από τα οποία αποτελείται για τρεις (3) βασικούς λόγους:

⁸⁴ Όπως θα ίσχυε αν είχαμε αντιστάσεις (R) συνδεδεμένες παράλληλα.

⁸⁵ Για την ακρίβεια (στην ελληνική ορολογία) ο συντελεστής απόδοσης είναι δεκαδικός αριθμός μικρότερος της μονάδας (<1), ενώ η απόδοση είναι ο συντελεστής απόδοσης εκφρασμένος σε ποσοστό επί τοις εκατό (π.χ., για συντελεστή απόδοσης $\eta = 0,15$ η απόδοση είναι 15%).

- τη μερική κάλυψη της γεωμετρικής επιφάνειας του πλαισίου από τα Φ/Β στοιχεία (παράγοντας κάλυψης – packing factor)⁸⁶
- την πιθανή ανομοιογένεια των χαρακτηριστικών των Φ/Β στοιχείων που αποτελούν το πλαίσιο
- την ανακλαστικότητα του διαφανούς υλικού που βρίσκεται στην άνω επιφάνεια του πλαισίου

Οι διαφορές μεταξύ της απόδοσης ενός Φ/Β πλαισίου και των Φ/Β στοιχείων που το αποτελούν είναι της τάξης μερικών εκατοστών (που όμως είναι σημαντικά στην συγκεκριμένη περίπτωση). Για παράδειγμα, σε Φ/Β πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου όπου η απόδοση είναι 12-14% στα αντίστοιχα Φ/Β στοιχεία είναι 14-18%. Στην πράξη η απόδοση του Φ/Β πλαισίου είναι μικρότερη από την απόδοση που αναφέρεται στις χαρακτηριστικές τιμές κάθε πλαισίου, καθώς αυτές οι τιμές είναι μετρημένες στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου [STC], οι οποίες είναι διαφορετικές από τις συνθήκες που επικρατούν καθημερινά στον τόπο εγκατάστασης του Φ/Β πλαισίου. Επίσης με την πάροδο του χρόνου, οι φυσιολογικές φθορές στα διάφορα εξαρτήματα του πλαισίου μειώνουν την απόδοσή του (παράγοντας γήρανσης)⁸⁷.

Έχοντας ως βάση τα παραπάνω μπορεί να οριστεί ο συντελεστής απόδοσης n ενός Φ/Β πλαισίου λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες απώλειες που μειώνουν την τιμή n_{STC} του συντελεστή απόδοσης, ο οποίος δίνεται από την εταιρεία κατασκευής και είναι υπολογισμένος στις συνθήκες STC.

Αυτή η σχέση⁸⁸ θα είναι:

$$n = n_{STC} \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4 \cdot \dots \quad (4.11)$$

όπου κάθε συντελεστής n δίνει το ποσοστό απωλειών εξαιτίας ενός συγκεκριμένου παράγοντα, π.χ., ο n_1 μπορεί να εκφράζει το συντελεστή καθαρότητας του υαλοπίνακα του πλαισίου και αναφέρεται στη μείωση της απόδοσης του πλαισίου εξαιτίας της μείωσης της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας λόγω σκόνης που έχει επικαθίσει με την πάροδο του χρόνου στο Φ/Β πλαίσιο. Οι υπόλοιποι συντελεστές n_i αναφέρονται σε άλλους παράγοντες μείωσης, όπως η αύξηση της θερμοκρα-

⁸⁶ Ο παράγοντας κάλυψης είναι ουσιαστικά το πηλίκο (συνολική επιφάνεια Φ/Β στοιχείων)/(επιφάνεια Φ/Β πλαισίων) και παίρνει τιμές (προφανώς) μικρότερες της μονάδας.

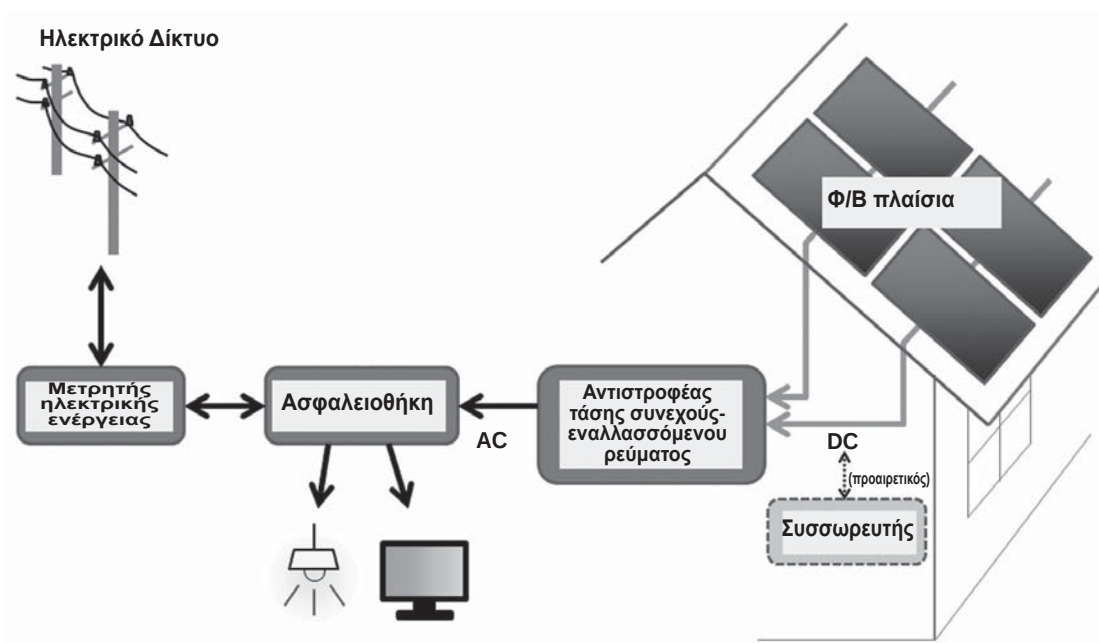
⁸⁷ Οι εταιρείες συνήθως εγγυώνται ότι μέχρι τα 25 πρώτα χρόνια λειτουργίας ενός Φ/Β πλαισίου η μείωση της αρχικής τιμής της ισχύος αιχμής του πλαισίου (P_m) δε θα είναι μεγαλύτερη από το 20% (Φραγκιαδάκης, 2004, σελ. 204).

⁸⁸ Στη βιβλιογραφία σε μια τέτοια σχέση διαφορετικοί συγγραφείς βάζουν διαφορετικούς συντελεστές ανάλογα με τους παράγοντες που λαμβάνουν υπόψη τους και τον ορισμό που κάνουν σε κάθε παράγοντα.

σίας πάνω από τους 25°C (που είναι συνθήκες STC), η μείωση της πυκνότητας της ηλιακής ισχύος κάτω από το 1.000 W/m² (συνθήκες STC), η μείωση λόγω χρόνου λειτουργίας (παράγοντας γήρανσης πλαισίου κ.λπ.)⁸⁹ κ.λπ.

4.4.4 Συμπληρωματικά στοιχεία-μέρη για την εγκατάσταση ενός Φ/Β πάνελ

Για να εγκατασταθεί ένα πλαίσιο και να μπορεί να δώσει ηλεκτρική ενέργεια στην κατανάλωση χρειάζεται ορισμένα συμπληρωματικά στοιχεία-μέρη [components]. Αυτά τα μέρη βασικά καθορίζονται από το αν το πλαίσιο θα χρησιμοποιηθεί ως απομονωμένο σύστημα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας [grid independent system]⁹⁰ ή θα ενταχθεί στο κυρίως ηλεκτρικό δίκτυο [grid connected system]⁹¹.



Σχήμα 4.14 Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα Φ/Β συστήματος εγκατεστημένου σε κατοικία. (Πηγή: commons.wikimedia.org)

⁸⁹ Για περισσότερα βλ. Φραγκιαδάκης, 2004, σελ. 204-209.

⁹⁰ Ορισμένοι συγγραφείς (Kaltschmitt et al, 2007) κάνουν τη διάκριση ανάμεσα σε Φ/Β εφαρμογές εντός δικτύου [grid connected] και Φ/Β εφαρμογές ανεξάρτητες από το δίκτυο [grid-independent], και τις δεύτερες τις χωρίζουν σε off-grid και stand-alone.

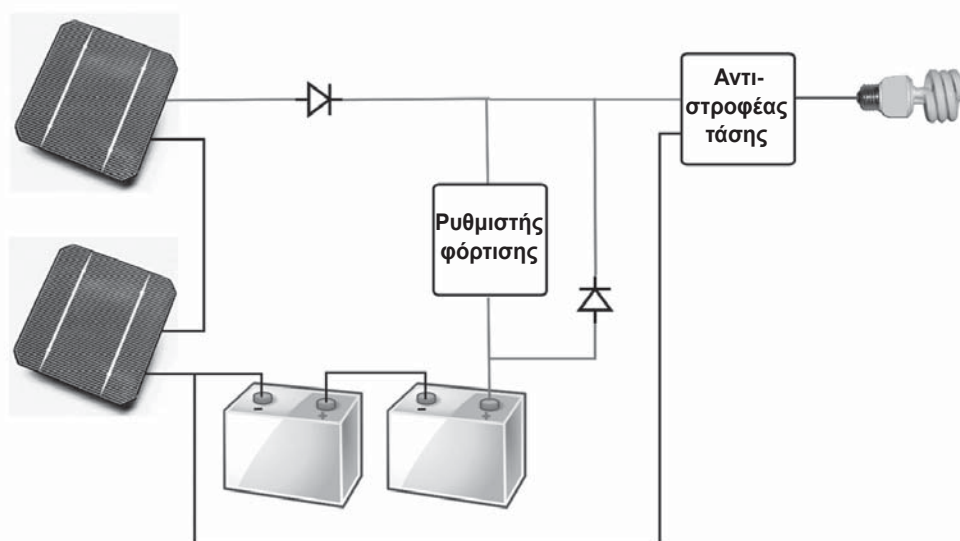
⁹¹ Παρακάτω θα γίνει αναφορά με περισσότερες λεπτομέρειες στα διάφορα είδη Φ/Β συστημάτων και στο διαχωρισμό τους.

Στην πρώτη περίπτωση [off-grid system] μαζί με το Φ/Β πλαίσιο θα πρέπει να εγκατασταθεί *σύστημα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας* (συνήθως συσσωρευτές που περιλαμβάνουν και ελεγκτές φόρτισης [charge controllers]). Επίσης χρειάζεται *μηχανισμός στήριξης και κατεύθυνσης του Φ/Β πλαισίου [mounting system]* στον οποίο υπάρχει η δυνατότητα να εγκατασταθεί και ιχνηλάτης παρακολούθησης Ήλιου [tracker]. Τέλος χρειάζεται *αντιστροφέας τάσης [inverter]* για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος (που παράγει το Φ/Β πλαίσιο) σε εναλλασσόμενο σε περίπτωση που η συγκεκριμένη εγκατάσταση έχει ανάγκη από εναλλασσόμενο ρεύμα (π.χ., για τις συσκευές οικιακής κατανάλωσης).

Στη δεύτερη περίπτωση [grid connected system] δε χρειάζεται σύστημα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας αλλά χρειάζονται τα υπόλοιπα μέρη [components].

α) Σύστημα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας (συσσωρευτές)

Το πιο διαδεδομένο σύστημα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από Φ/Β πλαίσια είναι οι συσσωρευτές. Η ύπαρξη συστήματος αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι αναγκαία για τα απομονωμένα συστήματα (εκτός δικτύου), καθώς εκεί απαιτείται να διατίθεται ρεύμα στην κατανάλωση ακόμα κι όταν τα Φ/Β πλαίσια αδυνατούν να παράγουν την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια (π.χ., τη νύχτα ή σε πολύ συννεφιασμένες ημέρες).



Σχήμα 4.15 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος σύνδεσης φωτοβολταϊκού συστήματος (εκτός ηλεκτρικού δικτύου) με συσσωρευτές.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

Ο χρόνος ζωής των συσσωρευτών⁹² είναι πολύ μικρότερος από το χρόνο ζωής ενός Φ/Β πλαισίου και συνεπώς πρέπει να αντικατασταθούν μερικές φορές κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος⁹³. Αυτό αυξάνει το σχετικό μερίδιο του κόστους των συσσωρευτών, το οποίο υπολογίζεται στο 20-40% του συνολικού κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας για όλο το χρονικό διάστημα που το σύστημα λειτουργεί⁹⁴.

Σήμερα υπάρχουν (και χρησιμοποιούνται) πολλά είδη συσσωρευτών (π.χ., νικελίου-καδμίου, νικελίου-μεταλουδριδίου, μολύβδου κ.λπ.). Το είδος των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται κάθε φορά εξαρτώνται από τις απαιτήσεις που έχει το σύστημα. Για παράδειγμα, σε μικρές φορητές εφαρμογές (όπως ρολόγια, υπολογιστές τσέπης κ.λπ.) χρησιμοποιούνται μπαταρίες νικελίου-καδμίου, νικελίου-μεταλουδριδίου, λιθίου κ.λπ. Σε συστήματα τα οποία εγκαθίστανται σε οικίες ή μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις (ορισμένων kW) χρησιμοποιούνται κυρίως συσσωρευτές μολύβδου⁹⁵.

Το βασικό τεχνολογικό⁹⁶ χαρακτηριστικό που απαιτείται για συσσωρευτές σε Φ/Β συστήματα, τα οποία εγκαθίστανται σε οικίες ή μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις, είναι η δυνατότητα να αντέχουν σε βάθος χρόνου τις βαθιές εκφορτίσεις⁹⁷, οι οποίες χαρακτηρίζουν αυτά τα συστήματα.

Η βασική αρχή λειτουργίας όλων των συσσωρευτών είναι η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας (από την οποία φορτίζονται) σε χημική ενέργεια αποθήκευσης και στη συνέχεια (κατά την εκφόρτιση), μετατροπή της χημικής ενέργειας αποθήκευσης σε ηλεκτρική ενέργεια. Η χημική ενέργεια ουσιαστικά αποθηκεύεται σε δύο ηλεκτρόδια (θετικό και αρνητικό) ανάμεσα στα οποία δημιουργείται η ηλεκτρική τάση (ηλεκτρεγερτική δύναμη ΗΕΔ-emf)⁹⁸.

⁹² Περίπου 5-7 έτη για τους πιο συνηθισμένους τύπους συσσωρευτών και ανάλογα με τη χρήση τους.

⁹³ Ο οποίος κατά μέσο όρο είναι 25-30 έτη.

⁹⁴ Αποτελεί το βασικό παράγοντα κόστους ακόμα και σε σχέση με τα Φ/Β πλαίσια.

⁹⁵ Οι συσσωρευτές μολύβδου έχουν ως βασικό μειονέκτημα τη μικρή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα βάρους (20-30 Wh/kg), δηλαδή έχουν μικρή παροχή ενέργειας ανάλογα με το βάρος τους (και τον όγκο τους). Έτσι, καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο και συνεπώς είναι ακατάλληλες για εφαρμογές όπου ο χώρος είναι περιορισμένος (π.χ., αυτοκίνητα ή άλλες μικρές καταναλωτικές εφαρμογές). Όμως επειδή το κόστος σε σχέση με τη διάρκεια ζωής τους είναι μικρό, προτιμώνται στα παραπάνω Φ/Β συστήματα.

⁹⁶ Το οικονομικό χαρακτηριστικό είναι προφανώς το κόστος αγοράς και συντήρησης. Οι αποφάσεις (ιδιαίτερα σε εμπορικές εφαρμογές) πάντα λαμβάνονται συνυπολογίζοντας τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά (τεχνο-οικονομική ανάλυση).

⁹⁷ Deep discharging που ουσιαστικά σημαίνει ότι οι συσσωρευτές εκφορτίζονται επανειλημμένως σε μεγάλο ποσοστό (καθώς έχουμε ανάγκη την ηλεκτρική ενέργειά τους) σε συχνά χρονικά διαστήματα.

⁹⁸ Για περισσότερα σε σχέση με τη λειτουργία των συσσωρευτών βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 272-276 και Φραγκιαδάκης, 2004, σελ. 235-239.

Τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη ενός συσσωρευτή είναι η *ηλεκτρεγερτική δύναμη ΗΕΔ- emf* , η *ονομαστική χωρητικότητά του [nominal Capacity C ή q_{max}]*, η *απόδοσή του [efficiency]*, η *κατάσταση φόρτισης [State Of Charge-SOC]*, το *χρονικό περιθώριο εκφόρτισης [discharge regime]* και ο *χρόνος ζωής του συσσωρευτή*. Παρακάτω θα γίνει σύντομη αναφορά σε κάθε ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά μεγέθη.

- *ηλεκτρεγερτική δύναμη ΗΕΔ- emf* . Είναι η μέγιστη τάση στα άκρα του συσσωρευτή όταν δεν είναι συνδεδεμένος με την κατανάλωση. Εκφράζεται σε V και η πιο συνηθισμένη τιμή της στους συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται είναι τα 12 V.
- *ονομαστική χωρητικότητα [nominal Capacity C ή q_{max}]*. Εκφράζει το μέγιστο ηλεκτρικό φορτίο που μπορεί να αποθηκεύσει ο συσσωρευτής (σε μορφή χημικής ενέργειας) κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, οι οποίες καθορίζονται κυρίως από τη θερμοκρασία. Η μονάδα μέτρησης στην οποία εκφράζεται συνήθως είναι το αμπερώριο (Ah).
- *η απόδοση [efficiency]*. Είναι καθαρός αριθμός και είναι ίσος με το πηλίκο του φορτίου που παρέχει ένας συσσωρευτής κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης προς το φορτίο που χρειάζεται ο συσσωρευτής για να επανέλθει στην αρχική κατάσταση φόρτισης.
- *η κατάσταση φόρτισης [State Of Charge-SOC]*. Εκφράζει ουσιαστικά το ποσοστό στο οποίο είναι φορτισμένος ένας συσσωρευτής σε δεδομένη χρονική στιγμή και είναι ίση με το πηλίκο της χωρητικότητας του συσσωρευτή στη δεδομένη χρονική στιγμή προς την ονομαστική χωρητικότητά της μπαταρίας, δηλαδή $SOC = q/q_{max}$. Οι τιμές της SOC είναι μεταξύ του 0 και του 1. Για $SOC = 1$ ο συσσωρευτής είναι πλήρως φορτισμένος, ενώ για $SOC = 0$ ο συσσωρευτής είναι πλήρως εκφορτισμένος.
- *το χρονικό περιθώριο εκφόρτισης [discharge regime]*. Είναι μέγεθος το οποίο εκφράζεται σε ώρες (h) και δείχνει ουσιαστικά πόσο γρήγορα εκφορτίζεται ο συσσωρευτής μέσω ενός δεδομένου ρεύματος για να δώσει όλο το φορτίο του (που εκφράζεται με την ονομαστική χωρητικότητά του). Για παράδειγμα, συσσωρευτής ονομαστικής χωρητικότητας 300 Ah που εκφορτίζεται με ρεύμα 6 A έχει «χρονικό περιθώριο εκφόρτισης» 50 ωρών (h) ($300 \text{ Ah} = 50 \text{ h} \cdot 6 \text{ A}$).
- *ο χρόνος ζωής συσσωρευτή*. Εκφράζεται σε αριθμό κύκλων λειτουργίας⁹⁹ (π.χ., 4.000 κύκλοι λειτουργίας) και εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο θα λειτουργήσει ο συγκεκριμένος συσσωρευτής. Συνεπώς, ο ίδιος συσσωρευτής μπορεί τελικά να παρουσιάσει διαφορετικό χρόνο ζωής σε διαφορετι-

⁹⁹ Ένας κύκλος λειτουργίας περιλαμβάνει μια φόρτιση και μια εκφόρτιση ενός συσσωρευτή.

κές συνθήκες λειτουργίας και χρησιμοποίησής της. Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι ο χρόνος ζωής ενός συσσωρευτή εξαρτάται από τις παραμέτρους που εμφανίζει κάθε κύκλος λειτουργίας του, δηλαδή από το βάθος φόρτισης-εκφόρτισης¹⁰⁰, από το ρεύμα φόρτισης-εκφόρτισης¹⁰¹ και το πλήθος των περιπτώσεων που θα συμβεί υπερφόρτιση [overcharging] ή υπερεκφόρτιση [overdischarging]¹⁰² του συσσωρευτή.

ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ [CHARGE CONTROLLER]

Είναι ηλεκτρονική συσκευή που συνδέεται μεταξύ του Φ/Β πλαισίου και των συσσωρευτών για να ρυθμίζει και να ελέγχει το ρεύμα φόρτισης και την τάση φόρτισης του συσσωρευτή. Ο βασικός σκοπός του ρυθμιστή φόρτισης είναι να αποφεύγονται περιπτώσεις υπερφόρτισης, υπερεκφόρτισης των συσσωρευτών και γενικά να ρυθμίζονται με τέτοιο τρόπο το ρεύμα και η τάση φόρτισης των συσσωρευτών έτσι ώστε να επιμηκύνεται ο χρόνος ζωής τους, ενώ οι φορτίσεις-εκφορτίσεις να γίνονται με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο για τη λειτουργία του Φ/Β συστήματος.

Β) Μηχανισμός στήριξης και κατεύθυνσης του Φ/Β πλαισίου [mounting system]

Η απόδοση των Φ/Β πλαισίου εξαρτάται από την πυκνότητα της ηλιακής ισχύος και ιδιαίτερα από τη συνιστώσα της που πέφτει κάθετα πάνω στην επιφάνεια. Για να εξασφαλιστεί η μεγαλύτερη δυνατή απόδοση τα πλαίσια πρέπει να τοπο-

¹⁰⁰ Το βάθος φόρτισης-εκφόρτισης εκφράζει το ποσοστό φόρτισης ή εκφόρτισης του συσσωρευτή σε σχέση με την ονομαστική χωρητικότητά του. Βαθείς εκφορτίσεις (δηλαδή με μεγάλο βάθος εκφόρτισης) μειώνουν το χρόνο ζωής ενός συσσωρευτή. Ανάλογα με το είδος του συσσωρευτή το ποσοστό εκφόρτισης δεν πρέπει να υπερβαίνει το 60-80%.

¹⁰¹ Το ρεύμα φόρτισης-εκφόρτισης ουσιαστικά εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο μεταφέρεται ηλεκτρικό φορτίο προς και από το συσσωρευτή. Το ρεύμα αυτό (ο ρυθμός δηλαδή) δεν πρέπει να είναι μεγάλο αν θέλουμε να επιμηκύνουμε το χρόνο ζωής ενός συσσωρευτή και να διατηρούμε το συσσωρευτή σε «καλή κατάσταση». Για να ρυθμίζεται το ρεύμα αυτό στις ιδανικές τιμές χρησιμοποιούνται ειδικές ηλεκτρονικές διατάξεις που ονομάζονται *ρυθμιστές φόρτισης [charge controllers]*.

¹⁰² Η φόρτιση ενός συσσωρευτή σε τάση πάνω από ένα όριο ονομάζεται υπερφόρτιση [overcharging], ενώ η εκφόρτισή της κάτω από ένα όριο ονομάζεται υπερεκφόρτιση [overdischarging]. Όταν συμβαίνει κάτι τέτοιο για παρατεταμένα χρονικά διαστήματα, ο χρόνος ζωής του συσσωρευτή μειώνεται. Για να αποφεύγονται τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται οι *ρυθμιστές φόρτισης*.

θετούνται με νότιο προσανατολισμό¹⁰³ (στο Βόρειο Ημισφαίριο¹⁰⁴) και στην κατάλληλη κλίση¹⁰⁵ που καθορίζεται από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και την εποχή του χρόνου¹⁰⁶. Συνήθως τα Φ/Β πλαίσια τοποθετούνται σε σταθερές θέσεις, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα να εγκατασταθούν *ιχνηλάτες [tracking Systems ή trackers]* που θα κατευθύνουν τα πλαίσια στην παρακολούθηση της κίνησης του Ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας και όλες τις εποχές, έτσι ώστε η ηλιακή ακτινοβολία να πέφτει όσο το δυνατόν πιο κάθετα στην επιφάνεια των πλαισίων και να μεγιστοποιείται η απόδοσή τους. Αυτοί οι μηχανισμοί μπορεί να είναι ενός άξονα¹⁰⁷ ή δύο αξόνων. Για τα Φ/Β συστήματα που λειτουργούν με βάση τη συγκεντρωμένη-συμπυκνωμένη ηλιακή ακτινοβολία οι *ιχνηλάτες Ήλιου* είναι απαραίτητοι, καθώς τα συγκεκριμένα Φ/Β αξιοποιούν μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία. Στις άλλες περιπτώσεις Φ/Β πλαισίων η οικονομοτεχνική μελέτη της εγκατάστασης δίνει τις πληροφορίες για να αποφασιστεί εάν είναι συμφέρουσα η εγκατάσταση τέτοιων μηχανισμών. Το βασικό πλεονέκτημα των ιχνηλατών (που είναι η αύξηση της ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τα Φ/Β πλαίσια¹⁰⁸) θα πρέπει να συγκριθεί με τα βασικά μειονεκτήματα των συστημάτων αυτών (μεγαλύτερο κόστος συντήρησης-λειτουργίας, καθώς περιλαμβάνουν κινητά μέρη και χρειάζονται ηλεκτρική ενέργεια για να λειτουργήσουν¹⁰⁹, αύξηση του αρχικού κόστους επένδυσης και μείωση της αξιοπιστίας του συστήματος λόγω πιθανών βλαβών της λειτουργίας τους) για να ληφθούν οι αποφάσεις για την εγκατάστασή τους. Μέχρι σήμερα (2013) η διείσδυσή τους στις μικρές εγκαταστάσεις Φ/Β είναι μικρή.

¹⁰³ Αποκλίσεις λιγότερο από 30° ανατολικά ή δυτικά επηρεάζουν κάπως την απόδοση των Φ/Β πλαισίων (λιγότερο από 5% στην ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας).

¹⁰⁴ Στο Νότιο Ημισφαίριο τα πλαίσια τοποθετούνται προς το βορρά για να έχουν τη δυνατότητα να «βλέπουν» τον Ήλιο στην ενεργή επιφάνειά τους κατά τη διάρκεια όλου του έτους.

¹⁰⁵ Ο νότιος προσανατολισμός και η κατάλληλη κλίση εξασφαλίζουν ότι η ηλιακή ακτινοβολία θα προσπίπτει κάθετα ή με την καλύτερη δυνατή γωνία στα πλαίσια για το μέγιστο χρονικό διάστημα που αυτό είναι δυνατόν κατά τη διάρκεια του έτους.

¹⁰⁶ Ο βασικός κανόνας είναι ότι τα πλαίσια πρέπει να τοποθετούνται σε κλίση περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου για να έχουν τη μέγιστη απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αν θέλουμε μεγαλύτερη απόδοση κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η κλίση μεγαλώνει κατά ~15°, ενώ, αν θέλουμε μεγαλύτερη απόδοση κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η κλίση μικραίνει κατά ~15°.

¹⁰⁷ Οριζόντιου, κατακόρυφου ή πολικού άξονα.

¹⁰⁸ Οι ιχνηλάτες [trackers] που ονομάζονται Maximum Power Point Trackers (ιχνηλάτες του σημείου μέγιστης ισχύος) κατευθύνουν τα Φ/Β πλαίσια, ώστε να παρακολουθούν την πορεία του Ήλιου και έχοντας εγκατεστημένα τα κατάλληλα λογικά και ηλεκτρικά κυκλώματα (μικροελεγκτές) έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίζουν την τάση και την ένταση του ρεύματος έτσι ώστε το Φ/Β πλαίσιο να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ), παρέχοντας δηλαδή τη μέγιστη δυνατή ισχύ.

¹⁰⁹ Έχει υπολογιστεί ότι είναι το 0,03-3% της ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ένα Φ/Β πλαίσιο (Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 271).



Εικόνα 4.2 Ένας τύπος ικνηλάτη κίνησης του Ήλιου.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

γ) Αντιστροφέας τάσης [inverter]

Τα Φ/Β πλαίσια (όπως και οι συσσωρευτές που αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια) παρέχουν το ηλεκτρικό ρεύμα υπό συνεχή τάση DC (και μάλιστα σε μικρές σχετικά τιμές). Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα για μικρές φορητές συσκευές (όπως ρολόγια, υπολογιστές τσέπης κ.λπ.). Οι περισσότερες όμως οικιακές συσκευές λειτουργούν με την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου¹¹⁰ (και συνεπώς με εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα). Για το λόγο αυτό είναι αναγκαία η εγκατάσταση ηλεκτρονικής συσκευής που ονομάζεται *αντιστροφέας [inverter]* που μετατρέπει τη συνεχή τάση που παρέχει το Φ/Β πλαίσιο σε εναλλασσόμενη τάση (μονοφασική ή τριφασική). Όταν τα Φ/Β πλαίσια παρέχουν την τάση στο δίκτυο [grid-connected] οι

¹¹⁰ Στις περισσότερες χώρες του κόσμου η τάση είναι 220-230 V (AC) και η συχνότητα 50 Hz (σε ορισμένες χώρες, όπως οι ΗΠΑ, 120 V (AC) και 60 Hz αντίστοιχα).

αντιστροφείς ρυθμίζουν τις βασικές παραμέτρους της ηλεκτρικής ενέργειας (τάση, ένταση ρεύματος, συχνότητα) για να μπορεί να εισαχθεί στο κεντρικό δίκτυο. Αν τα Φ/Β πλαίσια είναι εγκατεστημένα σε απομονωμένα συστήματα (οικιακά-γεωργικά ή άλλα), τότε οι αντιστροφείς ρυθμίζουν τις παραμέτρους για να μπορεί η ηλεκτρική ενέργεια να τροφοδοτήσει τις συσκευές που είναι εγκατεστημένες εκεί.

Η ισχύς που πρέπει να έχουν οι αντιστροφείς εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Υπάρχουν αντιστροφείς με ισχύ που κυμαίνεται από ~100 W έως μερικές δεκάδες kW.

Η μετατροπή της τάσης από συνεχή σε εναλλασσόμενη που πραγματοποιεί ένας αντιστροφέας είναι ουσιαστικά και μετατροπή της ισχύος P_{in} του συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος που εισάγεται σ' αυτόν σε ισχύ P_{out} του εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος που εξάγεται από αυτόν. Η αποτελεσματικότητα με την οποία ο αντιστροφέας πραγματοποιεί τη μετατροπή αυτή καθορίζεται από την απόδοσή του η_{inv} ¹¹¹ που είναι ίση με το παρακάτω πηλίκο:

$$\eta_{inv} = P_{out} / P_{in} = V_{ac} I_{ac} \cos(\varphi) / V_{dc} I_{dc} \quad (4.12)$$

όπου

V_{ac}, I_{ac} : οι τιμές της εναλλασσόμενης τάσης και έντασης ρεύματος

V_{dc}, I_{dc} : οι τιμές της συνεχούς τάσης και έντασης ρεύματος

$\cos(\varphi)$: ο συντελεστής ισχύος

Οι αντιστροφείς τάσης, ανάλογα με το σύστημα που θα εγκατασταθούν και την ακριβή λειτουργία που θα επιτελέσουν, χωρίζονται σε αρκετές κατηγορίες και υποκατηγορίες. Μια βασική κατηγοριοποίηση είναι ανάμεσα στους αντιστροφείς που προορίζονται για απομονωμένα συστήματα και αυτούς που προορίζονται για συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο. Αυτοί με τη σειρά τους μπορούν να χωριστούν σε τετραγωνικούς [rectangular], τραπεζοειδείς [trapezoid] ή ημιτονοειδείς [sine] ανάλογα με τη μορφή της τάσης που παράγουν στην έξοδο¹¹².

¹¹¹ Οι αποδόσεις των αντιστροφών είναι της τάξης του 90%.

¹¹² Περισσότερα για του αντιστροφείς μπορείτε να βρείτε Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 260-269, Luque et al, 2003, σελ. 881-900, Markvart et al, 2003, σελ. 566-575, Φραγκιαδάκης, 2004, σελ. 254-260.

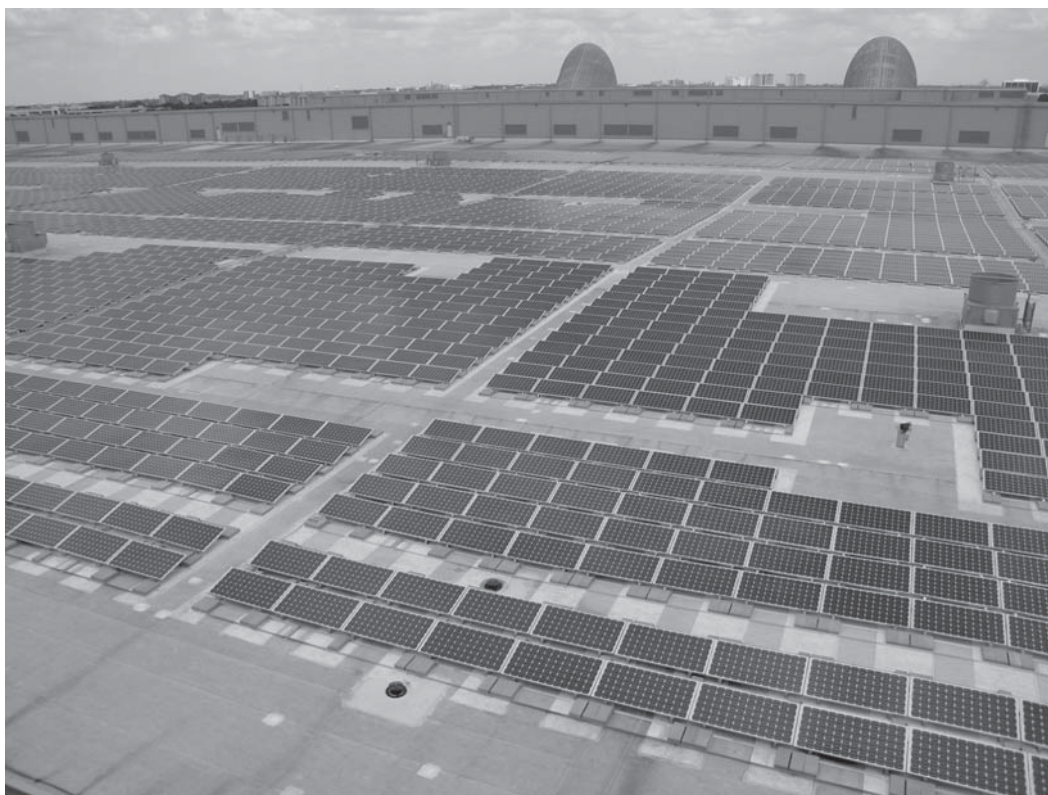
4.5 Φωτοβολταϊκό σύστημα [PV System] – Φωτοβολταϊκή συστοιχία [PV Array]

Τα Φ/Β πλαίσια μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα (ανάλογα με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που χρειάζεται το σύστημα) δημιουργώντας Φ/Β συστοιχία [array]. Σε μια συστοιχία τα Φ/Β πλαίσια που συνδέονται σε σειρά δημιουργούν έναν κλάδο, ενώ οι κλάδοι συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα δίνοντας στη συστοιχία την τελική μορφή της. Μια τυπική Φ/Β συστοιχία μικρής ισχύος είναι της τάξης των 50 W - 2 kW.

Αν εγκατασταθούν σε μια περιοχή πολλές Φ/Β συστοιχίες που συνεργάζονται μεταξύ τους, τότε πρόκειται για Φ/Β πεδίο [PV field] ή πάρκο [PV Park].



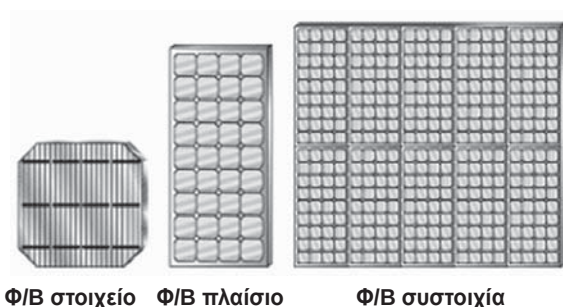
Εικόνα 4.3 Φωτοβολταϊκό πάρκο στο Hausen (Γερμανία).
(Πηγή: commons.wikimedia.org)



Εικόνα 4.4 Φωτοβολταϊκό πάρκο στο Orange County Convention Center στο Ορλάντο, Φλόριντα (ΗΠΑ).

(Πηγή: U.S Department of Energy)

Σήμερα (2013) υπάρχουν Φ/Β πάρκα της τάξης των δεκάδων MW. Αν σε ένα Φ/Β πάρκο συμπεριληφθούν και όλες οι υπόλοιπες διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ., μετατροπείς, αντιστροφείς κ.λπ.), έτσι ώστε να μπορεί να μεταφερθεί στην κατανάλωση, τότε αναφερόμαστε σε *Φ/Β σταθμό [PV station]*.



Σχήμα 4.16 Φωτοβολταϊκό στοιχείο, πλαίσιο και συστοιχία.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

4.5.1 Κατηγορίες Φ/Β συστημάτων

Τα Φ/Β στοιχεία χρησιμοποιούνται σήμερα σε πλήθος εφαρμογών, τόσο οικιακών όσο και επαγγελματικών-βιομηχανικών. Η πιο συνηθισμένη κατηγοριοποίηση που μπορεί να γίνει για να πλοηγηθεί κάποιος σε αυτό το πλήθος των εφαρμογών είναι καταρχάς ο διαχωρισμός των Φ/Β συστημάτων σε *συστήματα ανεξάρτητα από το δίκτυο*¹¹³ [*grid-independent systems*] και *συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο* [*Grid-connected systems*]. Τα πρώτα είναι συστήματα που με τον έναν ή τον άλλον τρόπο παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στις εγκαταστάσεις που συνδέονται (οικίες, επαγγελματικοί χώροι, εφαρμογές στην ύπαιθρο, καταναλωτικές εφαρμογές, μικρές εφαρμογές πόλης κ.λπ.) χωρίς να είναι απαραίτητη η παρουσία ηλεκτρικού δικτύου για να λειτουργήσουν. Τα δεύτερα είναι Φ/Β συστήματα που με τον έναν ή τον άλλον τρόπο είναι συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της περιοχής όπου εγκαθίστανται.

α) Συστήματα ανεξάρτητα από το δίκτυο [*grid-independent systems*]

Ιστορικά είναι τα πρώτα Φ/Β συστήματα¹¹⁴ που αναπτύχθηκαν είτε για καταναλωτικές εφαρμογές (όπως ρολόγια, υπολογιστές τσέπης κ.λπ.), είτε για επιστημονικές εφαρμογές (διαστημικοί σταθμοί κ.λπ.), είτε για οικιακές ή επαγγελματικές εφαρμογές σε απομονωμένες περιοχές¹¹⁵ με δύσκολη πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο (αντλίες νερού, ορειβατικά καταφύγια, αγροτικές οικίες σε απομονωμένα χωριά, φάροι, ραδιοφωνικές ή τηλεφωνικές κεραιές κ.λπ.).

Ανάλογα με το αν έχουν ή όχι τη δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγουν μπορούν να χωριστούν σε *Φ/Β συστήματα άμεσης τροφοδοσίας φορτίου* [*direct coupled*] και *αυτόνομα* [*autonomous*] Φ/Β συστήματα.

● Φ/Β συστήματα άμεσης τροφοδοσίας φορτίου

Πρόκειται για Φ/Β συστήματα στα οποία δεν υπάρχει αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας σε συσσωρευτές (μπαταρίες), όπως ρολόγια, υπολογιστές τσέπης κ.λπ.¹¹⁶. Επίσης σ' αυτή την κατηγορία θα μπορούσαν να ενταχθούν οι Φ/Β

¹¹³ Όπου δίκτυο εννοούμε το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο (μικρής, μεσαίας ή υψηλής τάσης) που υπάρχει σε κάθε περιοχή.

¹¹⁴ Εδώ ο όρος συστήματα αναφέρεται ουσιαστικά σε όλα τα είδη Φ/Β γεννητριών (στοιχείο, πλαίσιο, συστοιχία).

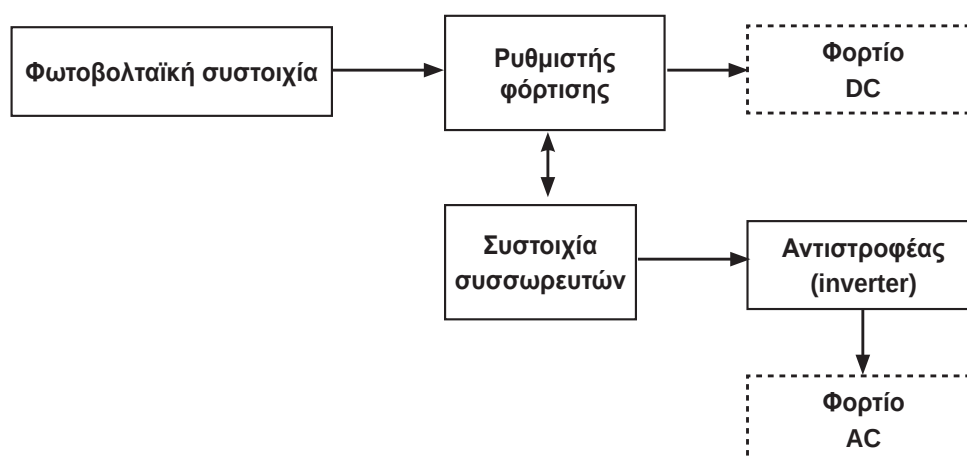
¹¹⁵ Συνήθως του λεγόμενου αναπτυσσόμενου κόσμου.

¹¹⁶ Σε τέτοιων διαστάσεων καταναλωτικές συσκευές συνήθως αρκεί η παρουσία ορισμένων ξεχωριστών Φ/Β στοιχείων για να δοθεί η απαραίτητη ισχύς.

αντλίες, δηλαδή Φ/Β συστήματα που χρησιμοποιούνται σε αγροτικές περιοχές για την άντληση νερού από πηγάδια, λίμνες ή ποτάμια. Σ' αυτή την περίπτωση η ηλεκτρική ενέργεια από τα Φ/Β συστήματα χρησιμοποιείται για να τροφοδοτεί ηλεκτρικές αντλίες που μεταφέρουν το νερό σε υπερυψωμένες δεξαμενές απ' όπου μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιείται για ύδρευση ή για άρδευση.

● **Αυτόνομα Φ/Β συστήματα**

Πρόκειται για αυτόνομα Φ/Β συστήματα [autonomous *pv-systems*] στα οποία υπάρχει σύστημα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας (συνήθως συσσωρευτές – μπαταρίες). Το Σχήμα 4.17 δείχνει το διάγραμμα ενός τέτοιου τυπικού συστήματος.



Σχήμα 4.17 Σχηματικό διάγραμμα αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

Τέτοια συστήματα είναι συνήθως εγκατεστημένα σε οικίες ή επαγγελματικούς χώρους. Το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα που παράγουν τα Φ/Β πλαίσια μπορεί να τροφοδοτήσει είτε απευθείας ηλεκτρικά φορτία [loads] συνεχούς ρεύματος [DC] (π.χ., συσκευές που μπορούν να λειτουργήσουν απευθείας με συνεχές ρεύμα, όπως ραδιόφωνο, τηλεόραση κ.λπ.) είτε μέσω του ρυθμιστή φόρτισης να φορτίσει τους συσσωρευτές του συστήματος. Από τους συσσωρευτές το συνεχές ρεύμα περνάει στον αντιστροφέα και στη συνέχεια τροφοδοτεί με εναλλασσόμενο ρεύμα τα φορτία AC (που ουσιαστικά είναι οι πρίζες του οικιακού ή επαγγελματικού χώρου στον οποίο είναι εγκατεστημένο το σύστημα)¹¹⁷.

¹¹⁷ Υπάρχει η δυνατότητα κατά τις ώρες λειτουργίας του Φ/Β συστήματος ένα τμήμα του συνεχούς [DC] ρεύματος (μέσω ηλεκτρονικού ελεγκτή) να πηγαίνει απευθείας από το Φ/Β στον αντιστροφέα παρακάμπτοντας τους συσσωρευτές.

Υπάρχουν Φ/Β συστήματα που δεν προορίζονται για την κάλυψη των φορτίων οικίας ή επαγγελματικού χώρου αλλά για διαφορετικές εφαρμογές (π.χ., συστήματα πυρανίχνευσης δασικών εκτάσεων ή πάρκων, τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών (κεραιών-αναμεταδοτών κ.λπ.), συστήματα φωτισμού δρόμων ή οικιών, συστήματα πληροφοριών σε στάσεις λεωφορείων – τραμ, κ.λπ.).

Σ' αυτές τις εφαρμογές το Φ/Β σύστημα παρέχει συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα (μέσω ενός ελεγκτή) ταυτόχρονα στο συνδεδεμένο φορτίο συνεχούς ρεύματος [DC Load] και το υπόλοιπο (μέσω του ρυθμιστή φόρτισης) στους συσσωρευτές. Έτσι, κατά τη διάρκεια της ημέρας που τα Φ/Β συστήματα λειτουργούν τροφοδοτούν συνεχώς τις συσκευές με ηλεκτρικό ρεύμα¹¹⁸, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας το απαραίτητο ηλεκτρικό ρεύμα το παρέχουν οι συσσωρευτές. Στην κατηγορία αυτή μπορεί να ενταχθεί και το Φ/Β σύστημα ηλιακού σπιτιού¹¹⁹ απομονωμένων περιοχών του λεγόμενου αναπτυσσόμενου κόσμου. Αυτό είναι σύστημα που περιλαμβάνει Φ/Β πλαίσια (ισχύος ~50 W) και σύστημα αποθήκευσης με μπαταρίες που μπορούν να παρέχουν ηλεκτρική ισχύ, η οποία επαρκεί για εντελώς συγκεκριμένες ανάγκες (π.χ., 3 λαμπτήρες και μια ασπρόμαυρη τηλεόραση)¹²⁰.

Μια ξεχωριστή κατηγορία αποτελούν και τα *υβριδικά Φ/Β συστήματα*. Αυτά είναι συνήθως *αυτόνομα συστήματα* που συνδυάζουν μαζί με τις Φ/Β γεννήτριες και άλλες τεχνολογίες ΑΠΕ παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ., ανεμογεννήτριες)¹²¹, καθώς και μια ηλεκτρογεννήτρια συμβατικού καυσίμου (diesel, φυσικού αερίου κ.λπ.). Αυτό γίνεται για λόγους μεγαλύτερης αξιοπιστίας του συστήματος με την έννοια ότι ανεξάρτητα από τη διαθεσιμότητα της απαιτούμενης ισχύος από ΑΠΕ¹²² το σύστημα να μπορεί να ανταποκρίνεται στη ζήτηση ακόμα και σε ακραίες περιπτώσεις¹²³.

¹¹⁸ Σε περίπτωση που η ισχύς δεν επαρκεί, τότε τη συμπληρώνουν οι συσσωρευτές.

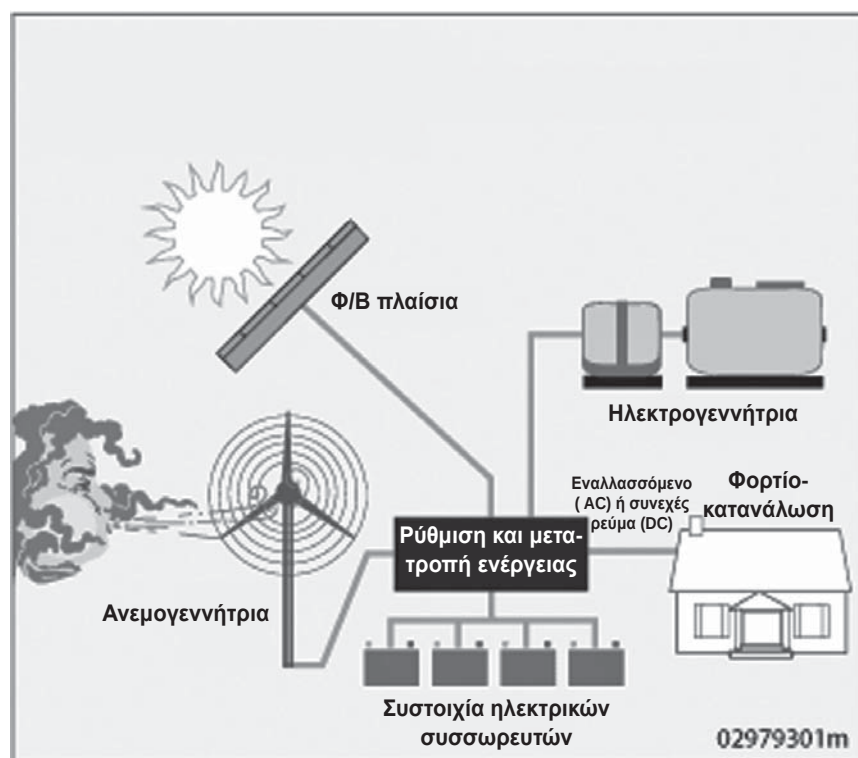
¹¹⁹ Solar Home System.

¹²⁰ Για περισσότερα βλ. Luque et al, 2003, σελ. 758-759 και Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 281-282.

¹²¹ Επίσης μπορούν αν οικονομοτεχνικά είναι βιώσιμες, να εξεταστούν περιπτώσεις εγκατάστασης στο σύστημα μίνι υδροηλεκτρικών μηχανών ή ακόμα και κυψελών καυσίμου [fuel-cells].

¹²² Καθώς, όπως έχει τονιστεί στο κεφ. 1, βασικό χαρακτηριστικό των ΑΠΕ είναι η στοχαστικότητά τους, με αποτέλεσμα να υπάρχουν περιπτώσεις στη διάρκεια μιας χρονιάς που να μην μπορούν να προσφέρουν τη ζητούμενη ισχύ.

¹²³ Τα συστήματα σχεδιάζονται (οικονομοτεχνικά) με βάση τις ετήσιες ανάγκες σε ενέργεια του συγκεκριμένου φορτίου στο οποίο συνδέονται. Για να αποφευχθεί το υπέρμετρο κόστος, συνήθως, υπάρχει φροντίδα να καλύπτεται το 80-90% των ημερών του χρόνου με την ισχύ από τις ΑΠΕ. Στο 10-20% των περιπτώσεων που είτε η διαθέσιμη ισχύς από τις ΑΠΕ είναι μικρότερη από την αναμενόμενη (λόγω συγκυριακών παραγόντων που έχουν σχέση με τα καιρικά φαινόμενα, π.χ., απουσία Ήλιου, αέρα κ.λπ.) είτε η ζήτηση συγκυριακά είναι μεγαλύτερη, το έλλειμμα ενέργειας το καλύπτει η συμβατική πηγή ενέργειας που έχει εγκατασταθεί.



Σχήμα 4.18 Υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

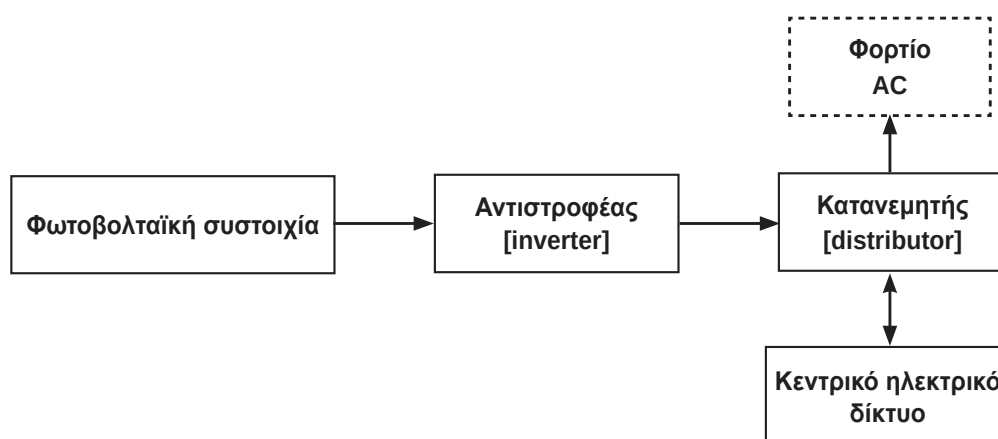
Στο Σχήμα 4.18 φαίνεται το διάγραμμα ενός τέτοιου υβριδικού συστήματος που αποτελείται από Φ/Β πλαίσια, ανεμογεννήτρια, σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με συσσωρευτές και μια ηλεκτρογεννήτρια συμβατικού καυσίμου (diesel, φυσικού αερίου κ.λπ.)¹²⁴. Όταν υπάρχει επαρκής ήλιος ή αέρας, το σύστημα λειτουργεί ως σύστημα ΑΠΕ (στην κεντρική Ευρώπη αλλά και στην Ελλάδα το φθινόπωρο ή το χειμώνα που μειώνεται η ηλιοφάνεια αλλά αυξάνεται η ταχύτητα

¹²⁴ Στο ενεργειακό σύστημα που παρουσιάζεται στο σχήμα δεν υπάρχει ένα απαραίτητο θερμικό ενεργειακό ηλιακό σύστημα (π.χ., ηλιακός θερμοσίφωνας) που να μπορεί να καλύπτει τις ανάγκες για ζεστό νερό χρήσης της οικίας ή της εγκατάστασης. Χρειάζεται να ξεκαθαριστεί ότι πρέπει να αποφεύγεται η κάλυψη αναγκών θερμικής ενέργειας (π.χ., για θέρμανση ζεστού νερού χρήσης) με την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ένα Φ/Β σύστημα αφενός μεν γιατί είναι (τουλάχιστον μέχρι τώρα και για το άμεσο μέλλον) ακριβή μορφή ενέργειας, αφετέρου (και κυρίως) γιατί είναι ενεργειακά παράλογο να μετατρέπουμε πρώτα την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική και στη συνέχεια σε θερμική, ενώ με έναν ηλιακό θερμοσίφωνα (για παράδειγμα) μπορούμε απευθείας να μετατρέψουμε την ηλιακή ενέργεια σε θερμική. Επίσης όταν πρόκειται για οικιακή ή επαγγελματική εγκατάσταση με συσκευές που ως τελικό σκοπό έχουν την παραγωγή θερμότητας (όπως φούρνος-κουζίνα ή θερμάστρα κ.λπ.) είναι προτιμότερο να αξιοποιηθεί η βιομάζα για την απαραίτητη ενέργεια (βλ. κεφ. 6) ή ως τελευταία λύση κάποιο συμβατικό καύσιμο. Επίσης σε περιπτώσεις κλιματισμού το ιδανικό θα ήταν να σχεδιαστεί σύστημα ηλιακού κλιματισμού (βλ. κεφ. 3).

του αέρα, τα Φ/Β πλαίσια και η ανεμογεννήτρια λειτουργούν συμπληρωματικά), ενώ σε περιπτώσεις που η ενέργεια από ΑΠΕ δεν επαρκεί, τότε χρησιμοποιείται η συμβατική ηλεκτρογεννήτρια. Συνήθως η ροή ενέργειας του συστήματος ελέγχεται ηλεκτρονικά και πολλές φορές φροντίζουμε η συμβατική ηλεκτρογεννήτρια να λειτουργεί περισσότερο χρονικό διάστημα έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ομαλότερη και σταθερότερη λειτουργία του συστήματος για να αυξάνεται τόσο η διάρκεια ζωής των μπαταριών όσο και το σύστημα να είναι πιο ευέλικτο (δηλαδή να μπορεί να αυξάνει την ισχύ του γρήγορα σε περιπτώσεις που είναι αναγκαίο).

β) Συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο [grid-connected systems]

Τα συστήματα αυτά συνδέονται στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο ή στο δίκτυο της περιοχής που είναι εγκατεστημένα. Η βασική δομή του συστήματος είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 4.19.



Σχήμα 4.19 Σχηματικό διάγραμμα φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένου στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Ο κύριος τρόπος που λειτουργεί ένα τέτοιο σύστημα είναι ο εξής: Η Φ/Β συστοιχία παρέχει το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα κατά τη διάρκεια της ημέρας σε αντιστροφέα [inverter] και μέσω ενός κατανεμητή-διανεμητή [distributor]¹²⁵ το μοιράζει στο εσωτερικό δίκτυο του χώρου (τις συνηθισμένες πρίζες εναλλασσόμενης τάσης) και (αν περισσεύει) στο κεντρικό δίκτυο. Σε περίπτωση που η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το Φ/Β σύστημα είναι λιγότερη από τις ανάγκες των φορτίων

¹²⁵ Που ουσιαστικά είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που υπολογίζει κάθε στιγμή τα (εναλλασσόμενα) φορτία που είναι συνδεδεμένα στο σύστημα και κατανέμει ανάλογα το ηλεκτρικό ρεύμα.

(ή κατά τη διάρκεια της νύχτας), τότε το κεντρικό δίκτυο παρέχει την επιπλέον ενέργεια που χρειάζεται το σύστημα.

Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης στο δίκτυο και την ισχύ αυτά τα Φ/Β συστήματα ομαδοποιούνται σε 3 βασικές κατηγορίες: τα κατακεντρωμένα (ή αποκεντρωμένα) συστήματα [distributed or decentralized systems], τα κεντρικά συστήματα [centralised systems] και τέλος τα οιωνεί κεντρικά (ή ψευδο-κεντρικά) συστήματα [quasi centralized systems].

- **Τα κατακεντρωμένα (ή αποκεντρωμένα) συστήματα [distributed ή decentralized systems]** είναι συνήθως οικιακά μικρά συστήματα (της τάξης μερικών kW) και αποτελούνται από: Φ/Β πλαίσια (που συνήθως είναι εγκατεστημένα στην οροφή του κτιρίου) και αντιστροφέα [Inverter DC-AC] για να μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο και να το μεταφέρει στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο σε τάση ίση με την οικιακή (220 V στην Ελλάδα και την Ευρώπη 110 V στις ΗΠΑ και κάποιες άλλες χώρες).

Τα κατακεντρωμένα Φ/Β συστήματα μπορούν να διαχωριστούν στη συνέχεια σε εκείνα που χρησιμοποιούν το κεντρικό δίκτυο ως βοηθητική πηγή ισχύος [grid back-up systems] και σε εκείνα που βρίσκονται σε συνεχή αλληλεπίδραση με το δίκτυο [grid interactive]. Τα πρώτα είναι Φ/Β συστήματα που σχεδιάζονται έτσι ώστε να καλύπτουν όλες τις ηλεκτρικές ενεργειακές ανάγκες του σπιτιού (ή της εγκατάστασης) σε μηνιαία βάση¹²⁶ και χρησιμοποιούν το κεντρικό δίκτυο μόνο σε περιπτώσεις έκτακτης ενεργειακής ζήτησης ή σε περιπτώσεις βλάβης του Φ/Β συστήματος¹²⁷. Στα δεύτερα Φ/Β συστήματα η εγκατεστημένη Φ/Β ισχύς υπολογίζεται με βάση τις ετήσιες ενεργειακές ανάγκες της οικίας (ή της εγκατάστασης)¹²⁸ και έτσι το Φ/Β σύστημα βρίσκεται σε διαρκή σύνδεση με το δίκτυο μέσω μιας ηλεκτρονικής μονάδας ελέγχου των ροών ενέργειας, έτσι ώστε σε περίπτωση περίσσειας ενέργειας από τα Φ/Β συστήματα, αυτή να διοχετεύεται κατευθείαν στο κεντρικό δίκτυο, ενώ σε περιπτώσεις ελλείμματος το δίκτυο να παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια στην εγκατάσταση. Ένας μετρητής αυτών των ροών αποτιμά το μηνιαίο

¹²⁶ Αυτό συνήθως σημαίνει μεγαλύτερη εγκατεστημένη Φ/Β ισχύ απ' όταν οι ενεργειακές ανάγκες υπολογίζονται σε ετήσια βάση.

¹²⁷ Συνήθως σ' αυτά τα συστήματα υπάρχει και σύστημα αποθήκευσης της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας (συσσωρευτές) που αποδίδει την ενέργεια στη διάρκεια της νύχτας ή όταν υπάρχει ανάγκη.

¹²⁸ Ο σχεδιασμός της εγκατεστημένης ισχύος του συστήματος περιλαμβάνει οικονομοτεχνικά κριτήρια που αλλάζουν συνεχώς ανάλογα με τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας (kWh) που δίνει ο κεντρικός παροχέας του δικτύου (στην Ελλάδα η ΔΕΗ) για Φ/Β ενέργεια που εισέρχεται στο δίκτυο από ένα Φ/Β σύστημα.

ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ Φ/Β ηλεκτρικής ενέργειας και ηλεκτρικής ενέργειας δικτύου.

- **Τα κεντρικά συστήματα [centralised systems]** είναι συνήθως μεγάλης ισχύος, της τάξης των εκατοντάδων kW_p μέχρι μερικά MW_p και μερικές φορές συνιστούν μεγάλα Φ/Β πάρκα. Τα Φ/Β πλαίσια εγκαθίστανται σε συστοιχίες συνήθως στο έδαφος και σπανιότερα σε στέγες μεγάλων βιομηχανικών ή άλλων εγκαταστάσεων. Τα πλαίσια μπορεί να είναι σε σταθερή βάση (τις περισσότερες φορές) ή να καθοδηγούνται από συστήματα ικνηλατών ενός ή δύο αξόνων. Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγουν εισέρχεται στο κεντρικό δίκτυο μέσω αντιστροφέων [inverters] σε μεσαία ή υψηλή τάση.
- **Τα οιωνοί κεντρικά (ή ψευδο-κεντρικά) συστήματα [quasi centralized systems]** είναι συστήματα που μέχρι τώρα έχουν μικρή διάδοση. Η ονομασία τους υποδηλώνει ότι έχουν χαρακτηριστικά των κεντρικών συστημάτων αλλά με κάποιες ιδιαιτερότητες. Αποτελούν συνδυασμό μικρών συστημάτων (της τάξης των kW) και μεγαλύτερων (της τάξης των εκατοντάδων kW), τα οποία είναι μεταξύ τους συνδεδεμένα σε μια γραμμή συνεχούς ρεύματος (τάσης) και στη συνέχεια συνδέονται όλα μαζί στο κεντρικό δίκτυο μέσω ενός μεγάλης ισχύος αντιστροφέα. Η επιλογή για το πόσα και ποια Φ/Β συστήματα θα συνδεθούν μεταξύ τους στη γραμμή συνεχούς ρεύματος (τάσης) γίνεται με βάση τεχνικοοικονομικά κριτήρια λαμβάνοντας υπόψη το μειονέκτημα που προκύπτει από τις απώλειες μεταφοράς του συνεχούς ρεύματος έως το σημείο εισαγωγής του στο κεντρικό δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος (που εξαρτώνται από την απόσταση) και το πλεονέκτημα από τις μικρότερες σχετικές απώλειες του αντιστροφέα (αντί πολλών ξεχωριστών) που εγκαθίστανται στο σημείο εισαγωγής του συνεχούς ρεύματος στο κεντρικό δίκτυο. Αν η εισαγωγή του ρεύματος στο δίκτυο γίνεται σε γραμμή μεσαίας ή υψηλής τάσης, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη και η εγκατάσταση ενός μετασχηματιστή μεσαίας ή υψηλής τάσης.

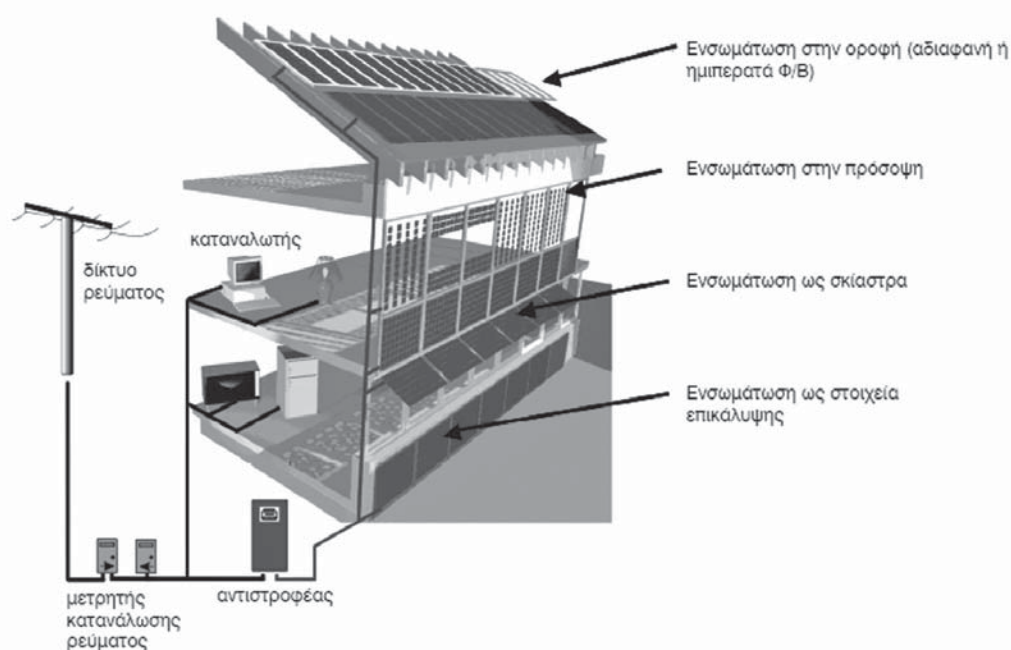
γ) Φ/Β συστήματα ενσωματωμένα σε κτίρια [Buildings Integrated PhotoVoltaics, BIPV]

Τα Φ/Β συστήματα ενσωματωμένα σε κτίρια (ΦΒΕΚ) ανήκουν συνήθως στην κατηγορία Φ/Β συστημάτων που είναι συνδεδεμένα στο κεντρικό δίκτυο¹²⁹. Ένα Φ/Β

¹²⁹ Κάτι τέτοιο δεν είναι όμως απαραίτητο, καθώς μπορούν να λειτουργήσουν και σε συστήματα εκτός δικτύου. Συνήθως όμως οι αισθητικές παράμετροι ή η απαιτητική λειτουργικότητα που αυτά τα Φ/Β συστήματα εξασφαλίζουν απαιτούνται σε κτίρια ενσωματωμένα στον οικιστικό ιστό και συνεπώς συνδεδεμένα με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο.

σύστημα θεωρείται ΦΒΕΚ όταν η εγκατάστασή του έχει ενταχθεί στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό του κτιρίου και η τοποθέτησή του γίνεται παράλληλα με την κατασκευή του οικοδομήματος. Τα ΦΒΕΚ τότε αποτελούν δομικό στοιχείο του κτιρίου ικανοποιώντας σε μεγάλο βαθμό αισθητικά κριτήρια (που ένα μη ενσωματωμένο Φ/Β σύστημα δε θα ικανοποιούσε). Τα ΦΒΕΚ μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- συστήματα ενσωματωμένα στη στέγη των κτιρίων (κεκλιμένη ή επίπεδη στέγη με αδιαφανή ή ημιπερατά πλαίσια)
- συστήματα ενσωματωμένα στην πρόσοψη κτιρίων (παράθυρα φωταγωγοί, σκίαστρα, κιγκλιδώματα, άλλα στοιχεία επικαλύψεων κ.λπ.).



Σχήμα 4.20 Εναλλακτικές δυνατότητες ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών πλαισίων σε ένα κτίριο. (Πηγή: ReSEL)

Σήμερα υπάρχουν εκατοντάδες επιτυχημένα παραδείγματα ΦΒΕΚ σε όλο τον κόσμο τόσο σε κτίρια όσο και σε διάφορες άλλες εγκαταστάσεις, όπως φωτεινοί σηματοδότες, ηχοπετάσματα, πέργκολες κ.λπ.¹³⁰.

¹³⁰ Για περισσότερα πάνω στα ΦΒΕΚ (BIPV) βλ. Tsoutsos et al, 2008 και Kalogirou, 2009, σελ. 495.



Εικόνα 4.5 Φωτοβολταϊκό σύστημα 2,54 kW εγκατεστημένο στη στέγη κτιρίου στη Μασαχουσέτη (ΗΠΑ).

(Πηγή: US Department of Energy)

4.5.2 Συνολικός συντελεστής απόδοσης Φ/Β συστήματος – Αλυσίδα ενεργειακών μετατροπών

Έχοντας υπόψη όσα έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα για την απόδοση των Φ/Β στοιχείων (κυψελών) και πλαισίων, είναι δυνατόν να αναλυθεί η συνολική αλυσίδα ενεργειακών μετατροπών που συμβαίνουν σε ένα Φ/Β σύστημα και να δικαιολογηθεί η απόδοση που παρουσιάζουν σε πρότυπες συνθήκες ελέγχου [STC] (μεταξύ 11-14% για τα Φ/Β συστήματα πυριτίου) και σε ετήσια βάση¹³¹ (10-12%).

¹³¹ Όταν εγκαθίσταται ένα Φ/Β σύστημα σε μια περιοχή, οι πραγματικές συνθήκες στις οποίες θα λειτουργήσει είναι διαφορετικές από τις συνθήκες στις οποίες έχουν δοκιμαστεί και ελεγχθεί τα Φ/Β πλαίσια (δηλαδή τις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC)). Έτσι, για να αποτιμηθεί η *πραγματική ισχύς* που δίνει ένα Φ/Β πλαίσιο στις πραγματικές μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν σε έναν τόπο, έχει εισαχθεί η έννοια της ετήσιας απόδοσης [annual efficiency]. Οι πραγματικές τιμές πυκνότητας ηλιακής ισχύος, φάσματος ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος αποτιμώνται σε συνάρτηση με τη συχνότητα εμφάνισής τους

Η αλυσίδα ενεργειακών μετατροπών που συμβαίνουν μεταξύ της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε Φ/Β στοιχείο μέχρι την εισαγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 4.21.



Σχήμα 4.21 Η ενεργειακή αλυσίδα μετατροπών σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.

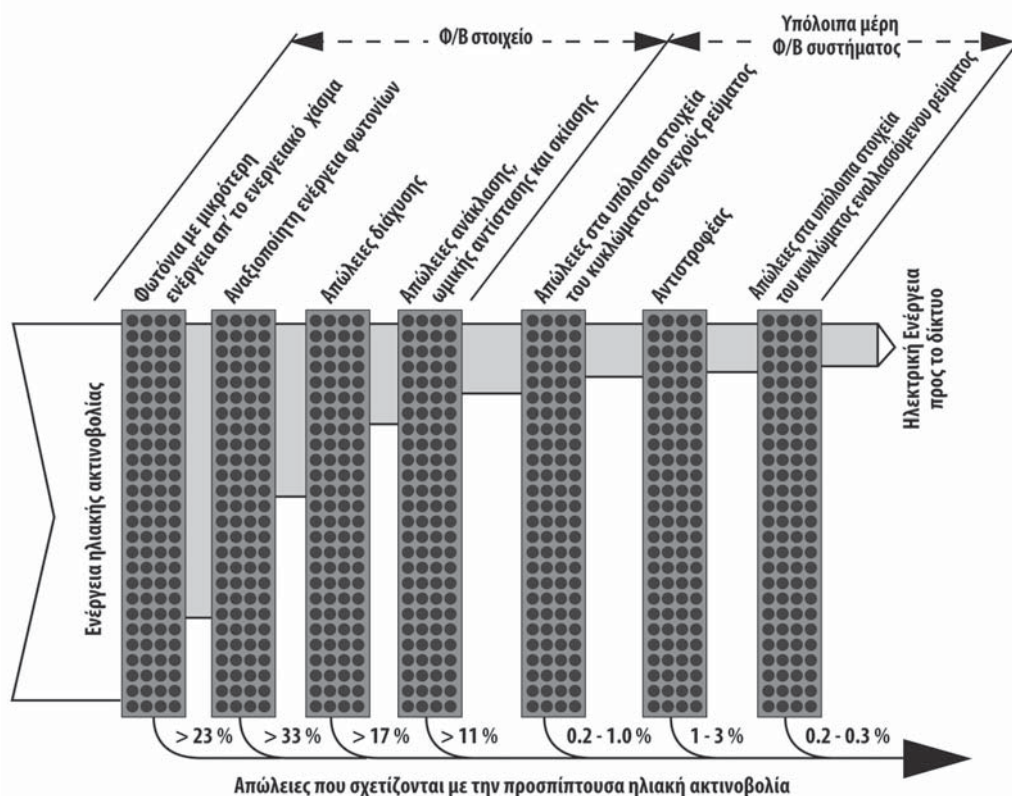
Η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω του Φ/Β φαινομένου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια του συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος που παράγει το Φ/Β στοιχείο με απόδοση που είναι έως περίπου 20% (για τα Φ/Β στοιχεία πυριτίου) και λίγο μικρότερη για τα Φ/Β πλαίσια. Στη συνέχεια το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα [DC] θα πρέπει μέσω των αντιστροφέων να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα [AC] για να εισαχθεί στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο (για τα συνδεδεμένα στο δίκτυο Φ/Β συστήματα). Αυτή η μετατροπή μειώνει ακόμα περισσότερο την απόδοση του Φ/Β συστήματος, καθώς υπάρχουν απώλειες πάνω στον αντιστροφέα όσο και στα καλώδια μεταφοράς (ωμικές και άλλες απώλειες)¹³². Έτσι, από την αρχική ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο Φ/Β στοιχείο μόνο το ~11-14% [STC]¹³³ μετατρέπεται τελικά σε ηλεκτρική ενέργεια που φτάνει στο ηλεκτρικό δί-

και σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που δίνονται από τους κατασκευαστές των πλαισίων. Με αυτό τον τρόπο αποτιμάται η πραγματική απόδοση των Φ/Β πλαισίων στη διάρκεια του έτους, που είναι κι αυτή που ενδιαφέρει τον εγκαταστάτη του Φ/Β συστήματος. Η ετήσια απόδοση είναι μικρότερη από την απόδοση σε συνθήκες STC.

¹³² Για τα μη συνδεδεμένα στο δίκτυο Φ/Β συστήματα που δεν έχουν αντιστροφέα, οι απώλειες συνδέονται με τη λειτουργία των συσσωρευτών (ή του οποιουδήποτε άλλου συστήματος αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που θα πρέπει να διαθέτουν).

¹³³ 10-12% σε ετήσια βάση (ετήσια απόδοση).

κτυο¹³⁴. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται μέσες τιμές των διαφόρων απωλειών που συμβαίνουν στην αλυσίδα ενεργειακών μετατροπών ενός Φ/Β συστήματος.



Σχήμα 4.22 Οι απώλειες στα διάφορα στάδια των ενεργειακών μετατροπών σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.

Το συντριπτικό ποσοστό των απωλειών (~84%) οφείλεται σε φαινόμενα που συμβαίνουν κατά την πρόσπτωση και την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στο Φ/Β στοιχείο, ενώ μόνο ένα μικρό ποσοστό (~3-5%) οφείλεται στα υπόλοιπα εξαρτήματα [components] του Φ/Β συστήματος (π.χ., καλώδια, αντιστροφείς κ.λπ.).

¹³⁴ Συνεχώς αυτές οι αποδόσεις βελτιώνονται (φτάνουν σε ποσοστά της τάξης του 18%) αλλά (όπως έχει εξηγηθεί και παραπάνω) υπάρχουν περιορισμοί που βάζουν οι φυσικοί νόμοι και δυσκολεύουν την επιστημονική προσπάθεια για μεγιστοποίηση των αποδόσεων. Έχει υπολογιστεί ότι για τα Φ/Β στοιχεία πυριτίου η μέγιστη θεωρητική απόδοση που μπορούν να φτάσουν (με βάση τους περιορισμούς των φυσικών νόμων όπως σήμερα είναι γνωστοί) είναι 40,7% για Φ/Β στοιχείο (κυψέλη) που φωτίζεται από ακτινοβολία μελανού σώματος 6.000 K και θερμοκρασίας Φ/Β στοιχείου 300K (Shockley W., Queisser H., 1961, *J. Phys.* 32, σελ. 510-519). Σε περιπτώσεις που στο Φ/Β στοιχείο προσπίπτει συγκεντρωμένη-συμπυκνωμένη ηλιακή ακτινοβολία (δεκάδων ή εκατοντάδων ήλιων) ήδη έχουν αναφερθεί αποδόσεις τις τάξης του ~40% (Noun. B., 2007, *Solar Power, Renewable Energy 2007/2008, WREN*, σελ. 62, 63). Για περισσότερα πάνω στο θέμα των ορίων της απόδοσης των Φ/Β στοιχείων βλ. Luque et al, 2003, σελ. 113-151 και Markvart et al, 2003, σελ. 123-134.