



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ – ΑΡΙΘΜΟΣ 1172**

## **ΤΙΤΛΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

**Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω  
φωτοβολταϊκών συστημάτων και η εξέλιξη της  
τεχνολογίας τον 21<sup>ο</sup> αιώνα**

**ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ : ΑΡΓΥΡΟΥΛΑ Φ. ΒΕΛΛΩΡΑ**

**ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΣΤΑΘΑΤΟΣ ΗΛΙΑΣ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΕΣ : ΣΤΑΘΑΤΟΣ - ΜΕΝΤΗ - ΚΑΡΕΛΗΣ**

**Πάτρα, Οκτώβριος 2011**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την παρούσα πτυχιακή εργασία έχω ως στόχο να δώσω στον αναγνώστη μια βασική κατανόηση της λειτουργίας των ηλιακών κυψελών. Τα φυσικά χαρακτηριστικά των ηλιακών κυττάρων, και τα υλικά που επιτρέπουν την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική, αναφέρονται εκτενέστατα στην παρούσα εργασία. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν την ικανότητα των ημιαγωγών να απορροφούν τα φωτόνια και να τα μετατρέπουν σε ηλεκτρικό ρεύμα.

Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει από αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα για την ανάπτυξη συστημάτων που θα παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια. Τέτοιες προσπάθειες έγιναν αμέσως μετά τον Α παγκόσμιο πόλεμο από αμερικανικά πανεπιστήμια αλλά μόνο σε ερευνητικό επίπεδο. Μετά και το τέλος το Β΄ παγκόσμιου πολέμου χώρες όπως οι ΗΠΑ, Γερμανία και Ιαπωνία άρχισαν να ενδιαφέρονται για τις περιβαλλοντικές συνθήκες και φυσικά για τρόπους παράγωγης ενέργειας μέσω πράσινης οικονομίας. Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 μεγάλες βιομηχανικές χώρες της Ευρώπης και της Αμερικής άρχισαν να φτιάχνουν φωτοβολταϊκά πάρκα για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας.

Τώρα μια δεκαετία μετά το 2000 πολλές χώρες ανά τον κόσμο έχουν στραφεί στην παραγωγή ενέργειας μέσω Φ/Β συστημάτων. Ευχάριστο είναι πως και η χώρα μας έχει ξεκινήσει δυναμικά την εγκατάσταση τέτοιων μορφών παραγωγής ενέργειας, ενώ αρκετές τράπεζες χρηματοδοτούν την εγκατάσταση Φ/Β σε στέγες σπιτιών.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους αυτούς τους ανθρώπους που συνέβαλλαν στο να φέρω εις πέρας την παρούσα Προπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή Σταθάτο Ηλία για την καθοδήγηση και οργάνωση της διπλωματικής εργασίας, για το πάντα θετικό πνεύμα του, για την πολύτιμη βοήθειά του, τις χρήσιμες συμβουλές του, την καθοδήγησή του και τη διαρκή υποστήριξή του, τόσο κατά τη διεξαγωγή της υλοποίησης όσο και κατά τη συγγραφή της παρούσας εργασίας. Θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Φώτιο και Αικατερίνη για την στήριξη, την αμέριστη συμπαράσταση, τη συνολική τους βοήθεια και προ πάντων κατανόηση και ανοχή καθ' όλο το χρονικό διάστημα των σπουδών μου. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους και συναδέλφους μου για τα όμορφα φοιτητικά χρόνια που περάσαμε μαζί.

Αφιερώνω αυτή την εργασία στους γονείς μου και τα αδέρφια μου.

Αργυρούλα Φ. Βελαώρα

Πάτρα, Οκτώβριος 2011



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με την παρούσα πτυχιακή εργασία θα αναφερθούμε στη νέα και ταχέως αναπτυσσόμενη μορφή ενέργειας που προέρχεται από την εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας. Μια μορφή ενέργειας καθαρή και άκρως οικολογική που το μόνο που χρειαζόμαστε είναι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και φυσικά τον Ήλιο. Στην παρούσα εργασία γίνεται αναφορά για την ιστορική εξέλιξη των φωτοβολταϊκών όπως και τη χρήση τους από τις Ευρωπαϊκές χώρες ανάλογα με τη σχετική τους ηλιοφάνεια. Εν συνεχεία αναφερόμαστε στην ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας τόσο για οικιακή χρήση όσο και για βιομηχανική χρήση από μικρές και μεγάλες εταιρείες. Προχωρώντας τη μελέτη της εργασίας θα αναφερθούμε σε τεχνολογικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και θα χρησιμοποιηθούν στο μέλλον καθώς και την πορεία των ερευνών για την παραγωγή υλικών μεγάλης απόδοσης και χαμηλού κόστους. Επιπλέον γίνεται εκτενέστατη αναφορά σχετικά με την λειτουργία των φωτοβολταϊκών καθώς και τη σύνδεση της παραγόμενης ενέργειας με το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και για μορφές ιδιωτικής κατανάλωσης. Τέλος γίνεται εκτενής παρουσίαση των μαθηματικών αλγορίθμων που χρειάζεται κάθε μελετητής για τη σωστή εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού συγκροτήματος που έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγωγής και φυσικά περιορισμού του κόστους.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή	9
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup></b>	<b>10</b>
Η ιδέα της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια	
1.1 Η ηλιακή ενέργεια	10
1.2 Η μεγάλη εικόνα της ηλιακής ενέργειας	11
1.3 Οι έξι μύθοι των φωτοβολταϊκών	15
1.4 Ιστορία των φωτοβολταϊκών	21
1.5 Το κόστος των Φ / Β και οι προβλέψεις αγοράς	25
1.6 Ποιοι είναι οι στόχοι της έρευνας Φ / Β και ποια η παραγωγή σήμερα	29
1.7 Παγκόσμιες τάσεις και εφαρμογές	30
1.8 Το κρυσταλλικό πυρίτιο και η πρόοδος του	35
1.9 Η επιφανειακή πρόοδος	38
1.10 Τα Φ / Β συστήματα	42
1.11 Η ισορροπία των συστημάτων	42
1.12 Το μέλλον των Φ / Β συστημάτων	47
1.13 Συμπεράσματα	49
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup></b>	<b>50</b>
Χαρακτηριστικά μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια	
2.1 Χαρακτηριστικά μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια	50
2.2 Περίληψη	59
2.3 Η Ανάπτυξη και των Φ / Β	59

2.4 Η η/ε για βιομηχανική χρήση	62
2.5 Η ενέργεια στο διάστημα	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup>	66
Η φύση των ηλιακών κυψελών	
3.1 Εισαγωγή	66
3.2 Θεμελιώδεις ιδιότητες των ημιαγωγών	69
3.2.1 Η κρυσταλλική δομή	69
3.2.2 Δομή Ενέργειας	70
3.2.3 Μπάντες πυκνότητας και καταστάσεις	73
3.2.4 Συγκεντρώσεις Ισορροπίας	73
3.2.5 Η απορρόφηση του φωτός	77
3.2.6 Ανασχεδιασμός των κυττάρων	82
3.2.7 Μεταφορές Carrier	87
3.2.8 Εξισώσεις Semiconductor	91
3.2.9 Εξίσωση μειωμένης κατά Diffusion	92
3.3 Ηλεκτροστατικός κόμβος	93
3.4 Βασικά υπολογιστικά στοιχεία κυττάρων	98
3.4.1 Ηλιακή ενέργεια οριακών συνθηκών Cell	98
3.4.2 Τα χαρακτηριστικά των τερματικών	99
3.4.3 Τα Χαρακτηριστικά των ηλιακών κυψελών	103
3.4.4 Ιδιότητες των ηλιακών κυττάρων	107
3.4.5 Διάρκεια ζωής και επιδράσεις ανασυνδυασμού επιφανείας	108
3.4.6 Αναλογία για την κατανόηση της Solar λειτουργία κυψελών	109
3.5.1 Αποτελεσματικότητα και το χάσμα των μπάντων	110

<b>3.5.2 Η φασματική απόκριση</b>	<b>111</b>
<b>3.5.3 παρασιτικές επιπτώσεις Αντίστασης</b>	<b>113</b>
<b>3.5.4 Επίδραση της θερμοκρασίας</b>	<b>116</b>
<b>3.5.5 Συμπυκνωτής ηλιακών κυψελών</b>	<b>118</b>
<b>3.5.6 Υψηλού επιπέδου Injection</b>	<b>119</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>122</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>123</b>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εργασία αυτή εξετάζονται οι πηγές ενέργειας που μετατρέπονται σε ηλεκτρική. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι τρόποι που πραγματοποιείται αυτή η μετατροπή μέχρι σήμερα, καθώς και νέες μέθοδοι, βελτιωμένες ως προς την αποδοτικότητα ή ως προς την φιλικότητά τους προς το περιβάλλον, που βρίσκονται αυτή την εποχή υπό έρευνα. Κάθε πηγή εξετάζεται ξεχωριστά ως προς την ύπαρξη αποθεμάτων και την δυνατότητα πρόσβασης σ' αυτά, την απόδοσή της (θερμική και οικονομική), και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την χρησιμοποίησή της.

Με την καθιέρωση του εναλλασσόμενου ρεύματος και της ανύψωσης της τάσης μεταφοράς γίνεται δυνατή η μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις από τις μονάδες παραγωγής, και έτσι δίνεται νέα ώθηση στην εξάπλωση του ηλεκτρισμού. Οι βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες έστρεψαν τις προσπάθειές τους στον περιορισμό της εξάρτησης αυτής με δύο τρόπους: α) με την λήψη μέτρων εξοικονόμησης και ορθολογικής χρήσης της ενέργειας και β) με την έρευνα για νέες πηγές που θα υποκαθιστούσαν το πετρέλαιο.

Τα ίδια αυτά μέτρα υπαγορεύονται και από μία ακόμη ανάγκη που έγινε κατανοητή μόλις τα τελευταία χρόνια: την προστασία του περιβάλλοντος, του οποίου η μόλυνση έχει φθάσει σε ανησυχητικά επίπεδα λόγω των έντονων δραστηριοτήτων του ανθρώπου. Για παράδειγμα το φαινόμενο του θερμοκηπίου, που δημιουργείται από την συσσώρευση CO<sub>2</sub> στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, είναι ένα από τα βασικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα στα οποία καλείται η ανθρωπότητα να βρει λύση.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## Η ιδέα της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια

### 1.1 Η ηλιακή ενέργεια

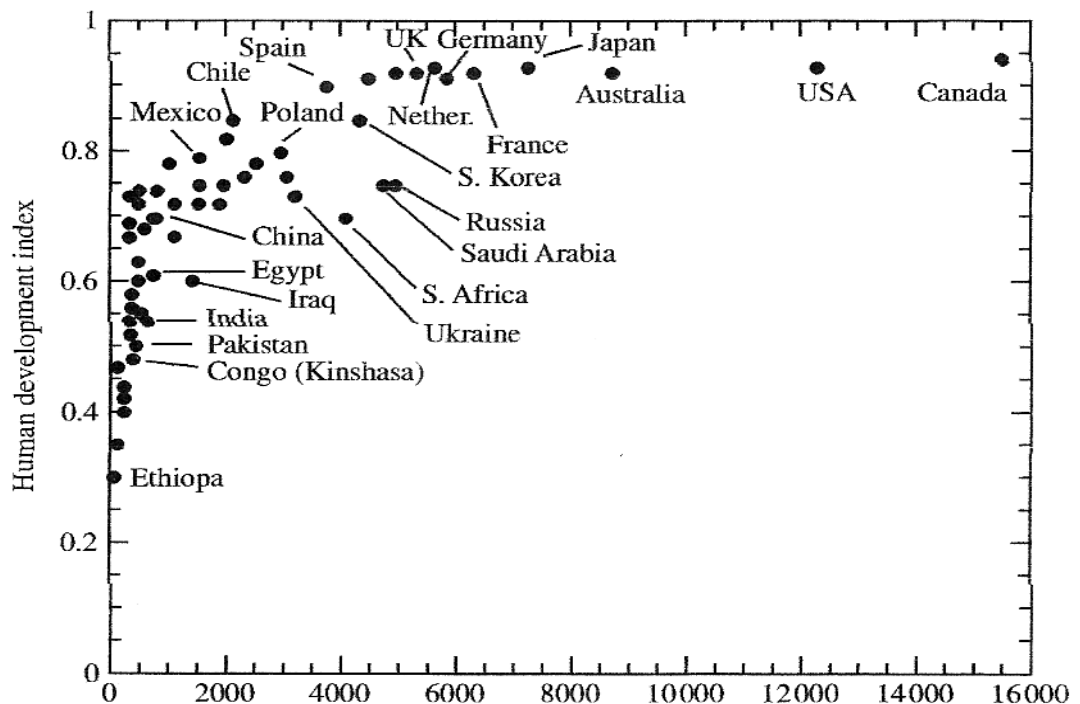
Η Ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια, γνωστή και ως φωτοβολταϊκή, έχει δείξει από τη δεκαετία του 1970 ότι η ανθρωπότητα μπορεί να πάρει ένα σημαντικό μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς την καύση ορυκτών ή τη δημιουργία πυρηνικών αντιδράσεων σχάσης. Τα Φωτοβολταϊκά μας βοηθούν αποφευχθούν οι περισσότερες από τις απειλές που συνδέονται με τις σημερινές τεχνικές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και επίσης έχει πολλά άλλα οφέλη. Το Φωτοβολταϊκό έχει δείξει ότι μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια για το ανθρώπινο είδος για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Τα Φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μια αγροτική οικογένεια που ζει 100 χιλιόμετρα μακριά από το πλησιέστερο ηλεκτρικό σταθμό σύνδεσης, επιτρέποντας έτσι στην οικογένειά να έχει, ηλεκτρικό φως αντί για λάμπες, να ακούσει ραδιόφωνο, κλπ. Μπορεί να βοηθήσει μια μεγάλη ηλεκτρική εταιρεία για την αντιμετώπιση του έντονου φόρτου της, σχετικά με καυτά καλοκαιρινά απογεύματα, όταν τα κλιματιστικά δουλεύουν με πλήρες ωράριο. Επιτρέπει σε σπίτια και επιχειρήσεις ένα νέο επίπεδο εγγυημένης ενέργειας και ασφάλειας. Τέλος τα φωτοβολταϊκά έχουν τροφοδοτήσει δορυφόρους σε τροχιά γύρω από τη Γη για πάνω από 30 χρόνια. Τα Φωτοβολταϊκά είναι μια ενδυνάμωση της τεχνολογίας που μας επιτρέπει να κάνουμε εντελώς καινούρια πράγματα. Μας επιτρέπει να εξετάσουμε νέους τρόπους παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε διάφορες αγορές σε ολόκληρο τον κόσμο. Επίσης, μας επιτρέπει να κάνουμε αυτό που ήδη κάνουμε, αλλά να το κάνει με βιώσιμο τρόπο και χωρίς ρύπανση.

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι η πλέον ευέλικτη μορφή ενέργειας που έχουμε. Είναι αυτό που επιτρέπει στους πολίτες από τις αναπτυγμένες χώρες να έχουν σχεδόν καθολική παροχή φωτισμού, ψύξης, κλπ. Η πρόσβαση και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι στενά συνδεδεμένα με την ποιότητα ζωής. Στο σχήμα 1.1 δείχνει την ανθρώπινη ανάπτυξη του δείκτη για πάνω από 60 χώρες, το οποίο περιλαμβάνει πάνω από το 90% της Γης. Σε σχέση με την ετήσια κατά κεφαλήν κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος.

Ο δείκτης HDI καταρτίζεται από τα Ηνωμένα Έθνη και υπολογίζεται με βάση το προσδόκιμο ζωής, και το κατά κεφαλή Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν. Για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής σε πολλές χώρες, μετράται το HDI τους, που θα απαιτήσει την αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από παράγοντες του 10, από μερικές εκατοντάδες σε μερικές χιλιάδες κιλοβατώρες (kWh) ανά έτος. Οι επιλογές μας είναι να συνεχίσουν να εφαρμόζουν τις απαντήσεις του περασμένου αιώνα, όπως η καύση περισσότερων ορυκτών καυσίμων ή η κατασκευή περισσότερων πυρηνικών σταθμών, ή την εφαρμογή στη νέα χιλιετία των

ανανεώσιμων πηγών και ευρέως διαθέσιμες καθαρές μορφές ενέργειας όπως τα φωτοβολταϊκά και ο άνεμος.



Σχήμα 1.1 Ανθρώπινη ανάπτυξη του δείκτη για πάνω από 60 χώρες

## 1.2 Η μεγάλη εικόνα της ηλιακής ενέργειας

Τα Φωτοβολταϊκά είναι η τεχνολογία που παράγει συνεχές ρεύμα (DC) ηλεκτρικής ισχύς μετρούμενης σε Watt από ημιαγωγούς όταν φωτίζονται από τα φωτόνια. Όσο το φως λάμπει η ηλιακή κυψέλη παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Όταν σταματήσει το φως, η ηλεκτρική ενέργεια σταματά. Τα Ηλιακά κύτταρα δεν χρειάζονται ποτέ φόρτιση σαν μια μπαταρία. Ο πίνακας 1.1 περιλαμβάνει μερικά από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών. Συχνά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι σχεδόν εντελώς αντίθετα της συμβατικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα. Για παράδειγμα, τα ορυκτά καύσιμα έχουν μειονεκτήματα όπως ένα ευρύ φάσμα από επικίνδυνες εκπομπές, τα μέρη του φθείρονται, αυξάνοντας σταθερά το κόστος των καυσίμων. Δύο κοινά χαρακτηριστικά, είναι ότι τα φωτοβολταϊκή και τα ορυκτά καύσιμα και οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής είναι πολύ αξιόπιστες. Σημειώστε ότι πολλά από τα μειονεκτήματα είναι μη τεχνικά, αλλά αφορούν την οικονομία και τις υποδομές.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, ο μέσος ρυθμός αύξησης του ποσοστού της παραγωγής ήταν πάνω 33% ετησίως. Τα ηλιακά κύτταρα κατασκευάζονται από ημιαγωγούς, τα οποία έχουν συνδετικό ασθενώς ηλεκτρόνιων και καταλαμβάνουν μια μπάνα της ενέργειας που ονομάζεται ζώνη σθένους. Όταν η ενέργεια υπερβαίνει ένα ορισμένο όριο, το λεγόμενο χάσμα ζωνών της ενέργειας, εφαρμόζεται σε ένα ηλεκτρόνιο σθένους, το ηλεκτρόνιο είναι ελεύθερο να κινηθεί γύρω σε μια νέα

ενεργειακή ζώνη που ονομάζεται ζώνη διεξαγωγής όπου μπορεί να αλλάξει η συμπεριφορά της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του υλικού. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας χωρίζονται από τη ζώνη σθένους και από το χάσμα ζωνών. Αυτή η ενέργεια που απαιτείται για να απελευθερώσει το ηλεκτρόνιο μπορεί να παρέχεται από τα φωτόνια, τα οποία είναι σωματίδια του φωτός.

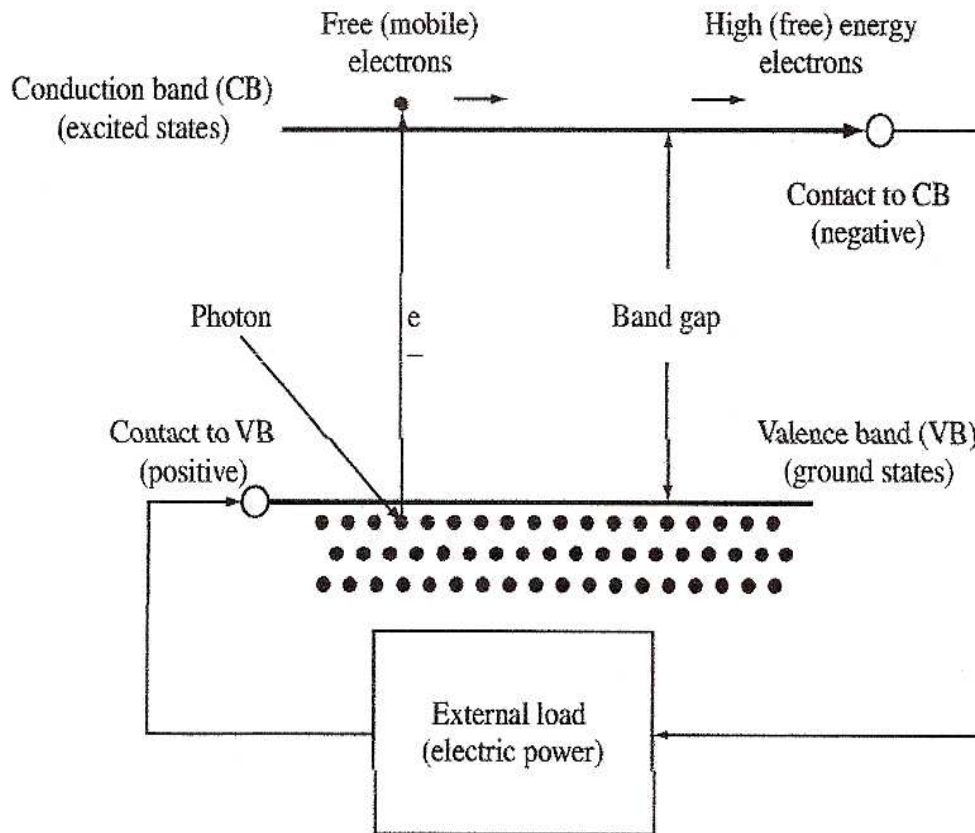
**Πίνακας 1.1** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των φωτοβολταϊκών

<p>Πηγή καυσίμων είναι τεράστια και ουσιαστικά ανεξάντλητη</p> <p>Όχι εκπομπές, όχι καύσης ή ραδιενεργά καύσιμα για διάθεση (δεν συμβάλλει αισθητά στην παγκόσμια αλλαγή του κλίματος ή της ρύπανσης).</p> <p>Χαμηλό κόστος λειτουργίας (μη καυσίμων). Δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη (δεν υπάρχει φθορά) Λειτουργία θερμοκρασίας όχι υψηλή θερμοκρασία</p> <p>Υψηλή αξιοπιστία σε ενότητες (&gt; 20 ετών)</p> <p>Γρήγορη εγκατάσταση. Μπορούν να ενσωματωθούν σε νέο ή υφιστάμενο κτίριο. Μπορεί να εγκατασταθεί σε σχεδόν οποιοδήποτε σημείο του κύκλου χρήσης. Ημερήσια αιχμής εξόδου μπορεί να ταιριάζει με την τοπική έλλειψη ζήτησης.</p> <p>Υψηλή αποδοχή από το κοινό. Εξαιρετικό ιστορικό ασφαλείας.</p>	<p>Η πηγή καυσίμου είναι διάχυτη (φως του ήλιου είναι ένα σχετικά χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας)</p> <p>Υψηλό κόστος εγκατάστασης</p> <p>Χαμηλή αξιοπιστία των βοηθητικών (ισοζυγίων του συστήματος) τα στοιχεία που περιλαμβάνουν την αποθήκευση</p> <p>Η έλλειψη ευρείας διάθεσης για την ολοκλήρωση του συστήματος και την εγκατάσταση του μέχρι στιγμής</p> <p>Οικονομική αποθήκευση ενέργειας</p>
--	---

Το σχήμα 1.2 δείχνει την εξιδανικευμένη σχέση μεταξύ της ενέργειας και των ορίων. Όταν το ηλιακό κύτταρο είναι εκτεθειμένο στο φως του ήλιου, τα φωτόνια πλήττουν τα ηλεκτρόνια σθένους, σπάζοντας τα δεσμά τους στην αγωγή μπάντα. Εκεί, μια ειδικά κατασκευασμένη επαφή που συλλέγει αγωγή ηλεκτρόνια οδηγεί τα ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα. Τα ηλεκτρόνια χάνουν την ενέργεια τους. Έχουν αποκαταστήσει το ηλιακό κύτταρο από το βρόχο επιστροφής του κυκλώματος μέσω δεύτερης επαφής, που τους επιστρέφει στην ζώνη σθένους με την ίδια ενέργεια που ξεκίνησε. Η κίνηση αυτών των ηλεκτρονίων στις εξωτερικές επαφές ονομάζεται ηλεκτρικό ρεύμα. Το δυναμικό και τα ηλεκτρόνια που παραδίδονται είναι ελαφρώς μικρότερα από την ενέργεια στο κατώτατο όριο, δηλαδή, το χάσμα ζωνών. Έτσι, σε ένα υλικό με 1 eV χάσμα ζωνών τα ηλεκτρόνια, εξάγονται σε 2 eV φωτονίου ή από 3 eV φωτονίου, θα έχουν και δύο ακόμη δυνατότητες ελαφρώς λιγότερο από το 1 V.



Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται είναι το προϊόν της τρέχουσας τάσης, δηλαδή, η δύναμη είναι ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων.



**Σχήμα 1.2** Σχήμα ενός ηλιακού κυττάρου. Τα ηλεκτρόνια που αντλούνται από τα φωτόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη διεξαγωγής. Εκεί εξάγονται από μια επαφή στη ζώνη διεξαγωγής με υψηλότερη ενέργεια και παραδίδεται προς τα έξω μέσω μιας τηλεφωνικής γραμμής και τότε επιστρέφουν στην ζώνη σθένους σε χαμηλότερη ενέργεια από ότι στην ζώνη σθένους

Σχηματικά μια ηλιακή κυψέλη. Τα ηλεκτρόνια που αντλούνται από φωτόνια από τη ζώνη σθένους στη ζώνη διεξαγωγής. Εκεί εξάγονται από μια επαφή επιλεκτική στη ζώνη διεξαγωγής σε υψηλότερη ενέργειας και παραδίδεται προς τον έξω κόσμο μέσω τηλεφωνικής γραμμής, όταν κάνουν κάποια χρήσιμη εργασία, τότε επιστρέφουν στην ζώνη σθένους σε χαμηλότερη ενέργεια από μια επαφή επιλεκτική στην ζώνη σθένους (ενός ημιαγωγού p-τύπου).

Το ηλιακό φως είναι ένα φάσμα των φωτονίων που καλύπτουν ένα κάποιο φάσμα της ενέργειας. Τα φωτόνια των οποίων η ενέργειας είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια χάσματος (η ενέργεια κατώτατου ορίου) μπορεί να διεγείρουν τα ηλεκτρόνια από την στιβάδα σθένους σε ζώνη διεξαγωγής, που μπορούν να βγουν από τη συσκευή και παράγουν ηλεκτρική δύναμη. Φωτόνια με ενέργεια μικρότερη από το ενεργειακό κενό αποτυγχάνουν να διεγείρουν ελεύθερα ηλεκτρόνια. Αντί αυτού, η ενέργεια διέρχεται μέσα από το ηλιακό κύτταρο και απορροφάται ως θερμότητα.

Τα Ηλιακά κύτταρα στο άμεσο ηλιακό φως μπορεί να είναι κάπως (20-30 C) θερμότερο από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος του αέρα. Έτσι, ενώ τα φωτοβολταϊκά κύτταρα μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες και χωρίς κινητά μέρη. Αυτά είναι τα κυριότερα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών που είναι ασφαλείς, απλά, και αξιόπιστα στη λειτουργία τους. Η καρδιά του κάθε ηλιακού κύτταρου είναι η επαφή pn. Η μοντελοποίηση και η κατανόηση είναι πολύ απλοποιημένες με τη χρήση της επαφής pn. Αυτό προκύπτει από την επαφή pn το που παράγει αγωγιμότητα σθένους με επιλεκτικές επαφές, με μία να γίνει η n-πλευρά (αρνητικό φορτίο) και το άλλο το p-πλευρά (θετικό φορτίο). Εδώ, οι κόμβοι pn αναφέρονται επειδή μιλάμε για ηλιακά κύτταρα, και χρησιμοποιείται περιστασιακά σε αυτό το κεφάλαιο.

Το πυριτίου, ένα από τα πιο άφθονα υλικά στο φλοιό της Γης, είναι ο ημιαγωγός που χρησιμοποιείται σε κρυσταλλική μορφή για το 90% των αιτήσεων PV σήμερα. Παραδόξως, οι άλλοι ημιαγωγοί είναι καλύτερα προσαρμοσμένοι για την απορρόφηση του ηλιακού φάσματος της ενέργειας. Αυτή η ενότητα θα αναλυθεί εκτενέστερα στο κεφάλαιο 1.10. Κάποιοι ονομάζονται ημιαγωγοί, εκ των οποίων άμορφου πυριτίου χαλκού του ινδικού γάλλιου, και τελλουριούχου καδμίου λαμβάνουν μεγαλύτερο μέρος της προσοχής.

Τα Ηλιακά κύτταρα μπορούν να λειτουργούν υπό συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία με χρήση των φακών ή κατόπτρων ως ασυγκέντρωτης, για ένα μικρό ηλιακό κύτταρο επιφάνειας που πρέπει να φωτίζεται με το φως από μια άλλη ευρύτερη περιοχή. Αυτό σώζει τα ακριβά στοιχεία των ημιαγωγών, αλλά προσθέτει πολυπλοκότητα στο σύστημα, δεδομένου ότι απαιτεί την παρακολούθηση των μηχανισμών για να κρατήσει το φως στις ηλιακές κυψέλες. Πυρίτιο και ημιαγωγοί, από ενώσεις όπως αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) και γάλλιο φωσφορούχο ινδικό (GaInP) είναι τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία που βρίσκεται ακόμη σε στάδιο επίδειξης της.

Για τις πρακτικές εφαρμογές, ένας μεγάλος αριθμός των ηλιακών κυττάρων είναι αλληλένδετα και ενθυλακώνονται σε μονάδες που ονομάζονται Φ / Β, η οποία είναι το προϊόν που συνήθως πωλείτε στο πελάτη. Παράγουν συνεχές ρεύμα που είναι συνήθως σε μετατρεπτική μορφή AC ρεύματος από μια ηλεκτρονική συσκευή που ονομάζεται inverter. Ο μετατροπέας, στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, η μηχανική δομή για να τοποθετήσετε και ο στόχος των ενοτήτων, καθώς και οποιαδήποτε άλλα στοιχεία απαραίτητα για την κατασκευή ενός Φ / Β συστήματος ονομάζονται ισορροπία συστήματος (BOS).

### 1.3 Οι έξι μύθοι των φωτοβολταϊκών

Δανειζόμενοι τη μορφή συζήτησης για τα φωτοβολταϊκά από τον Kazmerski, στην ενότητα αυτή, θα παρουσιάσω εν συντομία και στη συνέχεια να διαλύσω τους έξι κοινούς μύθοι για τα φωτοβολταϊκά. Στις ακόλουθες ενότητες, έχουμε εντοπίσει σοβαρές προκλήσεις που παραμένουν παρά τα 40 χρόνια προόδου στα φωτοβολταϊκά. Οι έξι μύθοι έχουν ως εξής:

1. Τα Φωτοβολταϊκά συστήματα θα απαιτήσουν πολύ έκταση για την κάλυψη όλο και σημαντικών τμημάτων της στο κόσμο:

Η ηλιακή ακτινοβολία είναι μια διάχυτη πηγή ενέργειας. Στο τομέα των Φ/Β μονάδων είναι απαραίτητη για να παράγει ορισμένα χρήσιμα ποσά ενέργειας. Ας κάνουμε μερικές πολύ προσεγγιστικές εκτιμήσεις για να δώσουμε απαντήσεις που θα είναι ακριβείς. Η Χρήση για μεθόδους περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 20, μπορεί κανείς να υπολογίσει πόσο φως του ήλιου πέφτει σε ένα τετραγωνικό μέτρο, οπουδήποτε στον τον κόσμο, κατά τη διάρκεια μιας μέσης ημέρας.

Εμείς θα χρησιμοποιήσουμε μια μέση τιμή των 4 kw- (kWh) ανά m<sup>2</sup> ανά ημέρα για να αντιπροσωπεύσουμε μια μέση παγκόσμια τιμή. Τώρα, μια τυπική Φ/Β μονάδα είναι περίπου 10% αποτελεσματική στη μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια, έτσι ώστε κάθε τετραγωνικό μέτρο του Φ/Β να παράγει κατά μέσο όρο,  $4 \times 0,1 = 0,4$  kWh ηλεκτρικής ενέργειας ανά ημέρα. Μπορούμε να υπολογίσουμε το εμβαδόν σε m<sup>2</sup> που απαιτούνται για μια δεδομένη ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας E σε kWh από τη διαίρεση E κατά 0,4 kWh/m<sup>2</sup>. Ας εξετάσουμε τρεις διαφορετικές μεγέθους εφαρμογές Φ/Β το σπίτι μιας οικογένειας σε μια βιομηχανοποιημένη χώρα, αντικαθιστώντας 1000 MW, άνθρακα ή πυρηνοκίνητων επιχειρήσεων ηλεκτρικής ενέργειας, ή την παροχή όλης της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται στις ΗΠΑ.

Πρώτα, για μια τυπική οικογένεια, ας υποθέσουμε ότι υπάρχουν τέσσερα άτομα στο σπίτι. Σχήμα 1.1 δείχνει μια σειρά της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας για τις βιομηχανικές χώρες. Ας χρησιμοποιήσουμε 6000 kWh/ άτομο / έτος κατά μέσο όρο. Όμως, αυτό περιλαμβάνει όλες τις ηλεκτρικές ανάγκες τους, συμπεριλαμβανομένων και την εργασία, στο σχολείο, καθώς και η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή των προϊόντων που αγοράζουν, τροφοδοτώντας τα φώτα του δρόμου τους, την άντληση νερού στα σπίτια τους, και ούτω καθεξής. Από τότε που οι άνθρωποι ξοδεύουν το ένα τρίτο περίπου της ημέρας στο σπίτι τους, ας υποθέσουμε ότι μια Τρίτη των ηλεκτρικών αναγκών τους, πρέπει να παρέχονται στο σπίτι τους 2000 kWh/ άτομο / έτος.

Η διαίρεση αυτή από 365 ημέρες σε ένα χρόνο δίνει περίπου 5 kWh/ άτομο / ημέρα, ή 20 kWh / ημέρα ανά τετραμελή οικογένεια. Αυτό είναι σύμφωνα με δεδομένα για τα νοικοκυριά από διάφορες περιοχές των ΗΠΑ και της Ευρώπης. Έτσι, θα χρειαστεί 20 kWh/0.4 kWh/m<sup>2</sup> ή 50 m<sup>2</sup> ηλιακών πάνελ για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, για τις ανάγκες τους στη διάρκεια του έτους. Έτσι, μια ορθογώνια περιοχή των ηλιακών συλλεκτών 5 με 10 μέτρα θα είναι επαρκείς. Στην πραγματικότητα, πολλές στέγες είναι αυτού του μεγέθους, και πολλά σπίτια είναι σε ηλιόλουστες περιοχές, ώστε να είναι δυνατή για μια τετραμελή οικογένεια, να παρέχουν όλη τους τη δύναμη από τα Φ/Β για το σπίτι τους.

Στη συνέχεια, το ερώτημα είναι, πόσος χώρος θα χρειαστεί για να αντικαταστήσει τον άνθρακα 1000 MW ή την πυρηνική μονάδα παραγωγής ενέργειας που λειτουργεί 24 ώρες / ημέρα και μπορεί να τροφοδοτήσει μια μεγάλη πόλη. Αυτό θα απαιτούσε από  $106 \text{ kW} \times 24 \text{ hr} / (0,4 \text{ kWh/m}^2)$  ή  $6 \times 10^7 \text{ m}^2$ . Έτσι, με  $60 \text{ km}^2$  των φωτοβολταϊκών, θα μπορούσε να αντικαταστήσει μία από τις μονάδες ισχύος του περασμένου αιώνα, με έναν από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής αυτού του αιώνα. Αυτό είναι ένα τετράγωνο 8 km σε μια πλευρά. Για την ίδια την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αυτό είναι ισοδύναμο με την περιοχή για την εξόρυξη άνθρακα κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του άνθρακα, εάν είναι επιφανειακής εξόρυξης, ή τρεις φορές την περιοχή για μια πυρηνική εγκατάσταση, μετρώντας το χώρο εξόρυξης ουρανίου. Αυτή, επίσης είναι η ίδια περιοχή που απαιτείται για να οικοδομήσουμε 600 χιλιόμετρα αυτοκινητόδρομου με 100 μ. πλάτος λωρίδας.

Τέλος, μπορούμε να υπολογίσουμε πόση γη απαιτείται για να τροφοδοτήσει το σύνολο των ΗΠΑ με φωτοβολταϊκά συστήματα. Οι ΗΠΑ χρησιμοποίησαν περίπου  $3,6 \times 10^{12} \text{ kWh}$  ηλεκτρικής ενέργειας το 2000. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με  $2 \times 10^{10} \text{ m}^2$ . Εάν την συγκρίνουμε με μια περιοχή από ασφαλτοστρωμένους δρόμους σε ολόκληρη τη χώρα, είναι περίπου περίπου  $380 \text{ km}^2$ . Το συμπέρασμα είναι ότι όλη η ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται στις ΗΠΑ μπορεί να επιτευχθεί με την κάλυψη των ασφαλτοστρωμένων δρόμων με φωτοβολταϊκές μονάδες. Χρησιμοποιούμε την αναλογία του δρόμου για να αποδείξουμε ότι αν η κοινωνία θα μπορούσε να ορίσει τις προτεραιότητες της χρήσης γης ευνοϊκές για φωτοβολταϊκά ακριβώς όπως έχει γίνει για να φιλοξενήσει την πανταχού παρουσία αυτοκινήτων. Αυτοί οι απλοϊκοί υπολογισμοί δείχνουν ότι έχουν αρκετές περιοχές για Φ/Β. Δεν είναι ένα όριο για έναν ιδιοκτήτη σπιτιού ή μια μεγάλη πόλη. Βεβαίως, υπάρχουν ηλιόλουστα μέρη σε κάθε χώρα που θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν για την παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως είναι εμφανές, το κόστος των φωτοβολταϊκών αποτελεί το βασικό εμπόδιο που πρέπει να ξεπεραστεί.

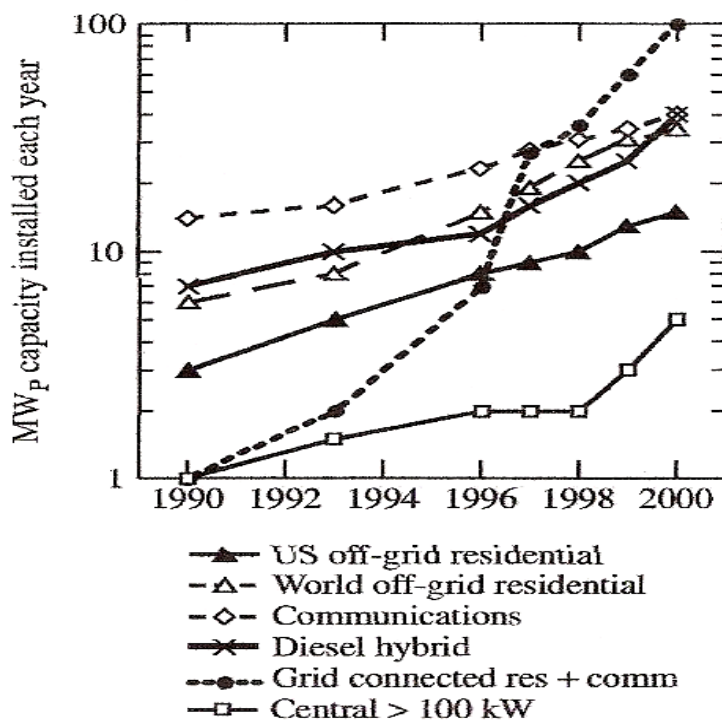
2. Τα Φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να καλύψουν όλες τις ανάγκες του κόσμου σήμερα, εμείς θέλουμε απλά νόμους που βοηθούν τα φωτοβολταϊκά και τη διακοπή όλων των ορυκτών και των πυρηνικών εγκαταστάσεων:

Εκτός από τη δυσκολία να πείσεις τους εκπροσώπους του λαού για την ψήφιση νόμου, το πρώτο τεχνικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει θα είναι η φύση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία διατίθεται μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας και περιορίζεται δραστικά στους ουρανούς με νεφώσεις. Η Ενέργεια αποθήκευσης θα λύσει αυτό το πρόβλημα, αλλά δεν είναι φθηνή μέθοδος. Παρ' όλα αυτά, καλά ανεπτυγμένα ηλεκτρικά δίκτυα μπορούν να δέχονται μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας Φ/Β με την απενεργοποίηση ορισμένων συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Η επαρκής διαχείριση του δικτύου θα επιτρέψει έως και 20 - 30% της ηλεκτρικής παραγωγής να είναι διαθέσιμη.

Αλλά στην πραγματικότητα, η συσσωρευτική παραγωγή των Φ/Β μέχρι το 2002 είναι περίπου 2000 MW. Έτσι, αν όλα τα Φ/Β που έγιναν μέχρι το 2002, και τα βάλουμε όλα στο ίδιο ηλιόλουστο περιβάλλον, θα παράγει αρκετό ηλεκτρισμό για να εκτοπίσει τα 500 MW από καπνό ή ραδιενεργών αποβλήτων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι σαφές ότι, αν θέλουμε τα φωτοβολταϊκά να έχουν οποιαδήποτε ουσιαστική συμβολή στον εφοδιασμό ενέργειας, θα πρέπει να ξεπεράσουμε την αντίληψη ότι τα Φ/Β είναι πολύ ακριβά. Μαζική χρήση της

ηλεκτρικής ενέργειας σήμερα, με Φ/Β θα μπορούσε να επιφέρει σημαντικές αρνητικές στρέβλωση στο οικονομικό σύστημα.

3. Τα Φωτοβολταϊκά συστήματα δεν μπορούν να ανταποκριθούν σε σημαντικό μέρος των αναγκών παγκοσμίως. Θα παραμείνει σε μικρή κλίμακα εξοχικό, βιομηχανία που θα συμφέρει μόνο για τις ανάγκες των αγορών τις οικογένειας, όπως απομακρυσμένα σπίτια στις αναπτυσσόμενες χώρες ή διαστημικών δορυφόρων:



Σχήμα 1.3 Τάση στις παγκόσμιες εφαρμογές Φ / Β 2000

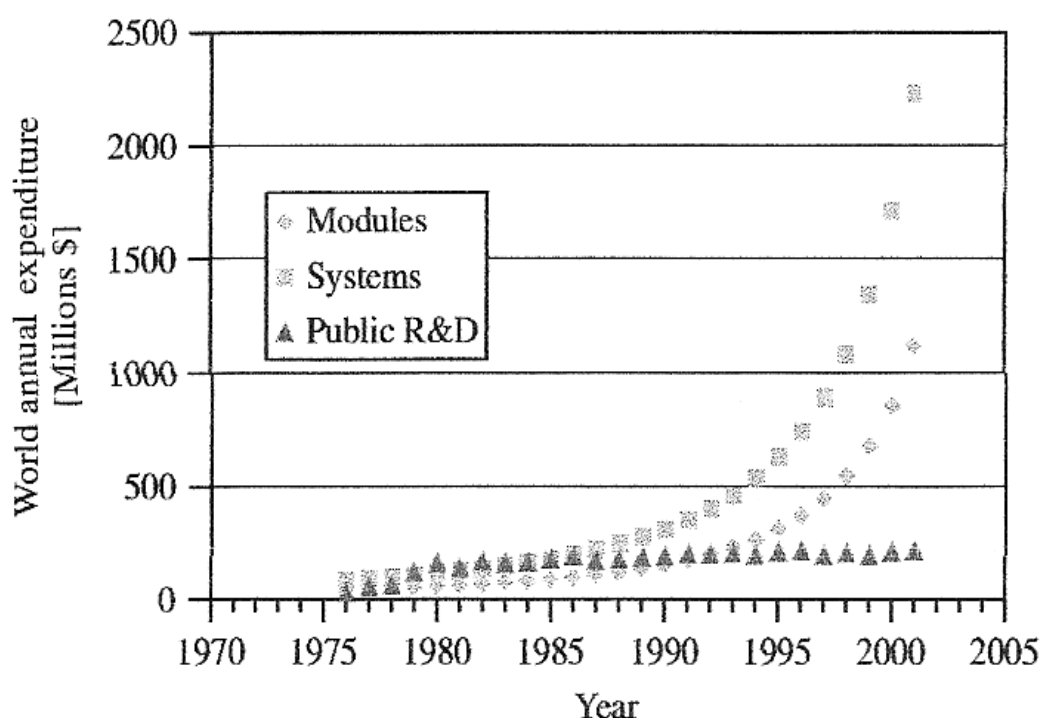
Το διάγραμμα 1.3 δείχνει την εξέλιξη των αγορών που συνδέονται με διάφορες εφαρμογές. Μερικοί το χρησιμοποιούν για να θεωρηθούν ως ειδικές αγορές, για παράδειγμα, η κατηγορία της «παγκόσμιας δύναμης εκτός δικτύου», η οποία προσπαθεί να παρέχει ισχύ στο ~1/3 του κόσμου που την στερούνται. Οι συνδεδεμένες αγορές, των οποίων η ανάπτυξη ήταν ραγδαία κατά την τελευταία δεκαετία, δεν είναι καθόλου μικρή αγορά. Κατά ειρωνικό τρόπο, είναι μεγάλης κλίμακας συγκεντρωτική αγορά μονάδων παραγωγής ενέργειας που είναι η μικρότερη εφαρμογή στο σημερινό κόσμο. Έτσι, τα στοιχεία από το πρόσφατο παρελθόν τείνουν να αντικρουστούν τις μέτριες προβλέψεις που ορισμένοι τις αποδίδουν στα φωτοβολταϊκά.

4. Δεν υπάρχουν άλλα R/D που είναι απαραίτητα για Φ/Β γιατί η τεχνολογία έχει αποδείξει την τεχνική ικανότητα για την εκτέλεση, οπότε θα πρέπει να σταματήσουμε όλες τις δημόσιες χρηματοδοτήσεις και να αποφασίσουν οι αγορές αν αξίζει:

Το παρόν το κόστος των φωτοβολταϊκών είναι προσιτό για ορισμένες αγορές, αλλά εξακολουθεί να είναι υπερβολικά υψηλό για να ανταγωνίζεται τη συμβατική ηλεκτρική ενέργεια. Τα Φ/Β πρέπει να προωθηθούν για περιβαλλοντικούς ή κοινωνικούς λόγους, η επιδότηση για εγκατάσταση θα είναι αναγκαία για την τόνωση της παραγωγής με μείωση του κόστους. Χωρίς τη συνέχιση των επιδοτήσεων, τα φωτοβολταϊκά θα παραμείνουν κατά πάσα πιθανότητα ως οικοτεχνία για τον επόμενο μισό αιώνα. Η κρατική στήριξη των φωτοβολταϊκών είναι ένας από τους μείζονες παράγοντες για τη χρηματοδότηση της. Η χρηματοδότηση αυτή ήταν συγκρίσιμη με Φ/Β σε πωλήσεις της δεκαετίας του 80, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4.

Η Ιδιωτική χρηματοδότηση έχει διπλασιαστεί σε σχέση με τη δημόσια στήριξη που οι ίδιες οι εταιρείες υποστήριζαν σε μεγάλο βαθμό για την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών. Μετά από δύο δεκαετίες συνεχών επενδύσεων σε μια πολλά υποσχόμενη αγορά, που άργησε να αρχίσει πραγματικά, η αγορά τελικά ξύπνησε και έγινε μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες στον κόσμο από την αρχή του εικοστού αιώνα, με πωλήσεις πλέον που έχουν υπερβεί κατά πολύ τις δημόσιες επενδύσεις.

Όμως, αυτή η ταχέως αναπτυσσόμενη αγορά εξακολουθεί να εξαρτάται από την κυβερνητική χρηματοδότηση. Όπως και με πολλά αγαθά και υπηρεσίες (π.χ. στρατιωτικό υλικό, εμπορικές αεροπορικές μεταφορές), τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι εν μέρει χρηματοδοτούμενα από το δημόσιο. Στη Γερμανία ή στην Ιαπωνία, για παράδειγμα, σημαντική δημόσια στήριξη δίνεται σε όσους συνδέονται με το δίκτυο εγκαταστάσεων. Αν το Φωτοβολταϊκό γίνει ένας σημαντικός διεκδικητής της ενέργειας, στις χώρες που η στήριξη που έλειπε θα παραμείνει τεχνολογικά κατώτερη σε σχέση με εκείνες, όπου η υποστήριξη έχει ήδη γίνει.



**Σχήμα 1.4** Η δημόσια χρηματοδότηση για E & A σε σύγκριση με το module και το σύστημα των πωλήσεων.

Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την ενεργειακή πολιτική και τη δημόσια ή ιδιωτική χρηματοδότηση. Το κρίσιμο ερώτημα λοιπόν είναι: Θα πρέπει η στήριξη να εστιάζεται στην R & D, ή στη Φ / Β τεχνολογία που είναι αρκετά ώριμη να εστιάσει στη μείωση του κόστους μέσω της οικονομίας κλίμακας που επιτρέπεται από το μεγαλύτερο όγκο της παραγωγής που απαιτείται από μια επιδοτούμενη αγορά;

5. Τα Φωτοβολταϊκά είναι ρυπογόνα όπως και όλα τα υψηλής τεχνολογίας ή υψηλής ενέργειας βιομηχανίες, αλλά με διαφορετικές τοξικές εκπομπές:

Ένα από τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών είναι η έννοια ως περιβαλλοντικά καθαρή και "πράσινη" τεχνολογία. Αυτή η υγιής εικόνα είναι αποτελέσματα της καθαρής λειτουργίας μιας γεννήτριας ηλεκτρικής ενέργειας Φ/Β σε σύγκριση, με τα ορυκτά καύσιμα, αλλά αυτό πρέπει να επεκταθεί στη διαδικασία κατασκευής και στην ανακύκλωση των απορριμμάτων τους. Για την κατασκευή Φ / Β σε μεγάλη κλίμακα απαιτείται ο χειρισμός μεγάλων ποσοτήτων επικίνδυνων υλικών. Ας είναι η διαπίστωση στην αρχή ότι η παρούσα τεχνολογία Φ/Β, το οποίο κυριαρχεί στην αγορά έχει λίγες περιβαλλοντικές ανησυχίες και θεωρείται απολύτως ασφαλές για το κοινό.

Όσοι ασχολούνται με το κλάδο των φωτοβολταϊκών γνωρίζουν πολύ καλά την αξία της "πράσινης" εικόνας και έχουν δουλέψει σκληρά όλα αυτά τα χρόνια να καθιερώσουν και να διατηρούν υψηλά πρότυπα περιβαλλοντικής ευθύνης. Διαφορές συζητήσεις για την Φ/Β Ασφάλεια και τα Περιβαλλοντικά Θέματα έχουν διεξαχθεί από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 και οι διαδικασίες τους έχουν δημοσιευτεί. Το Κέντρο Περιβαλλοντικής Ασφάλειας και Υγείας έχει παγκόσμιο ηγετικό ρόλο στην ανάλυση κινδύνου και ασφάλειας των Φ/Β και κάνει διαφορές συστάσεις για τη βιομηχανία φωτοβολταϊκών.

Ασφαλής χειρισμοί των διαδικασιών για μερικά από τα υλικά και τις διαδικασίες έχουν ήδη καθιερωθεί από το ολοκληρωμένο κύκλωμα των βιομηχανιών επίστρωσης γυαλιού. Αλλά στην περίπτωση των μοναδικών υλικών και διεργασιών, διαδικασίες ασφαλείας έπρεπε να αναπτυχθούν από την Φ/Β βιομηχανία. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τις τεχνολογίες thin-film. Ο κλάδος των φωτοβολταϊκών γνώριζε από νωρίς το σχεδιασμό των διαδικασιών ασφαλείας, από την αρχή ήταν υπεύθυνοι στο προγραμματισμό τους που θα οδηγούσε τελικά σε μείωση του κόστους. Ο διεθνής χαρακτήρας της βιομηχανίας φωτοβολταϊκών εισάγει κάποια μεταβλητότητα στα πρότυπα που πρέπει να τηρούνται.

Οι κίνδυνοι, μπορούν να ταξινομηθούν από το αν έχουν επίδραση στους εργαζομένους σε μια κατασκευή Φ/Β, ή πελάτες με φωτοβολταϊκά πάνω ή κοντά στα σπίτια τους, ή για το κοινό που καταναλώνει αέρα και το νερό κοντά στην φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Ο πληθυσμός με το μεγαλύτερο δυναμικό κινδύνους για την υγεία είναι οι εργαζόμενοι στην κατασκευή φωτοβολταϊκών. Ανάμεσα στα πιο σημαντικά θέματα που μελετήθηκαν στη Φ/Β βιομηχανία είναι η πιθανή τοξικότητα των ημιαγωγών CdTe και την ασφαλή χρήση του υδριδίου AsH<sub>3</sub>, SiH<sub>4</sub>, GeH<sub>4</sub>, B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> και H<sub>2</sub>Se, τα οποία χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη του GaAs, a-Si, a-SiGe, και Cu Se<sub>2</sub>. Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι έγινε σημαντική έρευνα και ανάλυση του

κινδύνου του CdTe ως υλικό Φ/Β. Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι το CdTe, δεν αποτελεί κίνδυνο για το κοινό. Ομοίως, οι διαδικασίες και το υλικό εξασφαλίζουν την ασφαλή χρήση του υδριδίου που έχουν καθιερωθεί, τόσο στη βιομηχανία ηλεκτρονικών ειδών όσο και στην φωτοβολταϊκή ενέργεια.

Η παρακολούθηση του περιβάλλοντος καθώς και του χώρου εργασίας για τα επικίνδυνα επίπεδα στον αέρα και τη βιολογική παρακολούθηση των εργαζομένων για την απόδειξη της έκθεσης θα πρέπει να είναι ρουτίνα την σημερινή εποχή. Μόλις η μονάδα έχει κατασκευαστεί, ο μόνος τρόπος για το κοινό να εκτεθεί στα επικίνδυνα υλικά που υπάρχουν σε κάποια τμήματα είναι απορροφώντας τα ή μέσω κατάποσης ή εισπνοής. Κατά συνέπεια, τυχαία ανθρώπινη απορρόφηση δεν είναι καθόλου πιθανό. Ακόμη και σε περίπτωση πυρκαγιάς στο σπίτι, οι μελέτες έχουν δείξει ότι το Φ/Β δεν απαλλάσσει κανένα επικίνδυνο και τοξικό υλικό.

Ένα θέμα είναι τι να κάνουμε με τις φωτοβολταϊκές μονάδες στο τέλος της προβλεπόμενης 25ετίας τους. Μια στρατηγική είναι η ανακύκλωση τους. Αυτό επιλύει δύο προβλήματα, δηλαδή, τη διατήρηση επικίνδυνων υλικών από το περιβάλλον και μειώνοντας την ανάγκη για πρόσθετη εξόρυξη ή τη διύλιση νέων υλικών. Πωλητές έχουν εκφράσει την προθυμία να χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία των φωτοβολταϊκών για άλλες νέες εγκαταστάσεις, αλλά πρώτα να καθαριστεί το CdTe, CD ή Cu, Se<sub>2</sub> για την μεταπώληση και επαναχρησιμοποίηση του.

6. Τα Φ/Β ποτέ δεν ανακτούν το σύνολο της ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή ενεργείας, συνεπώς πρέπει να υπολογίζεται και η καθαρή απώλεια ενέργειας:

Το επίκεντρο των φωτοβολταϊκών είναι η ενέργεια παραγωγής με πολλές ευεργετικές ιδιότητες, όπως αναφέρονται στον πίνακα 1.1. Μεταξύ αυτών που οραματιζόμαστε, τα φωτοβολταϊκά να έχουν όλο και μεγαλύτερο ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του κόσμου, υπάρχει συνειδητοποίηση ότι οι εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών πρέπει να παράγουν πολύ περισσότερη ενέργεια από ό,τι απαιτείται. Διαφορετικά, η καθαρή ενέργεια δεν αποτελεί πηγή ενέργειας. Έτσι περιγράφεται όσον αφορά πόσα χρόνια το Φωτοβολταϊκό σύστημα πρέπει να λειτουργεί για την παραγωγή της ενέργειας που απαιτείται από την κατασκευή του, μετά από το χρόνο αποπληρωμής.

Σε γενικές γραμμές, τα αποτελέσματα αρκετών ερευνών, καταλήγουν σε ορισμένα γενικά συμπεράσματα. Συγκεκριμένοι χρόνοι αποπληρωμής κυμαινόταν από 3 έως 5 έτη για κρυσταλλικό πυρίτιο και 1 - 4 χρόνια για λεπτές ταινίες. Για το κρυσταλλικό πυρίτιο, που αποτελεί το κρυσταλλικό πυρήνα του Si είναι για τις μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις. Για λεπτές όμως ταινίες, τα στρώματα ημιαγωγών είναι 100 φορές λεπτότερα, και κατατίθεται σε ~1000 ° C χαμηλότερη θερμοκρασία, έτσι οι ενεργειακές τους ανάγκες είναι αμελητέες, σε σύγκριση τους.

Επίσης, μια φαινομενικά ασήμαντη συνιστώσα, είναι ότι τα πλαίσια Al γύρω από τη μονάδα, είναι υπεύθυνα για ένα εκπληκτικά μεγάλο μέρος της ενέργειας. Στην πραγματικότητα, αυτό μπορεί να είναι το κυρίαρχο στοιχείο της ενέργειας για λεπτά φύλλα -Si ή Cu ή Se<sub>2</sub> των πάνελ μας. Η περίπτωση της συγκέντρωσης είναι λιγότερο μελετημένο, αλλά και πάλι η χρήση των ημιαγωγών μειώνεται, ενώ η BOS αποκτά μεγαλύτερη σημασία από ό,τι για τις λεπτές ταινίες γιατί η συγκέντρωση των δομών



είναι πολύ ογκώδης. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά τους είναι υψηλότερη. Συνοψίζοντας, μπορούμε να υποθέσουμε ότι στην περίπτωση αυτή η κατάσταση θα είναι παρόμοια με την περίπτωση των.

#### 1.4 Ιστορία των φωτοβολταϊκών

Η ιστορία των φωτοβολταϊκών ανάγεται στον δέκατο ένατο αιώνα, όπως φαίνεται στον πίνακα 1.2. Η πρώτη προσπάθεια, έγινε εσκεμμένα από τον Fritts το 1883. Είχε λιώσει Se σε ένα λεπτό φύλλο με μεταλλικό υπόστρωμα και πίεξε ένα Au-φύλλο ταινία ως την κορυφαία επαφή. Ήταν περίπου 30 cm<sup>2</sup> συνολικής επιφάνειας. Σημείωσε, ότι "το ρεύμα που παραγόταν, μπορούσε να αποθηκευτεί σε συσσωρευτές αποθήκευσης ακόμα και σε περιοχές μακρύτερες από το σημείο που γινόταν η παράγωγή ρεύματος." Αυτός προέβλεψε τη Φ/Β τεχνολογία με τη σημερινή μορφή.

Η σύγχρονη εποχή των φωτοβολταϊκών ξεκίνησε το 1954 όταν οι ερευνητές στο Bell Labs στις ΗΠΑ τυχαία ανακάλυψαν ότι οι επαφές pn δίοδοι δημιουργούν τάση όταν τα φώτα του δωματίου ήταν ανοικτά. Μέσα σε ένα χρόνο, είχαν παραχθεί 6% αποτελεσματικά pn πυριτίου με διασταύρωση ηλιακών κυψελών. Μέχρι το 1960, πολλά βασικά έγγραφα από τον πρίγκιπα, Loferski Rappaport και Wysoski Shockley και Queisser, ανέπτυξαν τις βασικές αρχές της pn διασταύρωσης με ηλιακή λειτουργία των κυττάρων, συμπεριλαμβανομένων των θεωρητικών σχέσεων μεταξύ του χάσματος, του φάσματος, θερμοκρασία και της θερμοδυναμικής.

Επίσης το διαστημικό πρόγραμμα των ΗΠΑ χρησιμοποιεί Φ/Β με Si για την τροφοδότηση των δορυφόρων που στέλνονται στο διάστημα και που εξακολουθεί να είναι η κύρια εφαρμογή για τα φωτοβολταϊκά συστήματα μέχρι και σήμερα. Το έτος 1973 ήταν καθοριστικό για τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τόσο από τεχνικής όσο και τις παροχές. Ένα σημαντικό βήμα για την βελτίωση της επίδοσης που είχαμε μέχρι και πριν το 1973 είναι η βελτίωση της κυψέλης που σύντομα οδηγεί σε σχετική αύξηση 30% της απόδοσης σε παράγωγή ενεργείας από τον ήλιο.

**Πίνακας 1.2** αξιοσημείωτα γεγονότα στην ιστορία των φωτοβολταϊκών

- 1839 Becquerel (FR) ανακαλύφθηκε φωτογαλβανικό αποτέλεσμα σε υγρά ηλεκτρολυτών
- 
- 1877 Adams και Day (UK) ανακαλύπτουν φωτογενεση του ρεύματος σε Se σωλήνες
- 1883 Fritts (ΗΠΑ) κάνει την πρώτη του μεγάλη περιοχή ηλιακών κυττάρων που χρησιμοποιούν Se ταινία
- 1955 Hoffman Electronics (ΗΠΑ) προσφέρει 2% αποτελεσματικό Si Φ / B σε κύτταρα με 1500 δολάρια
- 1958 η NASA τροφοδοτεί τους δορυφόρους με εφεδρικό Si ηλιακής σειράς
- 1959 Hoffman Electronics (ΗΠΑ) προσφέρει 10% αποτελεσματικό Si Φ / B
- 1963 Sharp Corp (JP) παράγει τις πρώτες εμπορικές μονάδες Si
- 1966 NASA βάζει σε τροχιά Αστρονομικό Παρατηρητήριο που ξεκίνησε με 1 kW
- 1972 Πρώτη Φ/B διάσκεψη ωα περιλαμβάνει μια συνεδρία για επίγειες εφαρμογές (IEEE)
- 1973 Παγκόσμια κρίση του πετρελαίου κέντρισαν πολλά έθνη για να εξετάσουν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που περιλαμβάνον τα φωτοβολταϊκά συστήματα.
- 1974 το Έργο Sunshine ξεκίνησε στην Ιαπωνία για να ενισχύσει την ανάπτυξη της βιομηχανίας φωτοβολταϊκών εφαρμογών
- 1981 350 kW, συμπυκνωτής σειρά εγκαταστάθηκε στη Σαουδική Αραβία
- 1982 1 MW Φ / B μονάδας παραγωγής ενέργειας (CA, USA) με Arco μονάδες Si σε 2-άξονα ιχνηλάτες
- 1985 μια μεγάλη χρονιά για υψηλής απόδοσης ηλιακά κύτταρα Si: Si ηλιακών κυψελών > 20%, σύμφωνα με το φως του ήλιου και > 25%
- 1986 Πρώτη εμπορική μονάδα ισχύος, το a-Si G4000 από Arco Solar (ΗΠΑ)
- 1987 Δεκατέσσερα ηλιακά αυτοκίνητα που κινούνται με ηλιακή ενεργεία για 3200 χιλιόμετρα σε αγώνα στην Αυστραλία.
- 1995-1996 Φωτοηλεκτροχημική ευαισθητοποίηση στερεού / υγρού κυττάρου επιτυγχάνει 11% (EPFL, Ελβετία)
- 1997-1999, με συνολική ισχύεις παγκόσμιος εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά φτάνει 1000 MW
- 2000 Ολυμπιακοί Αγώνες στην Αυστραλία, τονίζουν ευρύ φάσμα των Φ / B εφαρμογών

Επίσης GaAs κύτταρα αναπτύχθηκαν επίσης στην IBM στις ΗΠΑ και έχουν το 13% αποτελεσματικότητα. Επίσης το 1973, ένα κρίσιμο συμβάν κάλεσε την Cherry Hill σε διάσκεψη, στις ΗΠΑ, όπου μια ομάδα από Φ / B ερευνητές και επικεφαλής της κυβέρνησης των ΗΠΑ και επιστημονικών οργανώσεων συναντήθηκαν για να αξιολογούν την επιστημονική αξία και το δυναμικό των φωτοβολταϊκών. Ως αποτέλεσμα ήταν η απόφαση ότι οι εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών ήταν αντάξιες της κρατικής ενίσχυσης, με αποτέλεσμα το σχηματισμό στις ΗΠΑ της Ενεργειακής Έρευνας και Ανάπτυξης, του οποίου η αποστολή είναι η προαγωγή της έρευνας για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η οποία τελικά έγινε στις ΗΠΑ. Τέλος, τον Οκτώβριο του 1973, έγινε το πρώτο

Παγκόσμιο πετρελαϊκό εμπάργκο από τις χώρες παραγωγής του Περσικού Κόλπου με αποτέλεσμα ολοένα και περισσότερο οι κυβερνήσεις να στρέφονται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Στη δεκαετία του 1980, η βιομηχανία άρχισε να ωριμάζει, και έδωσε έμφαση στην κατασκευή εγκαταστάσεων για την παραγωγή φωτοβολταϊκών μονάδων από τον κόμβο Si pn με ηλιακά κύτταρα που χτίστηκαν στις ΗΠΑ, την Ιαπωνία και την Ευρώπη. Οι νέες τεχνολογίες άρχισαν να κινούνται μέσω των πανεπιστημιακών και των βιομηχανικών εργαστηρίων, και σε η πιλοτικές γραμμές παραγωγής. Οι εταιρείες επιχείρησαν να αναβαθμίσουν τις τεχνολογίες φωτοβολταϊκών a-Si και CuInSe<sub>2</sub>, οι οποίες είχαν πραγματοποιήσει >10% της αποδοτικότητας για τη μικρή περιοχή, 1cm<sup>2</sup>, σε συσκευές που έχουν κατασκευαστεί με προσεκτικά ελεγχόμενο εξοπλισμό εργαστηριακής κλίμακας. Προς μεγάλη όμως απογοήτευσή τους, ανακάλυψαν ότι αυτό ήταν πολύ πιο περίπλοκο από μια απλή κλιμάκωση του μεγέθους του εξοπλισμού.

Το 1990, ο μεγαλύτερος ηλιακός κατασκευαστής στον κόσμο ήταν η Arco Ηλιακή (CA, USA), που ανήκει στην πετρελαϊκή εταιρεία Atlantic Richfield, η οποία είχε c-Si και a-Si στη παραγωγή της. Επίσης το 1990, οι κατασκευαστές των συσκευών Μετατροπής Ενέργειας (MI, USA) είχαν συστήσει μια κοινή επιχείρηση που ονομαζόταν Ηνωμένα Ηλιακά Συστήματα, με την ιαπωνική κατασκευάστρια της Canon για την εμπορική παραγωγή της a-Si τεχνολογίας. Το 1994, η Mobil Ηλιακής Ενέργειας (MA, USA), η οποία είχε αναπτύξει μια διαδικασία για την παραγωγή ηλιακών κυττάρων από πυρίτιο, πωλήθηκε στη γερμανική εταιρεία και μετονομάστηκε σε ASE Αμερικής. Η βρετανική εταιρεία BP ηλιακής ενέργειας απέκτησε διπλώματα ευρεσιτεχνίας για την τεχνολογία της ηλεκτροχημικής CdTe ηλιακών κυττάρων, το 1989 η μητρική εταιρία αγόρασε το αμερικανικό γίγαντα του πετρελαίου Standard Oil του Οχάιο. Το 1996, υπέγραψε την συμφωνία με το Πολυτεχνείο της Μαδρίτης για να εκμετάλλευση της τεχνολογίας που χρησιμοποιεί κύτταρα LGBG, όπως τα κύτταρα του ασυγκέντρωτη. Το 1999, η BP Solar αποκτήθηκε από την Enron που είχαν κρυσταλλικό και άμορφο Si της ηλιακής τεχνολογίας των κυττάρων. Έτσι, η BP Solar θα εγκαταστήσει την μέθοδο με τις τρεις τεχνολογίες. Εν τω μεταξύ, η ιαπωνική βιομηχανία φωτοβολταϊκών άρχισε να απογειώνετε.

Η παραγωγή του c-Si και η εντατική έρευνα για την τεχνολογία, στην Ιαπωνία οδήγησε σε πολλά καινοτόμα σχέδια συσκευών, με βελτιωμένη επεξεργασία υλικών, και την αυξανόμενη κυριαρχία στη παγκόσμια αγορά φωτοβολταϊκών. Μαζί με την ωρίμανση της ηλιακής τεχνολογίας των κυττάρων, πολλά προϊόντα όπως αντιστροφείς, που μετατρέπουν την ενέργεια DC σε εναλλασσόμενο ρεύμα, και τον ήλιο είχαν μόνο περιορισμένη εφαρμογή έξω από το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής από Φ / Β, οπότε και πάλι ήταν περιορισμένων τεχνικών και χρηματοδοτικών πόρων για την ανάπτυξη.

Σε πολλά συστήματα αξιολογήσεων, ο μετατροπέας εντοπίστηκε επανειλημμένα ως ο αδύναμος κρίκος από άποψη αξιοπιστίας και ποιότητας ρεύματος. Το κόστος τους δεν έχει πέσει σχεδόν τόσο γρήγορα όσο αυτές του Φ / Β. Ενώ πολλές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στο ηλιακό κόστος των κυττάρων και επιδόσεων, λίγη προσοχή είχε δοθεί στην εγκατάσταση και συντήρηση του κόστους. Γρήγορα ανακαλύψαμε ότι υπάρχει περιθώριο για μεγάλη βελτίωση.

Μια πρώιμη ανάπτυξη που βοήθησε πολλές εταιρείες να πουλούν τα Φ / Β κύτταρα για καταναλωτές μεγέθους μικρής κλίμακας είναι η ηλιακή ενέργεια, η οποία ξεκίνησε από τις ιαπωνικές εταιρείες ηλεκτρονικών ειδών για αντικατάσταση των μπαταριών στις αριθμομηχανές τσέπης, στις αρχές του 1980, που είναι το πιο γνωστό παράδειγμα. Αυτό οδήγησε στην πρόωρη χρήση a-Si Φ/Β κύτταρων που προορίζονται για διάφορες εφαρμογές. Ένα άλλο παράδειγμα ήταν ηλιακή ενέργεια σε υπαίθριο φωτισμό. Μια άλλη εφαρμογή ήταν η ηλεκτροδότηση των αγροτικών περιοχών των απομακρυσμένων χωριών σε μια προσπάθεια για να βοηθήσει περίπου το ένα τρίτο των πολιτών του κόσμου να αποκτήσει πρόσβαση σε ένα μικρό ποσό σύγχρονης επικοινωνίας και φωτισμού. Οι περισσότερες από αυτές τις εγκαταστάσεις Φ/Β ήταν πολύ μικρές, 10 - 40 W ανά νοικοκυριό.

Οι περισσότερες από αυτές τις εγκαταστάσεις είχαν χρηματοδοτηθεί από ορισμένους διεθνείς οργανισμούς. Οι μελέτες παρακολούθησης αυτών των προγραμμάτων έδειξαν ότι υπάρχουν πολύ μεγάλα ποσοστά αποτυχίας, κυρίως λόγω έλλειψης τεχνικής υποδομής και της κατάρτισης, ο σχεδιασμός της πληρωμής, καθώς και για άλλους λόγους. Σπάνια τα Φ/Β να αποτύχουν. Ακόμη και με επιδοτήσεις από τα διεθνή ειδησεογραφικά πρακτορεία, το υψηλό αρχικό κόστος της ιδιοκτησίας (\$ 100 με 1.000), ήταν ακόμα ένα σημαντικό εμπόδιο σε μεγάλο μέρος της στον κόσμο, όπου αυτό αντιπροσωπεύει έσοδα ενός έτους για μια οικογένεια.

Στο αντίθετο άκρο της κλίμακας μεγέθους ήταν οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, τάξεως MW, που εγκαθίστανται από επιχειρήσεις κοινής ωφελείας στις ανεπτυγμένες χώρες τη δεκαετία του 1980 για να αξιολογήσουν τις δυνατότητές τους σε δύο εφαρμογές, ως τεχνολογία αιχμής φορτίου-μείωσης, όταν τα φωτοβολταϊκά παρέχουν πρόσθετη ικανοποίηση το φορτίου αιχμής κατά τη διάρκεια του απογεύματος ή διανέμοντας σε γεννήτριες, για τη μείωση των απωλειών μεταφοράς και διανομής.

Αρκετές αμερικανικές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας διερεύνησαν αυτές τις εφαρμογές, έτσι ώστε να αξιολογηθούν οι τεχνικές, καθώς και τα οικονομικά οφέλη για τα φωτοβολταϊκά στις εφαρμογές κλίμακας χρησιμότητας. Οι αμερικανικές επιχειρήσεις κοινής ωφελείας είχαν χάσει το ενδιαφέρον για τα Φ/Β στα τέλη της δεκαετίας του '90, παρόλο αυτά στην Ευρώπη και την Ιαπωνία άρχισε να αναπτύσσεται με ταχείς ρυθμούς, κυρίως λόγω της ισχυρής υποστήριξης των κυβέρνησαν. Μικρής και μεγάλης κλίμακας συστήματα συνδεδεμένα με το Φ / Β, ανθίζουν στις χώρες αυτές.

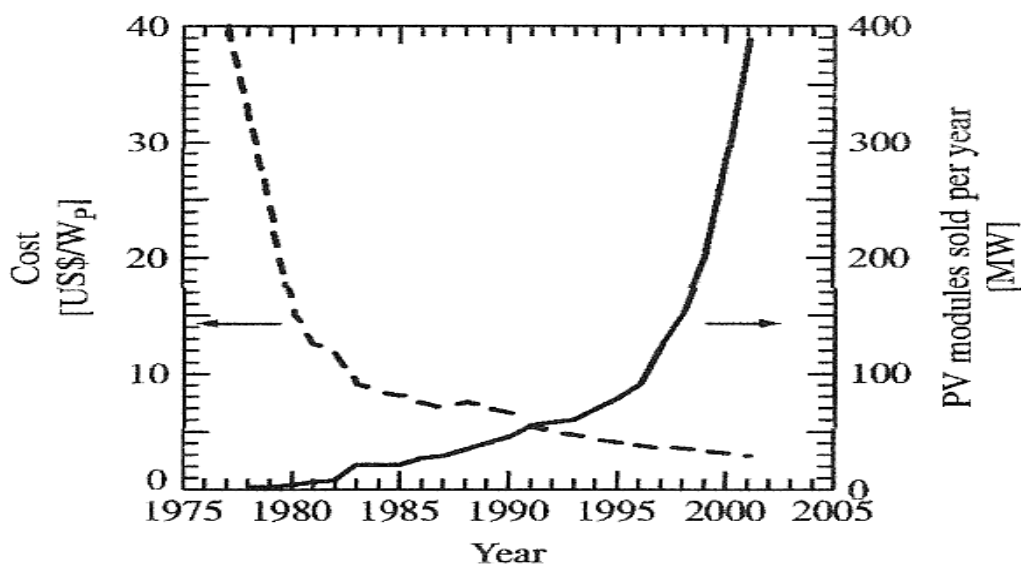
Ακόμα μια σημαντική εξέλιξη όσον αφορά την εφαρμογή των φωτοβολταϊκών στα τέλη του 1990, ήταν ενσωμάτωση στο κτίριο φωτοβολταϊκών, όπου τα Φ / Β κύτταρα ενσωματώνονται σε ένα πρότυπο κτίριο, όπως ένα παράθυρο ή μια στέγη, ή σε ένα αρχιτεκτονικό χαρακτηριστικό, όπως μια εξωτερική τέντα ήλιου ή ένας ημιδιαφανής φεγγίτης. Με τον τρόπο αυτό, το κόστος του Φ/Β αντισταθμίστηκε εν μέρει από το κόστος των οικοδομικών υλικών, τα οποία θα έπρεπε ούτως ή αλλιώς, οπότε το επιπλέον κόστος των φωτοβολταϊκών είναι πολύ χαμηλότερο.

Οι γερμανικές τράπεζες έδιναν γενναιοδωρη δάνεια για την αγορά της εγκατάστασης. Παρόμοιες ενέργειες χρησιμοποιούνται στην Ισπανία, την Ολλανδία και άλλες χώρες της Ευρώπης. Όμως, η μεγαλύτερη επιτυχία είναι στην Ιαπωνία, όπου λαμβάνουν έκπτωση από την κυβέρνηση για το 30% του κόστους

φωτοβολταϊκού συστήματος. Στη συνέχεια, ο ηλεκτρικός λογαριασμός τους καθορίζεται από το βοηθητικό πρόγραμμα, χρησιμοποιώντας την "καθαρή μέτρησης", και ο πελάτης πληρώνει μόνο την καθαρή διαφορά μεταξύ αυτού που χρησιμοποιεί και αυτό που παράγει. Εκπτώσεις είναι διαθέσιμες σε ορισμένα, αλλά όχι σε όλα.

### 1.5 Το κόστος των Φ/Β και οι προβλέψεις αγοράς

Στα πρώτα 20 χρόνια έρευνας, από τα μέσα του 1960 μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980, ο κύριος στόχος ήταν να κάνει το προϊόν πιο αποτελεσματικό έτσι ώστε να παραχθεί περισσότερη δύναμη. Οι δαπάνες μειώθηκαν επίσης δραματικά καθώς τα ηλιακά κύτταρα μετακινούνται από την πιλοτική κλίμακα σε κλίμακα παραγωγής. Αυτή είναι η δύναμη που θα παραδώσει ένα ιδανικό φορτίο όταν η μονάδα είναι φωτισμένη με 1 kW/m<sup>2</sup> της φωτεινής ενέργειας ενός ορισμένου επιπέδου του ραδιοφάσματος, ενώ η θερμοκρασία του θαλάμου καθορίζεται στους 25° C.



**Σχήμα 1.5** Ιστορική εξέλιξη του κόστους ανά Watt για τα ηλιακά κύτταρα και τον όγκο της παραγωγής. Οι δαπάνες αυτές για το Φ / Β, που συνήθως Έχουν αύξηση κατά ένα συντελεστή 2-3

Το διάγραμμα 1.5 δείχνει το κόστος (\$/WP) και η παραγωγή μετράται και ανταμείβεται η εργασία επί της εμπορικής αξίας των φωτοβολταϊκών. Μέχρι περίπου το 2000, οι τιμές αυτές αντιπροσώπευαν κυρίως c-Si την ηλιακή τεχνολογία των κυττάρων. Αυτές οι δύο καμπύλες είναι χαρακτηριστικές των περισσότερων νέων τεχνολογιών. Αρχικά, οι τιμές είναι υψηλές δεδομένου ότι η παραγωγή είναι μικρή, έτσι ευνοεί την ανάπτυξη και την έναρξη λειτουργίας στα έξοδα τα οποία καταναλώνονται όταν πωλούνται σχετικά λίγες μονάδες.

Η υψηλή τιμή αποκλείει τους περισσότερους αγοραστές εκτός από μοναδικές εξειδικευμένες εφαρμογές της κυβέρνησης και των χρηματοδοτούμενων προγραμμάτων. Καθώς αυξάνεται ο όγκος παραγωγής, το κόστος πέφτει. Η τεχνολογία είναι πλέον οικονομικά προσιτή στις ευρύτερες αγορές και η ζήτηση αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς. Κάθε μικρή μείωση του κόστους ανοίγει μεγαλύτερες αγορές και εφαρμογές. Μόλις μια ορισμένη τιμή έχει επιτευχθεί, μια τεράστια νέα αγορά θα ανοίξει με άφθονες ευκαιρίες για τους επενδυτές και για τη χρηματοδότηση νέων ικανοτήτων παραγωγής.

Αυτή η σχέση μεταξύ σωρευτικής παραγωγής των  $\Phi / B$  σε MWP (M) και τιμής σε  $\$ / WP$ , μπορούν να περιγραφούν με μια καμπύλη εμπειρίας, η οποία χαρακτηρίζεται από την παράμετρο που ονομάζεται ο εκθέτης εμπειρίας  $E$  ή

$$\frac{p(t)}{p_0} = \left[ \frac{M(t)}{M_0} \right]^{-E}$$

όπου  $M_0$  και  $P_0$  είναι το σωρευτικό της αγοράς και η τιμή στον αυθαίρετο αρχικό χρόνο  $t = 0$  (που μπορούμε να πάρουμε στην αρχή της πρώιμης εμπορίας).

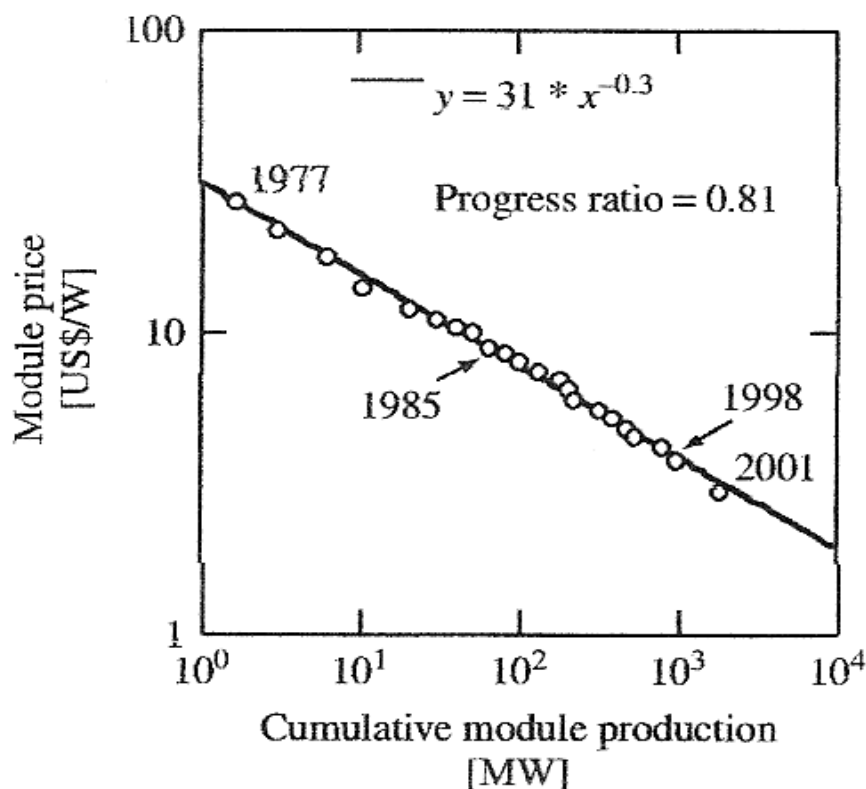
Η καμπύλη εμπειρίας για τα φωτοβολταϊκά φαίνεται στο διάγραμμα 1.6, όπου η χαμηλότερη τιμή ανά ομάδα εργασίας για ένα δεδομένο έτος είναι συναρτήσει της σωρευτικής παραγωγής μέχρι το έτος αυτό. Στο γράφημα η κλίση είναι σημαντική, δεδομένου ότι καθορίζει την εμπειρία του συντελεστή που δίνεται από το  $1-2^{-E}$ . Η ποσότητα αυτή δείχνει πόσο το κόστος μειώνεται για κάθε διπλασιασμό της σωρευτικής παραγωγής. Το διάγραμμα 1.6 παρουσιάζει έναν εκθέτη  $E = 0,30$  που δίνει έναν παράγοντα εμπειρίας του 0,19. Έτσι, οι τιμές έχουν μειωθεί κατά 19% και για κάθε διπλασιασμό το κόστος των φωτοβολταϊκών, των αγορών και της σωρευτικής παραγωγής κατά τα τελευταία 30 χρόνια. Εάν η τάση αυτή συνεχιστεί, η τιμή των  $\$ 1/WP$  θα επιτευχθεί όταν η αθροιστική παραγωγή φθάσει 105 MWp.

Θα πρέπει να πούμε ότι, ενώ ο ετήσιος ρυθμός αύξησης των πωλήσεων των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι αρκετά θεαματικός, με μέσο όρο 33% ετησίως από το 1995 έως το 2000 ο συντελεστής εμπειρίας του 0,19 είναι μάλλον μέτριος. Για παράδειγμα, για τις μήνες ημιαγωγών είναι περίπου 0,32, αν και για την αιολική ενέργεια είναι μόνο 0,15. Η  $\Phi/B$  τεχνολογία δεν μείωσε τις τιμές πολύ αποτελεσματικά. Αυτό υποστηρίζει την ιδέα ότι οι R & D θα πρέπει να υποστηριχθούν για να αναζητήσουν καινοτόμες λύσεις για να μειώσει τις τιμές πέρα από την ασφαλή πορεία της καμπύλης εμπειρίας.

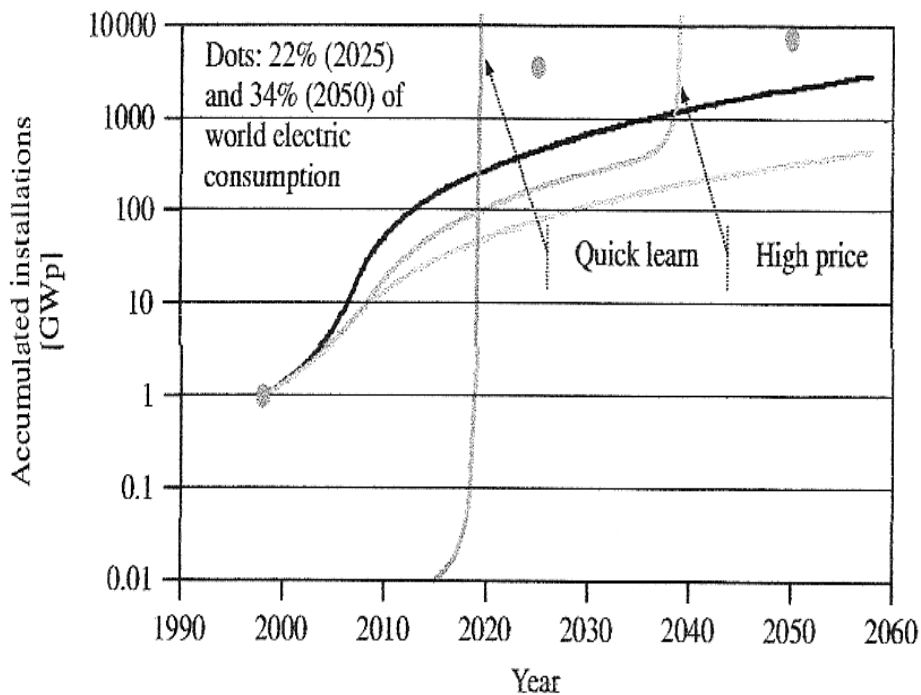
Όταν αυτή η συσσωρευτική της αγοράς θα επιτευχθεί μπορεί να προσδιοριστεί αν γνωρίζουμε την ζήτηση ελαστικότητα  $S$ . Από τεχνική άποψη, αυτή είναι η λογαριθμική παράγωγο της ετήσιας αγοράς σε σχέση με την τιμή και δείχνει ότι το 1% μείωση των τιμών θα παράγει ποσοστό  $S$  της αύξησης της αγοράς. Η παράμετρος αυτή μας επιτρέπει να προσδιορίζεται τότε στο μέλλον ένα ορισμένο επίπεδο τιμών έχει επιτευχθεί. Με βάση την εγκατεστημένη ισχύ  $\Phi/B$  που δίνεται στο σχήμα 1.7 για λογικές τιμές από την ελαστικότητα της ζήτησης. Μπορούμε να παρατηρήσουμε μια γρήγορη αρχική αύξηση, που ακολουθείται από μια περίοδο

μέτριας αύξησης. Αυτή η δεύτερη περίοδος καθορίζεται από το επενδυτικό κοινό ότι οι κοινωνίες είναι πρόθυμες να επενδύσουν σε αυτή την ακριβή ενεργειακή τεχνολογία.

Οι ακραίες καμπύλες της σκιασμένης περιοχής αντιστοιχούν στις δαπάνες για τα φωτοβολταϊκά και της υπόθεσης ότι το 0,05% και το 0,2% του ΑΕΠ των βιομηχανικών χωρών επενδύεται κάθε χρόνο στην ηλεκτρική ενέργεια PV. Ως σημείο αναφοράς, περίπου 0,3% των βιομηχανικών χωρών ΑΕΠ γίνεται που δόθηκε σήμερα ως ενίσχυση για την ανάπτυξη. Το 1992, μια μελέτη υποβλήθηκε στην διάσκεψη κορυφής του Ρίο με θέμα την ανάλυση και την δυνατότητα μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub>, διατηρώντας παράλληλα ένα υψηλό ρυθμό ανάπτυξης στις αναπτυσσόμενες χώρες. Οι τελείες αντιπροσωπεύουν το ποσό των φωτοβολταϊκών για την επίτευξη των απαιτήσεων RIGES. Με άλλα λόγια, τα σημεία, είναι το ύψος της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών που απαιτείται για να είναι περιβαλλοντικά και κοινωνικά προηγμένα.



**Σχήμα 1.6** Καμπύλη εμπειρία για τα φωτοβολταϊκά από το 1976 έως το 1998 [53]. Ευθεία γραμμή είναι κατάλληλο αναφέροντας συντελεστή εμπειρία  $1 - 2^{-0.3} = 0,19$



**Σχήμα 1.7** Μακροπρόθεσμη πρόγνωση της εγκατεστημένης ισχύς αιχμής σε PV. Η διακεκομμένη περιοχή αντιπροσωπεύει τη αναμενόμενη σωρευτική εγκατεστημένη ισχύς για μια σειρά παραδοχών που συνδέονται με τη ζήτηση. Οι τιμές δεν θα είναι ανταγωνιστικές κατά την περίοδο που εμφανίζεται εκτός της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας που διπλασιάζεται στην τιμή.

Ο στόχος για το 2050 είναι να παράγεται το 34% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως. Σε καμία περίπτωση δεν νοείται μια εξειδικευμένη αγορά που θα παράγεται από μια βιομηχανία εξοχικών σπιτιών. Έχει παρατηρηθεί ότι με το σημερινό χαμηλό συντελεστή εμπειρίας, δεν θα επιτευχθούν οι περιβαλλοντικοί στόχοι. Παρ' όλα αυτά, η πρόβλεψη αυτή προβλέπει ότι η βιομηχανία φωτοβολταϊκών θα είναι πολύ μεγάλη στα μέσα του αιώνα. Η καμπύλη επισημαίνει την υψηλή τιμή που αναφέρεται στην περίπτωση όπου οι συμβατικές τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας διπλασιάζονται. Στην περίπτωση αυτή, τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα φτάσουν την ανταγωνιστικότητα των τιμών με τις ισχύουσες ηλεκτρικές ενέργειας πριν από τα μέσα του αιώνα. Ίσως ένα κρυφό αλλά πρακτικό συμπέρασμα της ανάλυσης αυτής είναι ότι η υποστήριξη προς τη βιομηχανία φωτοβολταϊκών θα έχει ως αποτέλεσμα ένα πρόσθετο στοιχείο της ασφάλειας του εφοδιασμού με ηλεκτρική ενέργεια. Η ενεργειακή ασφάλεια θα έχει αυξημένο ενδιαφέρον για το κοινό, τους υπαλλήλους και στους πολίτες.

Οι προηγούμενες υποθέσεις αντιστοιχούν στην κατάσταση που διέπεται από μια συνεχή εμπειρία. Δεν θεωρείται τεχνολογική ανακάλυψη. Ποια θα ήταν η κατάσταση εάν μελετούσαμε αυτά που παρήχθησαν; Μια επαναστατική τεχνολογία θα χαρακτηριζόταν από υψηλότερο συντελεστή εμπειρίας και θα πρέπει να είναι σε θέση να μειώσει το κόστος από την εμπειρία πιο γρήγορα από ό,τι η σημερινή τεχνολογία Φ / Β. Η καμπύλη επισημαίνει γρήγορη εκμάθηση, στο Σχήμα 1.7 δείχνει



την υπόθεση μιας τεχνολογίας με τον παράγοντα εμπειρία της μικροηλεκτρονικής. Να σημειωθεί ότι το πολύ σε λίγα χρόνια θα είναι σε θέση να επιτύχει τον ανταγωνισμό με τη συμβατική ηλεκτρική ενέργεια.

Ωστόσο, σημειώνεται ότι η επιτυχία αυτή βασίζεται από την επίτευξη σε ορισμένα αθροιστικά της αγοράς, παρά την υψηλότερη τιμή αυτής της τεχνολογίας σε πρώιμο στάδιο σε σύγκριση με την ανταγωνιστική τεχνολογία των Φ/Β. Αυτό είναι συχνά εμφανιζόμενη κατάσταση και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη από τους επενδυτές. Η σύγκριση δεν πρέπει να γίνει μεταξύ των τιμών σε διαφορετικές λύσεις την ίδια χρονική στιγμή, αλλά για την ίση συσσώρευση της αγοράς. Με άλλα λόγια, πρέπει να συγκρίνει την τιμή ενός δικαιώματος σήμερα με εκείνη του ανταγωνιστή σε κάποια στιγμή του παρελθόντος και θα πρέπει να εξετάσει επίσης την εμπειρία του παράγοντα. Μερικές φορές ένα προϊόν που σε μια δεδομένη στιγμή, είναι πιο ακριβό από τον ανταγωνισμό, μπορεί να γίνει φθηνότερο νωρίτερα λόγω του ότι φέρει στο εσωτερικό του χαμηλότερο κόστος και συγκρίσιμες επιδόσεις. Αυτό είναι το επικίνδυνο χαρακτηριστικό της επιχειρηματικότητας.

Τέλος, η βασική R & D στα φωτοβολταϊκά πρέπει να ψάχνει για την καινοτομία, εάν θέλουμε φωτοβολταϊκά για την εκπλήρωση των στόχων που ζητά η κοινωνία. Την ίδια στιγμή, η στήριξη της αγοράς θα συμβάλει στη δημιουργία μια αρκετά μεγάλης βιομηχανίας που θα είναι σε θέση να εμπορευματοποιήσει τις ανακαλύψεις σε όλο τον κόσμο. Σε κάθε περίπτωση δεν μιλάμε για μια οίκο τεχνολογία. Η βιομηχανία φωτοβολταϊκής ενέργειας έχει δυνατότητα να γίνει ένας σημαντικός προμηθευτής ηλεκτρικής ενέργειας στον εικοστό πρώτο αιώνα και να αποτελέσει ένα ισχυρό σύμμαχο στις περιβαλλοντικές πιέσεις, για να διευκολυνθεί η ανθρώπινη ανάπτυξη, και να αποτελέσει στοιχείο της ασφάλειας στα ηλεκτρικά μας εφόδια.

## **1.6 Ποιοι είναι οι στόχοι της έρευνας Φ / Β και ποια η παραγωγή σήμερα**

Δεδομένου ότι ο γενικός στόχος είναι η παραγωγή ενός χαμηλού κόστους συστήματος φωτοβολταϊκών, χρειαζόμαστε περισσότερο από χαμηλού κόστους απόδοσης ηλιακά κύτταρα, χρειαζόμαστε ένα χαμηλό κόστος αποτελεσματικού συστήματος περιλαμβανομένων των στηριγμάτων, κλιματικών συνθηκών, ασφάλειες, καλώδια, αποθήκευση, παρακολούθηση. Λιγότερη έρευνα και ανάπτυξη έχει πάει σε αυτές τις περιοχές απ' ό,τι στα φωτοβολταϊκά των ηλιακών κυττάρων.

### **Πίνακας 1.3 Στόχοι της ηλιακής έρευνας των κυττάρων και της κατασκευής**

- Χρησιμοποιήστε λιγότερο υλικό ημιαγωγών κάνοντας λεπτότερα κύτταρα
- Χρησιμοποιήστε λιγότερο ακριβά υλικά ημιαγωγών. Αυτά τείνουν να είναι λιγότερο καθαρά και λιγότερο τέλεια
- Βελτίωση της απόδοσης ηλιακών κυττάρων με λιγότερο τέλειους ημιαγωγούς
- Ακόμη και με φτωχότερο υλικό διατηρούν υψηλή απόδοση στην παραγωγή, δηλαδή, μείωση του αριθμού των κυττάρων που απορρίφθηκε από τον έλεγχο της ποιότητας.

- Αύξηση υλικού χρησιμοποίησης με τη μείωση των αποβλήτων στην κατασκευή ημιαγωγών και κυττάρων
- Αύξηση της ροής ηλιακής ακτινοβολίας κυττάρων για τα ηλιακά κύτταρα, χρησιμοποιώντας συγκεντρωτές χωρίς αύξηση του κόστους ή οπτικές απώλειες.
- Αύξηση χρήσης της ηλιακής ακτινοβολίας μέσω της απορρόφησης περισσότερο του φάσματος
- Αύξηση της ταχύτητας και της απόδοσης των παραγωγικών διαδικασιών με τα βήματα επεξεργασίας και με απλοποίηση στο κόστος εξοπλισμού.
- το κόστος να μειωθεί και να βελτιωθεί η αξιοπιστία των BOS

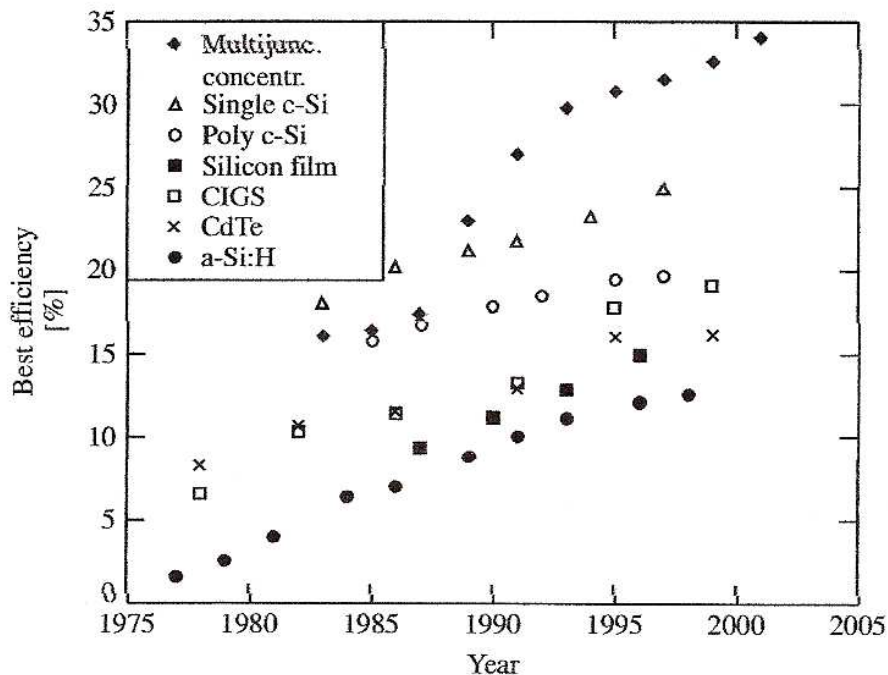
## 1.7 Παγκόσμιες τάσεις και εφαρμογές

Το διάγραμμα 1.8 δείχνει τις τάσεις της αποδοτικότητας που επιτεύχθηκαν κατά τα τελευταία 20 χρόνια για όλες τις μεγάλες  $\Phi / B$  τεχνολογίες. Τα αποτελέσματα αυτά είναι για τα μικρά "κύτταρα", το ένα είδος είναι αποτέλεσμα που καθορίζει τις δυνατότητες ενός συγκεκριμένου συστήματος υλικού και τεχνολογίας. Η υψηλότερη απόδοση είναι το πιο δαπανηρό των συσκευών, με βάση III-V τεχνολογίες, όπως GaAs και GaInP, που αποτελείται από πολλαπλές συσκευές με διαφορετικές οπτικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, που καλλιεργούνται το ένα πάνω στο άλλο. Αυτά τα κύτταρα υπερβαίνουν όλες τις τεχνολογίες κυψελών για τρεις λόγους.

Είναι κατασκευασμένα από πολύ υψηλής καθαρότητας κρυσταλλικά υλικά, που μπορούν να συλλάβουν είτε σε ένα ευρύτερο φάσμα του ηλιακού φάσματος ή για την ίδια κλίμακα πιο αποτελεσματικά από ό,τι άλλες συσκευές, και λειτουργούν με υψηλά ποσοστά συγκέντρωσης οι οποίες αυξάνουν την απόδοση. Δεν αποτελεί έκπληξη, αλλά είναι και εξαιρετικά δαπανηρή.

Η κινητήριος δύναμη του κλάδου των φωτοβολταϊκών είναι ακόμη το Si όπως αναφέρεται στα κεφάλαια 5, 6, και 7. Το Si με τη μορφή είτε ενιαίου κρυστάλλου Si ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου αντιπροσωπεύει το 90% της αγοράς φωτοβολταϊκών. Τα πολυκρυσταλλικά κύτταρα Si έχουν καταγραφεί με 25% και 20% αποδοτικότητα, αντίστοιχα, η διαφορά στην ενότητα των επιδόσεων μεταξύ των δύο τεχνολογιών Si είναι πολύ μικρότερη. Έχουν συνήθως 14% και 12% απόδοση σε εμπορικές μονάδες, αντίστοιχα.

Παρά τις τρεις δεκαετίες έρευνας και την κατασκευή, επιστήμονες και μηχανικοί βρίσκονται ακόμη στη φάση βελτίωσης της επιδόσεις του Si-πλακιδίων στα φωτοβολταϊκά. Και επίσης ερευνούν τρόπους μείωσης του κόστους. Μεταξύ αυτών των προσπαθειών είναι και οι εξελίξεις των φύλλων του πυριτίου, μια πολύ ακριβή και σπάταλη διαδικασία. Τα φύλλα έχουν ήδη φτάσει σε ένα αξιοσημείωτο ποσοστό της αγοράς με δύο εταιρείες: την RWE στη Γερμανία και η Evergreen Solar στις ΗΠΑ.



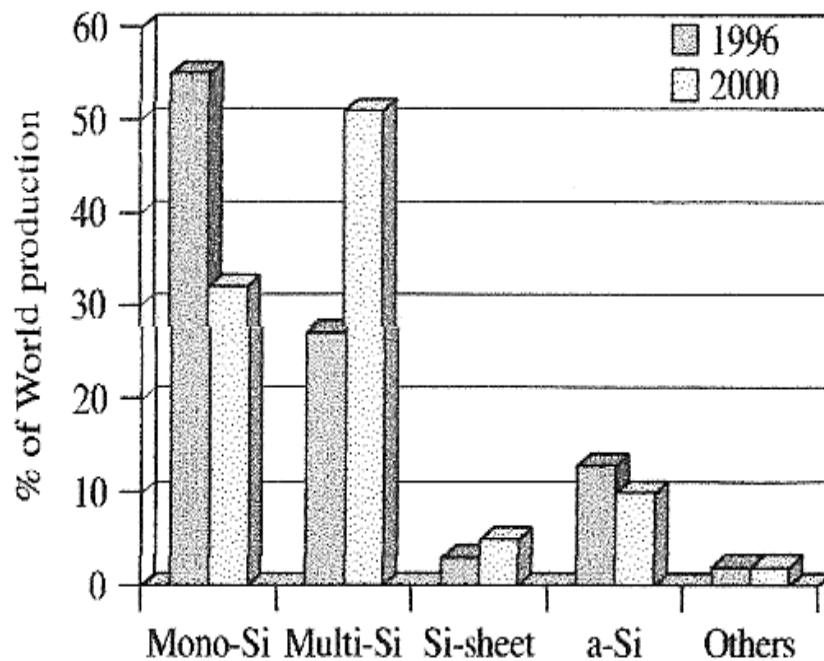
**Σχήμα 1.8** Η Καλύτερη μικρή περιοχή (0,5 - 5 cm<sup>2</sup>) απόδοσης για τις διάφορες τεχνολογίες κυψελών που μετρούνται σύμφωνα με τυπικές συνθήκες δοκιμών εργαστηρίου. Οι MJ συγκεντρωτές είναι δίκλινες διασταυρώσεις πριν από το 1995, και τριπλά διασταυρώσεις μετά.

Συνεχίζοντας το καθορισμό της αποτελεσματικότητας του άξονα, συναντάμε τιμές τριών μεγαλύτερων φωτοβολταϊκών με κατασκευές από τα στοιχεία: Cu, Se<sub>2</sub>, CdTe, και a-Si, με αυτή τη σειρά. Το κύριο κίνητρο για το ενδιαφέρον στα φωτοβολταϊκά ανέκαθεν είναι η δυνατότητα μείωσης του κόστους, και φυσικά υψηλότερες επιδόσεις. Τα κύτταρα με αποδόσεις της τάξης του 19% και η θέση τους, δημιουργεί έντονο ανταγωνισμό στα πολυκρυσταλλικά, αν και υπάρχουν τεράστιες διαφορές στον τομέα της μεταποίησης με βάση τις εμπειρίες μεταξύ Se<sub>2</sub> Cu και πολυ-Si. Τα οφέλη και οι προκλήσεις των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών συζητήθηκαν λεπτομερώς στο τμήμα 1.9. Τέλος, σημειώνουμε ότι η κατηγορία των Si στα ηλιακά κύτταρα στο Σχήμα 1.8 είναι μια ειδική περίπτωση των ηλιακών κυττάρων που θα αναπτυχθεί εξ ολοκλήρου από μία εταιρεία (Astropower στις ΗΠΑ), στην οποία εργάζονται για την επίτευξη των υψηλών επιδόσεων του πολυκρυσταλλικού πυριτίου με την προσέγγιση χαμηλού κόστους από λεπτές ταινίες.

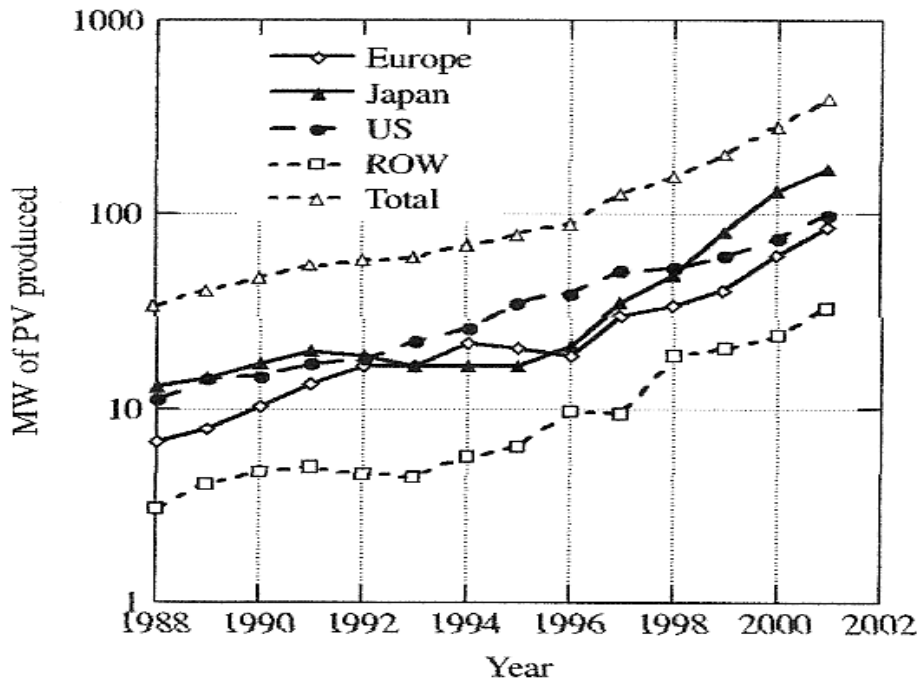
Από τα αποτελέσματα στο Σχήμα 1.8 προκύπτει σαφώς ότι υπάρχουν πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες από την άποψη της δυνατότητας τους να επιτύχουν αρκετά υψηλή απόδοση. Αλλά η πραγματικότητα είναι ότι, σχεδόν το 90% των μονάδων Φ/Β στον κόσμο είναι είτε μονόκλινα, c-Si ή πολυ c-Si. Η εξέλιξη δείχνει μια τάση απομάκρυνσης από c-Si προς τα πολυκρυσταλλικά-Si τεχνολογίας, με το μερίδιο αγοράς των φύλλων Si να αυξάνεται. Περίπου το 10% παγκόσμιος, οι πωλήσεις είναι a-Si/a-Si ή a-Si/a-SiGe και το υπόλοιπο <1% Cu (INGA) Se<sub>2</sub>, CdTe και συγκεντρωτές. Οι συγκεντρωτές με βάση GaInP / GaAs κύτταρα έχουν ακόμη βρει

εμπορικές εφαρμογές στη γη, αλλά και σε GaInP / κύτταρα GaAs που χρησιμοποιούνται συνήθως για διαστημικές αποστολές όπου η υψηλή απόδοση τους είναι πιο σημαντική από το υψηλό κόστος τους.

Το διάγραμμα 1.10 δείχνει την κατανομή από τις τρεις μεγάλες γεωγραφικές περιοχές της Ευρώπης, την Ιαπωνία και τις Ηνωμένες Πολιτείες. Σημειώστε ότι αυτή είναι μια λογαριθμική κλίμακα, υποδηλώνοντας μια πολύ σταθερή αύξηση την τελευταία δεκαετία, του 20-30%. Η παραγωγή το 2001 ήταν πράγματι 36% υψηλότερο σε σχέση με το 2000. Οι ΗΠΑ είχαν σταθερή την ανάπτυξη και οδήγησαν τον κόσμο σε φωτοβολταϊκά μεταξύ 1992 και 1998, όταν η Ευρώπη και η Ιαπωνία είχε στατική ανάπτυξη του μεταποιητικού κλάδου. Στη συνέχεια, το 1998, η σταδιακή και υποστήριξη των κρατών προς τους πολιτικές, σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες και στην Ιαπωνία είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της παραγωγής. Οι πολιτικές αυτές υποκινήθηκαν εν μέρει από μια ισχυρή δέσμευση για τη μείωση του CO<sub>2</sub> ως εκτός νόμου από το πρωτόκολλο του Κιότο. Η ευρωπαϊκή παραγωγή κυριαρχείται από την Ισπανία στενά ακολουθούμενη από τη Γερμανία, και σε μικρότερο βαθμό, τη Γαλλία, την Ιταλία και την Ολλανδία. Για παράδειγμα, ένα μεγάλο μέρος της παραγωγής των Φ/Β γίνεται στις ΗΠΑ (~ 70%) και Ισπανία (~ 80%).

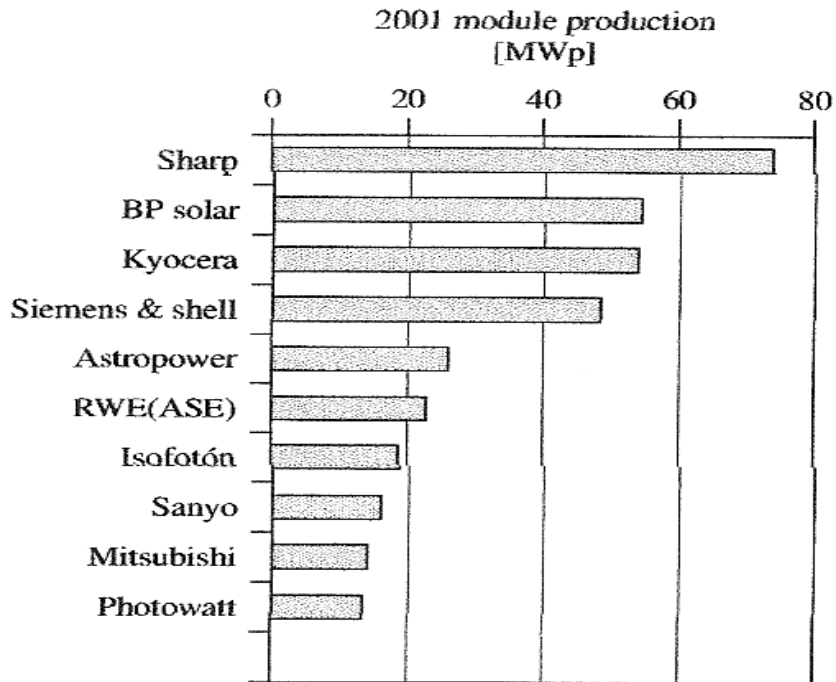


Σχήμα 1.9 Κατανομή της αγοράς φωτοβολταϊκών



Σχήμα 1.10 Η παγκόσμια παραγωγή φωτοβολταϊκών μονάδων

Στο σχήμα 1.11 φαίνονται οι κορυφαίοι δέκα κατασκευαστές Φ/Β για το 2001. Ο κατάλογος έχει επικεφαλής την ιαπωνική εταιρεία ηλεκτρονικών ειδών, Sharp, και ακολουθείτε στην τρίτη θέση από την Kyocera, μια άλλη ιαπωνική εταιρεία. Τη δεύτερη θέση κατέχει το Ηνωμένο Βασίλειο με βάση την BP Solar με c-Si και πολυ-Si εγκαταστάσεων στις Ηνωμένες Πολιτείες, την Ισπανία, την Αυστραλία, και την Ινδία. Η BP Solar είχε επίσης δύο τεχνολογίες στην εμπορευματοποίηση της, δηλαδή τα a-Si και τα CdTe. Ο μεγαλύτερος κατασκευαστής Φ/Β στις ΗΠΑ σήμερα είναι η Shell Solar. Από αυτό το γράφημα, από όλες τις εταιρείες στο Σχήμα 1.11, μόνο η Astropower (ΗΠΑ), η Isofoton (ισπανικά), και η Photowatt (γαλλικά) μπορούν να εστιάσουν την δραστηριότητά τους αποκλειστικά στα φωτοβολταϊκά. Οι υπόλοιπες είναι είτε τμήματα ή θυγατρικές των μεγάλων επιχειρήσεων με ποικίλα ενδιαφέροντα κατασκευής.



**Σχήμα 1.11** Οι κορυφαίοι δέκα κατασκευαστές κυψελών Φ / Β το 2001

Το Σχήμα 1.3 έδειξε την παγκόσμια τάση για διάφορες εφαρμογές. Ο ρυθμός ανάπτυξης ήταν μεγάλος κυρίως στην Ευρώπη και Ιαπωνία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Υπάρχει σταθερή αύξηση της χρήσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων αντί του πετρελαίου και της υβριδικής τεχνολογίας. Αυτές είναι εκτός δικτύου εφαρμογών και συνήθως σε απομακρυσμένες περιοχές. Σημειώνετε ότι στο διάγραμμα 1.3 δείχνει ότι η κλίμακα, κεντρικών ηλιακών σταθμών παραγωγής ενέργειας είναι σχεδόν ανύπαρκτη. Αυτά τα τεράστια «ηλιακά ηλεκτρικά αγροκτήματα» οραματίστηκαν κατά τις πρώτες ημέρες των φωτοβολταϊκών, που θα κατασκευάζονταν στην ηλιόλουστη άνυδρη έρημο, όπου το έδαφος ήταν ουσιαστικά άνευ αξίας για άλλες χρήσεις.

Αυτές οι τεράστιες εγκαταστάσεις θα αντικαταστήσουν συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, τουλάχιστον για τη διάρκεια της ημέρας. Η μεγαλύτερη κεντρική μονάδα στον κόσμο Φ/Β μέχρι σήμερα έχει εγκατασταθεί στη κεντρική Καλιφόρνια μεταξύ 1984-1985. Μετά από αρκετά χρόνια λειτουργίας, η εγκατάσταση αποσυναρμολογήθηκε και οι ενότητες πωλήθηκαν μεμονωμένα, στην αγορά. Σήμερα, η μεγαλύτερη κεντρική μονάδα παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά είναι 3 MW στο Serre, της Ιταλίας. Υπήρξαν αρκετές άλλες εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας. Οι τεχνικές, της εργασίας, και το κόστος λειτουργίας έχει επίσης καταγραφεί. Ειδικότερα, η 0,4 MW a-Si στο εργοστάσιο στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ και το 0,48 MW του εργοστασίου συγκέντρωσης στην Τενερίφη, η Ισπανία είναι αξιοσημείωτη, επειδή δεν χρησιμοποιεί την τεχνολογία c-Si.

## 1.8 Το κρυσταλλικό πυρίτιο και η πρόοδος του

Το Διάγραμμα 1.9 έδειξε ότι οι c-Si, ήταν υπεύθυνες για υο σχεδόν 90% της παγκόσμιας παραγωγής  $\Phi / B$  το 2001. Πώς πραγματικά έχει συμβεί; Αρχικά, υπήρχε μια τεράστια παγκόσμια επιστημονική και τεχνική υποδομή για το Si, αρχίζοντας από το 1960. Οι τεράστιες κρατικές και βιομηχανικές επενδύσεις και τα προγράμματα για την κατανόηση των χημικών και ηλεκτρονικών ιδιοτήτων του Si, το πώς θα αυξηθεί με την απαιτούμενη καθαρότητα και την κρυσταλλική δομή, καθώς και για τη δημιουργία του αναγκαίου εξοπλισμού που να εκτελεί όλα τα στάδια επεξεργασίας.

Το κίνητρο δεν ήταν μόνο στην επιστημονική περιέργεια, αλλά μάλλον η ανταγωνιστική μονάδα για την κατασκευή όλο και πιο σύνθετου ολοκληρωμένου κυκλώματος τσιπ, το οποίο δημιούργησε το πρώτο της αναλογικό, στη συνέχεια, την ψηφιακή ηλεκτρονική επανάσταση που οδήγησε στις τρέχουσες πληροφορίες μας, την ψυχαγωγία, και των τηλεπικοινωνιών. Η υπόσχεση του πλούτου και της δεσπόζουσας θέσης στην αγορά οδήγησε δημόσιους και ιδιωτικούς οργανισμούς για να ξεκλειδώσουν πολλά μυστικά της τεχνολογίας του Si. Το χάσμα ζωνών του πυριτίου, της τάξης του 1,1 eV, είναι σχεδόν άριστο για να κάνει ένα καλό ηλιακό μετατροπέα. Η βιομηχανία των φωτοβολταϊκών θα μπορούσε να το αξιοποιήσει για δική της εφαρμογή. Επιπλέον, το Si είναι ένα από τα πιο άφθονα μέταλλα στη Γη. Έτσι, δεν υπάρχει φυσικός περιορισμός στην παροχή του.

Ωστόσο, για μηχανικούς λόγους, το πυρίτιο απαιτεί σχετικά πυκνά κύτταρα, με τυπικό πάχος πλάκας, περίπου 300  $\mu\text{m}$ . Ως εκ τούτου, ορισμένα από τα ηλεκτρόνια αντλούνται από τα φωτόνια στη ζώνη διεξαγωγής και πρέπει να διανύουν μεγάλες αποστάσεις, σχετικά με την επιφάνεια τους μέσω της επιλεκτικής επαφής σε αυτή τη ζώνη (η επαφή pn). Κατά συνέπεια, ένα καλό υλικό με υψηλή χημική καθαρότητα είναι απαραίτητο για την καταπολέμηση της φυσικής τάσης της αγωγιμότητας με ηλεκτρόνια για να επιστρέψει στην ζώνη σθένους. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται απώλεια ανασυνδυασμού. Για να αποφύγετε αυτές τις απώλειες, τα ηλεκτρόνια πρέπει να είναι πολύ κινητικά. Οι ακαθαρσίες και οι ατέλειες πρέπει να αποφεύγονται καθώς μπορούν να απορροφήσουν την επιπλέον ενέργεια του ηλεκτρονίου και να το μετατρέψουν σε θερμότητα. Η παραγωγή θερμότητας, η οποία είναι επιθυμητή στα θερμικά ηλιακά πάνελ, όπου αυτή η θερμότητα μεταφέρεται σε ένα ρευστό, είναι ανεπιθύμητη στα  $\Phi / B$ , γιατί θα προσπαθήσει να ανακτήσει την ηλιακή ενέργεια.

Το πολυπυρίτιο έχει πλέον την επιθυμητή χημική καθαρότητα, αλλά η ποιότητα των δομικών του είναι ελλιπής. Η ποιότητα των δομικών θα βελτιωθεί με την τήξη του πολυπυριτίου ( $> 1400^\circ \text{C}$ ) και με «πάγωμα» ή να το αφήσουμε να στερεοποιηθεί πολύ αργά γύρω από ένα περιστρεφόμενο κρυσταλλικό μηχανισμό, συνήθως με την (CZ) μέθοδο. Με τον τρόπο αυτό, ένα κυλινδρικό μόνο κρυσταλλικής μορφής ράβδου παράγει περίπου 25 cm διάμετρο και των 100 cm μήκος. Σε αυτό το βήμα, ένας πολύ μικρός αριθμός των ατόμων του βορίου έχουν ενταχθεί στην τήξη για να καταστεί δυνατή η μεταλλική επαφή. Αυτό αποτελεί τον p-τύπο πλευρά της σύνδεσης PN.

Οι ράβδοι είναι τώρα κομμένοι με ένα πριόνι. Γι 'αυτό ένα πολύ μακρύ καλώδιο (μέχρι 500 χιλιόμετρα) τυλίγεται πολλές φορές σχετικά με την περιστροφή σε δίσκους. Ωστόσο, η διαδικασία είναι αργή και περίπου το ήμισυ του πυριτίου χάνεται στα πριονίδια. Η πρόκληση εδώ είναι να κόψει το λεπτότερο, ώστε να

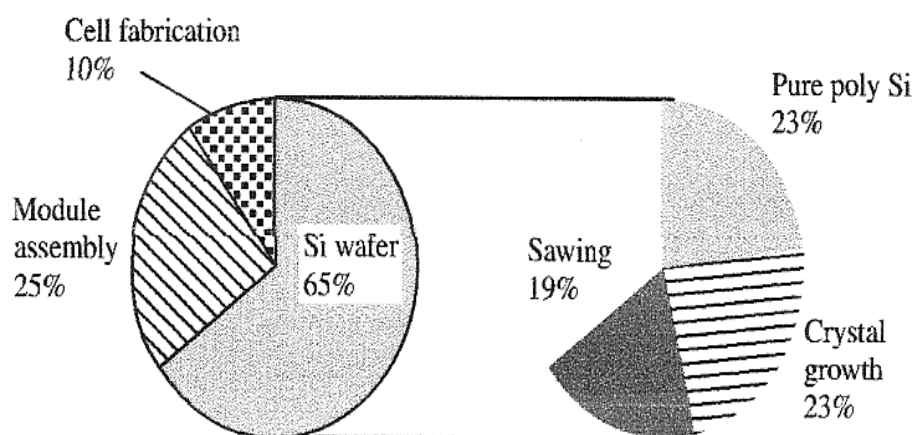
υπάρχει περισσότερο κέρδος από το πυρίτιο. Οι τεχνικές και οι προκλήσεις που σχετίζονται με την ανάπτυξη κρυστάλλων και το πριόνισμα περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6.

Η ράβδος τώρα είναι χαραγμένη ελαφρώς για την καλύτερη απορρόφηση του φωτός. Στη συνέχεια, η αγωγιμότητα στις επαφές γίνεται με την εισαγωγή από τα άτομα του φωσφόρου σε μία επιφάνεια της ράβδου, αντικαθιστώντας την n-τύπου σε επαφή pn. Αυτό γίνεται με τον εντοπισμό σε μια πλούσια σε φώσφορο ατμόσφαιρα σε υψηλή θερμοκρασία, έτσι ώστε αυτά τα άτομα διεισδύουν ελαφρώς (~ 0,2 μm), στο πυρίτιο των πλακιδίων. Έπειτα, τα μεταλλικά πλέγματα που αναγράφονται στο βόριο και στο φωσφόρο ανακατεύονται με μερικές άλλες προσμείξεις. Τα τεχνάσματα για το διαχωρισμό του βόριου και του φωσφόρου είναι πολλά και ανάλογα με την κάθε χρήση που θέλουμε. Οι σχάρες διευκολύνουν τη συλλογή της ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς απώλειες και συνήθως εφαρμόζονται με χαμηλό κόστος. Όμως, ένα ηλιακό κύτταρο είναι εύθραυστο και παράγει χαμηλή τάση (περίπου 0,5 V), έτσι είναι περίπου 36 κελιά και συνδέονται με τον χαλκό που σχηματίζεται από ένα φύλλο, και έπειτα η ενσωματώνεται με πολυμερές που περιβάλλει τα ηλιακά κύτταρα, καθώς και ένα πλαστικό στρώμα.

Η κατανομή των δαπανών, όπως αναφέρονται στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.12. Η σειρά αντιπροσωπεύει περίπου το 65% της μονάδας κόστους, περίπου ίση μεταξύ του καθαρισμού της κρυστάλλωσης και του πριονίσματος. Αυτό το πυρίτιο βρίσκεται σήμερα ως σκράπ ή των υπολειμμάτων από τη βιομηχανία μικροηλεκτρονικής στην τιμή των ~ \$ 50/kg. Η αύξηση της αγοράς φωτοβολταϊκών στη δεκαετία του 1990 έχει εξαντλήσει σχεδόν αυτή την αγοράς. Διάφορες προμήθειες προέρχονται από την πρώην Σοβιετική Ένωση, των οποίων η μικροηλεκτρονική βιομηχανία έχει εξαφανιστεί λόγω δυτικού ανταγωνισμού. Η μέθοδος Siemens θεωρείται τελικά πολύ ακριβή για τα φωτοβολταϊκά, αλλά και η καθαρότητα που παρέχει είναι αναγκαία για την κατασκευή των ηλιακών κύτταρων.

Οι προσπάθειες τη δεκαετία του 1980 για την κατασκευή ενός χαμηλού κόστους ηλιακού πυριτίου (SolSil) δεν ευδοκίμησε, εν μέρει λόγω των τόκων που παράγονται από τις μικρές αγορές. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν τα βήματα για τον καθαρισμό και την παραγωγή πυριτίου MG, αποφεύγοντας τη δαπανηρή διαδικασία χλωρίωσης για περαιτέρω καθαρισμό. Δεν είναι σαφές κατά πόσον μπορεί να επιτύχει το αναγκαίο επίπεδο καθαρότητας. Ακόμη και αν είναι εφικτό, δεν είναι αβέβαιο αν μια τέτοια μέθοδος θα ήταν λιγότερο δαπανηρή από την τυπική διαδικασία της Siemens ή κάποια απλοποιημένη έκδοση της.





**Σχήμα 1.12** Ανάλυση του κόστους στην κατασκευή ενός Si-wafer Φ / B πλαισίου. Η δεξιά πλευρά παρουσιάζει το κόστος

Μια σημαντική πρόοδος στον τομέα της ηλιακής κατασκευής κυττάρων ήταν η απόδειξη ότι οι κυψέλες με υψηλή απόδοση μπορεί να είναι κατασκευασμένες από ράβδους που περιέχουν τις εκατοντάδες των κόκκων (1-10 mm) που ονομάζονται πολυκρυσταλλικού -Si ή πολυκρυσταλλικού-Si, αν και αυτός ο όρος είναι λιγότερο ευνοημένος διότι μπορεί να προκαλέσει σύγχυση με την πρώτη ύλη. Η πολυ-Si διαδικασία ανάπτυξης είναι πολύ πιο γρήγορη και φθηνότερη. Η απώλεια της ικανότητας των λίγων εκατοστιαίων μονάδων που προκαλείται από το τυχαίο προσανατολισμό της κρυσταλλικής των κόκκων σε ένα πολυ-Si πλακιδίων, σε σύγκριση με ένα μόνο c-Si αντισταθμίζεται από το χαμηλότερο κόστος, έτσι ώστε η τιμή ανά βατ να είναι η ίδια σε μια μονάδα βάσης.

Μια ενδιαφέρουσα επιλογή σε ηλιακή κατασκευή κυττάρων είναι η ανάπτυξη της ράβδου. Οι ράβδοι δεν απαιτούν τη δαπανηρή διαδικασία κοπής. Ωστόσο, η ανάπτυξη της ράβδου είναι πιο αργή, επειδή συνήθως αναπτύσσονται στο επίπεδο που είναι κάθετο στην επιφάνεια της ράβδου, σε με πολύ μικρή περιοχή. Αντίθετα, οι ράβδοι αναπτύσσονται στο επίπεδο της επιφάνειας της περιοχή. Η τυπική διαδικασία της στερεοποίησης είναι πολύ αποτελεσματική διαδικασία καθαρισμού, λόγω διαχωρισμού των προσμειξεων στο λιωμένο πυρίτιο. Εν ολίγοις, η ράβδος είναι καλή και πιθανόν φθηνότερη.

Πρόκληση συνίστανται στην αύξηση της ταχύτητας της ανάπτυξης και της απόδοσης των κυττάρων. Πράγματι, η απόδοση του 25% έχει επιτευχθεί για τα κύτταρα εργαστηρίου σε μια μακροχρόνια περίπλοκη διαδικασία, όπου κάθε δυνατή βελτιωμένη λεπτομέρεια έχει εφαρμοστεί για την παραγωγή μιας ιδανικής δομής. Ωστόσο, τα περισσότερα εργοστάσια χρησιμοποιούν κάποια παραλλαγή της κατασκευής πλακιδίων και κυττάρων, συμπεριλαμβανομένης της διαδικασίας μεταξοτυπίας, που οδηγεί σε 15% ή 13% των κυττάρων. Αυτές οι αποδόσεις μειώνονται στο 14% ή 12%, κυρίως λόγω του επαναπροσδιορισμού του χώρου που

τώρα περιλαμβάνει το πλαίσιο. Αυτή η διαδικασία θεωρείται ο καλύτερος συμβιβασμός μεταξύ κόστους και απόδοσης.

Το μεγάλο χάσμα απόδοσης μεταξύ των εργαστηρίων και των εμπορικών κύτταρων, μαζί με την αυξανόμενη αγορά, δείχνουν ότι νέα, υψηλής απόδοσης εμπορικό κελί θα εμφανιστεί στα επόμενα χρόνια. Ορισμένες εταιρείες (BP Solar και η Sanyo, για παράδειγμα) είναι ήδη σε αυτήν την πορεία και έχουν διαφορετικές διαδικασίες που οδηγούν σε 17 με 18% της παραγωγής. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η τεχνολογία είναι ασυμβίβαστη, έτσι ώστε μια νέα επεξεργασία, η οποία δεν μπορεί να είναι τόσο φθηνή, είναι υποχρεωμένη να κατασκευάσει κύτταρα με αυτό το υλικό. Ένας πρόσθετος παράγοντας που επηρεάζει πολύ σοβαρά το κόστος των κυττάρων είναι η απόδοση της παραγωγής. Στην κατασκευή οποιασδήποτε συσκευής ημιαγωγών, η απόδοση παραγωγής είναι 95%.

## 1.9 Η επιφανειακή πρόοδος

Θα μπορούσε να αναρωτηθεί κανείς γιατί να αναπτυχθεί μια εντελώς διαφορετική τεχνολογία ημιαγωγών για τα φωτοβολταϊκά όταν η Si είναι τόσο καλά εδραιωμένη;. Η απάντηση είναι για να επιτύχουμε χαμηλότερο κόστος και τη βελτίωση της κατασκευής σε μεγαλύτερες κλίμακες. Στην πραγματικότητα, έχουμε ήδη υπερασπιστεί την πεποίθησή μας ότι η τεχνολογία Si, είναι πολύ σημαντική κατά τις επόμενες δεκαετίες, αλλά δεν θα είναι σε θέση να επιτύχουμε τους απώτερους στόχους που απαιτούνται για την διεύθυνση των φωτοβολταϊκών παγκοσμίως.

Ως εκ τούτου, τουλάχιστον δέκα φορές περισσότερο κρυσταλλικό πυρίτιο είναι απαραίτητο για να απορροφήσει ένα συγκεκριμένο μέρος του ηλιακού φωτός σε σχέση με άλλες μορφές ημιαγωγών, όπως GaAs, CdTe, Cu (INGA) Se<sub>2</sub>, ακόμα και άλλες μορφές Si όπως a-Si. Όλα αυτά οδηγούν, όπως είδαμε και πριν, σε υψηλό κόστος υλικού. Επιπλέον, αναφέρουμε ότι, σήμερα, μεγάλο μέρος της βιομηχανίας Si- Φ / B εξαρτάται από την αγορά υλικού από την ηλεκτρονική βιομηχανία. Καθώς η ζήτηση σε φωτοβολταϊκά μεγαλώνει, η προμήθεια υλικών μπορεί να καταστεί ανεπαρκείς (βλέπε κεφάλαιο 5).

Αναγνωρίστηκαν σχεδόν συντομότερα τα c-Si Φ / B κύτταρα που αναπτύχθηκαν στη δεκαετία του 1950, ότι σε σχέση με άλλους ημιαγωγούς θα μπορούσε να κάνει καλά ηλιακά κύτταρα. Τα περισσότερα από αυτά υπάρχουν σε μια μορφή που ονομάζονται λεπτοί υμένες. Όταν είναι κατασκευασμένα με χρήσιμες συσκευές, είναι τόσο λεπτά ώστε να πρέπει να κατατίθενται σε ένα ξένο υλικό που ονομάζεται υπόστρωμα για μηχανική υποστήριξη, όπως μια στρώση του χρώματος σε ένα κομμάτι από ξύλο ή η αντανακλαστική επίστρωση μετάλλου στο γυαλί για να διαμορφώσει έναν καθρέφτη. Καθ' όλη τη δεκαετία του 1970, η πρόοδος στην Cu<sub>2</sub>S/CdS στα ηλιακά κύτταρα οδήγησε στην ανάπτυξη νέων θεωριών για να εξηγήσουν την απόδοση της συσκευής, των νέων μεθόδων και της επεξεργασίας υλικών, καθώς και νέες έννοιες στον τομέα της μεταποίησης συσκευών και ημιαγωγών.

Μεταξύ του 1981 και 82, τέσσερις τεχνολογίες απόδειξαν την ικανότητά τους να ξεπεράσουν το 10% στο φράγμα απόδοσης. Η a-Si έχει ένα μικρό πρόβλημα σταθερότητας που δεν είναι καταστροφική και δεν έχει αποτελέσει σημαντικό εμπόδιο για την περαιτέρω ανάπτυξη και την παραγωγή. Θεμελιώδες πρόβλημα της σταθερότητας έχει διαπιστωθεί με Cu (INGA) Se<sub>2</sub> και CdTe ενότητες. Η έρευνα και η ανάπτυξη των πόρων κατευθύνθηκε σε όλο τον κόσμο σε TFSC τεχνολογία. Αυτό έχει οδηγήσει σε σταθερή πρόοδο στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των κυττάρων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8.

Το κυριότερο πλεονέκτημα του TFSC είναι ότι θα έχει χαμηλότερο κόστος από ό,τι των c-Si-πλακιδίων, όταν αυτά θα παράγονται σε αρκετά μεγάλες ποσότητες για να αντισταθμίσει την αρχική επένδυση του κεφαλαίου. Το χαμηλότερο κόστος των TFSC ακόλουθος είναι: συνήθως 100 φορές λεπτότερο από το Si (~ 3.1 μm για όλα τα στρώματα ημιαγωγών) κατατίθενται σε σχετικά χαμηλό κόστος, όπως το γυαλί, και τα φύλλα μετάλλου και πλαστικού, κατατίθενται συνεχώς σε μεγάλες περιοχές με πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία και μπορούν να αντέξουν σε υψηλότερες ακαθαρσίες και είναι εύκολα να ενσωματωθούν σε διασυνδεδεμένα μονολιθικά τμήματα. Οι ημιαγωγοί σε τυπικά TFSC είναι 10 φορές λεπτότεροι από μια ανθρώπινη τρίχα. Τα TFSC είτε πολυκρυσταλλικά με ~ 1 μm μέγεθος κόκκου όπως Cu (INGA) Se<sub>2</sub> ή CdTe, ή αλλιώς άμορφα σαν a-Si. Αυτό είναι συνέπεια που θα κατατεθεί σε θερμοκρασίες πολύ χαμηλές για να επιτρέψει το τέλειο κρυσταλλικό σχηματισμό.

Τα TFSCs αποτελούνται συνήθως από 5 έως 10 διαφορετικά στρώματα των οποίων οι λειτουργίες περιλαμβάνουν τη μείωση αντίστασης, που αποτελούν τη σύνδεση PN, μειώνοντας απώλειες ανάκλασης, και παρέχοντας ένα ισχυρό στρώμα για την επαφή και τη διασύνδεση μεταξύ των κυττάρων. Μερικά από τα στρώματα είναι μόνο ~10 nm, αν και είναι πλάτους ενός μέτρου. Αυτό απαιτεί άριστο έλεγχο της διαδικασίας. Η διαδικασία παραγωγής είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να εναποτίθενται διαδοχικά στα κινητά υποστρώματα, όπως σε μια συνεχή γραμμή. Αυτό ελαχιστοποιεί το χειρισμό και διευκολύνει την αυτοματοποίηση του, συμπεριλαμβανομένων των λείζερ για να απομονώσει τα κύτταρα στη μονάδα, που ονομάζεται μονολιθικό σύστημα ολοκλήρωσης.

Παρ' όλα τα πλεονεκτήματα της TFSCs, γιατί c-Si ή πολυ-Si, εξακολουθούν να κυριαρχούν κατά 90% της παγκόσμιας αγοράς. Αυτό έχει μειονεκτήματα του TFSC να έχουν χαμηλότερη απόδοση, και έχουν ένα πολύ λιγότερο αναπτυγμένες γνώσεις και τεχνολογία σε σύγκριση με το c-Si. Συνεπώς, σύμφωνα με την κεφαλαιοποίηση της εταιρείας έπρεπε να είχε αναπτύξει όχι μόνο την κατανόηση των υλικών και συσκευών, αλλά και τον εξοπλισμό και την επεξεργασία για την παρασκευή τους.

Ποια είναι τα πλεονεκτήματα στις εναπομένουσες προκλήσεις για τον κλάδο TFSC; Εμείς θα επανεξετάσουμε τα κυριότερα χαρακτηριστικά των τριών ηγετών: a-Si, Cu (INGA) Se<sub>2</sub>/CdS, και CdTe / CD. Άμορφο Si έχει κατατεθεί από αέρια όπως το υδρίδιο SiH<sub>4</sub> χρησιμοποιώντας πλάσμα για να αναλύσουμε το φυσικό αέριο. Αυτό ονομάζεται πλάσμα-ενισχυμένο CVD (PECVD) και επιτρέπει μεγάλες περιοχές με ομοιομορφία και με άριστο έλεγχο. Ωστόσο, η χρησιμοποίηση των αερίων είναι μόνο περίπου 10 με 30%, που σημαίνει μεγάλο μέρος του υλικού σπαταλείται. Το υλικό που έχει 1 έως 10% του υδρογόνου συνδεδεμένο με το Si, συχνά χαρακτηρίζεται ως

a-Si: H. Τα άτομα H είναι ένας μεγάλος αριθμός των ελαττωμάτων που προκύπτουν από την ελλιπή συγκόλληση των ατόμων Si.

Οι ράβδοι συνήθως κατατίθενται μεταξύ 150 - 300 ° C, η χαμηλότερη θερμοκρασία οποιοδήποτε από τα υλικά του TFSC, επιτρέποντας τη χρήση του χαμηλού κόστους, χαμηλής και θερμοκρασίας στα υποστρώματα. Τα a-Si ηλιακά κύτταρα είναι κατατεθειμένα στο γυαλί, στο φύλλο του ανοξειδωτού χάλυβα, ή πλαστικού. Τα τελευταία δύο υποστρώματα είναι ευέλικτα επιτρέποντας την παραγωγή. Η επαφή pn σχηματίζεται από τις λεπτές στρώσεις καθώς μεγαλώνουν μέσω του υλικού πρόσμιξης αερίων που περιέχουν βόριο και φωσφορικά άτομα. Όλες οι πρακτικές a-Si περιέχουν έχουν πολλαπλές συσκευές διαστάυρωσης όπου δύο ή τρεις διασταυρώσεις καλύπτουν το ένα το άλλο. Αυτό επιτρέπει την πιο αποτελεσματική χρήση του ηλιακού φωτός. Το συνολικό πάχος, συμπεριλαμβανομένων των πολλαπλών κόμβων και όλα τα στρώματα επαφής, είναι μικρότερο από 1 μm, με εξαίρεση το υπόστρωμα.

Ενώ τα a-Si TFSCs κύτταρα μπορεί να έχουν ελαφρώς φτωχότερες επιδόσεις σε σύγκριση με άλλους TFSCs, όταν δοκιμάζονται κάτω από εργαστηριακές συνθήκες (Διάγραμμα 1.8), έχουν ένα μοναδικό χαρακτηριστικό που βελτιώνει τις επιδόσεις τους σε πραγματικές συνθήκες, δηλαδή, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από τη θερμοκρασία, ενώ για όλες τις άλλες τεχνολογίες, c-Si, η απόδοση μειώνεται καθώς η μονάδα θερμαίνεται όπως στις πραγματικές εξωτερικές συνθήκες. Οι τρεις μεγάλες προκλήσεις για την a-Si τεχνολογία είναι οι εξής:

1) να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα από 6 έως 8% σε 10 - 12%

2) ελαχιστοποίηση ή την εξάλειψη των υποβαθμίσεων η οποία μειώνει την απόδοση κατά 2 έως 3%, και την κατασκευή υλικών για χαμηλότερο κόστος.

Τα πολυκρυσταλλικά στρώματα Cu (INGA) Se<sub>2</sub> και άλλα κράματα έχουν πράξει την υψηλότερη αποδοτικότητα των συσκευών TFSC. Οι TFSCs βάσεις CuInSe<sub>2</sub> πέτυχαν 12 έως 15% αποδοτικότητα αλλά περιορίζονταν από το χαμηλό κόστος. Η κραματοποίηση με Ga ή S αυξάνουν το χάσμα ζωνών και αυξάνεται η αποτελεσματικότητα της παράδοσης των ηλεκτρονίων στο κύκλωμα (όπως εξετάζονται στο τμήμα 1.2). Αν και πολλές μέθοδοι εναπόθεσης έχουν διερευνηθεί στο εργαστήριο, υπάρχουν δύο διαφορετικές διαδικασίες στο πλαίσιο εμπορικής ανάπτυξης. Η co-εξάτμιση κράματος με την ταυτόχρονη εξάτμιση των Cu, In, Ga, και Se από άλλες πηγές σε θερμαινόμενο υπόστρωμα. Οι μεμβράνες Cu (INGA) Se<sub>2</sub> είναι p-τύπου, τυπικά 1 έως 3 μm παχιά και οι κρυσταλλίτες της τάξης του 1 μm. Η επαφή pn σχηματίζεται με την εναπόθεση ενός n-τύπου στρώμα CdS, ZnO, ή από άλλα νέα υλικά σε ανάπτυξη για την αντικατάσταση του CdS. Η υψηλότερη απόδοση των κυττάρων είναι σήμερα 19% και πολλές επιχειρήσεις έχουν αναφέρει μονάδες με απόδοση > 10%.

Τα Πολυκρυσταλλικά στρώματα CdTe έχουν διερευνηθεί για τα φωτοβολταϊκά από το 1970. Σε αντίθεση με τις περιορισμένες επιλογές για τη διαδικασία a-Si ή Cu (INGA) Se<sub>2</sub>, υπάρχουν πάνω από 10 διαφορετικές μεθόδους για να καταθέσετε τις μεμβράνες που έχουν παραχθεί στα ηλιακά κύτταρα που υπερβαίνει το 10% της απόδοσης. Φαίνεται να υπάρχουν τρία κρίσιμα βήματα στα ηλιακά κύτταρα. Πρώτον, χρειάζονται εναπόθεση με την παρουσία του Cl και O<sub>2</sub> σε

περίπου 400 ° C. Αυτή η χημική ουσία μεγεθύνει τα όρια των κόκκων, και βελτιώνει την ηλεκτρονική ποιότητα του CdTe. Δεύτερον, όλα τα στρώματα CdTe χρειάζονται μια επεξεργασία στην επιφάνεια πριν εφαρμόσουν μια επαφή. Αυτή η μέθοδος μπορεί να είναι μια υγρή ή στεγνή διαδικασία και προετοιμάζει την επιφάνεια με καθαρισμό από τα ανεπιθύμητα οξειδία για την πραγματοποίηση μιας επαφής χαμηλής αντίστασης. Τρίτον, όλες οι συσκευές υψηλής απόδοσης λόγω Cu περιέχουν αμίαντο κατά τη διαδικασία της επαφής τους αλλά και πάλι, υπάρχουν πολλοί τρόποι αντιμετώπισης τους.

Η επαφή pn σχηματίζεται από την πρώτη κατάθεση n-τύπου σε στρώμα και σχετικά διαφανές αγωγίμο υπόστρωμα οξειδίου που ακολουθείται από το στρώμα του CdTe και κατάλληλη ανόπτηση με χημικά. Μόλις γίνεται το ηλιακό κύτταρο, οι ταινίες CdTe είναι p-τύπου, και κατά κανόνα, πάχους από 2 έως 8 μm και έχουν κρυστάλλους της τάξης του 1 μm. Η υψηλότερη απόδοση για μια CdTe είναι σήμερα 16%. Μερικές μονάδες CdTe έχουν για πάνω από πέντε χρόνια μια αμελητέα υποβάθμιση. Ο διπλός ρόλος του χαλκού θα πρέπει να επιλυθεί, και φαίνεται να είναι απαίτηση για την παραγωγή μιας συσκευής υψηλής απόδοσης, αλλά φαίνεται να εμπλέκεται και στη μακροπρόθεσμη σταθερότητα. Οι διάφορες μέθοδοι βελτιστοποίησης πρέπει να είναι καλύτερα κατανοητές ώστε να μπορούν να απλουστευτούν για να μεταφέρονται στην παραγωγή.

Στην πραγματικότητα, οι επενδυτές γνωρίζουν ότι άλλοι παράγοντες που μπορεί να είναι πιο σημαντικοί στην αποτελεσματικότητα της επιλογής μιας τεχνολογίας για την ανάπτυξη. Στο σημείο αυτό προκύπτει από την εξέταση των σχετικών επιδόσεων των τριών τεχνολογιών μείζονος σημασίας η TFSC - Cu (INGA) Se<sub>2</sub>, η CdTe, και η a-Si - στο σχήμα 1.8. Σημειώστε ότι η a-Si είχε πάντα την χαμηλότερη αποδοτικότητα. Ωστόσο, από τις τρεις, ήταν αυτή που έχει εμπορευματοποιηθεί πολύ νωρίτερα και ευρύτερα.

Απολαμβάνει μια πολύ μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής. Από το 2001, η a-Si αντιπροσώπευαν σχεδόν το 9% (34 MW) της παγκόσμιας φωτοβολταϊκής ισχύς με μονάδες παραγωγής, ενώ CdTe και Cu (INGA) Se<sub>2</sub> μαζί αντιπροσωπεύουν λιγότερο από το 0,3% δηλαδή 1 MW. Ένας σημαντικός παράγοντας ήταν ότι η a-Si είχε ισχυρότερη παγκόσμια επιστημονική έρευνα βάση της οποίας εξασφαλίζεται η σχέση μεταξύ των όρων και των θεμελιωδών υλικών ενώ οι ιδιότητες της συσκευής είχαν καλά χαρακτηριστικά. Αντίθετα, οι CdTe και Cu (INGA) Se<sub>2</sub> δεν έχουν καμία πραγματική εφαρμογή εκτός των φωτοβολταϊκών. Ως εκ τούτου, η ολοκλήρωση της γνώσης δεν αναπτύχθηκε τόσο πολύ λόγω της ανεπαρκούς χρηματοδότησης των βιομηχανικών.

## 1.10 α Φ/Β συστήματα

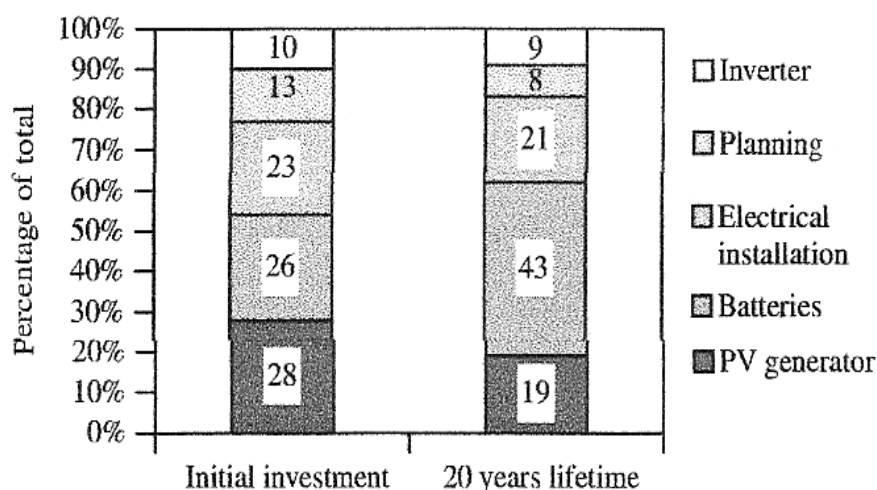
Εστιάζοντας το συμπυκνωμένο φως του ήλιου πάνω σε λιγότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία θα ήταν ένας τρόπος μείωσης του κόστους. Για παράδειγμα, αντί για ένα τυπικό 100 cm<sup>2</sup> ηλιακών κυττάρων που απορροφά 100 cm<sup>2</sup> ηλιακού φωτός, θα μπορούσε κανείς να επικεντρώσει το φως του ήλιου από 100 cm<sup>2</sup> σε ένα 1 cm<sup>2</sup> ηλιακών κυττάρων, μειώνοντας έτσι το κόστος ηλιακών κυττάρων έως 99%, ενώ θα χρησιμοποιούν ακόμη το ίδιο ποσό φωτός του ήλιου. Αυτό παραβλέπει το κόστος που απαιτείται για την τεχνολογία συγκέντρωσης. Φυσικά, οι δύο προϋποθέσεις που απαιτούνται είναι: Το ένα είναι από την οπτική επιφάνεια εισαγωγής του φωτός και η δεύτερη είναι ότι η απόδοση των κυττάρων κάτω από το συμπυκνωμένο φως του ήλιου δεν θα πρέπει να μειωθεί σημαντικά.

Ωστόσο, η διατήρηση των κυττάρων στο επίκεντρο απαιτεί μια κινούμενη δομή για να διατηρηθεί η επαφή με τον ήλιο καθώς κινείται πέρα από τον ουρανό, το οποίο προσθέτει κόστος για το σύστημα. Όσο για την αποτελεσματικότητα των κυττάρων, υπάρχουν θεμελιώδεις λόγοι (βλ. κεφάλαιο 3) γιατί η ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει να αυξηθεί με την αύξηση της φωτεινής ροής. Ωστόσο, στην πράξη, η ωμική αντίσταση απωλειών που προκαλούνται από τον χειρισμό των μεγάλων ρευμάτων περιορίζει την αύξηση της αποδοτικότητας. Ωστόσο, η μικρή περιοχή που τα κύτταρα χρησιμοποιούνται σε συγκέντρωση ή, εναλλακτικά, η μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από κάθε κύτταρο, επιτρέπει την καταβολή υψηλότερου κόστους για τα κύτταρα και, συνεπώς, τους επιτρέπει να υιοθετήσουν πολλές βελτιώσεις.

Στην πραγματικότητα, οι συγκεντρωτές είναι κατάλληλα για σχετικά μεγάλες εγκαταστάσεις, ενώ η αγορά έχει εξελιχθεί μέχρι σήμερα σε μικρότερες εγκαταστάσεις όπως τα διασυνδεδεμένα σπίτια, απομακρυσμένα σπίτια, ή τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές των οποίων το μέγεθος είναι σπάνια μεγαλύτερο από 5 kW. Επομένως, πολύ λίγες εταιρείες κατασκευάζουν τα κύτταρα σήμερα, και τις τιμές τους να είναι πολύ ψηλά λόγω του όγκου των γενικών εξόδων για τις πολύ μικρές ποσότητες παραγωγής. Ωστόσο, η κατάσταση μπορεί να αλλάξει. Η δυσκολία της ανάπτυξης ασυγκέντρωτων δεν πρέπει να υποτιμηθεί. Η απαίτηση για υψηλές επιδόσεις με χαμηλό κόστος είναι μία τεράστια πρόκληση. Ειδικότερα, η οπτική πρέπει να είναι χαμηλού κόστους, αλλά επιτρέπει εξαιρετικά ακριβή εστίαση, υψηλή οπτική αποδοτικότητα και ίσο ποσό φως σε όλα τα κύτταρα. Η δομή παρακολούθησης πρέπει να είναι φτηνή και ακριβείς, τα κύτταρα πρέπει να είναι αποτελεσματικά και να μην είναι πολύ ακριβά.

## 1.11 Η ισορροπία των συστημάτων

Ένα Φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από πλαίσια και αυτά στην συνέχεια αποτελούνται από ηλιακές κυψέλες. Η BOS συνήθως, αποτελείται από την μπαταρία, τη μονάδα ελέγχου και το μετατροπέα, τη μηχανική δομή υποστήριξης, την ηλεκτρική καλωδίωση, και τα συστήματα προστασίας, όπως οι ασφάλειες, η γείωση και τους διακόπτες. Σας παρουσιάζουμε στο Σχήμα 1.13 το κόστος ενός Φ/Β αυτόνομη εγκατάσταση με την αποθήκευση, όπως παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2.



**Σχήμα 1.13** Η Κατανομή των δαπανών της αυτόνομης Φ / Β εγκατάστασης με το βέλτιστο μέγεθος αποθήκευσης. Οι διαφορές στην αρχική επένδυση και η επένδυση του κύκλου ζωής οφείλονται σε αντικατάσταση των μπαταριών κατά τη διάρκεια της ζωής 20 χρόνια

Μπορούμε να δούμε ότι στην προκειμένη περίπτωση τα Φ/Β αντιπροσωπεύουν περίπου το ένα τέταρτο του κόστους, ενώ το κόστος των μπαταριών είναι μεγαλύτερο από εκείνη των φωτοβολταϊκών μονάδων, ειδικά όταν η περιοδική αντικατάστασή τους πάνω από 20 χρόνια συμπεριλαμβάνεται. Αυτό έχει ένα πολύ σημαντικό σημείο: ακόμα κι αν θα μπορούσαμε να κάνουμε Φ / Β δωρεάν, το κόστος του κύκλου ζωής και το αυτόνομο σύστημα στο σχήμα 1.13 μόνο θα μειωθεί κατά 25%. Είναι σαφές ότι, οι ηλεκτρικές στήλες πρέπει να εξεταστούν πιο στενά. Είναι ευτυχές το γεγονός ότι πολλές σημαντικές εφαρμογές, δεν απαιτούν την αποθήκευση και, συνεπώς, είναι απαλλαγμένα από αυτή τη σημαντική επιβάρυνση του κόστους.

Οι μπαταρίες είναι στις περισσότερες περιπτώσεις από μόλυβδο. Οι ιδανικές μπαταρίες των Φ / Β συστημάτων είναι αυτές που μπορούν να αποδώσουν ένα μεγάλο ποσοστό και πρέπει να λειτουργούν με υψηλή απόδοση και μεγάλη διάρκεια. Ωστόσο, πολλές εφαρμογές Φ/Β χρησιμοποιούν μπαταρίες με χαμηλό αρχικό κόστος σε βάρος του μακροπρόθεσμου κόστους. Μερικές από τις σύγχρονες μπαταρίες, όπως αυτές που βασίζονται σε ιόντα λιθίου ή πολυμερών λιθίου, που χρησιμοποιούνται σε φορητούς υπολογιστές ή κινητά τηλέφωνα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ηλιακής ενέργειας, αλλά είναι πολύ ακριβά και δεν είναι σημαντικά καλύτερα από τις μπαταρίες μολύβδου.

Όπως ειπώθηκε προηγουμένως, το σχετικά υψηλό κόστος των μπαταριών αυξάνεται περαιτέρω αν λάβουμε υπόψη το κόστος διάρκειας του κύκλου ζωής της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, δεδομένου ότι οι μπαταρίες πρέπει να αντικαθίστανται κάθε τέσσερα έως οκτώ χρόνια λόγω της σχετικά σύντομης ζωής τους. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικά καλές συντήρησης για την αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας, αλλά δεν είναι πάντα επιτυχές. Εναλλακτικές μέθοδοι αποθήκευσης υπάρχουν, αλλά δεν θα αντικαταστήσουν την μπαταρία μολύβδου,

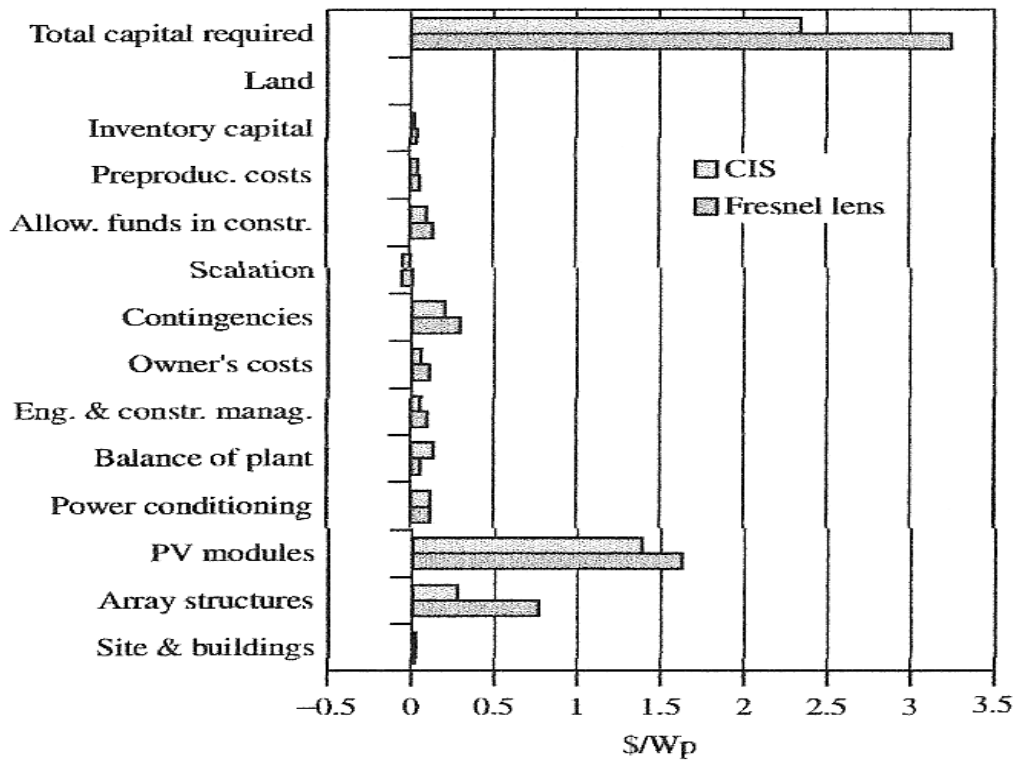
τουλάχιστον, όχι στα επόμενα δέκα χρόνια. Ο ελεγκτής φόρτισης της μπαταρίας είναι απαραίτητος για τη μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Είναι μια ηλεκτρονικής συσκευή που αποτρέπει την υπερφόρτιση και υπερβολική εκφόρτωση, οι δύο εκ των οποίων μπορεί να μειώσει δραματικά τη ζωή της μπαταρίας. Επίσης, τα φορτία μπορούν να χαρακτηριστούν, έτσι ώστε σε περίπτωση χαμηλής φόρτισης της μπαταρίας και χαμηλής παραγωγή  $\Phi / B$ , κάποια φορτία μπορούν να αποσυνδεθούν ενώ κάποια διατηρούνται ενεργά.

Σε πολλές περιπτώσεις, η αποθήκευση της μπαταρίας δεν είναι απαραίτητη. Για τα διασυνδεδεμένα σπίτια και κτίρια γραφείων, τα φωτοβολταϊκά παράγουν ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας και το δίκτυο παρέχει την ενέργεια κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε συννεφιασμένες ημέρες, εξαλείφοντας την ανάγκη για μπαταρίες, απλοποιώντας το σχεδιασμό του συστήματος, και τη μείωση του κόστους BOS. Η επιτυχία της διασύνδεσης με εφαρμογές  $\Phi / B$  είναι πολύ ευαίσθητη στον ανταγωνισμό τιμών με συμβατικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ευτυχώς οι ακριβές μπαταρίες δεν παρεμποδίζουν τον ανταγωνισμό αυτό. Το Φωτοβολταϊκό έχει ένα επιπλέον σημαντικό ρόλο, να μεταβάλει την ηλεκτρική λειτουργία του  $\Phi/B$  και να διατηρήσουν την παραγωγή της στη μέγιστη δυνατή τιμή κατά την οποία η συστοιχία φωτοβολταϊκών παράγει μέγιστη εξαγωγή ισχύος. Οι μετατροπείς έχουν συχνά έλλειψη αξιοπιστίας στις αρχές του συστήματος. Παρατηρήσεις προς τους κατασκευαστές έχουν μειώσει σε μεγάλο βαθμό τα προβλήματα σε αυτά.

Λόγω του κόστους, μερικές φορές οι κλιματικές συνθήκες θεωρούνται ως σοβαρό εμπόδιο στην ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών. Ωστόσο, πιστεύουμε στην εμφάνιση της μια σημαντική αγορά που θα μειώσει το κόστος σε λογικά όρια. Μια προσέγγιση είναι να έχουμε ένα μικρό μετασχηματιστή στο πίσω μέρος της κάθε ενότητας, αντί ενός κεντρικού μετατροπέα για ολόκληρο το σύστημα. Αυτή η σπονδυλωτή προσέγγιση έχει πολλά πλεονεκτήματα και έχει τεθεί σε παραγωγή στις ΗΠΑ και στη Γερμανία, αλλά προς το παρόν είναι πιο ακριβά και θα είναι τόσο εάν η μαζική παραγωγή μειώνει το κόστος σε σχέση με τους θεωρητικά μεγαλύτερους μετατροπείς.

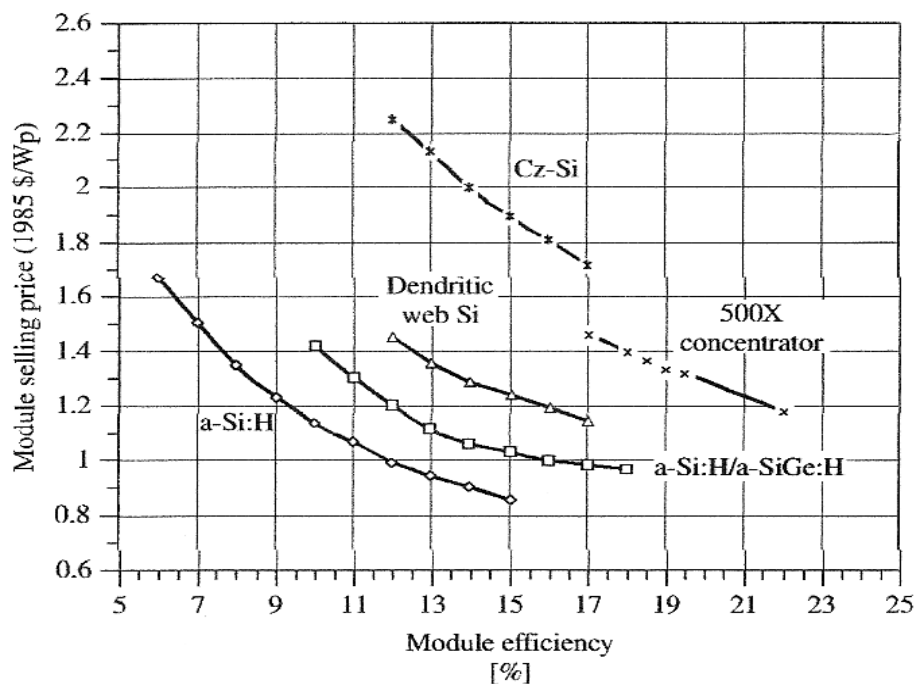
Το σύστημα τοποθέτησης είναι επίσης σημαντικό, ειδικότερα, στη συγκέντρωση συστημάτων. Στην πραγματικότητα, αυτό είναι το δεύτερο πιο σημαντικό στοιχείο κόστους στη συγκέντρωση των  $\Phi / B$  συστημάτων, μετά τις ενότητες. Αντίθετα, το κόστος κλιματισμού έχει μικρές δαπάνες που συνδέονται με την κατασκευή των εγκαταστάσεων. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1.14, όπου θα παρουσιάσει την κατανομή των δαπανών για TFSC.





**Σχήμα 1.14** Υπολογιζόμενη κατανομή των δαπανών για την κατασκευή μιας κεντρικής εγκατάστασης Φ / Β με βάση δύο αναμενόμενες τεχνολογίες.

Στο σχήμα 1.15 φαίνεται ο υπολογισμός του κόστους των διαφόρων τύπων των ενοτήτων σε μια προηγμένη διαδικασία κατασκευής που υπολογίζεται με την ίδια διαδικασία. Και πάλι, η παρουσίαση του παρόντος είναι το κεφάλαιο 21, που αφιερώνεται στο κόστος υπολογισμών. Παρά το γεγονός ότι οι υπολογισμοί του κόστους για την Cu (INGA) Se2 τεχνολογία δεν είναι διαθέσιμο, δεν είναι το κόστος που αναμένεται να είναι πολύ διαφορετικό με εκείνες του a-Si. Ωστόσο, σύμφωνα με το μοντέλο, της ενότητας c-Si Cz είναι σαφώς πιο ακριβά από οποιαδήποτε από τις άλλες επιλογές.



**Σχήμα 1.15** Επίδραση της τεχνολογίας των κυττάρων και την αποτελεσματικότητα στην ενότητα των τιμών.

**Πίνακας 1.3** Ετήσια απόδοση και την ενέργεια και του κόστους για τις κεντρικές φυτά σταθμό. Υπολογισμοί για συνεχείς 1990 \$, για μια μονάδα των 50 MWp

Ενέργεια εξόδου (MWh)	140 100 112 000
Χωρητικότητα συντελεστής	32,0% 25,8%
Ετήσια ενεργειακή απόδοση	18,8% 9,9%
Ετήσια έξοδα (\$ 10 <sup>6</sup> )	
Πρωτίστη χρέωση	16,69 11,95
Λειτουργία και Συντήρηση βάρος	0,61 0,18
Σύνολο	17,30 12,13
30 - χρόνια ενεργειακού κόστους (\$ / kWh)	
Πρωτεύουσα χρέωση,	119 0, 106
Λειτουργίας και συντήρησης του κόστους	0.004 0.002
Σύνολο (\$ / kWh)	0.123 0.106

Για τον τελικό χρήστη, το κόστος της συμβατικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να είναι πολύ παρόμοια με ένα τον πίνακα. Το κόστος εγκατάστασης ενός  $\Phi / B$  σε διασυνδεδεμένο σύστημα σε ένα σπίτι ή κτίριο δεν είναι πολύ πιο ακριβό από την κεντρική μονάδα παραγωγής ενέργειας που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα, αλλά το κόστος εμπορίας των εν λόγω καταναμημένων οικιστικών προϊόντων θα αυξήσει το τελικό κόστος εγκατάστασης από τη σχετική σημασία των διαφόρων παραγόντων. Αυτές οι παραδοχές του μοντέλου μπορεί να μην ισχύουν για ορισμένες τεχνολογίες. Ωστόσο, αυτές οι έρευνες μπορεί να είναι χρήσιμες στους φορείς λήψης αποφάσεων, ειδικά εάν συμπληρωθεί η μελέτη σωστά.

Φυσικά, όλα τα κατασκευαστικά στοιχεία του συστήματος έχουν κάποια απώλεια ισχύος. Η ετήσια κατά μέσο όρο απόδοση του AC είναι 10% σε μια καλά οργανωμένη σύνδεση με απόδοση 14%. Μεγάλο μέρος αυτής της απώλειας μπορεί να αποδοθεί στη θερμοκρασία που κύτταρα λειτουργούν σε 20 - 30 ° C πάνω από το περιβάλλον που μειώνει την αποδοτικότητα και την παραγωγή τους, δεδομένου ότι η αποδοτικότητα μειώνεται με τη θερμοκρασία. Επιπλέον, 8 έως 10% σε σχέση με τις απώλειες χάνονται για τη μετατροπή DC-AC στο μετατροπέα. Οι απώλειες της μπαταρίας μπορεί να είναι 10 έως 20%.

### 1.12 Το μέλλον των $\Phi / B$ συστημάτων

Το ηλιακό δυναμικό είναι τεράστιο, αν και ενεργειακή πυκνότητα της είναι μάλλον χαμηλή. Ωστόσο, δεν είναι χαμηλά ώστε να χάσει κάθε ελπίδα της μαζικής χρήσης, αλλά δεν είναι αρκετά υψηλή ώστε να είναι εύκολο. Προφανώς, η σωστή στρατηγική για την ανάκτηση της διεσπαρμένης πορείας είναι να πετύχει υψηλή απόδοση σε χαμηλό κόστος ανά περιοχή. Όμως, όπως περιγράφεται στο παρόν κεφάλαιο, παραδίδει στο εξωτερικό κύκλωμα υψηλή αποδοτικότητα των φορέων φορτίου που παράγεται από τα λίγα φωτόνια με ενέργεια κοντά στο χάσμα των ζωνών. Η περίσσεια ενέργειας στα φωτόνια των οποίων η ενέργεια είναι μεγαλύτερη από το χάσμα ζωνών συνήθως σπαταλάτε ως θερμότητα. Ακόμη, όλη την ενέργεια των φωτονίων των οποίων η ενέργεια είναι κάτω από το χάσμα ζωνών είναι χαμένη δεδομένου ότι δεν απορροφάται και επομένως δεν παράγει ενέργεια.

Ένας τρόπος εξαγωγής περισσότερης δύναμης από τον ήλιο είναι η χρήση των κυττάρων των ημιαγωγών που έχουν διαφορετικά κενά μπάνας. Με τους ημιαγωγούς το χάσμα ζωνών που βρίσκεται στην κορυφή της στοίβας επιτρέπει στα φωτόνια της ενέργειας λιγότερο από το χάσμα ζωνών τους να περάσουν μέσα, από όπου μπορούν να απορροφηθούν από τα εσωτερικά κύτταρα των χαμηλότερων ζωνών χάσματος. Έτσι, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4, η μέγιστη απόδοση που μπορεί να λαμβάνεται υπό τις καλύτερες συνθήκες από ένα μόνο κόμβο με ηλιακό κύτταρο είναι της τάξης του 40%.

Η καλύτερη απόδοση μέχρι τώρα έχει ληφθεί για την απλή διασταύρωση ηλιακών κυττάρων και είναι 27,6%, με GaAs. Τυπική απόδοση πυριτίου των κυττάρων είναι ~ 15%, μετρούμενη σε κανονικές συνθήκες. Το ενδιαφέρον για τα κύτταρα multijunction έχει αναζωπυρωθεί από τις απαιτήσεις για χώρο, όπου η τιμή είναι λιγότερο σημαντική από την απόδοση σε πολλές περιπτώσεις. Ωστόσο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επίγειες εφαρμογές με την προϋπόθεση ότι λειτουργούν με

πολύ υψηλή συγκέντρωση. Επίσης, η ανάπτυξη του χαμηλού κόστους με συγκεντρωτές είναι ένα θέμα της τρέχουσας έρευνας. Μια εκτίμηση του κόστους παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.5. που το κόστος είναι παρόμοιο με αυτά στον πίνακα 1.4. Εντούτοις, στη περίπτωση που οι δαπάνες είναι, πολύ ανταγωνιστικές με τη συμβατική ηλεκτρική ενέργεια, θα είναι με την προϋπόθεση ότι θα επιτύχουν πολύ υψηλές αποδόσεις.

Ο ρόλος του παράγοντα εμπειρίας τονίστηκε κατά την περιγραφή στους πίνακες 1.6 και 1.7. Συμβατικά κύτταρα έχουν ένα σχετικά χαμηλό συντελεστή εμπειρίας και θεωρούμε ότι, περιορίζονται στη μέγιστη απόδοση που μπορεί να φθάσει. Τα Multijunction κύτταρα, σε αντίθεση, έχουν πολύ υψηλότερο όριο αποδοτικότητας και μπορεί να προχωρήσει στην απόδοση για ένα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Αυτός είναι ένας λόγος να τους απονέμουν μια ταχύτερη παραγωγή. Τα Multijunction κύτταρα είναι επίσης σημαντικά για την επιτυχία των φωτοβολταϊκών Η χρήση των multijunction κυττάρων σε λεπτές μεμβράνες μπορεί να οδηγήσει σε ταχύτερη καμπύλη μάθησης και επομένως θα μειωνόταν κόστος.

<b>Πίνακας 1.4</b> Δαπάνες για την πολύ υψηλή απόδοση 1000 ηλιακών συστημάτων για έναν κόμβο (1-J) και τέσσερις κόμβους (4-J). Η Κανονική Άμεση ακτινοβολία EGL αντιπροσωπεύει εξαιρετικά καλή θέση με $NDI = 2700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{χρόνος}^{-1}$ . Με τις σημερινές δαπάνες σημαίνει ότι μειώνεται κατά μια καμπύλη μάθησης με συντελεστή εμπειρίας των 0,32	
Κύτταρα (\$ ανά cm <sup>2</sup> κυτταρική επιφάνεια)	13,4 4,43
Ενότητα (\$ ανά επιφάνεια του ανοίγματος)	265 113
Cell απόδοση (%)	23.1 45
Ενότητα απόδοσης (%)	19.0 37.1
Τιμή (\$ επιφάνεια του ανοίγματος)	526 271
Στη Μαδρίτη NDI ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{χρόνος}^{-1}$ )	1826 1826
Απόδοση αναλογία	0.606 0.606

Ωστόσο, σε όλα αυτά τα συστήματα αλουμινίου, η ποιότητα υλικών υποβαθμίζει σημαντικά την απόδοση της συσκευής για τη κενή μπάνα που υπερβαίνει 1,4 έως 1,6 eV, ανάλογα με τα υλικά (βλέπε κεφάλαιο 13). Ένας πολύ παραγωγικός τομέας της έρευνας θα είναι να βελτιωθεί, όταν παράγονται με την ανάπτυξη νέων κραμάτων. Οποιαδήποτε διαδικασία multijunction πρέπει να είναι διαδοχικά συμβατές από την αρχή μέχρι το τέλος. Εκτός από την προσπάθεια των multijunction, άλλες έννοιες είναι σε ισχύ για την προσπάθεια μιας καλύτερης αξιοποίησης του ηλιακού φάσματος, όπως είναι η ενδιάμεση μπάνα, το οποίο

περιγράφεται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 4. Μια μπάντα, θα επιτρέπει τη διέλευση των ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους για δύο φωτόνια χαμηλής ενέργειας.

Τα Quantum είναι σταγονίδια από ένα υλικό σε μια σειρά από άλλο υλικό του τριτοβάθμιου χάσματος. Τα σταγονίδια είναι πολύ μικρά κβαντικά φαινόμενα, μεταξύ των οποίων είναι η εμφάνιση των ενδιάμεσων ζωνών ή τα επίπεδα. Τα Κράματα μπορεί επίσης να βρεθούν σε ενδιάμεσα συγκρότημα, αλλά δεν έχει πρακτική υλοποίηση που έχει αποδειχθεί μέχρι σήμερα. Άλλες νέες διατάξεις, αν και δεν είναι εύκολο να τις συνειδητοποιήσουμε, έχουμε επίσης οραματιστεί. Η θεωρητική βάση όλων αυτών των νέων συσκευών μπορεί να βρεθεί. Επί του παρόντος το αντικείμενο πολλών ερευνών, στα ηλιακά κύτταρα έχουν επιτύχει > 10% απόδοση, αλλά έχουν πολλές προκλήσεις όσον αφορά τη σταθερότητα και των δυνατοτήτων κατασκευής.

### 1.13 Συμπεράσματα

Τα Φωτοβολταϊκά συνιστούν μια νέα μορφή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που είναι περιβαλλοντικά καθαρή και πολύπλευρη. Σε αυτόνομες εγκαταστάσεις, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την αποθήκευση ή άλλο είδος γεννήτριας για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, όταν ο ήλιος δεν λάμπει. Σε συνδεδεμένες στο δίκτυο εγκαταστάσεις αποθήκευσης δεν είναι αναγκαίο, με την απουσία του φωτός του ήλιου, η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται από τις άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας.

Η φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια εκτιμάται ιδιαίτερα από το κοινό. Είναι μοναδική για πολλές εφαρμογές υψηλής κοινωνικής αξίας, όπως η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους ανθρώπους από την έλλειψη σε απομακρυσμένες περιοχές. Συχνά, οι διεθνείς οργανισμοί παρέχουν την χρηματοδότηση, καθώς πολλοί από τους χρήστες είναι πολύ κακή. Τα Φωτοβολταϊκά είναι πολύ κατάλληλα ως παροχή ενέργειας σε απομακρυσμένες συσκευές επικοινωνίας. Η χρήση του αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε διασυνδεδεμένα σπίτια και στις βιομηχανικές χώρες, παρά την κατά 5 με 10 φορές υψηλότερο κόστος από τη συμβατική ηλεκτρική ενέργεια. Συχνά, δημόσια χρηματοδοτούμενα προγράμματα απαιτούνται για να μπορέσουν τα φωτοβολταϊκά να ανταγωνίζονται το υψηλότερο κόστος.

Το Φωτοβολταϊκό τείνει να καταστεί μια μεγάλη παγκόσμια βιομηχανία υψηλής τεχνολογίας παραγωγής και την πώληση μονάδων σχεδόν σε κάθε χώρα. Οι κυβερνήσεις και οι επιχειρηματίες θα πρέπει να έχουν επίγνωση αυτού του γεγονότος. Πρέπει να συνεχίσει να είναι έτσι για τις χώρες εκείνες που θέλουν να διατηρήσουν ηγετικό ρόλο σε αυτή την τεχνολογία. Μερική επιδότηση των Φ/Β εγκαταστάσεων επιτρέπουν την άνευ προηγουμένου ανάπτυξη του κλάδου των φωτοβολταϊκών και θα βοηθήσει επίσης τη βιομηχανία των χωρών που συμμετέχουν σε αυτή την προσπάθεια να πάρει το προβάδισμα. Αυτή η τεχνολογία είναι μια από τους υποψηφίους για να πάρει τη σκυτάλη από την τεχνολογία Si μακροπρόθεσμα.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

### Τα χαρακτηριστικά της μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια

#### 2.1 Χαρακτηριστικά μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια

Τα Φωτοβολταϊκά στοχεύουν σε δύο πεδία εφαρμογής. Το ένα είναι η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος για αυτόνομες επαγγελματικές συσκευές και τα συστήματα παροχής και η άλλη είναι μεγάλη κλίμακα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ως υποκατάστατο και συμπλήρωμα έναντι των μη αειφόρων ενεργειακών διαδικασιών του σήμερα. Όσον αφορά την τελευταία, η παγκόσμια ηλεκτρική ενέργεια Φ/Β είναι καθοριστικής σημασίας. Το διάγραμμα 2.1 παρουσιάζει τις τεχνικές και τις θεωρητικές δυνατότητες των διαφόρων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το θεωρητικό δυναμικό δεν λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς χρήσης της γης, η βελτίωση της αποτελεσματικότητας της μετατροπής, αποθήκευση το απαιτεί. Το τεχνικό δυναμικό από την άλλη πλευρά δεν πρέπει να συγχέεται με το βραχυπρόθεσμο οικονομικό δυναμικό, επειδή οι καταστάσεις των τιμών και των κεφαλαιακών απαιτήσεων για την ενεργοποίηση αυτών των πηγών ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα δεν είναι σταθερές.

<u>Resource</u>	<u>Current use</u>	<u>Technical potential</u>	<u>Theoretical potential</u>
Hydropower	9	50	147
Biomass energy	50	>276	2900
Solar energy	0.1	>1575	3900000
Wind energy	0.12	640	6000

**Σχήμα 2.1** Τρέχουσα χρήση και τρέχουσες δυνατότητες των επιλεγμένων ανανεώσιμες πηγών ενέργειας. Για σύγκριση: παγκόσμια ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας 402 exajoule / έτος (1998). Το μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας της «τρέχουσας χρήσης» έχει μετατραπεί σε πρωτογενή ενέργεια που χρησιμοποιεί συντελεστή απόδοσης των 0,385.

Παρ' όλα αυτά, δύο σημαντικά συμπεράσματα μπορούν να συναχθούν από την Εικόνα 2.1 ακόμη υπό αυστηρούς περιορισμούς χώρου και παραδοχές της συνολικής τεχνικής αποτελεσματικότητας, της ηλιακής ενέργειας μόνο θα μπορούσε να παράγει πολύ περισσότερο ενέργεια από όση καταναλώνεται σήμερα και σε σύγκριση με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η ηλιακή ακτινοβολία είναι μακράν

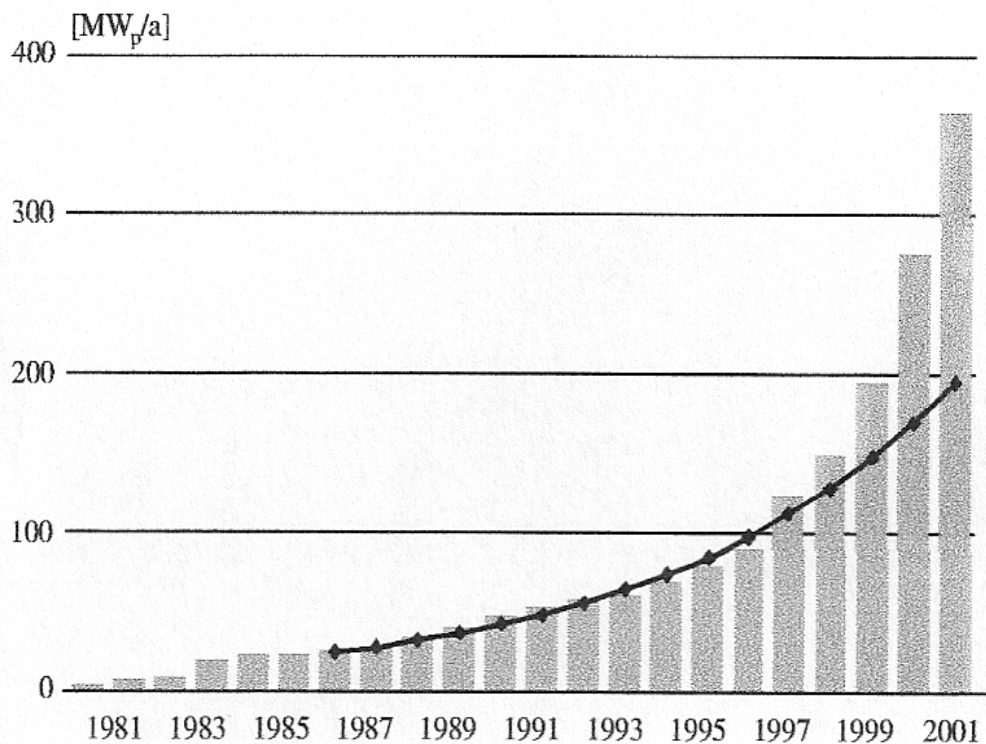
η μεγαλύτερη. Ένα βιώσιμο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα, είναι έντονα βασισμένο σε ανανεώσιμες πηγές που σε βάθος χρόνου κυρίως θα είναι ένα σύστημα ηλιακής ενέργειας. Όσον αφορά την τεχνολογία της ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας, αυτό σημαίνει ηλιακές θερμικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας και φωτοβολταϊκών. Η εφαρμογή των θερμικών σταθμών περιορίζεται σε περιοχές με υψηλή και άμεση μόνωση, επίπεδη οι πλάκες των Φ/Β πλαισίων μπορούν να εφαρμοστούν σχεδόν παντού στον κόσμο, δεδομένου ότι μετατρέπουν την άμεση ακτινοβολία με περίπου την ίδια αποτελεσματικότητα.

Αν και χαρακτηρίζεται από το υψηλό δυναμικό που δίνεται στο σχήμα 2.1, η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας είναι σχετικά χαμηλή, δηλαδή περίπου 100 W/m<sup>2</sup> σχετικά με το μέσο όρο. Αυτό σημαίνει ότι η παγκόσμια συγκομιδή του ηλιακού δυναμικού κατ'ανάγκη απαιτεί μια παραγωγή μεγάλης επιφάνειας της μετατροπής ενέργειας. Κατάλληλες στρατηγικές ανακύκλωσης θα είναι συνεπώς αναγκαίες για την ενέργεια. Ήδη σήμερα η τεχνολογία και οι επιστήμονες εργάζονται για τις απαιτήσεις που αφορούν την ανακύκλωση και την αειφόρο παραγωγή. Αν και χαρακτηρίζεται από το υψηλό δυναμικό που δίνεται στο σχήμα 2.1, η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας είναι σχετικά χαμηλή, δηλαδή περίπου 100 W/m<sup>2</sup> σχετικά με το μέσο όρο. Αυτό σημαίνει ότι η παγκόσμια συγκομιδή του ηλιακού δυναμικού κατ'ανάγκη απαιτεί μια παραγωγή μεγάλης επιφάνειας της μετατροπής ενέργειας. Κατάλληλες στρατηγικές ανακύκλωσης θα είναι συνεπώς αναγκαίες για την ενέργεια των φωτοβολταϊκών. Ήδη σήμερα το πρότυπο Φωτοβολταϊκό τεχνολογίας πυριτίου συνέρχεται κατ'αρχήν τις απαιτήσεις όσον αφορά την ανακύκλωση και την αειφόρο παραγωγή.

Η Φωτοβολταϊκή μετατροπή της ενέργειας είναι εξαιρετικά πολύπλοκη. Οι εγκαταστάσεις μπορούν να ποικίλλουν μεταξύ τους για τα καταναλωτικά προϊόντα στην περίπτωση των διασυνδεδεμένων μονάδων παραγωγής ενέργειας. Από την άποψη της αγοράς, αυτό θα δημιουργήσει ένα ευρύ φάσμα των Φ / Β εφαρμογών. Για τους επαγγελματίες των επιχειρήσεων ενεργειακού εφοδιασμού, αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό και όσον αφορά την εξέλιξη των συστημάτων παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλές αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές όπου οι επεκτάσεις του δικτύου είναι δεν είναι οικονομικά εφικτές.

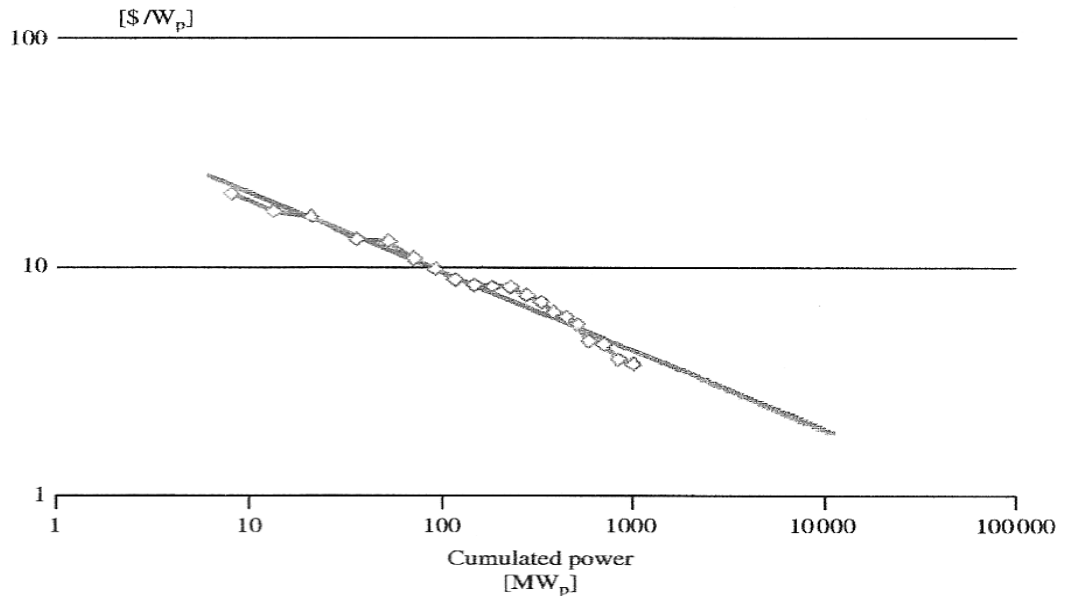
Αρχίζοντας από τις χαμηλές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής, Φ/Β πλαισίων μπορούμε σταδιακά να προσθέτουμε τα κατάλληλα συστήματα για να αντιμετωπίσουμε την αυξανόμενη ενεργειακή απαίτηση. Με αυτόν τον τρόπο εφοδιασμού με ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί και να αποφευχθούν υπερβολικά υψηλές αρχικές επενδύσεις, στο πλαίσιο της ηλεκτροδότηση των αγροτικών περιοχών, καθώς και για τον επαγγελματία της ενέργειας, η προμήθεια εκτός δικτύου ηλεκτρονικών συσκευών και το χαμηλό χαρακτηριστικό συντήρηση των φωτοβολταϊκών θεωρείται ως ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Ένα άλλο θετικό χαρακτηριστικό των φωτοβολταϊκών είναι ότι μπορούν να θεωρηθούν ως μέρος της ταχέως αναπτυσσόμενης βιομηχανίας ημιαγωγών της αγοράς. Η σχέση αυτή διευκολύνει μια ισχυρή μεταφορά από μια ώριμη βιομηχανία στην αναδυόμενη βιομηχανία των φωτοβολταϊκών. Παράλληλα με αυτή, ανοίγει η προοπτική νέων μεγάλων βιομηχανιών δημιουργώντας σημαντικές επιχειρήσεις και τις ευκαιρίες απασχόλησης.

Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η καμπύλη (καμπύλη μάθησης) τιμής - εμπειρίας μέχρι το 2000. Κάθε διπλασιασμό της μονάδας μεταφοράς είχε ως αποτέλεσμα κατά μέσο όρο τη μείωση της τιμής αγοράς κατά 20%. Είναι γενικά αποδεκτό ότι είναι δυνατό να μειώσουμε τις τιμές από έναν άλλον παράγοντα σε δύο γραμμές παραγωγής που χρησιμοποιούν μάζα που βασίζεται στην τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου πλακιδίων. Σημαντική μείωση του κόστους φαίνεται να είναι εφικτή δεδομένου ότι οι νέες και κατά πάσα πιθανότητα τουλάχιστον δαπανηρές τεχνολογίες Φ / Β είναι ήδη στην κατάσταση της πιλοτικής παραγωγής ή στο πλαίσιο της έρευνας στα εργαστήρια. Έτσι, υπάρχει μια καλή πιθανότητα ακόμη μεταξύ ηλεκτρικής ενέργειας Φ/Β και των συμβατικών τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας, δεδομένου ότι το κόστος της μη βιώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνεται δεόντως υπόψη.



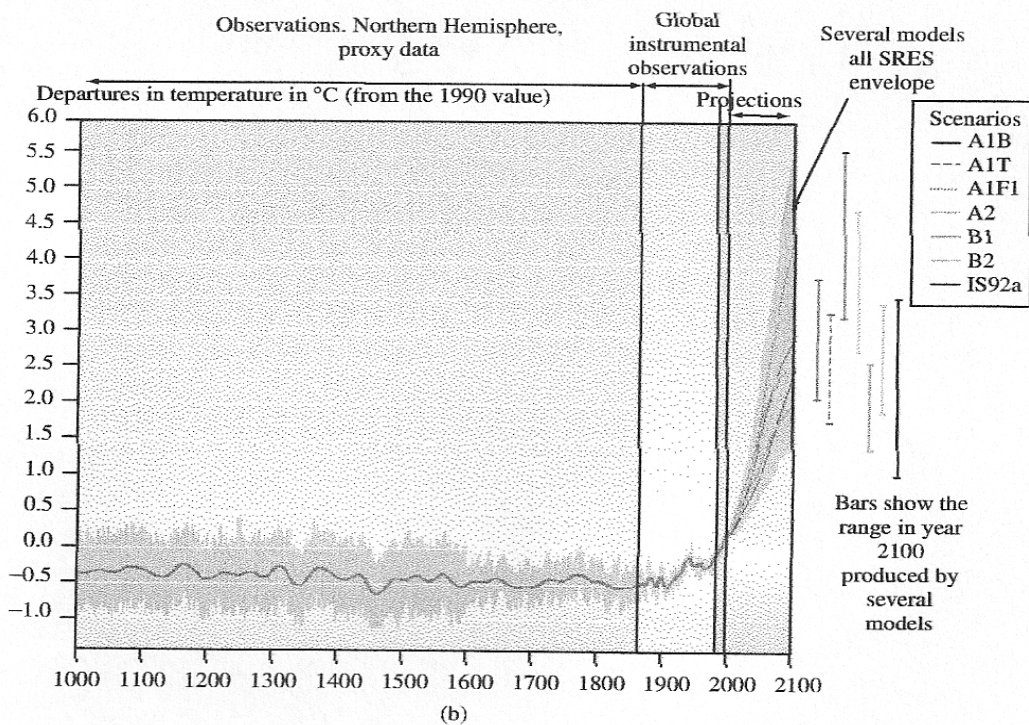
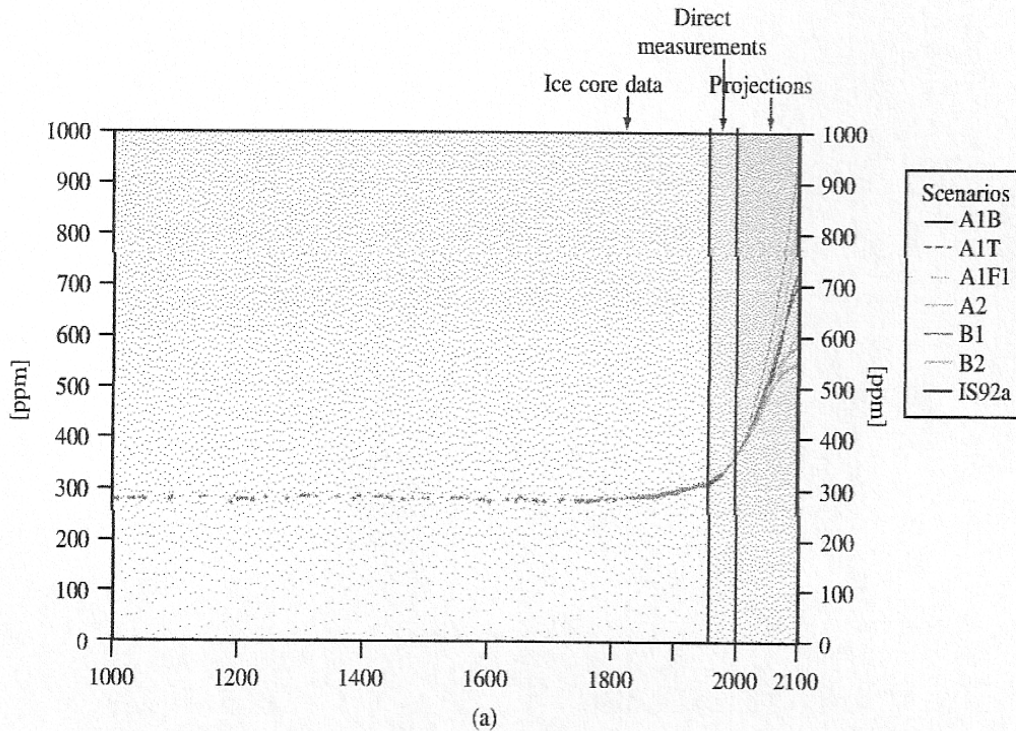
**Σχήμα 2.2** Εξέλιξη της παγκόσμιας αγοράς φωτοβολταϊκών. Μέχρι το 1996 ο ρυθμός ανάπτυξης ήταν περίπου το 15% / έτος. Οι ρυθμοί ανάπτυξης σήμερα είναι της τάξης του 30% / έτος





**Σχήμα 2.3** η καμπύλη τιμών εμπειρία της αγοράς φωτοβολταϊκών έως το 2000. Κλίμακα: διπλή λογαριθμική. Η κλίση της καμπύλης χαρακτηρίζεται από έναν παράγοντα  $f = 0,8$ . Αυτό σημαίνει ότι ο διπλασιασμός του Φωτοβολταϊκού είχε ως αποτέλεσμα μια μείωση των τιμών έως 80% κάτω.

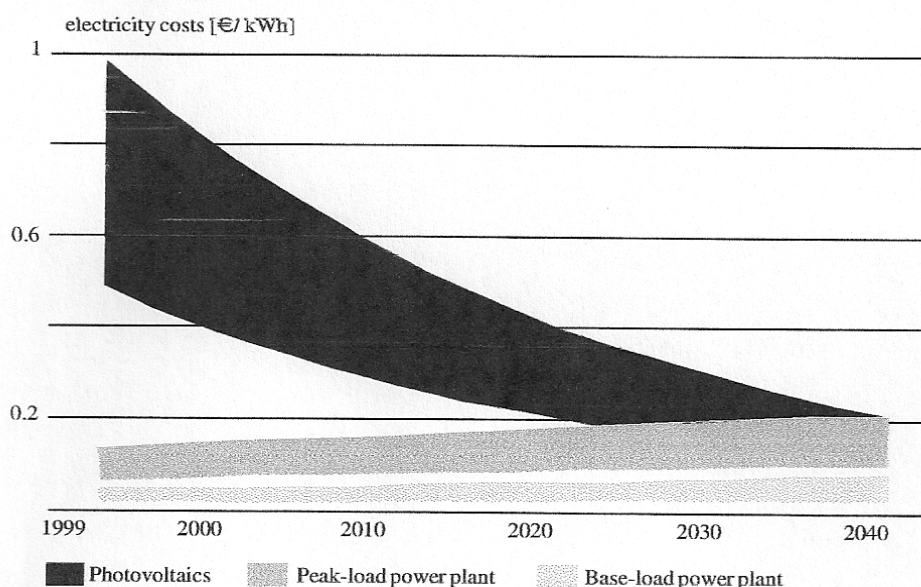
Η αιχφόρος ανάπτυξη πρέπει να σέβεται ορισμένα θέματα. Όσον αφορά την συστηματική τροφοδότηση, αυτά καθορίζονται κυρίως από το παγκόσμιο πρόβλημα του CO<sub>2</sub> (Διάγραμμα 2.4). Η υπερθέρμανση του πλανήτη περισσότερο από 2 ° C και ένα ποσοστό του πλανήτη από 0,2 ° C ανά δεκαετία φαίνεται να είναι τα ανώτατα όρια για μια ανάπτυξη που μπορεί να τεθεί υπό έλεγχο. Αυτές οι ρυθμίσεις είναι σύμφωνες με τα αποτελέσματα πρόσφατων μελετών της Διεθνούς Ομάδας για την Κλιματική αλλαγή. Δεδομένου ότι η διατήρηση και η επέκταση της μετατροπής των συστημάτων ενέργειας απαιτούν σημαντικές επενδύσεις, τη στρατηγική των μεγάλων αποστάσεων ακινητοποίησης. Για παράδειγμα, το γερμανικό Συμβούλιο για την Παγκόσμια αλλαγή προτείνει τη συνεχή μείωση του CO<sub>2</sub> σε ποσοστό κατά 1% ετησίως για τα επόμενα 150 χρόνια. Αν κάποιος αγωνίζεται για μια δίκαιη και ορθολογική κατανομή των παγκόσμιων υποχρεώσεων μείωσης, η βιομηχανική ανάπτυξη και τα έθνη έχουν να μειώσουν τις εκπομπές CO<sub>2</sub> έως το 2050 σχεδόν κατά 80% σε σχέση με το 1990. Η μείωση αυτή επηρεάζει κυρίως τον τομέα της ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των καυσίμων για τις μεταφορές.



**Σχήμα 2.4** Παρελθόν και μέλλον, οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> (α) και τις διακυμάνσεις της επιφάνειας της θερμοκρασία (β). Χρονική διάρκεια: έτος 1000 έως το έτος 2100. Οι προβλέψεις για το δικαίωμα είναι με βάση τα σενάρια της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC).

Όπως μπορούμε να δούμε σήμερα, ο στόχος μείωσης μπορεί - με κοινωνικά αποδεκτό τρόπο - να επιτευχθεί μόνο όταν οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που εφαρμόζονται σε όλο τον κόσμο σε μια πραγματικά μεγάλης κλίμακας έρθουν σε συνεννόηση. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αυτό σημαίνει πάνω απ' όλα η χρήση των φωτοβολταϊκών και σε μικρότερο (αλλά σημαντικό) βαθμό η αιολική ενέργεια, η βιομάζα και η μετατροπή ηλιακής θερμικής ενέργειας. Συνεπώς, κύριος η οικολογική διάσταση των φωτοβολταϊκών είναι εξαιρετικά υψηλή. Τίθεται βέβαια το ερώτημα κατά πόσο μπορούμε να ενεργοποιήσουμε αυτή τη δυνατότητα, σε εύθετο χρόνο. Με σεβασμό σε αυτό, τουλάχιστον δύο υπό-προβλήματα πρέπει να αντιμετωπιστούν: (1) πόσο γρήγορα μπορεί η βιομηχανία να παράγει την απαραίτητη μεγάλη επιφάνεια Φ / Β συστημάτων μετατροπής ενέργειας και (2) είναι δυνατόν να δημιουργεί ένα ισχυρό μακροχρόνιο μηχανισμό της αγοράς οδήγησης που είναι σύμφωνο με τις ιδέες του σήμερα, μιας ανταγωνιστικής αγοράς.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, οι ετήσιοι ρυθμοί ανάπτυξης της αγοράς και ως εκ τούτου η αύξηση της βιομηχανικής παραγωγής Φ / Β έχουν με τη σειρά τους αύξηση 15 έως 30% (Διάγραμμα 2.2). Ο λόγος της εντυπωσιακής ανάπτυξης είναι ότι πολλές κυβερνήσεις και οι καταναλωτές που βλέπουν μια επείγουσα ανάγκη για μια μεταμόρφωση των ενεργειακών συστημάτων προς την πορεία της αειφορίας. Οικονομικοί μηχανισμοί υποστήριξης έχουν αναπτυχθεί και περιλαμβάνουν σαφή στοιχεία για τον ανταγωνισμό στο εσωτερικό, καθορίζοντας τομείς των τεχνολογιών του ενεργειακού εφοδιασμού. Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα αυτά πρέπει να είναι περιορισμένης χρονικής διάρκειας, και το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό αν οι αγορές εξελίσσονται εκθετικά. Έτσι, τίθεται το ερώτημα αν ένα σύμπλεγμα συζευγμένου Φ/Β ηλεκτρικής ενέργειας θα καταστεί αποδοτικό εντός εύλογου χρονικού διαστήματος. Το Σχήμα 2.5 δείχνει μια προβολή κόστους βασικού φορτίου ενέργειας.



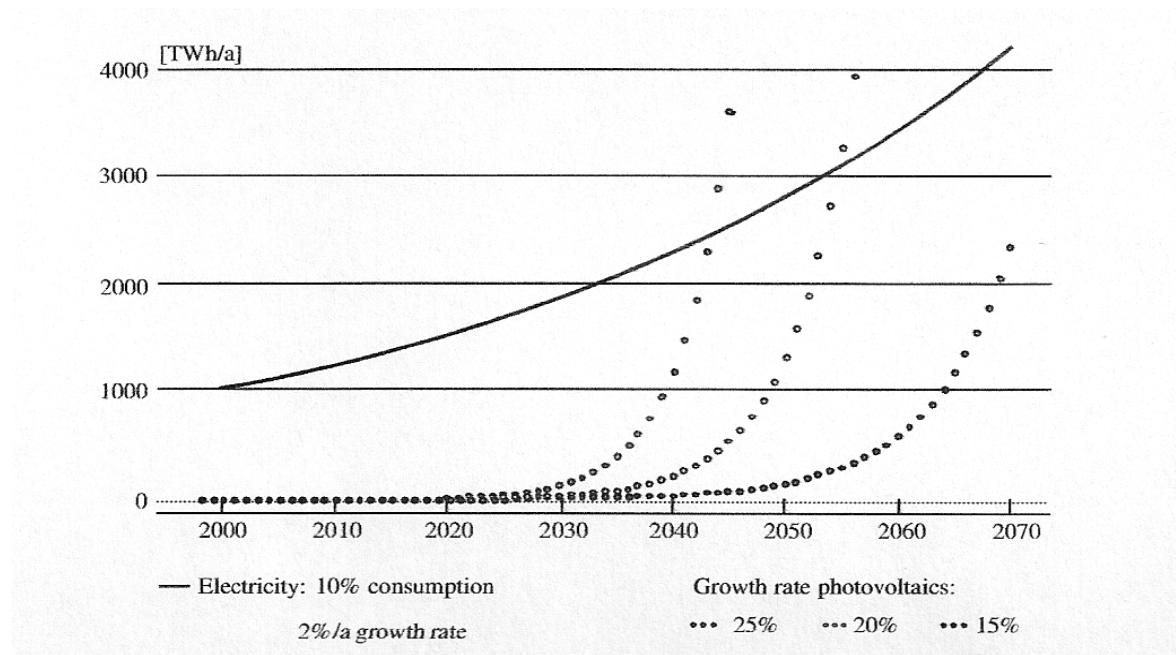
**Σχήμα 2.5** προβλέψεις δαπανών για τα φωτοβολταϊκά ηλεκτρικής ενέργειας. Το ανώτατο όριο του κόστους φωτοβολταϊκών αντανάκλα την κατάσταση της Γερμανίας, από το χαμηλότερο όριο της Νότιας Ευρώπης.

Η προέκταση της καμπύλης εμπειρίας κατά τη διάρκεια αρκετών δεκαετιών έχει, φυσικά, σημαντικό κίνδυνο. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν καλά τεχνολογικά επιχειρήματα ότι η τιμή εμπειρίας της καμπύλης θα συνεχίσει να μειώνεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στο παρελθόν για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα. Η ισχυρή μείωση της κλίσης της καμπύλης πιθανότατα θα πρέπει να αντιμετωπιστεί πριν από μια περαιτέρω μείωση των τιμών με συντελεστή 3 έως 5 που έχει επιτευχθεί. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι κατά πάσα πιθανότητα η δήλωση αυτή ισχύει και για την ισορροπία των στοιχείων του συστήματος, όπως η ηλεκτρονική ισχύος και ούτω καθεξής.

Από βιομηχανικής άποψης, μια ισχυρή εξέλιξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας  $\Phi / B$  θα μπορούσε να παράγει μια ενδιαφέρουσα παγκόσμια αγορά. Μια μακροπρόθεσμη παραγωγή για την τιμή-εμπειρία με  $f = 0,82$  (βλέπε τίτλος του σχήματος 2.3) και ρυθμό ανάπτυξης της αγοράς του 20% ετησίως που θα δημιουργήσει για παράδειγμα, τις ακόλουθες παγκόσμιες αγορές για τα  $\Phi / B$ : 2010  $2 \times 10^9$  €, 2020  $9 \times 10^9$  € και 2030  $30 \times 10^9$  €. Η πρόσθετη αγορά για τα κατασκευαστικά στοιχεία του συστήματος και την ένταξη θα είναι πιθανώς της ίδιας τάξης. Οι προοπτικές μιας τέτοιας ουσιαστικής αγοράς είναι η αιτιολόγηση των σημαντικών βιομηχανικών επενδύσεων σε  $\Phi / B$  για την παραγωγική ικανότητα.

Το θέμα μπορεί να αντιμετωπιστεί προβλέποντας πιθανούς συντελεστές μακροπρόθεσμης ανάπτυξης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με  $\Phi/B$  (Σχήμα 2.6). Τα ποσοστά 26% / έτος οδηγεί σε έναν παράγοντα αύξησης του 10 πάνω από μία δεκαετία. Ξεκινώντας από σήμερα, ημέρα με χαμηλό επίπεδο και λαμβάνουμε τουλάχιστον τρεις έως τέσσερις δεκαετίες για τα φωτοβολταϊκά να συμβάλλουν με ουσιαστικό τρόπο στην παγκόσμια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Μετά από αυτή την περίοδο εκκίνησης, το Φωτοβολταϊκό σύστημα μπορεί να γίνει ένας βασικός προμηθευτής ηλεκτρικής ενέργειας στο μελλοντικό ενεργειακό μείγμα.

Οι ρυθμοί ανάπτυξης του 15% ετησίως από την άλλη πλευρά παράγουν απλώς έναν παράγοντα ανάπτυξης των τεσσάρων δεκαετιών, υπό τις συνθήκες αυτές, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να καταστούν σημαντικοί παράγοντες μόνο κατά το δεύτερο ήμισυ του αιώνα μας. Δεδομένου ότι τα κλιματικά προβλήματα απαιτούν μια γρήγορη και ισχυρή λύση που είναι τόσο ευνοϊκή προς το περιβάλλον και είναι κοινωνικά αποδεκτή.



**Σχήμα 2.6** Σενάρια της παγκόσμιας φωτοβολταϊκής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την παραδοχή σταθερού ρυθμού ανάπτυξης 25% / έτος, το 20% / έτος και 15% / έτος. Η στερεά καμπύλη αντιπροσωπεύει το 10% της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, υποθέτοντας μια σταθερή αύξηση κατά 2% / έτος. Μια γραμμική κλίμακα είναι που χρησιμοποιείται για τον άξονα της ενέργειας. Έτσι, αν και αυξάνεται εκθετικά, η παραγωγή ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών δεν είναι ορατή στην κλίμακα που χρησιμοποιείται μέχρι το έτος 2020.

Η απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας έχει οδηγήσει σε νέες και καινοτόμες ιδέες, ιδίως στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα από αυτά είναι η καταναμημένη παραγωγή σε πολλά μεγαβάτ εγκαταστάσεων αντί των κεντρικών μονάδων. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι διασκορπισμένα στο χώρο παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας από τη συμπαραγωγή, ιδίως στο χαμηλό επίπεδο τάσης, με καταναμημένα αποθέματα στην περίπτωση του εφοδιασμού και εν μέρει σε ευνοϊκές καταστάσεις. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι καλά προσαρμοσμένη στα αποκεντρωμένα συστήματα παραγωγής. Αυτό ισχύει ιδίως αν το φορτίο θεωρείται ότι είναι στενά συνδεδεμένο με την ηλιακή ακτινοβολία και ψυκτικές μονάδες. Η Καταναμημένη αιχμή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι πιθανότατα η πρώτη αίτηση αγοράς ενέργειας για την οπτική συγκέντρωση των Φ / Β σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



**Σχήμα 2.7** Η αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η οροφή ολοκληρωμένων φωτοβολταϊκών σύστημα έχει τη μέγιστη τιμή ισχύος 5 kw

Ένας άλλος τομέας που πρέπει να επισημανθεί χωριστά, είναι η ολοκληρωμένη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλεγμάτων στις στέγες και τις ταράτσες των οικιών. Αν γίνει με έναν αισθητικά ελπιδοφόρο τρόπο, η φωτοβολταϊκή επένδυση μπορεί να υποκαταστήσει τα κύριους οικοδομικά στοιχεία. Αυτές οι εφαρμογές μπορούν να γίνουν οι πρώτες στην αγορά για ομοιογενή εμφάνιση Φ/Β. Ακόμη και αν η περιοχή που συνδέονται έχει υψηλό κόστος, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται και το όφελος της αρχιτεκτονικής χρήσης μπορούν να αντισταθμίσουν αυτή τη διαφορά εντός ευλόγου χρονικού διαστήματος.



**Σχήμα 2.8** Φωτοβολταϊκά σε ένα υπόστεγο στέγης. Στην περίπτωση αυτή, τα φωτοβολταϊκά κύτταρα χρησιμεύουν και ως οπτικά στοιχεία σκίασης για το χώρο κάτω, αποτρέποντας την υπερθέρμανση κάτω από το καλοκαίρι

## 2.2 Περίληψη

Το τεχνικό δυναμικό της ηλεκτρικής ενέργειας Φ/Β είναι αρκετά υψηλό ώστε να συμβάλλει σημαντικά στην μείωση στο παγκόσμιο πρόβλημα του CO<sub>2</sub>. Με τη βοήθεια του μηχανισμού μεσοπρόθεσμης οικονομικής στήριξης και μακροπρόθεσμα από τους ενεργειακούς φόρους, οι τεχνικές δυνατότητες μπορεί να αξιοποιηθούν οικονομικά. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα θα είναι περισσότερα και μάλλον θα είναι οικονομικά και αποδοτικά για την καταναμημένη παραγωγή ενέργειας και για τις απαιτήσεις στον κτιριακό τομέα. Η ηλιακή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να αυξηθεί κατά τρεις τάξεις μεγέθους, πριν συναντήσει ένα 10% του επιπέδου της παγκόσμιας ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια. Υποθέτουμε με φιλόδοξους ρυθμούς ότι η ανάπτυξη θα διαρκέσει τρεις έως τέσσερις δεκαετίες.

## 2.3 Η Ανάπτυξη και των Φ/Β

Δύο δισεκατομμύρια άνθρωποι σε όλο τον κόσμο δεν έχουν πρόσβαση σε εμπορική ηλεκτρική ενέργεια. Όταν είναι δυνατόν, να καλύπτουν τις ανάγκες τους για την ηλεκτρική ενέργεια με βάση τις υπηρεσίες μέσω συστοιχιών, και επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Σε πολλές περιπτώσεις, τα εν λόγω καθεστάτα εφοδιασμού, είναι πολύ δαπανηρά, αναξιόπιστα και οικολογικά αμφισβητήσιμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το γεγονός ότι για ένα μεγάλο ποσοστό του παγκόσμιου πληθυσμού, υπηρεσίες όπως το ηλεκτρικό φως, ραδιόφωνο, τηλεόραση, τηλεπικοινωνίες, υγεία, καθαρό νερό, ψύξη, και ούτω καθεξής, δεν είναι όλα

διαθέσιμα ή είναι διαθέσιμα μόνο σε πολύ χαμηλό επίπεδο. Πρέπει να τονιστεί ότι οι εν λόγω ηλεκτρική ενέργειας που βασίζεται σε οφέλη είναι, μεταξύ άλλων, ζωτικής σημασίας για την εκπαίδευση, τις επιχειρήσεις και τις μικρές εμπορικές επιχειρήσεις. Έτσι, η έλλειψη ενός σταθερού και οικονομικά προσιτού εφοδιασμού με ηλεκτρική ενέργεια εμποδίζει την ανάπτυξη πολλών αγροτικών περιοχών.

Πέρα από το χαμηλό επίπεδο ισχύος των ηλεκτρικών στηλών, υπάρχουν τρεις κυρίως σε όλο τον κόσμο που εφαρμόζονται από ομάδες τεχνολογίας που είναι σε θέση να συμβάλουν με επαγγελματικό τρόπο για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές. Η επέκταση του δικτύου, ντίζελ ηλεκτροπαραγωγών ζευγών και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το πιο χαρακτηριστικό μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα, αιολική ενέργεια και τα φωτοβολταϊκά. Όλες οι τεχνολογίες που αναφέρονται τελικά θα συμβάλουν στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας των αγροτικών και απομακρυσμένων περιοχών.

Εκ πρώτης όψεως, οι επεκτάσεις του δικτύου φαίνεται να είναι το πιο φυσικό και τεχνολογικά ο κομψότερος τρόπος για να ξεπεραστούν οι ελλείψεις στην παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Αποδεικνύεται, ωστόσο, ότι η μια τέτοια στρατηγική είναι απαγορευτικά υψηλή αν οι καταναλωτές είναι διασκορπισμένοι σε μεγάλες ακτίνες και εάν η μέση ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια είναι σχετικά μικρή. Υπό αυτές τις καταστάσεις είναι ως επί το πλείστον αδύνατον να ανακτήσουν οι επενδύσεις από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας ή να αυξηθούν. Οι εναλλακτικές λύσεις για την επέκταση δικτύου είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στο κείμενο που ακολουθεί, τα οφέλη και τα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών, θα συζητηθούν. Το Σχήμα 2.9 συνοψίζει μερικά από τα κυριότερα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών για την ηλεκτρική ενέργεια εκτός δικτύου εφοδιασμού. Το βασικό μειονέκτημα των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι το σχετικά υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης.

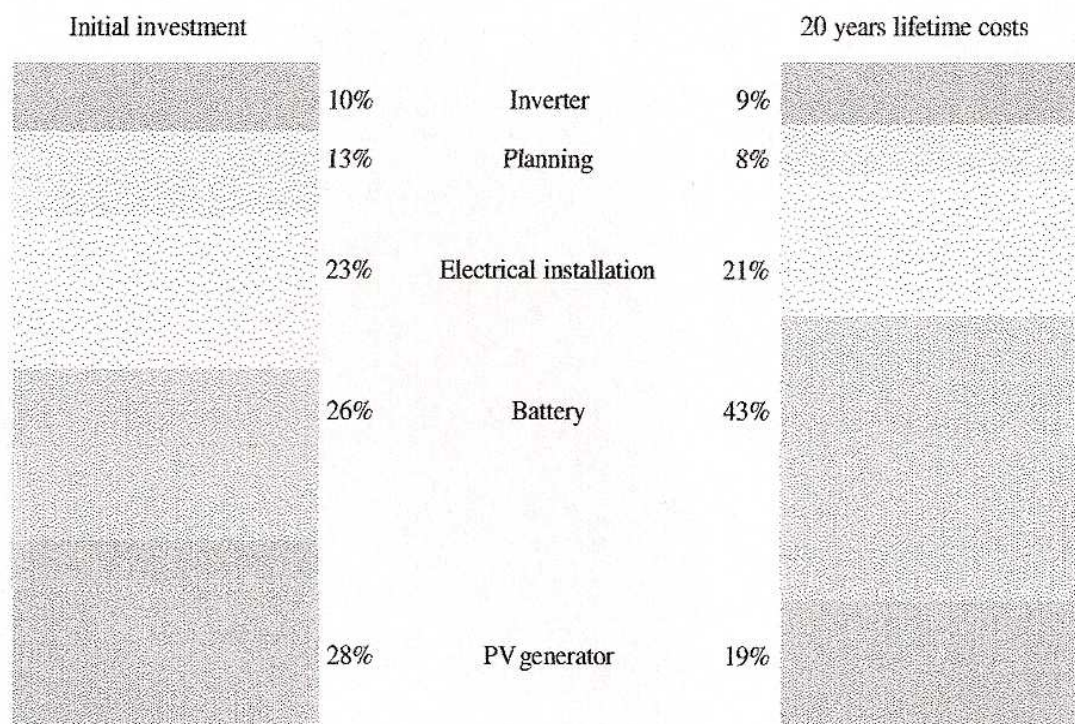
### **Ενεργειακά χαρακτηριστικά των Φ/Β**

- Υψηλή αξιοπιστία
- Υψηλή διάρκεια ζωής
- Χαμηλή συντήρηση
- Δεν απαιτούνται καύσιμα
- Ευνοϊκή επεκτασιμότητα (αρθρωτή)
- Εύκολο στη μεταφορά (modularity)
- Κατάλληλο για σκληρές περιβαλλοντικές προϋποθέσεις
- Κατάλληλο για κινητά ενεργειακού εφοδιασμού
- Ευνοϊκές προς το περιβάλλον (όχι απόβλητα, το θόρυβο, τις μεταφορές καυσίμων)

**Σχήμα 2.9** Χαρακτηριστικά των Αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων παροχής ενέργειας



Τα Αυτόνομα συστήματα εφοδιασμού με ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να αποθηκεύουν ενέργεια. Ειδικά τα ηλιακά ηλεκτρικά συστήματα έχουν και σημαντικές απαιτήσεις περιοδικής συντήρησης σύμφωνα με τους κατασκευαστές τους. Για την αξιόπιστη λειτουργία, η μπαταρία αποθήκευσης πρέπει να αλλάζεται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Το Σχήμα 2.10 δείχνει σαφώς ότι το σύστημα και οι συσκευές αποθήκευσης αποτελούν τους κύριους παράγοντες του κόστους ζωής.



**Σχήμα 2.10** το Αρχικό κόστος ζωής έναντι των μικρών επαγγελματικών αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων - ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα. Σύστημα δεδομένων: PV 1,3 kWp, μπαταρία 35 kWh, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας 5,4, απώλεια της πιθανότητας φορτίου 0,1%

Επί του παρόντος, οι κυριότερες εφαρμογές των φωτοβολταϊκών σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές είναι:

- (1) φωτοβολταϊκά (αυτοκίνητο-) μπαταρίας-σταθμούς φόρτισης όταν η μπαταρία φορτισμένη μεταφέρεται στον καταναλωτή ηλεκτρικής ενέργειας,
- (2) τα φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα στο σπίτι για τον ενεργειακό εφοδιασμό των ηλεκτρικών φώτων, ραδιόφωνα και απλές συσκευές τηλεόρασης και
- (3) τα φωτοβολταϊκά τροφοδοτούν την άντληση σταθμών για την παροχή νερού για ανθρώπινες απαιτήσεις και τη γεωργία.

Τα κύρια εμπόδια για μια περαιτέρω ταχεία εισαγωγή των τεχνολογιών αυτών στην πράξη είναι τα Κατάλληλα προγράμματα χρηματοδότησης, την κοινωνική ένταξη, η κατάρτιση των μηχανικών και του εμπορίου και της βιομηχανίας κατασκευών πρέπει να αναπτυχθούν και να έχουν αποτελεσματική ενσωμάτωση των κοινωνιών. Τα Φωτοβολταϊκά μπορεί τότε να γίνουν ένας από τους κύριους πυλώνες της ηλεκτροδότησης των αγροτικών περιοχών. Ένας όγκος αγοράς των 15 με 30 GW ανά έτος αναμένεται εντός 10 - 20 ετών. Έχει ήδη αναφερθεί ότι ο σπονδυλωτός είναι ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών. Κατ' αρχήν, τα ηλιακά συστήματα στο σπίτι μπορούν να αναβαθμιστούν βήμα προς βήμα. Σε κατάλληλες περιπτώσεις θα είναι δυνατό να συνδέονται με τα επιμέρους συστήματα για να σχηματίσουν Φ/Β τροφοδοσία. Εκτός από την κοινωνική διαχείριση των εν λόγω δομών, που αποτελεί προϋπόθεση για τις διαδεδομένες εφαρμογές είναι η παραγωγή και βιομηχανική ανάπτυξη της κατάλληλης ισχύος σε ηλεκτρονικά είδη, συσκευές διαχείρισης φορτίου και των συστημάτων πληροφοριών.

	Price (US \$)	Price (%)	Lifetime (years)
PV-module (53 W) and support	200	47	>20
Battery (70 Ah)	40	9	4
Battery charge controller	35	8	10
Lamps, wiring, switches	35	8	5
Delivery, installation, retail margins	75	18	-
Duties and taxes	40	10	-
Total	425	100	

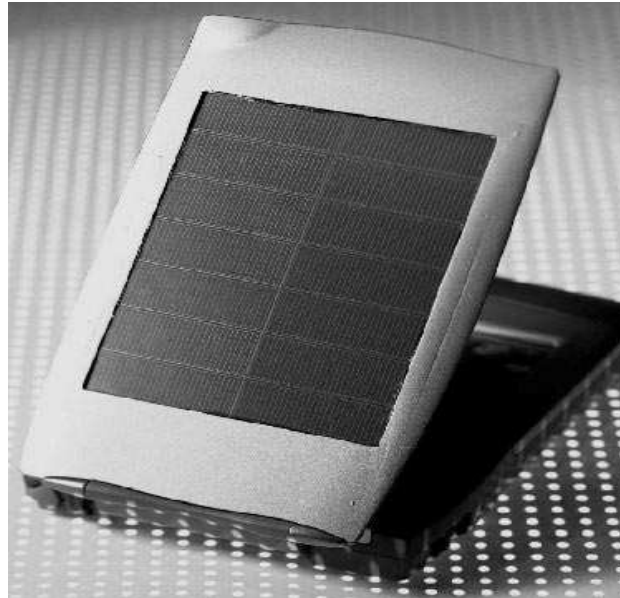
**Figure 2.11** Cost break down of a typical solar home system

#### 2.4 Η η/ε για βιομηχανική χρήση

Αυτό το μέρος περιλαμβάνει την προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτικών προϊόντων, επαγγελματικών βιομηχανικών συστημάτων και απομακρυσμένα συστήματα χαμηλής ισχύος. Στον τομέα αυτό, τα φωτοβολταϊκά συστήματα υποκαθιστούν ή συμπληρώνουν τις παραδοσιακές τροφοδοσίες μέσω μπαταρίας ή μικρά ορυκτά καύσιμα. Η μέση ζήτηση ενέργειας, ιδίως στον τομέα των καταναλωτικών προϊόντων και των επαγγελματικών συστημάτων, αφορά εν γένει στην περιοχή ισχύος από 0,1 W έως 100 W.

Οι εν λόγω συσκευές χρειάζονται μικρά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία και την κατάσταση αναμονής. Ακόμη και αν το ηλεκτρικό δίκτυο είναι έτοιμο, τα ασύρματα χωρίς συντήρηση προτιμάται γενικά από τους χρήστες. Χωρίς συντήρηση εδώ σημαίνει ότι η δαπανηρή πρωτογενής συστοιχία με περιορισμένη περιεκτικότητα σε ενέργεια μπορεί να αποφευχθεί.

Σε πολλές περιπτώσεις, τα φωτοβολταϊκά μπορούν να εισέλθουν σε αυτό το τομέα του ενεργειακού εφοδιασμού, εάν οι συσκευές έχουν τουλάχιστον προσωρινά, υπό φωτισμό και (2) εάν οι κατάλληλες συσκευές αποθήκευσης ισχύουν. Σε αυτό το τμήμα της αγοράς υπάρχει ένα ευρύ φάσμα των ειδικών απαιτήσεων για Φ / Β κύτταρα. Εξοπλισμοί, όπως τα κινητά τηλέφωνα που χαρακτηρίζονται από χαμηλή επιφάνεια και σχετικά υψηλές προκλήσεις ενεργειακής ζήτησης για υψηλής απόδοσης (π.χ. 20%), τα ηλιακά ρολόγια από την άλλη πλευρά μπορεί να τροφοδοτούνται από Φ / Β κύτταρα που έχουν μόνο ένα ποσοστό αποδοτικότητας.



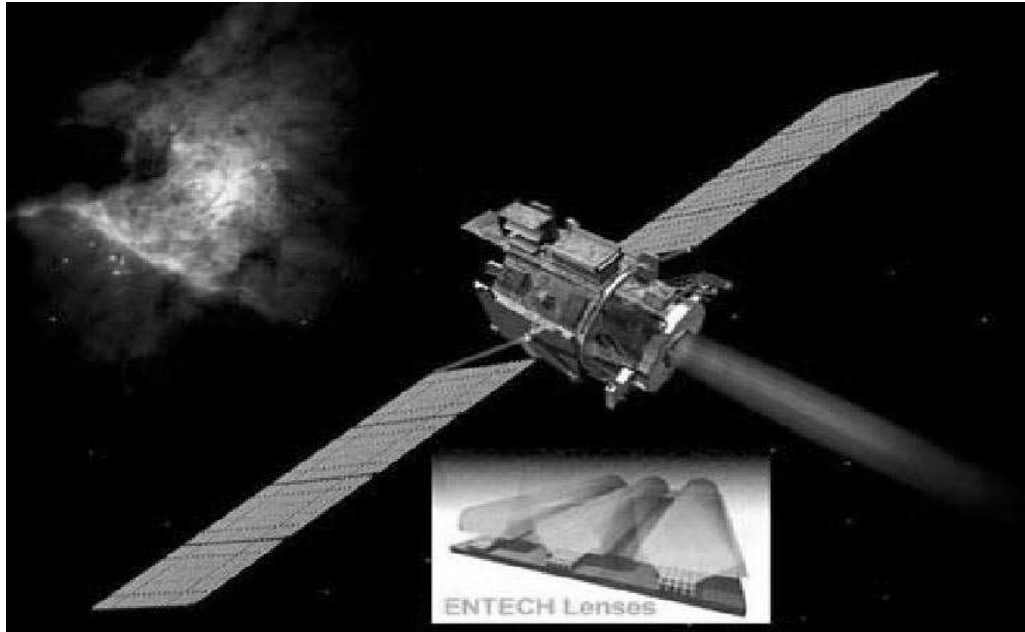
**Σχήμα 2.12** προσωπικός ψηφιακός βοηθός που κινείται με πυριτίου ηλιακά κύτταρα. Ενότητα της αποδοτικότητας σε ηλιακή ενέργεια > 20%



**Σχήμα 2.13** τηλέφωνο έκτακτης ανάγκης. Αυτόνομο πληροφοριακό σύστημα που χρησιμοποιεί φωτοβολταϊκά τροφοδοσία

## **2.5 Η ενέργεια στο διάστημα**

Το τροφοδοτικό των δορυφόρων είναι η πρώτη επαγγελματική εφαρμογή των φωτοβολταϊκών το 1958. Ενώ στην αρχή, στρατιωτικές δραστηριότητες έχουν σε πρώτο πλάνο τη τροφοδοσία χώρου, σήμερα εμπορικές δραστηριότητες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο ως καλή τροφοδοσία δορυφόρων για τηλεπικοινωνίες, τηλεανίχνευσης, πλοήγησης κλπ. Σε αυτές προφανώς τις εφαρμογές εκτός δικτύου, τα τροφοδοτικά είναι λιγότερο ή περισσότερο χωρίς την τεχνολογικά των ανταγωνιστών. Έτσι, τα ηλιακά ηλεκτρικά συστήματα αυτού του είδους θα είχαν αναπτυχθεί με επιτυχία ακόμα και χωρίς την επίγεια αγορά που αναφέρθηκε ανωτέρω. Από την άλλη, η παράλληλη εξέλιξη των διαστημικών και επίγειων φωτοβολταϊκών έχει οδηγήσει σε πολύ γόνιμη και ουσιαστική έρευνα.



**Σχήμα 2.14** Ο δορυφόρος είναι εξοπλισμένος με τριπλή διασταύρωση GaInP / GaAs / Ge φωτοβολταϊκά κύτταρα. Για πρώτη φορά, η οπτική συγκέντρωση εφαρμόζεται με κύτταρα III / V στο χώρο.

Τα Φωτοβολταϊκά για διαστημικές εφαρμογές (Σχήμα 2.14) πρέπει να πληρούν τις επί το πλείστον αυστηρότερες απαιτήσεις από επίγεια συστήματα, όπως χαμηλότερο βάρος και υψηλότερη απόδοση, εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία, υψηλή αντίσταση κατά της εξωγήινης ακτινοβολίας των σωματιδίων και τη φασματική ευαισθησία που ταιριάζει με το εξωγήινο ηλιακό φάσμα. Τέτοια ηλιακά κύτταρα εμφανίζουν σημαντικά υψηλότερες αποδόσεις και η διάρκεια ζωής από τα κύτταρα. Υπάρχει μια ρεαλιστική πιθανότητα να γίνουν αυτές οι δοκιμασμένες τεχνολογίες η βάση για μια νέα κατηγορία των ηλιακών κυττάρων που έχουν απόδοση μετατροπής της τάξης των 40 ή ακόμη και 50%.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### Η φύση των ηλιακών κυψελών

#### 3.1 Εισαγωγή

Τα ηλιακά κύτταρα είναι βασικά πολύ απλές συσκευές. Οι ημιαγωγοί έχουν την ικανότητα να απορροφούν το φως και να παραδώσουν ένα μέρος της ενέργειας των αναρροφώμενων φωτονίων στους μεταφορείς του ηλεκτρικού ρεύματος, τα ηλεκτρόνια και τις οπές. Μια δίοδος ημιαγωγών διαχωρίζει και συλλέγει τους μεταφορείς και διευθύνει το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα κατά προτίμηση σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Έτσι, ένα ηλιακό κύτταρο είναι απλώς μια δίοδος ημιαγωγών που έχει προσεκτικά σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για την αποτελεσματική απορρόφηση και που μετατρέπουν το φως της ενέργειας από τον ήλιο σε ηλεκτρική ενέργεια. Μια απλή συμβατική ηλιακή δομή των κυττάρων απεικονίζεται στην Εικόνα 3.1. Το φως του ήλιου είναι από την κορυφή στο μπροστινό μέρος του ηλιακού κυττάρου. Ένα μεταλλικό πλέγμα μεταφέρει τις ηλεκτρικές επαφές της διόδου και επιτρέπει στο φως να πέσει στο ημιαγωγό μεταξύ των γραμμών του πλέγματος και έτσι να απορροφάται και να μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Μια στρώση μεταξύ των γραμμών του πλέγματος αυξάνει την ποσότητα του φωτός που διαβιβάζεται στους το ημιαγωγούς.

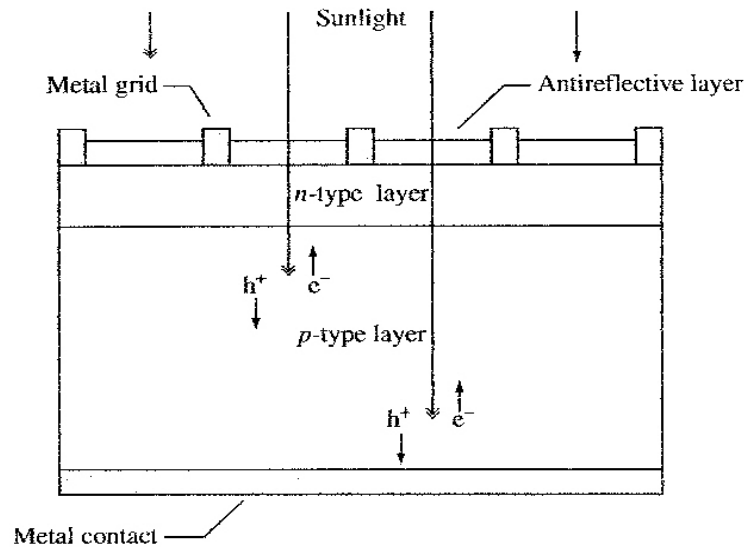
Η δίοδος των ημιαγωγών διαμορφώνεται όταν ένας n-τύπου ημιαγωγός και ενός ημιαγωγού p-τύπου συγκεντρώνονται για να σχηματίσουν μια μεταλλουργική διασταύρωση. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με διάχυση ή εμφύτευση ειδικών προσμείξεων ή μέσω μιας διαδικασίας εναπόθεσης. Η δίοδος αποτελείται από ένα μεταλλικό στρώμα στο πίσω μέρος του ηλιακού κυττάρου. Όλες οι ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες, συμπεριλαμβανομένης του φωτός του ήλιου, αποτελούνται από σωματίδια που ονομάζονται φωτόνια, τα οποία μεταφέρουν συγκεκριμένες ποσότητες ενέργειας που καθορίζονται από τις φασματικές ιδιότητες από την πηγή τους. Τα φωτόνια εμφανίζουν επίσης ένα κυματοειδή χαρακτήρα με το μήκος κύματος,  $\lambda$ , να είναι αυτό που σχετίζεται με την ενέργεια των φωτονίων,  $E_\lambda$ ,  $h\nu$ ,

$$E_\lambda = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.1)$$

όπου:  $h$  είναι η σταθερά του Plank και  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός.

Μόνο τα φωτόνια με αρκετή ενέργεια φτάνουν για να δημιουργηθεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίων, δηλαδή, τα άτομα με ενέργεια μεγαλύτερη από την ενέργεια χάσματος ημιαγωγών, θα συμβάλει στη διαδικασία μετατροπής της ενέργειας. Έτσι, η φασματική φύση του φωτός του ήλιου είναι ένα σημαντικό θέμα για το σχεδιασμό αποτελεσματικών ηλιακών κυψελών. Ο ήλιος έχει μια επιφανειακή θερμοκρασία 5762 K και το φάσμα ακτινοβολίας του μπορεί να προσεγγίζεται με ένα θερμαντικό μέλανος σώματος στην ίδια θερμοκρασία. Εκπομπή ακτινοβολίας από τον ήλιο, όπως

και με όλα τα μέλανα σώματα, είναι ισοτροπικό. Ωστόσο, η μεγάλη απόσταση της Γης από τον ήλιο σημαίνει ότι μόνο τα φωτόνια εκπέμπονται άμεσα στην κατεύθυνση της Γης και συμβάλλουν στο ηλιακό φάσμα, όπως παρατηρείται από τη Γη.



**Σχήμα 3.1** Μια σχηματική απεικονίζει ενός απλού συμβατικού ηλιακού κυττάρου. Δημιουργία ηλεκτρονίων οπών ζεύγη,  $e^-$  και  $h^+$ , αντίστοιχα,

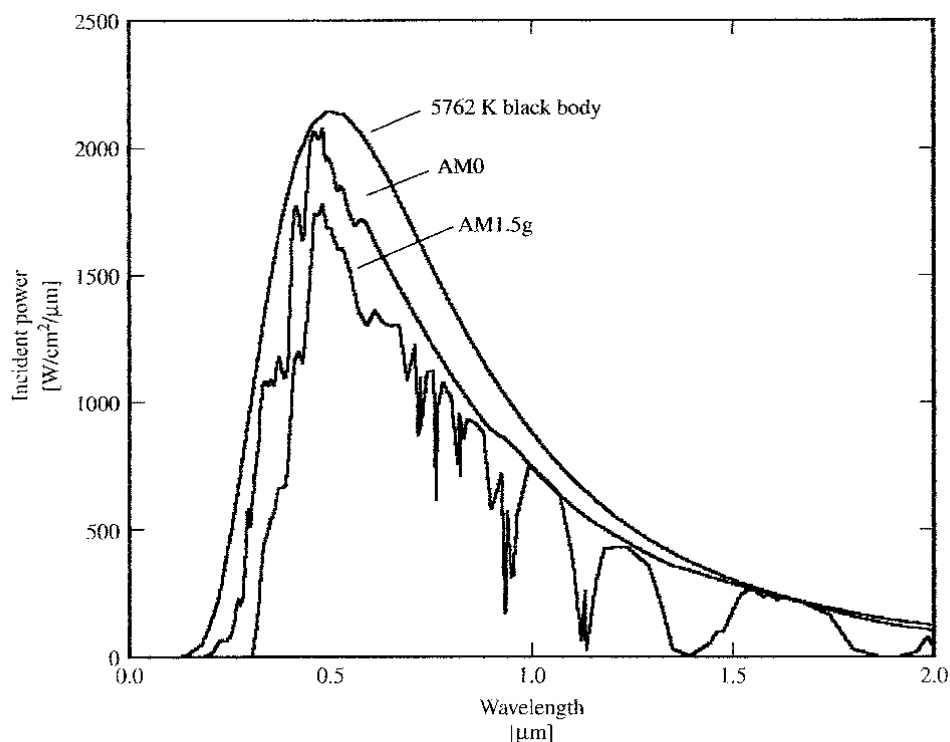
Ως εκ τούτου, για πρακτικούς λόγους, το φως που πέφτει πάνω στη Γη μπορεί να θεωρηθεί ως παράλληλη ροή των φωτονίων. Ακριβώς πάνω από τη γήινη ατμόσφαιρα, η ένταση της ακτινοβολίας, είναι περίπου  $1,353 \text{ kW/m}^2$  και η φασματική κατανομή αναφέρεται ως μία μηδενική μάζα αέρα του φάσματος ακτινοβολίας και είναι το μέτρο του πόσου απορρόφησης στην ατμόσφαιρα που επηρεάζει το φασματικό περιεχόμενο και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της Γης. Ο αριθμός μάζας αέρα δίνεται από:

$$\text{Air Mass} = \frac{1}{\cos \theta} \quad (3.2)$$

όπου  $\theta$  είναι η γωνία πρόσπτωσης ( $\theta = 0$  όταν ο ήλιος είναι ακριβώς από πάνω). Ο μαζικός αριθμός είναι πάντα μεγαλύτερος ή ίσος με την επιφάνεια της Γης. Ένας εύκολος τρόπος για την εκτίμηση της μάζας αέρα έχει δοθεί από:

$$\text{Air Mass} = \sqrt{1 + (S/H)^2} \quad (3.3)$$

όπου  $S$  είναι το μήκος μιας σκιάς από ένα αντικείμενο από το ύψος  $H$ . Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο για τη σύγκριση των επιδόσεων ηλιακών κυττάρων είναι το φάσμα AM 1.5 που ομαλοποιούνται στη συνολική ισχύ πυκνότητας σε  $1 \text{ kW/m}^2$ . Το φασματικό περιεχόμενο του ηλιακού φωτός στην επιφάνεια της Γης έχει επίσης μια διάχυτη (έμμεση) συνιστώσα, λόγω σκέδασης και τον προβληματισμό στην ατμόσφαιρα και γύρω από το τοπίο και μπορούν να αντιπροσωπεύουν έως και το 20% του φωτός που προσπίπτει.



**Σχήμα 3.2** Το φάσμα ακτινοβολίας για ένα μαύρο σώμα σε 5762 K, ένα φάσμα AM0, και μια AM1.5 σε παγκόσμιο φάσμα

Ο αριθμός μάζας αέρα ως εκ τούτου ορίζεται από το εάν ή όχι το μετρούμενο ραδιοφάσμα περιλαμβάνει το στοιχείο διάχυσης. Μια AM1.5g (παγκόσμια) ραδιοφάσματος περιλαμβάνει την διάχυτη συνιστώσα, ενώ μια AM1.5d (άμεση) δεν το κάνει. Το Μαύρο σώμα ( $T = 5762 \text{ K}$ ), AM0, και οι AM1.5g και τα φάσματα ακτινοβολίας φαίνεται στο σχήμα 3.2. Οι φυσικές αρχές που διέπουν τη λειτουργία των ηλιακών κυψελών είναι το αντικείμενο σε αυτό το κεφάλαιο. Πρώτον, μια σύντομη ανασκόπηση των βασικών ιδιοτήτων των ημιαγωγών δεδομένου ότι περιλαμβάνει επισκόπηση της δομής της ζώνης ημιαγωγών και την παραγωγή του μεταφορέα, ανασυνδυασμού, και οι μεταφορές. Στη συνέχεια, οι ηλεκτροστατικές ιδιότητες της διόδου PN σε διασταύρωση έχει αναθεωρηθεί, ακολουθούμενη από μια περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών λειτουργίας των ηλιακών κυψελών, συμπεριλαμβανομένου της παραγωγής για την τρέχουσα τάση της χαρακτηριστικής ενός εξιδανικευμένου ηλιακού κυττάρου.



Αυτό χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των βασικών ηλιακών στοιχείων και της αξίας του, δηλαδή, η τάση ανοικτού κυκλώματος, του ρεύματος βραχυκυκλώματος, ο συντελεστής κάλυψης, η αποδοτικότητα της μετατροπής ή και η απόδοση συλλογής, η<sub>c</sub>. Τέλος, ορισμένα πρόσθετα θέματα σχετικά με την ηλιακή λειτουργία των κυψελών, το σχεδιασμό και την ανάλυση θα παρουσιαστούν. Αυτές περιλαμβάνουν την σχέση μεταξύ χάσματος και την αποδοτικότητας, την ηλιακή κυψέλη και την φασματική απόκριση, την επίδραση της θερμοκρασίας, μια σύντομη εισαγωγή σε κάποια μοντέρνα σχεδίαση, καθώς και μια σύντομη επισκόπηση των λεπτομερών των αριθμητικών μοντέλων των ηλιακών κυττάρων.

### **3.2 Θεμελιώδεις ιδιότητες των ημιαγωγών**

Η κατανόηση της λειτουργίας των ημιαγωγών των ηλιακών κυττάρων απαιτεί την εξοικείωση με μερικές βασικές έννοιες της στερεάς φυσικής κατάστασης. Εδώ, παρέχεται στις βασικές έννοιες που απαιτούνται για την εξέταση της φυσικής των ηλιακών κυττάρων. Πληρέστερες εφαρμογές είναι διαθέσιμες από διάφορες πηγές. Τα ηλιακά κύτταρα μπορεί να είναι κατασκευασμένα από ένα αριθμό υλικών, οι περισσότεροι συνήθως πυριτίου (Si) - κρυσταλλική, πολυκρυσταλλικά και άμορφα. Τα ηλιακά κύτταρα είναι επίσης κατασκευασμένα από GaAs, GaInP, Cu (INGA) Se<sub>2</sub>, και CdTe. Τα υλικά επιλέγονται σε μεγάλο βαθμό με βάση το πόσο καλά ταιριάζουν με τα χαρακτηριστικά της απορρόφησης του ηλιακού φάσματος και το κόστος τους. Το πυρίτιο έχει μια κοινή επιλογή λόγω ότι τα χαρακτηριστικά της απορρόφησης είναι μια αρκετά καλή αντιστοιχία με το ηλιακό φάσμα.

#### **3.2.1 Η κρυσταλλική δομή**

Η ηλεκτρονική τάξη των ημιαγωγών είναι πολύ καθαρό κρυσταλλικό υλικό. Ο κρυσταλλικός χαρακτήρας σημαίνει ότι τα άτομα τους ευθυγραμμίζονται σε τακτικό περιοδικό πίνακα. Αυτή η περιοδικότητα, σε συνδυασμό με την ατομική ιδιότητα των συστατικών στοιχείων, είναι αυτό που δίνει πολύ χρήσιμες ηλεκτρονικές ιδιότητες τους. Μια συνοπτική περιοδικός πίνακας των στοιχείων παρατίθεται στον πίνακα 3.1. Σημειώστε ότι το πυρίτιο που βρίσκεται στη στήλη IV, σημαίνει ότι έχει τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους, ότι είναι, τέσσερα ηλεκτρόνια που μπορούν να μοιραστούν με τα γειτονικά άτομα για να σχηματίσουν ομοιοπολικούς δεσμούς με τους γείτονες αυτούς. Σε στοιβάδες κρυσταλλικού πυριτίου, τα άτομα είναι διατεταγμένα σε ένα πλέγμα διαμαντιού με τετραδική συγκόλληση τεσσάρων ομολόγων από κάθε άτομο όπου η γωνία μεταξύ δύο δεσμών είναι 109,5°.

**Πίνακας 3.1** Περιοδικός πίνακας των στοιχείων

I	II	III	IV	V	VI
		B	C	N	O
		Al	Si	P	S
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te

Το δικτυωτό πλέγμα είναι σταθερό, είναι το μήκος των άκρων της κυβικής κυψελίδας. Το σύνολο του πλέγματος μπορεί να κατασκευαστεί με τη στοιβάδα από τα κύτταρα της μονάδας. Για παράδειγμα, σε GaAs, αλληλοδιαπερνώντας ένα FCC κύτταρο σε μονάδα αποτελείται εξ ολοκλήρου από Ga άτομα και το άλλο εξ ολοκλήρου από άτομα. Σημειώστε ότι ο μέσος όρος σθένους είναι τέσσερα για κάθε ένωση, έτσι ώστε να υπάρχουν τέσσερα ομόλογα προς και από κάθε άτομο με κάθε ομοιοπολικό δεσμό που περιλαμβάνει δύο ηλεκτρόνια σθένους. Ορισμένες ιδιότητες των ημιαγωγών εξαρτώνται από τον προσανατολισμό του κρυσταλλικού πλέγματος, και η κρυσταλλική δομή από την άποψη ενός κυβικού κύτταρου των μονάδων που καθιστά τον εντοπισμό ευκολότερο.

### 3.2.2 Δομή Ενέργειας

Από τη φυσική των ηλιακών κυττάρων, είναι πώς η περιοδική κρυσταλλική διάρθρωση των ημιαγωγών προβλέπει ηλεκτρονικές ιδιότητες. Ένα ηλεκτρόνιο κινείται σε ένα υλικό ημιαγωγών και είναι ανάλογη με ένα σωματίδιο που περιορίζεται σε ένα τρισδιάστατο κουτί που έχει μια πολύπλοκη εσωτερική δομή που οφείλεται κατά κύριο λόγο στο δυναμικό και στους τομείς που περιβάλλει τον πυρήνα του ατόμου και την συνιστώσα και τα σφικτά συνδεδεμένα ηλεκτρόνια του πυρήνα. Η δυναμική συμπεριφορά του ηλεκτρονίου μπορεί να καθοριστεί από την κυματοσυνάρτηση ηλεκτρονίου,  $\psi$ , το οποίο λαμβάνεται λύνοντας τη χρονικά ανεξάρτητη εξίσωση Schrodinger.

$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} [E - U(\vec{r})] \psi = 0 \quad (3.4)$$

όπου  $m$  είναι η μάζα ηλεκτρονίου,  $\hbar$  είναι η μειωμένη σταθερά του plank,  $E$  είναι η ενέργεια των ηλεκτρονίων, και  $U(\vec{r})$  είναι η περιοδική ενεργειακού δυναμικού στο εσωτερικό του ημιαγωγού. Η επίλυση αυτής της εξίσωσης είναι πέρα από το πεδίο εφαρμογής αυτού του έργου, αλλά αρκεί να πούμε ότι η λύση που ορίζει τη δομή

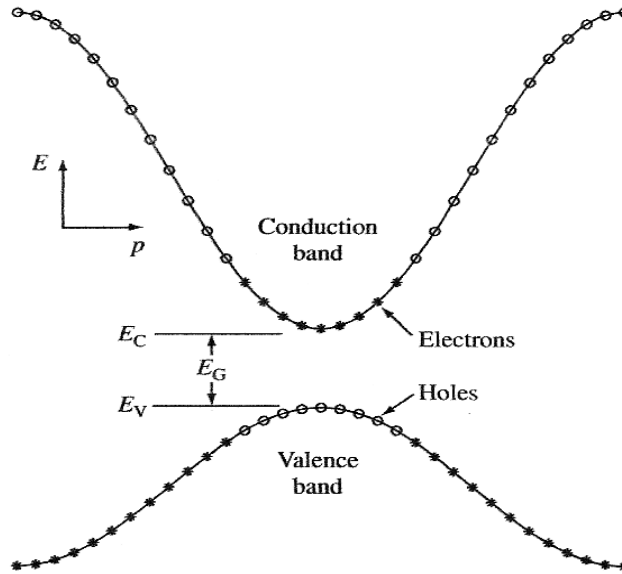
στην μάλιστα των ημιαγωγών λέει ότι η κβαντική υπολογιστική μηχανική κίνηση των ηλεκτρονίων στα κρυστάλλινα είναι, σε καλή προσέγγιση, όπως αυτή ενός ηλεκτρονίου σε ελεύθερο χώρο, εάν η μάζα του  $m$ , αντικαθίσταται από την μάζα  $m$ , στο νόμο του Νεύτωνα από την κλασική μηχανική

$$F = m^* a \quad (3.5)$$

όπου  $F$  είναι η δύναμη που εφαρμόζεται και είναι η επιτάχυνση του ηλεκτρονίου. Μια απλοποιημένη ενεργειακή δομή ζωνών φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Οι επιτρεπόμενες ενέργειες ηλεκτρονίων φέρονται έναντι του κρυστάλλου ορμής, με  $p = \hbar k$ , όπου  $k$  είναι το διάνυσμα κύματος που αντιστοιχεί στις λύσεις της κυματοσυνάρτησης της εξίσωσης Schrodinger. Μόνο οι ενεργειακές ζώνες του αμέσου ενδιαφέροντος κάτω από το σθένος της μάλιστα έχει πλήρως καταληφθεί από τα ηλεκτρόνια και τα πάνω από τη ζώνη αγωγιμότητας που είναι κενό. Το ηλεκτρόνιο έχει πραγματική μάζα που καθορίζεται επομένως ως

$$m^* \equiv \left[ \frac{d^2 E}{dp^2} \right]^{-1} = \left[ \frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2 E}{dk^2} \right]^{-1} \quad (3.6)$$

Σημειώνεται ότι η πραγματική μάζα δεν είναι σταθερή για κάθε ζώνη. Επιπλέον, κοντά στην κορυφή από τη ζώνη του σθένους, η πραγματική μάζα είναι αρνητική. Τα ηλεκτρόνια συμπληρώνουν τα μέλη που βρίσκονται κοντά στην κορυφή της ζώνη σθένους και είναι κενά, λόγω ότι κάποια ηλεκτρόνια θερμαίνονται στη ζώνη διεξαγωγής.



**Σχήμα 3.3** Ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενεργειακής ζώνης  $T > 0$  K για άμεσο χάσμα ζωνών (EG) ημιαγωγών. Τα ηλεκτρόνια κοντά στα ανώτατα όρια της ζώνης σθένους έχουν θερμικά μέλη που βρίσκονται κοντά από τα ελάχιστα όρια αγωγιμότητας

Όταν το ελάχιστο της ζώνης γίνεται με την ίδια αξία η ορμή του κρυστάλλου είναι στη μέγιστη ζώνη σθένους, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3, ο ημιαγωγός είναι ένα άμεσο χάσμα ζωνών. Όταν δεν ευθυγραμμιστεί, ο ημιαγωγός λέγεται ότι είναι μια έμμεση φάση ημιαγωγών χάσματος. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν η απορρόφηση του φωτός είναι μεγίστη. Όλες έχουν την πολυπλοκότητα των περιοδικών δυνατοτήτων των ατόμων του στοιχείου που έχουν ενσωματωθεί στην αποτελεσματική μάζα. Η πυκνότητα καταστάσεων στη ζώνη αγωγιμότητας δίνεται από

$$g_C(E) = \frac{m_n^* \sqrt{2m_n^*(E - E_C)}}{\pi^2 \hbar^3} \text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1} \quad (3.7)$$

ενώ η πυκνότητα καταστάσεων στη ζώνη σθένους δίνεται από:

$$g_V(E) = \frac{m_p^* \sqrt{2m_p^*(E_V - E)}}{\pi^2 \hbar^3} \text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1} \quad (3.8)$$

### 3.2.3 Μπάντες πυκνότητας και καταστάσεις

Τώρα που η δυναμική της κίνησης των ηλεκτρονίων σε έναν ημιαγωγό έχει προσεγγιστεί με ένα αρνητικά φορτισμένο σωματίδιο με μάζα  $m_n^*$  στη ζώνη διεξαγωγής και από ένα θετικά φορτισμένο σωματίδιο με μάζα  $m_p^*$  στη ζώνη σθένους, μπορεί να υπολογιστεί η πυκνότητα των μελών σε κάθε ζώνη. Όλες έχουν την πολυπλοκότητα των περιοδικών δυνατοτήτων των ατόμων του στοιχείου που έχουν ενσωματωθεί στην αποτελεσματική μάζα. Η πυκνότητα καταστάσεων στη ζώνη αγωγιμότητας δίνεται από:

$$g_C(E) = \frac{m_n^* \sqrt{2m_n^*(E - E_C)}}{\pi^2 \hbar^3} \text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1} \quad (3.7)$$

ενώ η πυκνότητα καταστάσεων στη ζώνη σθένους δίνεται από:

$$g_V(E) = \frac{m_p^* \sqrt{2m_p^*(E_V - E)}}{\pi^2 \hbar^3} \text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1} \quad (3.8)$$

### 3.2.4 Συγκεντρώσεις Ισορροπίας

Όταν ο ημιαγωγός είναι σε θερμική ισορροπία, η λειτουργία καθορίζει την αναλογία του, γεμίζουν τις καταστάσεις για να διατίθενται σε κάθε ενέργεια και δίνεται από:

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}} \quad (3.9)$$

όπου  $E_F$  είναι η ενέργεια Fermi,  $k$  είναι σταθερά του Boltzmann, και  $T$  είναι η θερμοκρασία Kelvin. Στο απόλυτο μηδέν, είναι μια λειτουργία παρακάτω με  $E_F$  γεμάτο με ηλεκτρόνια και όλα αυτά αναφέρονται παραπάνω σαν  $E_F$  και είναι εντελώς άδειες. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, η θερμική διέγερση θα αφήσει μερικά  $E_F$  στο κενό, και τον αντίστοιχο αριθμό των θα γεμίσει με τα ηλεκτρόνια. Οι συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων ισορροπίας και της τρύπας είναι

$$n_o = \int_{E_C}^{\infty} g_C(E) f(E) dE = \frac{2N_C}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}((E_F - E_C)/kT) \quad (3.10)$$

$$p_o = \int_{-\infty}^{E_V} g_V(E) [1 - f(E)] dE = \frac{2N_V}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}((E_V - E_F)/kT) \quad (3.11)$$

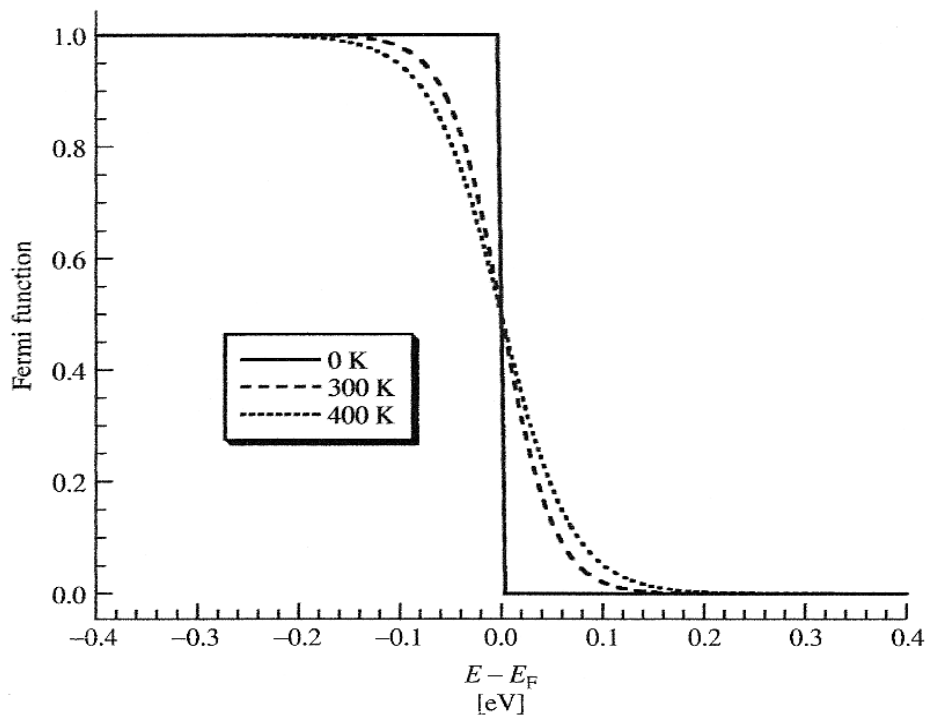
όπου  $F_{1/2}(\xi)$  είναι το Fermi-Dirac ολοκλήρωμα για  $1/2$ ,

$$F_{1/2}(\xi) = \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{\xi'} d\xi'}{1 + e^{\xi' - \xi}} \quad (3.12)$$

Η αγωγιμότητα και το σθένος έχουν αποτελεσματική πυκνότητα ( $\#/cm^3$ ),  $N_C$  και  $N_V$  και αντίστοιχα, δίνεται από:

$$N_C = 2 \left( \frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (3.13)$$

Ακόμη και τα άμορφα υλικά εμφανίζουν παρόμοια δομή στη μάντα τους. Σε μικρές αποστάσεις, τα άτομα είναι διατεταγμένα με ένα περιοδικό τρόπο, και μια λειτουργία κύματος των ηλεκτρονίων που μπορεί να οριστεί. Οι λειτουργίες κύματος από αυτές τις μικρές περιοχές αλληλεπικαλύπτονται με τέτοιο τρόπο ώστε το χάσμα κινητικότητας να μπορεί να οριστεί με τα ηλεκτρόνια του πάνω από το χάσμα που καθορίζει τη ζώνη σθένους κινητικότητας στον καθορισμό της ζώνης αγωγιμότητας



**Σχήμα 3.4** Η συνάρτηση Fermi σε διάφορες θερμοκρασίες

Και

$$N_V = 2 \left( \frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} . \quad (3.14)$$

Όταν η ενέργεια Fermi,  $E_F$ , είναι αρκετή ( $> 3 kT$ ) από μεταφορά συγκεντρώσεις μπορεί να υπάρξει προσέγγιση (με ακρίβεια 2%), όπως

$$n_o = N_C e^{(E_F - E_C)/kT} \quad (3.15)$$

$$p_o = N_V e^{(E_V - E_F)/kT} \quad (3.16)$$

και ο ημιαγωγός λέγεται ότι είναι nondegenerate. Σε nondegenerate ημιαγωγούς, τα προϊόντα του ηλεκτρονίου ισορροπίας και οι συγκεντρώσεις είναι ανεξάρτητα από την τοποθεσία της ενέργειας Fermi και είναι μόλις:

$$p_o n_o = n_i^2 = N_C N_V e^{(E_V - E_C)/kT} = N_C N_V e^{-E_G/kT} . \quad (3.17)$$

Σε μια αννοδίωση των ημιαγωγών σε θερμική ισορροπία, ο αριθμός των ηλεκτρονίων σε ζώνη διεξαγωγής και τον αριθμό των οπών στη ζώνη σθένους είναι ίσοι με  $p_o = n_i$ , όπου  $n_i$  είναι η εγγενής συγκέντρωση μεταφορέα. Οι εγγενείς συγκέντρωση μεταφορέα μπορεί να υπολογίζονται από την (3.17), δίνοντας

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{(E_V - E_C)/2kT} = \sqrt{N_C N_V} e^{-E_G/2kT} . \quad (3.18)$$

Η ενέργεια Fermi σε έναν εγγενή ημιαγωγό,  $E_i = E_F$ , δίνεται από τον τύπο

$$E_i = \frac{E_V + E_C}{2} + \frac{kT}{2} \ln \left( \frac{N_V}{N_C} \right) \quad (3.19)$$

που είναι συνήθως πολύ κοντά στο μέσο του χάσματος. Η συγκέντρωση μεταφοράς είναι συνήθως πολύ μικρή σε σχέση με την πυκνότητα των μερών και των τυπικών πυκνοτήτων και οι ενδογενείς ημιαγωγοί συμπεριφέρονται παρόμοια με τους μονωτές που είναι πολύ χρήσιμοι ως αγωγοί του ηλεκτρισμού.

Ο αριθμός των ηλεκτρονίων και των οπών στις αντίστοιχες ζώνες τους, και ως εκ τούτου η αγωγιμότητα των ημιαγωγών, μπορεί να ελεγχθεί μέσω της θέσπισης ειδικών προσμίξεων που ονομάζονται και αποδέκτες. Για παράδειγμα, όταν οι ημιαγωγοί πυριτίου είναι ενισχυμένοι με φώσφορο, ένα ηλεκτρόνιο είναι γύρω από την ζώνη διεξαγωγής που το κάθε άτομο του φωσφόρου θα εισαχθεί. Τέσσερις τύποι αυτών χρησιμοποιούνται για να ικανοποιήσουν τους τέσσερις ομοιοπολικούς δεσμούς του πλέγματος του πυριτίου και το πέμπτο είναι διαθέσιμο για την πλήρωση μιας κενής κατάστασης στη ζώνη αγωγιμότητας. Αν το πυρίτιο είναι ενσωματωμένο σε βόριο, κάθε άτομο βορίου δέχεται ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους, αφήνοντας πίσω του ένα κενό. Όλα αυτά εισαγάγουν πρόσθετες τοπικές ηλεκτρονικές δομές στη ζώνη, συχνά κατά την απαγορευμένη ζώνη μεταξύ της ΕΚ και ΕV, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5.

Η ελεγχόμενη εισαγωγή του δότη και οι προσμίξεις του δέκτη σε έναν ημιαγωγό επιτρέπει τη δημιουργία του ν-τύπου και ρ-τύπου ημιαγωγών, αντίστοιχα. Αυτή είναι η βάση για την κατασκευή όλων των συσκευών ημιαγωγών, όπως τα ηλιακά κύτταρα. Ο αριθμός των ιονισμένων δοτών και αποδέκτες δίνονται από

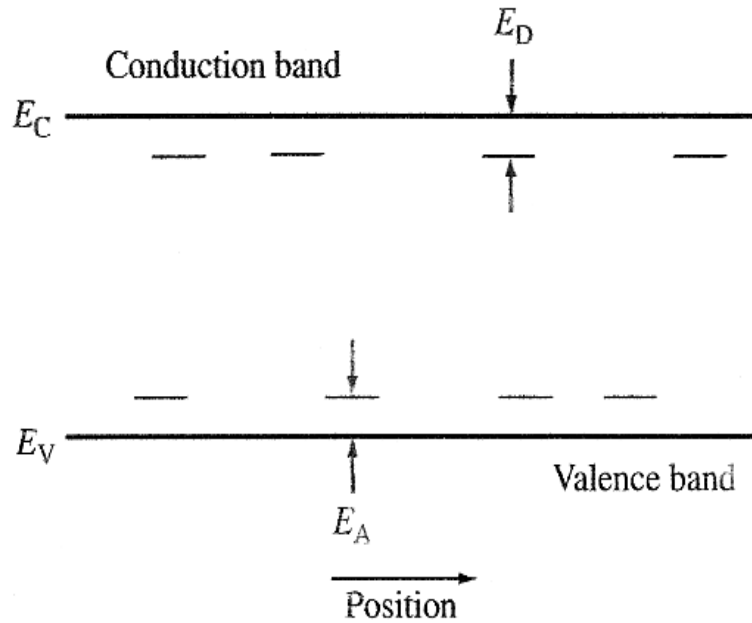
$$N_D^+ = \frac{N_D}{1 + g_D e^{(E_F - E_D)/kT}} = \frac{N_D}{1 + e^{(E_F - E'_D)/kT}} \quad (3.20)$$

$$N_A^- = \frac{N_A}{1 + g_A e^{(E_A - E_F)/kT}} = \frac{N_A}{1 + e^{(E'_A - E_F)/kT}} \quad (3.21)$$

όπου  $g_D$  και  $g_A$  είναι ο δότης. Συνήθως,  $g_D = 2$  και  $g_A = 4$ . Οι παράγοντες αυτοί συνήθως συνδυάζονται ούτως ώστε  $E_D = E'_D + kT \ln g_D$  και  $E'_A = E_A + kT \ln g_A$ . Συχνά, υποτίθεται ότι είναι πλήρως ιονισμένοι έτσι ώστε να μην αλλάζουν σε n-τύπου υλικού και  $p_0 = N_A$  σε ρ-τύπου υλικό. Η ενέργεια Fermi μπορεί στη συνέχεια να γραφεί ως

$$E_F = E_i - kT \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (3.22)$$



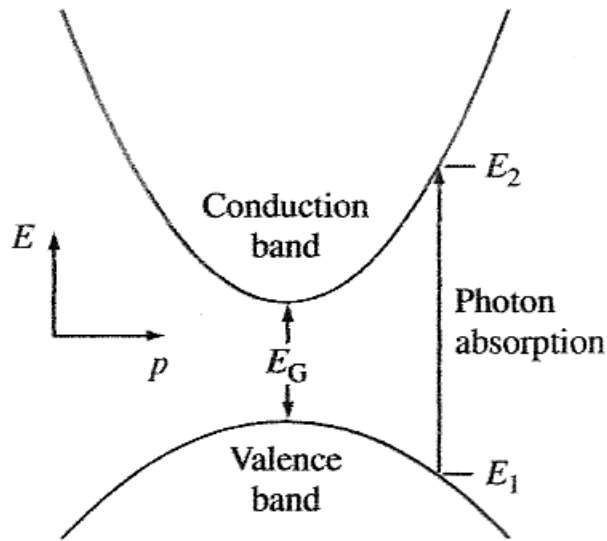


**Σχήμα 3.5** Σχηματική παράσταση χορηγών και αποδεκτών σε ημιαγωγούς. Η χωρική κατανομή ενισχύει την έννοια ότι είναι εντοπισμένες σε τμήματα

Όταν μια πολύ μεγάλη συγκέντρωση των προσμίξεων εισάγεται εντός συστήματος δεν μπορεί πλέον να θεωρηθεί ως μια μικρή διαταραχή στο σύστημα. Η επίδρασή τους σχετικά με τη διάρθρωση της ζώνης πρέπει να εξεταστεί. Συνήθως, εκδηλώνεται ως μείωση του χάσματος  $EG$ , και έτσι μια αύξηση της εσωτερικής συγκέντρωσης, όπως προκύπτει από την εξίσωση (3.18).

### 3.2.5 Η απορρόφηση του φωτός

Η δημιουργία των ηλεκτρονίων μέσω της απορρόφησης του φωτός του ήλιου είναι θεμελιώδης για την λειτουργία των ηλιακών κυψελών. Η διέγερση ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη διεξαγωγής ονομάζεται θεμελιώδης απορρόφηση. Η συνολική ενέργεια και της ορμής όλων των σωματιδίων που εμπλέκονται στη διαδικασία απορρόφησης πρέπει να διατηρηθούν.



**Σχήμα 3.6** απορρόφηση φωτονίων, με άμεσο χάσμα ζωνών για ένα φωτόνιο με ενέργειας  $h\nu = E_2 - E_1 > E_G$

Ολες τις πιθανές μεταβάσεις μεταξύ των  $E_2 - E_1 = h\nu$  δίνεται παρακάτω.

$$\alpha(h\nu) \propto \sum P_{12} g_V(E_1) g_C(E_2), \quad (3.24)$$

Η απορρόφηση είναι αποτέλεσμα της δημιουργίας ενός ζεύγους ηλεκτρονίων οπών από το ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο για τη ζώνη διεξαγωγής που φεύγουν από μια ελεύθερη οπή στη ζώνη σθένους. Κάθε αρχική κατάσταση ηλεκτρονίων με ενέργεια  $E_1$  και κρυσταλλική ορμή  $p_1$  στη ζώνη σθένους συνδέεται με μια τελική κατάσταση στη διενέργεια ελέγχων  $E_2$  και την κρυσταλλική ορμή  $p_2$ . Δεδομένου ότι η ορμή ηλεκτρονίου διατηρείται, η δυναμική της τελικής κατάστασης είναι η ίδια με την αρχική κατάσταση,  $p_1 \approx p_2 = p$ . Η διατήρηση της ενέργειας υπαγορεύει ότι η ενέργεια του φωτονίου που απορροφάται είναι

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (3.25)$$

$$E_V - E_1 = \frac{p^2}{2m_p^*} \quad (3.26)$$

$$E_2 - E_C = \frac{p^2}{2m_n^*} \quad (3.27)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.25), (3.26), και (3.27) οι αποδόσεις είναι

$$h\nu - E_G = \frac{p^2}{2} \left( \frac{1}{m_n^*} + \frac{1}{m_p^*} \right) \quad (3.28)$$

και του συντελεστή απορρόφησης για τις άμεσες μεταβάσεις είναι

$$\alpha(h\nu) \approx A^* (h\nu - E_G)^{1/2}, \quad (3.29)$$

όπου  $A^*$  είναι μια σταθερά. Σε ορισμένα υλικά ημιαγωγών, οι κανόνες επιλογής στην κβαντική δεν επιτρέπουν τη μετάβαση σε  $p = 0$ , αλλά τους επιτρέπουν για  $p \neq 0$ . Σε αυτές τις περιπτώσεις

$$\alpha(h\nu) \approx \frac{B^*}{h\nu} (h\nu - E_G)^{3/2}, \quad (3.30)$$

όπου  $B^*$  είναι μια σταθερά.

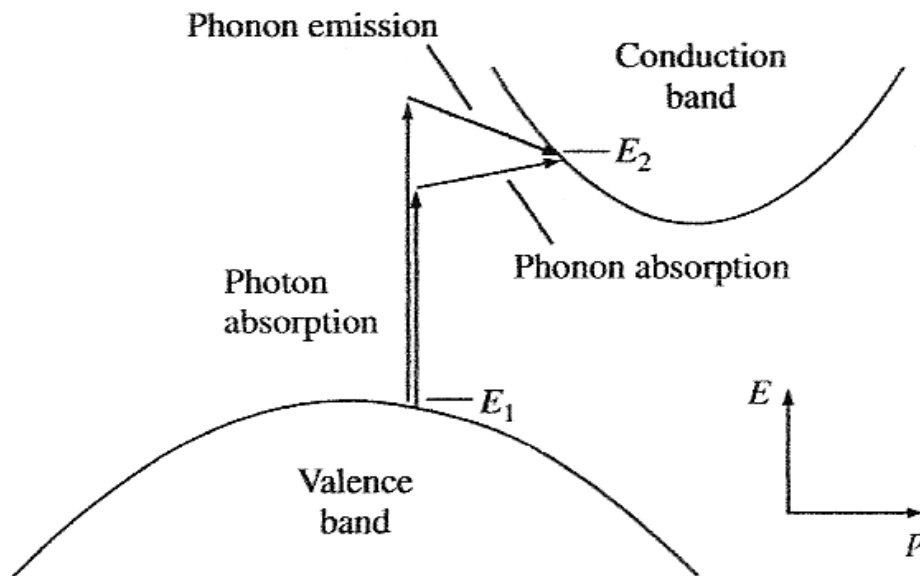
Στο πλαίσιο του ημιαγωγού χάσματος, όπως Si και Ge, όπου η μέγιστη μπάντα σθένους μεταβαίνει σε διαφορετικό ρυθμό κρυστάλλου από την ελάχιστη αγωγιμότητα, στη διατήρηση των ηλεκτρονίων με την δυναμική προϋποθέτει ότι η διαδικασία απορρόφησης φωτονίων εμπεριέχει επιπλέον σωματίδια. Τα φωτόνια και τα σωματιδίων του πλέγματος, μπορούν να ανταποκριθούν σε αυτή τη διαδικασία επειδή είναι χαμηλής ενέργειας σωματίδια με σχετικά υψηλή δυναμική. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3.7. Σημειώνετε ότι η απορρόφηση φωτός διευκολύνεται είτε με απορρόφηση ή με εκπομπή. Ο συντελεστής απορρόφησης, όταν υπάρχει, δίνεται από τον

$$\alpha_a(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_G + E_{ph})^2}{e^{E_{ph}/kT} - 1} \quad (3.31)$$

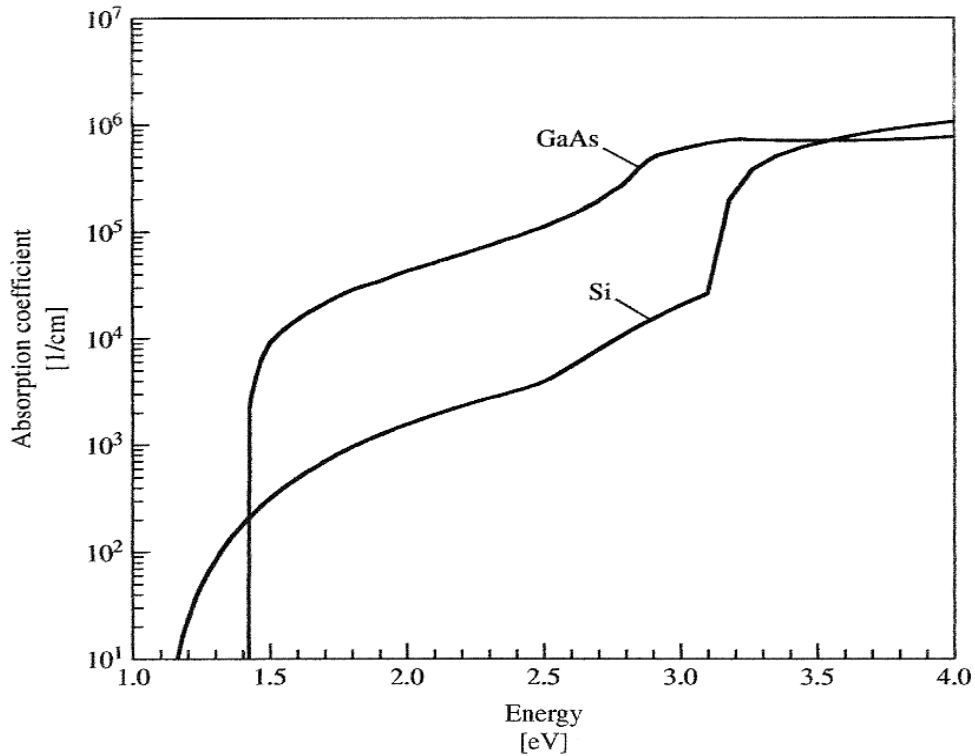
$$\alpha_e(h\nu) = \frac{A(h\nu - E_G - E_{ph})^2}{1 - e^{-E_{ph}/kT}} \quad (3.32)$$

όταν ένα φωτόνιο εκπέμπεται. Επειδή και οι δύο διαδικασίες είναι δυνατές,

$$\alpha(h\nu) = \alpha_a(h\nu) + \alpha_e(h\nu). \quad (3.33)$$



**Σχήμα 3.7** απορρόφηση φωτονίων σε χάσμα ζωνών για ένα φωτόνιο με ενέργεια  $h\nu < E_2 - E_1$  και ένα φωτόνιο με ενέργεια  $h\nu > E_2 - E_1$ . Ενέργεια και ορμή, σε κάθε περίπτωση διατηρούνται από την απορρόφηση και την εκπομπή.



**Σχήμα 3.8** Απορρόφηση του συντελεστή ως συνάρτηση της ενέργειας φωτονίων για το Si και GaAs στους 300 K. Η κενή μάντα τους είναι 1,12 και 1,4 eV, αντίστοιχα

Ο συντελεστής απορρόφησης δεν εξαρτάται μόνον από την πυκνότητα της πλήρους αρχικής θέσης των ηλεκτρονίων, αλλά και από τη διαθεσιμότητα των φωτονίων με την απαιτούμενη ώθηση. Έτσι, ο συντελεστής απορρόφησης για τις έμμεσες μεταβάσεις είναι σχετικά μικρός. Έτσι, το φως διεισδύει πιο βαθιά σε έμμεσο ημιαγωγό χάσματος ζώνης. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3.8 για το Si, ένα έμμεσο χάσμα ζωνών ημιαγωγών. Ο καθαρός συντελεστής απορρόφησης και το άθροισμα των συντελεστών απορρόφησης οφείλεται σε όλες τις απορροφήσεις των διαδικασιών.

$$\alpha(h\nu) = \sum_i \alpha_i(h\nu). \quad (3.34)$$

Στην πράξη, μετράται ο συντελεστής απορρόφησης, από την απορρόφηση αυτά χρησιμοποιούνται στην ανάλυση και μοντελοποίηση. Ο ρυθμός δημιουργίας των ηλεκτρονίων, ως συνάρτηση της θέσης τους εντός ενός ηλιακού κυττάρων είναι

$$G(x) = (1 - s) \int_{\lambda} (1 - r(\lambda)) f(\lambda) \alpha(\lambda) e^{-\alpha x} d\lambda \quad (3.35)$$

όπου  $s$  είναι ο συντελεστής πλέγματος,  $r(\lambda)$  είναι η ανάκλαση, η  $a(\lambda)$  είναι η απορρόφηση συντελεστή,  $f(\lambda)$  είναι η ροή φωτονίων, και το φως του ήλιου θεωρείται ότι είναι  $x = 0$ . Εδώ, ο συντελεστής απορρόφησης έχει υπολογιστεί από την άποψη του μήκους κύματος του φωτός μέσα από την σχέση  $h\nu = hc / \lambda$ . Η ροή φωτονίων,  $f(\lambda)$ , λαμβάνεται διαιρώντας την ισχύ σε κάθε μήκος κύματος από την ενέργεια των φωτονίων.

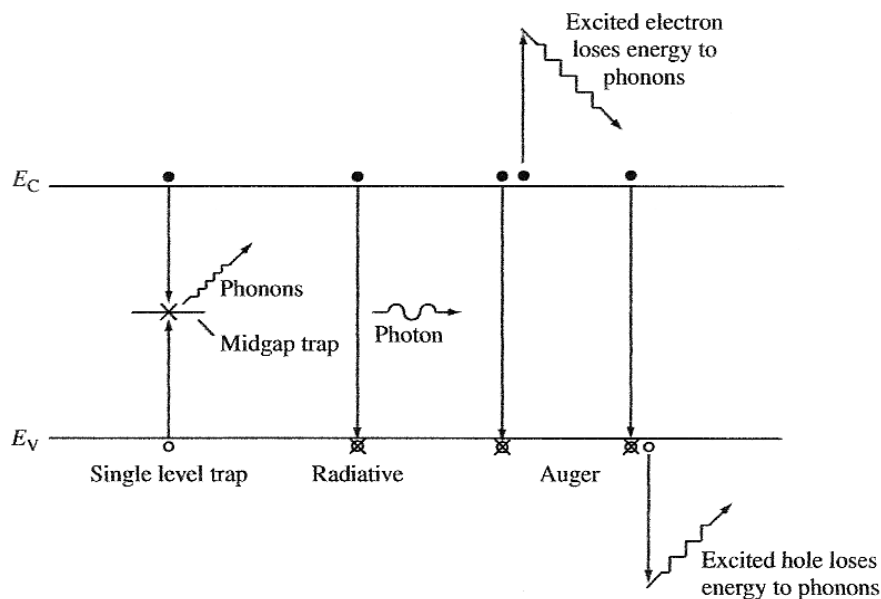
Η ελεύθερη μεταφορά απορρόφησης, στην οποία τα ηλεκτρόνια απορροφούν την ενέργεια ενός φωτονίου και προσχωρούν σε μια κενή κατάσταση σε υψηλότερη ζώνη αγωγιμότητας, είναι συνήθως μόνο σημαντική όσον αφορά τα φωτόνια με  $E < E_G$  δεδομένου ότι η απορρόφηση σε ελεύθερη μεταφορά αυξάνεται με την αύξηση του μήκους κύματος,

$$\alpha_{fc} \propto \lambda^\gamma \quad (3.36)$$

όπου  $1,5 < \gamma < 3,5$ . Έτσι, τα μονά ηλιακά κύτταρα, δεν επηρεάζουν τη δημιουργία των ηλεκτρονίων σε ζεύγη και μπορούν να αγνοηθούν.

### 3.2.6 Ανασχεδιασμός των κυττάρων

Όταν ένας ημιαγωγός έχει εξέλθει της θερμικής ισορροπίας, οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων ( $n$ ) και οπών ( $p$ ) έχουν την τάση να χαλαρώνουν προς τις τιμές ισορροπίας τους μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται ανασυνδυασμός, και κατά την οποία ένα ηλεκτρόνιο πέφτει από τη ζώνη διεξαγωγής στην ζώνη σθένους, εξαλείφοντας έτσι ένα σθένος. Υπάρχουν αρκετοί μηχανισμοί ανασυνδυασμού σημαντικοί για τη λειτουργία των ηλιακών κυττάρων - ανασυνδυασμού με παγίδες στην απαγορευμένη ζώνη. Οι τρεις αυτές διαδικασίες φαίνονται στο σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9 διεργασίες Ανασυνδυασμός σε ημιαγωγούς

Το καθαρό ποσοστό ανασυνδυασμού ανά μονάδα όγκου και ανά δευτερόλεπτο μέσω μιας και μόνο παγίδας σε επίπεδο που βρίσκεται σε ενέργεια  $E = E_T$  κατά το απαγορευμένο χάσμα, που συνήθως αναφέρεται ως Shockley-Read-Hall ανασυνδυασμού, και δίνεται από τον τύπο

$$R_{SLT} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_{SLT,n}(p + n_i e^{(E_i - E_T)/kT}) + \tau_{SLT,p}(n + n_i e^{(E_T - E_i)/kT})} \quad (3.37)$$

όπου οι ζώνες μεταφοράς δίνονται από

$$\tau_{SLT} = \frac{1}{\sigma v_{th} N_T} \quad (3.38)$$

όπου  $\sigma$  είναι η συνολική διατομή,  $v_{th}$  είναι η θερμική ταχύτητα των μεταφορέων, και  $N_T$  είναι η συγκέντρωση των παγίδων. Η συνολική διατομή μπορεί να θεωρηθεί ως το μέγεθος της και ο στόχος του παρόντα σε φόρτια που διέρχονται από το ημιαγωγόν σε  $v_{th}$  ταχύτητα και μικρές ζωές αντιστοιχούν σε υψηλά ποσοστά ανασυνδυασμού. Μερικές λογικές παραδοχές επιτρέπουν στη εξίσωση (3.37) που πρέπει να απλουστευθεί. Εάν το υλικό είναι p-τύπου, σε χαμηλή ένεση, και η ενέργεια της παγίδας είναι κοντά στην μέση από το απαγορευμένο κενό, το ποσοστό ανασυνδυασμού μπορεί να γραφτεί ως:

$$R_{\text{SLT}} \approx \frac{n - n_o}{\tau_{\text{SLT},n}}. \quad (3.39)$$

Αν η υψηλή ένταση επικρατήσει τότε οι συνθήκες ( $p \approx n \gg p_o, n_o$  δεν),

$$R_{\text{SLT}} \approx \frac{n}{\tau_{\text{SLT},p} + \tau_{\text{SLT},n}} \approx \frac{p}{\tau_{\text{SLT},p} + \tau_{\text{SLT},n}}. \quad (3.40)$$

Η ακτινοβολία σε ανασυνδυασμό είναι απλά το αντίστροφο της οπτικής διαδικασίας και είναι πολύ πιο αποδοτική σε άμεσους ημιαγωγούς χάσματος σε σχέση με τους έμμεσους ημιαγωγούς χάσματος. Όταν η ακτινοβολία ανασυνδυασμού συμβαίνει, η ενέργεια του ηλεκτρονίου δίνεται στο φωτόνιο και αυτό είναι το λείζερ των ημιαγωγών και το φως της διόδου εκπομπής φωτός που λειτουργούν. Σε μια έμμεση κατάσταση το υλικό ορισμένες φορές είναι το ίδιο με ένα φωτόνιο. Το καθαρό ποσοστό ανασυνδυασμού λόγω ακτινοβολίας δίνεται ως

$$R_\lambda = B(pn - n_i^2). \quad (3.41)$$

Αν έχουμε ένα n-τύπου ημιαγωγό σε χαμηλή εισφορά, η καθαρή ακτινοβολία σε ποσοστό ανασυνδυασμού μπορεί να γραφτεί από την άποψη μιας αποτελεσματικής ζωής,  $\tau_\lambda$ ,  $p$ ,

$$R_\lambda \approx \frac{p - p_o}{\tau_{\lambda,p}} \quad (3.42)$$

$$\tau_{\lambda,p} = \frac{1}{n_o B}. \quad (3.43)$$

Ο Auger ανασυνδυασμός είναι η αντίστροφη διαδικασία για ιονισμό όπου μια ενέργεια συγκρούεται με ηλεκτρόνια και με ένα κρυστάλλινο άτομο, σπάζοντας τη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίων. Το καθαρό ποσοστό ανασυνδυασμού λόγω Auger διεργασίας είναι

$$R_{\text{Auger}} = (\Lambda_n n + \Lambda_p p)(pn - n_i^2) \quad (3.44)$$



Σε ένα υλικό n-τύπου και σε συνθήκες χαμηλής ενέργειας το καθαρό ποσοστό ανασυνδυασμού Auger γίνεται

$$R_{\text{Auger}} \approx \frac{p - p_0}{\tau_{\text{Auger},p}} \quad (3.45)$$

με

$$\tau_{\text{Auger},p} = \frac{1}{\Lambda_n n_0^2}. \quad (3.46)$$

Κάθε μια από αυτές τις διαδικασίες ανασυνδυασμού εμφανίζεται παράλληλα και μπορεί να υπάρχουν πολλές στην απαγορευμένη ζώνη ηλεκτρονίων, έτσι το συνολικό ποσοστό ανασυνδυασμού είναι το άθροισμα των ποσοστών που οφείλονται σε κάθε διαδικασία

$$R = \left[ \sum_{\text{traps } i} R_{\text{SLT},i} \right] + R_\lambda + R_{\text{Auger}}. \quad (3.47)$$

Μια αποτελεσματική διάρκεια ζωής των μεταφορέων για ενισχυμένο υλικό δίνεται ως

$$\frac{1}{\tau} = \left[ \sum_{\text{traps } i} \frac{1}{\tau_{\text{SLT},i}} \right] + \frac{1}{\tau_\lambda} + \frac{1}{\tau_{\text{Auger}}}. \quad (3.48)$$

Οι διασυνδέσεις μεταξύ δύο ανόμοιων υλικών, όπως αυτές που συμβαίνουν στο μέτωπο επιφάνειας των ηλιακών κυττάρων, έχουν υψηλό ποσοστό συγκέντρωσης λόγω της απότομης διακοπής του κρυσταλλικού πλέγματος. Η γενική έκφραση για ανασυνδυασμός επιφάνεια

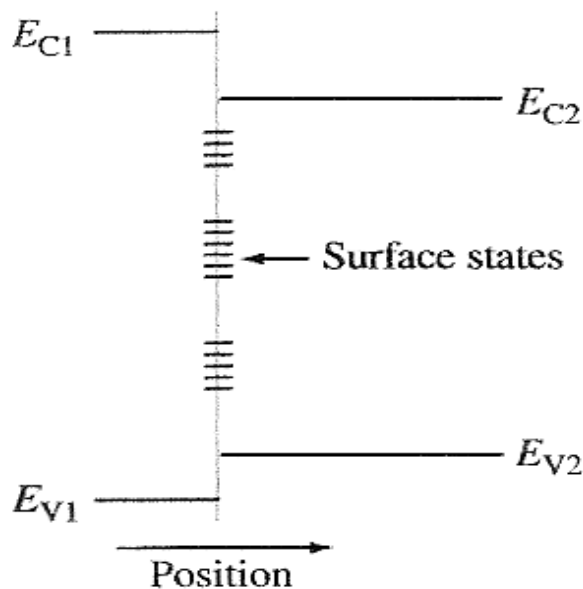
$$R_S = \int_{E_V}^{E_C} \frac{pn - n_i^2}{(p + n_i e^{(E_i - E_t)/kT})/s_n + (n + n_i e^{(E_t - E_i)/kT})/s_p} D_{\Pi}(E_t) dE_t \quad (3.49)$$

όπου  $E_t$  είναι η ενέργεια,  $\Delta(E_t)$  είναι η συγκέντρωση επιφάνειας και  $SP$  είναι ο ανασυνδυασμός επιφάνειας σε ταχύτητες, ανάλογη με τη διάρκεια της ζωής για μαζικές παγίδες.

$$R_S = S_p(p - p_o) \quad (3.50)$$

$$R_S = S_n(n - n_o) \quad (3.51)$$

σε p-τύπου υλικό.  $S_p$  και  $S_n$  είναι αποτελεσματικές ταχύτητες ανασυνδυασμού επιφάνεια. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι αυτές οι αποτελεσματικές ταχύτητες ανασυνδυασμού δεν είναι απαραίτητες σταθερές, αν και συνήθως αντιμετωπίζονται ως τέτοια.



**Σχήμα 3.10** Απεικόνιση των καταστάσεων της επιφάνειας σε μια επιφάνεια ημιαγωγών, όπως δύο διαφορετικά ή ένα μέταλλο και ενός ημιαγωγού

### 3.2.7 Μεταφορές Carrier

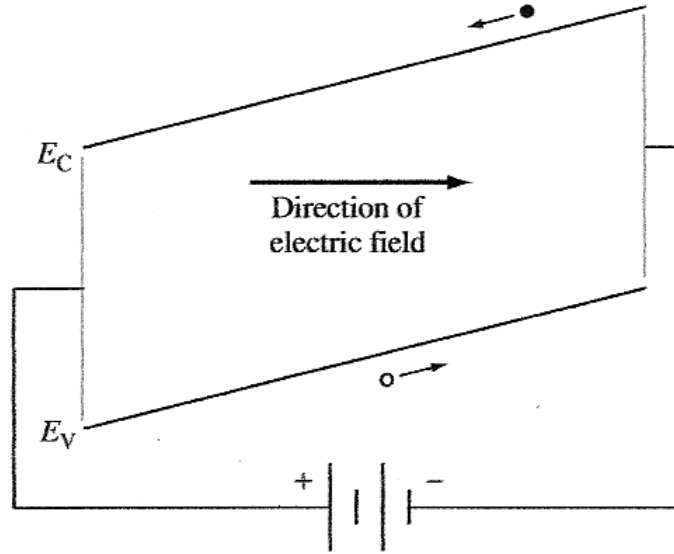
Όπως έχει ήδη διαπιστωθεί, τα ηλεκτρόνια και οι οπές σε ημιαγωγό συμπεριφέρονται σαν ένα ελεύθερο σωματίδιο του ίδιου ηλεκτρονικού φορτίου με την αποτελεσματική μάζα  $m^* n$  και  $m^* p$ , αντίστοιχα. Τα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας, είναι αρνητικά φορτισμένα, κινούνται προς την αντίθετη κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου και οι τρύπες στη ζώνη σθένους, όντας θετικά φορτισμένα, κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου πεδίου. Ωστόσο, Οι κρύσταλλοι ημιαγωγών είναι γεμάτοι από αντικείμενα με τα οποία συγκρούονται και είναι διάσπαρτα. Αυτά τα αντικείμενα περιλαμβάνουν τα άτομα του κρυστάλλου, το υλικό πρόσμιξης που είναι τα ιόντα, το κρυσταλλικό ελαττώματα, και ακόμα άλλα ηλεκτρόνια και οπές. Σε μια μικροσκοπική κλίμακα, η κίνηση τους είναι σαν μια μπάλα σε μηχανήμα pinball, αλλά γενικά κινείται προς την κατεύθυνση που προβλέπονται από το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο,  $E = -\nabla\phi$ , όπου  $\Phi$  είναι το ηλεκτροστατικό δυναμικό. Η ταχύτητα μετακίνησης είναι ευθέως ανάλογη προς το ηλεκτρικό πεδίο

$$|\vec{v}_d| = |\mu \vec{E}| = |\mu \nabla \phi| \quad (3.52)$$

όπου  $\mu$  είναι η κινητικότητα. Η κινητικότητα είναι γενικά ανεξάρτητη από το ηλεκτρικό πεδίο και εκτός του τομέα είναι πολύ ισχυρή. Η μετατόπιση του ρεύματος για τα ηλεκτρόνια μπορούν να γραφτούν ως

$$\vec{j}_p^{\text{drift}} = q p \vec{v}_{d,p} = q \mu_p p \vec{E} = -q \mu_p p \nabla \phi \quad (3.53)$$

$$\vec{j}_n^{\text{drift}} = -q n \vec{v}_{d,n} = q \mu_n n \vec{E} = -q \mu_n n \nabla \phi. \quad (3.54)$$



**Σχήμα 3.11** Απεικόνιση ενός ημιαγωγού. Σημειώστε ότι τα ηλεκτρόνια και οι οπές κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να δημιουργηθεί από την εσωτερική ενσωματωμένη στο δυναμικό της ή από εξωτερικά εφαρμοσμένη τάση

Η πιο σημαντική διασπορά των μηχανισμών σε ηλιακά κύτταρα είναι το πλέγμα και η ιονισμένη σκέδαση πρόσμειξης. Αυτές οι δραστηριότητες κινητικότητας μπορούν να αποτυπωθούν ως:

$$\mu_L = C_L T^{-3/2} \quad (3.55)$$

$$\mu_I = \frac{C_I T^{3/2}}{N_D^+ + N_A^-} \quad (3.56)$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_L} + \frac{1}{\mu_I}. \quad (3.57)$$

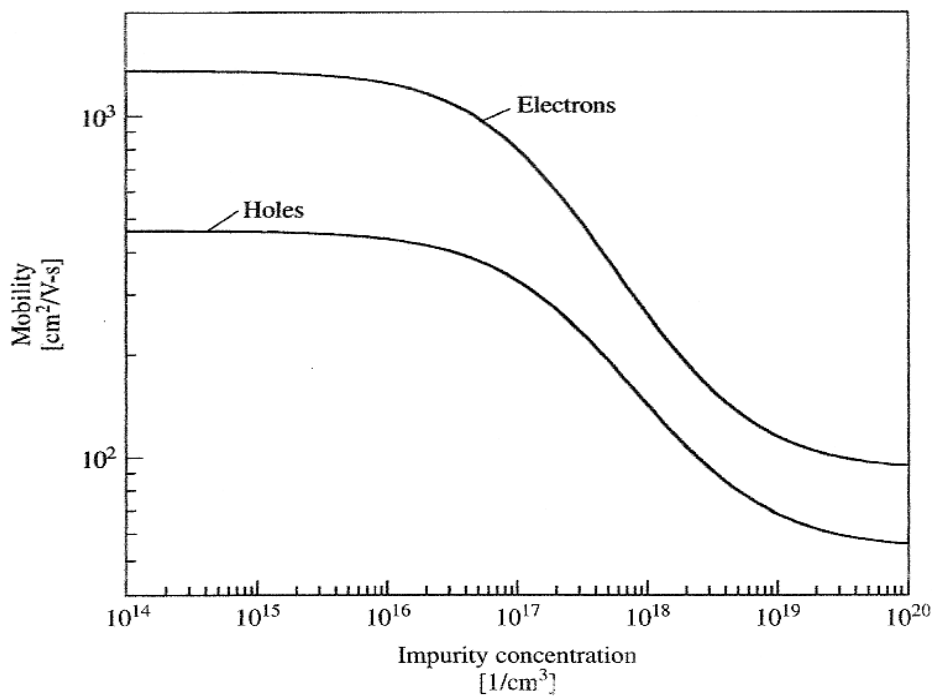
Αυτά τα δύο είδη κινητικότητας μπορούν να διακριθούν πειραματικά με τις διαφορετικές εξαρτήσεις από τη θερμοκρασία. Μια καλύτερη προσέγγιση είναι

$$\mu = \mu_L \left[ 1 + \left( \frac{\delta\mu_L}{\mu_I} \right) \left( \text{Ci} \left( \frac{\delta\mu_L}{\mu_I} \right) \cos \left( \frac{\delta\mu_L}{\mu_I} \right) + \left[ \text{Si} \left( \frac{\delta\mu_L}{\mu_I} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \sin \left( \frac{\delta\mu_L}{\mu_I} \right) \right) \right], \quad (3.58)$$

(3.58)

Η μοντελοποίηση στα ηλιακά κύτταρα, είναι πιο σίγουρη στη χρήση των δεδομένων μέτρησης ή στους εμπειρική τύπους. Οι φέροντες κινητικότητες σε Si στους 300 K είναι καλά προσεγγιστικά από τον τύπο

$$\mu_n = 92 + \frac{1268}{1 + \left( \frac{N_D^+ + N_A^-}{1.3 \times 10^{17}} \right)^{0.91}} \text{cm}^2/\text{V-s} \quad (3.59)$$



**Σχήμα 3.12** ηλεκτρονική κινητικότητα στο πυρίτιο για  $T = 300 \text{ K}$

$$\mu_n = 92 + \frac{1268}{1 + \left( \frac{N_D^+ + N_A^-}{1.3 \times 10^{17}} \right)^{0.91}} \text{cm}^2/\text{V-s} \quad (3.60)$$

Μοιάζει πολύ με τον τρόπο που φουσκώνουμε ένα μπαλόνι και κατανέμεται ομοιόμορφα μέσα στον όγκο της, οι μεταφορείς, η έλλειψη οποιασδήποτε εξωτερικής δύναμης, θα έχουν επίσης την τάση να διανέμουν ομοιόμορφα. Αυτή η διαδικασία καλείται διάδοση και τη διάχυση οι πυκνότητες ρεύματος δίνεται από

$$\vec{J}_p^{\text{drift}} = qp\vec{v}_{d,p} = q\mu_p p \vec{E} = -q\mu_p p \nabla\phi \quad (3.61)$$

$$\vec{J}_n^{\text{drift}} = -qn\vec{v}_{d,n} = q\mu_n n \vec{E} = -q\mu_n n \nabla\phi. \quad (3.62)$$

όπου  $D_p$  και  $D_n$  είναι οι συντελεστές διάχυσης οπών και ηλεκτρονίων, αντίστοιχα. Σημειώστε ότι οδηγούνται από την κλίση των πυκνοτήτων. Σε νέα κατασκευής υλικά, αυτό οδηγεί στη σχέση του Αϊνστάιν

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q} \quad (3.63)$$

και επιτρέπει τη διάχυση του συντελεστή που μπορεί να υπολογίζεται απευθείας από την κινητικότητα. Γενικευμένη μορφή της σχέσης του Αϊνστάιν, που ισχύει

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{1}{q} n \left[ \frac{dn}{dE_F} \right]^{-1} \quad (3.64)$$

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{-1}{q} p \left[ \frac{dp}{dE_F} \right]^{-1}. \quad (3.65)$$

Η συνολική ροή ηλεκτρονίων είναι το άθροισμα των παρασυρόμενων και των συστατικών διάχυσης

$$\vec{J}_p = \vec{J}_p^{\text{drift}} + \vec{J}_p^{\text{diff}} = q\mu_p p \vec{E} - qD_p \nabla p = -q\mu_p p \nabla\phi - qD_p \nabla p \quad (3.66)$$

$$\vec{J}_n = \vec{J}_n^{\text{drift}} + \vec{J}_n^{\text{diff}} = q\mu_n n \vec{E} + qD_n \nabla n = -q\mu_n n \nabla\phi + qD_n \nabla n \quad (3.67)$$

$$\vec{J} = \vec{J}_p + \vec{J}_n + \vec{J}_{\text{disp}} \quad (3.68)$$

$$\nabla \cdot \epsilon \vec{E} = q(p - n + N) \quad (3.69)$$

### 3.2.8 Εξισώσεις Semiconductor

Η λειτουργία των περισσότερων συσκευών ημιαγωγών, όπως τα ηλιακά κύτταρα, μπορεί να περιγραφεί από τη λεγόμενη εξίσωση ημιαγωγών. Μια γενικευμένη μορφή των εξισώσεων αυτών είναι.

$$\nabla \cdot \epsilon \vec{E} = q(p - n + N) \quad (3.70)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_p = q \left( G - R_p - \frac{\partial p}{\partial t} \right) \quad (3.71)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = q \left( R_n - G + \frac{\partial n}{\partial t} \right) \quad (3.72)$$

όπου  $G$  είναι η οπτική γενιά των ηλεκτρονίων. Η Θερμική παραγωγή είναι που περιλαμβάνεται στο  $R_p$  και  $R_n$ . Οι πυκνότητες ρεύματος δίνονται από

$$\vec{J}_p = -q\mu_p p \nabla(\phi - \phi_p) - kT\mu_p \nabla p \quad (3.73)$$

$$\vec{J}_n = -q\mu_n n \nabla(\phi + \phi_n) + kT\mu_n \nabla n. \quad (3.74)$$

Δύο νέους όρους,  $\phi_p$  και  $\phi_n$ , έχουν εισαχθεί εδώ ως μόνες ηλεκτρονίων.

### 3.2.9 Εξίσωση μειωσιφίας κατά Diffusion

Το χάσμα ζωνών και ηλεκτρικών διηλεκτρικήν είναι ανεξάρτητο της θέσης. Δεδομένου ότι είναι ομοιόμορφη, ο μεταφορέας κινητικότητας και της διάδοσης είναι επίσης ανεξαρτήτως από τη θέση και ενδιαφέρονται κυρίως για τη σταθερή λειτουργία της κατάστασης των ηλιακών κυψελών, οι εξισώσεις ημιαγωγών έχουν μειωθεί στο

$$\frac{d\vec{E}}{dx} = \frac{q}{\varepsilon}(p - n + N_D - N_A) \quad (3.75)$$

$$q\mu_p \frac{d}{dx}(p\vec{E}) - qD_p \frac{d^2 p}{dx^2} = q(G - R) \quad (3.76)$$

$$q\mu_n \frac{d}{dx}(n\vec{E}) + qD_n \frac{d^2 n}{dx^2} = q(R - G) \quad (3.77)$$

Και επίσης

$$R = \frac{n_P - n_{Po}}{\tau_n} = \frac{\Delta n_P}{\tau_n} \quad (3.78)$$

$$R = \frac{p_N - p_{No}}{\tau_p} = \frac{\Delta p_N}{\tau_p} \quad (3.79)$$

στην περιοχή του n-τύπου. Τα  $\Delta_{PN}$  και  $\Delta_{NP}$  είναι η υπέρβαση των συγκεντρώσεων των μεταφορέων. Οι δείκτες, P και N, χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν τις ποσότητες σε p-τύπου και n-τύπου περιοχές. Οι εξισώσεις (3.76) και (3.77) μπορούν να αποτυπωθούν ως:



$$D_p \frac{d^2 \Delta p_N}{dx^2} - \frac{\Delta p_N}{\tau_p} = -G(x) \quad (3.80)$$

$$D_n \frac{d^2 \Delta n_P}{dx^2} - \frac{\Delta n_P}{\tau_n} = -G(x) \quad (3.81)$$

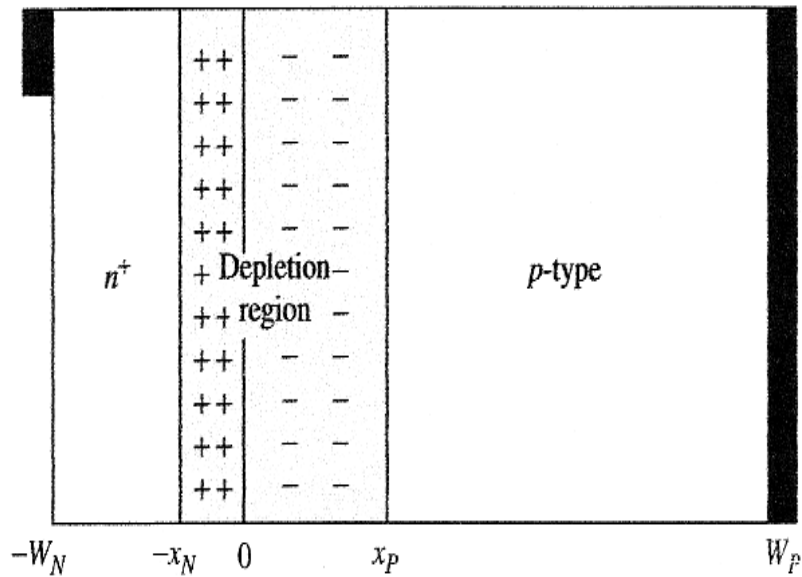
σε p-τύπου υλικό. Για παράδειγμα, η  $N_p$  είναι η συγκέντρωση ηλεκτρονίων στο p-τύπος υλικού. Η εξίσωση διάχυσης συχνά χρησιμοποιείται για να αναλύσει τη λειτουργία των ημιαγωγών, συμπεριλαμβανομένων και των ηλιακών κυττάρων.

### 3.3 Ηλεκτροστατικός κόμβος

Όταν ένας ημιαγωγός n-τύπου έρχεται σε επαφή με έναν ημιαγωγό p-τύπου, διαμορφώνεται σε θερμική ισορροπία και δεν υπάρχει καθαρή ροή ηλεκτρικού ρεύματος και, εξ ορισμού, η ενέργεια πρέπει να είναι ανεξάρτητη από τη θέση. Δεδομένου ότι υπάρχει μια διαφορά συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων μεταξύ των δύο τύπων των ημιαγωγών υπάρχουν οπές διάσπαρτες από την p-τύπου περιοχή στην περιφέρεια n-τύπου και, ομοίως τα ηλεκτρόνια από το διάχυτο υλικό n-τύπου στην περιοχή p-τύπου. Σε θερμική ισορροπία, τα ρεύματα διάχυσης και μετατόπισης των κάθε τύπο μεταφορέων είναι σε ισορροπία, οπότε δεν υπάρχει καθαρή ροή ρεύματος.

Η περιοχή μετάβασης μεταξύ του n-τύπου και των ημιαγωγών p-τύπου ονομάζεται περιοχή επιβάρυνσης. Επίσης συχνά αποκαλείται η περιοχή μείωσης, δεδομένου ότι αποτελείται από δύο οπές και τα ηλεκτρόνια. Το ηλεκτροστατικό δυναμικό της διαφορά που προκύπτει από τη δημιουργία του κόμβου καλείται ενσωματωμένη τάση VBI. Αυτή προκύπτει από το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από την έκθεση των θετικών και των αρνητικών φορτίων του χώρου στην περιοχή μείωσης. Η ηλεκτροστατική αυτή κατάσταση διέπεται από την εξίσωση Poisson για

$$\nabla^2 \phi = \frac{q}{\epsilon} (n_o - p_o + N_A^- - N_D^+) \quad (3.82)$$



**Σχήμα 3.13** Απλή ηλιακή δομή των κυττάρων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της λειτουργίας των ηλιακών κυττάρων. Η μεταφορά έχει μεταδοθεί και πέρα από τη σύνδεση ( $x = 0$ ) και την εγκατάλειψη του χώρου της επιβάρυνσης ή περιοχή μείωσης που στερείται παντελώς των τελών κινητής τηλεφωνίας.

όπου  $\phi$  είναι το ηλεκτροστατικό δυναμικό,  $q$  όπου είναι το μέγεθος του φορτίου του ηλεκτρονίου,  $\epsilon$  είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα των ημιαγωγών,  $p_0$  είναι η συγκέντρωση ισορροπίας,  $N - A$  είναι η ιονισμένη συγκέντρωση αποδέκτη, και  $N + D$  είναι η ιονισμένη συγκέντρωση. Στο Σχήμα 3.13 απεικονίζεται ένας απλός μονοδιάστατος PN-κόμβος ηλιακών κυττάρων, με τη μεταλλουργική διασταύρωση στο  $x = 0$ , που είναι ομοιόμορφα ενισχυμένη με ND σχετικά με την n-τύπου πλευρά και NA από την πλευρά της p-τύπου. Για λόγους απλούστευσης, υποτίθεται ότι κάθε πλευρά είναι ενισχυμένη και τα υλικά πρόσμιξης πλήρως ιονισμένα και μπορούν να υπολογιστούν από τους παρακάτω δυο τύπους.

$$\begin{aligned} \nabla^2 \phi &= -\frac{q}{\epsilon} N_D, \quad \text{for } -x_N < x < 0 \quad \text{and} \\ \nabla^2 \phi &= \frac{q}{\epsilon} N_A, \quad \text{for } 0 < x < x_P \end{aligned} \quad (3.83)$$

Έξω από την περιοχή μείωσης, της ουδέτερης χρέωσης γίνεται δεκτός επίσης και ο παρακάτω τύπος.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{for } x \leq -x_N \quad \text{and} \quad x \geq x_P. \quad (3.84)$$

Αυτό συνήθως αναφέρεται ως η προσέγγιση εξάντλησης. Οι περιφέρειες και στις δύο πλευρές των περιφερειών εξάντλησης είναι η σχεδόν ουδέτερες περιοχές. Η ηλεκτροστατική διαφορά δυναμικού σε όλη την διασταύρωση είναι η ενσωματωμένη τάση VBI και μπορεί να επιτευχθεί με την ενσωμάτωση του ηλεκτρικού πεδίου,  $E = -\Delta\phi$ .

$$\int_{-x_N}^{x_P} \vec{E} dx = - \int_{-x_N}^{x_P} \frac{d\phi}{dx} dx = - \int_{V(-x_N)}^{V(x_P)} d\phi = \phi(-x_N) - \phi(x_P) = V_{bi} \quad (3.85)$$

Η επίλυση των εξισώσεων (3.83) και (3.84) και ο καθορισμός  $\phi(x_P) = 0$ , δίνει

$$\phi(x) = \begin{cases} V_{bi}, & x \leq -x_N \\ V_{bi} - \frac{qN_D}{2\epsilon}(x + x_N)^2, & -x_N < x \leq 0 \\ \frac{qN_A}{2\epsilon}(x - x_P)^2, & 0 \leq x < x_P \\ 0, & x \geq x_P \end{cases} \quad (3.86)$$

Το ηλεκτροστατικό δυναμικό πρέπει να είναι συνεχές στο  $x = 0$ . Ως εκ τούτου, από την εξίσωση (3.86) θα πάρουμε,

$$V_{bi} - \frac{qN_D}{2\epsilon}x_N^2 = \frac{qN_A}{2\epsilon}x_P^2 \quad (3.87)$$

Από την ελλείπει οποιασδήποτε επιβάρυνσης διασύνδεσης στη μεταλλουργική διασταύρωση, το ηλεκτρικό πεδίο είναι συνεχές στο σημείο αυτό, και

$$x_N N_D = x_P N_A \quad (3.88)$$

Η επίλυση των εξισώσεων (3.87) και (3.88) για το πλάτος εξάντλησης δίνει

$$W_D = x_N + x_P = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_{bi}}. \quad (3.89)$$

Υπό τις αυτές τις συνθήκες, το ηλεκτροστατικό δυναμικό με διαφορά πέρα από τη σύνδεση τροποποιείται με την εφαρμογή της τάσης  $V$ , η οποία είναι μηδενική σε θερμική ισορροπία. Ως συνέπεια, το πλάτος μείωσης εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση

$$W_D(V) = x_N + x_P = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)} (V_{bi} - V). \quad (3.90)$$

Η τρύπα πυκνότητας ρεύματος δίνεται από την σχέση

$$\vec{J}_p = q\mu_p p_o \vec{E} - qD_p \nabla p = 0. \quad (3.91)$$

Έτσι, χρησιμοποιώντας τη σχέση του Αϊνστάιν, το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να γραφτεί ως

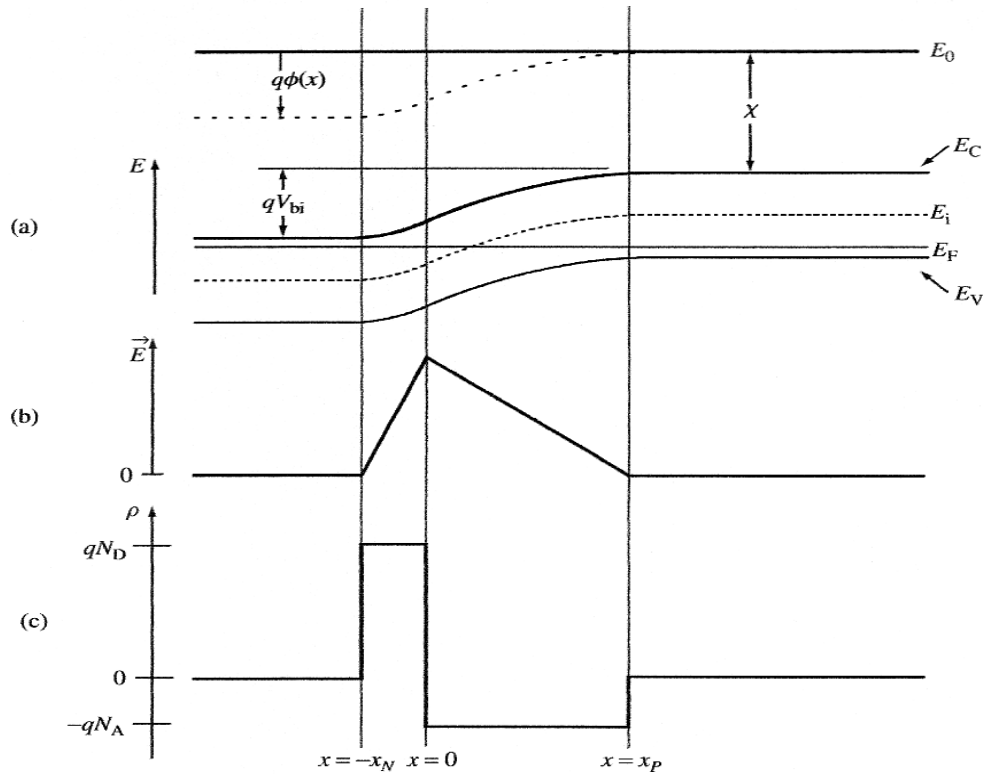
$$\vec{E} = \frac{kT}{q} \frac{1}{p_o} \frac{dp_o}{dx} \quad (3.92)$$

ή

$$V_{bi} = \int_{-x_N}^{x_P} \vec{E} dx = \int_{-x_N}^{x_P} \frac{kT}{q} \frac{1}{p_o} \frac{dp_o}{dx} dx = \frac{kT}{q} \int_{p_o(-x_N)}^{p_o(x_P)} \frac{dp_o}{p_o} = \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{p_o(x_P)}{p_o(-x_N)} \right] \quad (3.93)$$

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right]. \quad (3.94)$$

Το σχήμα 3.14 δείχνει την ενεργειακή ισορροπία, το ηλεκτρικό πεδίο, και τη πυκνότητα για μια απλή δίοδο πυριτίου  $pn$  με διασταύρωση πλησίον της περιοχής εξάντλησης.



**Σχήμα 3.14** συνθήκες ισορροπίας σε ένα ηλιακό κύτταρο: (α) ζώνες ενέργειας (β) ηλεκτρικό πεδίο και (γ) χρέωση πυκνότητας

Η βασική ηλιακή δομή των κυττάρων έχει πλέον καθοριστεί (Σχήμα 3.13). Είναι απλά μια διάοδο pn με διασταύρωση που αποτελείται από δύο σχεδόν ουδέτερες περιφέρειες και στις δύο πλευρές της περιοχή με ηλεκτρική επαφή. Συνήθως, η πιο βαριά περιοχή ονομάζεται εκπομπή (την περιοχή n-τύπου στο σχήμα 3.13) και η πιο ελαφρά περιοχή ονομάζεται η βάση (την περιοχή p-τύπου στο Σχήμα 3.13). Η περιοχή της βάσης επίσης συχνά αναφέρεται ως η περιοχή απορρόφησης από την περιοχή της εκπομπής και είναι συνήθως πολύ λεπτό και το μεγαλύτερο μέρος της απορρόφησης του φωτός εμφανίζεται στη βάση. Η βασική αυτή δομή θα χρησιμεύσει ως βάση για την εξαγωγή των θεμελιωδών χαρακτηριστικών λειτουργίας των ηλιακών κυττάρων.

### 3.4 Βασικά υπολογιστικά στοιχεία κυττάρων

Το βασικό ρεύμα τάσης είναι χαρακτηριστικό των ηλιακών κυττάρων και μπορούν να προκύψουν από την επίλυση εξίσωση διάχυσης με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες.

#### 3.4.1 Ηλιακή ενέργεια οριακών συνθηκών Cell

Στο  $x = -W_N$ , η συνήθης υπόθεση είναι ότι το μέτωπο επαφή μπορεί να θεωρηθεί ως μια ιδανική ωμική επαφή. Ως εκ τούτου,

$$\Delta p(-W_N) = 0. \quad (3.95)$$

Στην περίπτωση αυτή, η οριακή συνθήκη στο  $x = -W_N$  είναι

$$\frac{d\Delta p}{dx} = \frac{S_{F,eff}}{D_p} \Delta p(-W_N) \quad (3.96)$$

Η πίσω επαφή θα μπορούσε επίσης να θεωρηθεί ως μια ιδανική ωμική επαφή, έτσι ώστε να

$$\Delta n(W_P) = 0. \quad (3.97)$$

Η BSF κρατά μεταφορείς μειονότητας μακριά από το πίσω μέρος της ωμικής επαφής και αυξάνει τις πιθανότητές τους να συλλέγονται και να μπορούν να διαμορφωθούν με αποτελεσματικό και σχετικά χαμηλό τρόπο. Αυτή η οριακή συνθήκη στη συνέχεια γίνεται

$$\left. \frac{d\Delta n}{dx} \right|_{x=W_P} = -\frac{S_{BSF}}{D_n} \Delta n(W_P), \quad (3.98)$$

όπου  $S_{BSF}$  είναι η πραγματική ταχύτητα ανασυνδυασμού επιφάνεια στο BSF.

Υπό τις συνθήκες ισορροπίας και εφαρμοζόμενης τάσης, η ενέργεια,  $E_F$ , είναι σταθερή στη θέση. Όταν μια τάση εφαρμόζεται, είναι σκόπιμο να εισάγεται η έννοια της ενέργειας Fermi και πηγών ενέργειας. Αποδείχθηκε προηγουμένως πως η ισορροπία συγκέντρωσης του φορέα θα μπορούσε να σχετίζεται με την ενέργεια Fermi που δίνεται ως

$$p = n_i e^{(E_i - F_P)/kT} \quad (3.99)$$

$$n = n_i e^{(F_N - E_i)/kT} \quad (3.100)$$

Είναι προφανές ότι, υπό συνθήκες ισορροπία  $F_P = F_N = E_F$ , για το λόγο αυτό η εφαρμοζόμενη τάση μπορεί να γραφτεί ως εξής

$$qV = F_N(-W_N) - F_P(W_P) \quad (3.101)$$

$$qV = F_N(x) - F_P(x) \quad (3.102)$$

$$p_N(-x_N) = \frac{n_i^2}{N_D} e^{qV/kT} \quad (3.103)$$

$$n_P(x_P) = \frac{n_i^2}{N_A} e^{qV/kT} \quad (3.104)$$

### 3.4.2 Τα χαρακτηριστικά των τερματικών

Οι πυκνότητες ρεύματος στην ουδέτερη περιοχή είναι ακριβώς η διάχυση του ρεύματος, δεδομένου ότι το ηλεκτρικό πεδίο είναι αμελητέο. Χρησιμοποιώντας το ενεργό πρόσημο για το ρεύμα δίνει

$$\vec{J}_{p,N}(x) = -qD_p \frac{d\Delta p_N}{dx} \quad (3.110)$$

$$\vec{J}_{n,P}(x) = qD_n \frac{d\Delta n_P}{dx} \quad (3.111)$$

$$I = A[J_p(x) + J_n(x)] \quad (3.112)$$

και είναι παντού μέσα στο ηλιακό κύτταρο. Οι εξισώσεις (3.110) και (3.111) δίνουν μόνο την τρέχον κατάσταση στην περιοχή n-τύπου και το ρεύμα ηλεκτρονίων στην περιοχή του p-τύπου που δεν είναι, τόσο στο ίδιο σημείο. Ωστόσο, η ενσωμάτωση της εξίσωσης (3.72), στην εξίσωση συνέχειας το ηλεκτρόνιο, δίνει

$$\int_{-x_N}^{x_P} \frac{d\vec{J}_n dx}{dx} = \vec{J}_n(x_P) - \vec{J}_n(-x_N) = q \int_{-x_N}^{x_P} [R(x) - G(x)] dx \quad (3.113)$$

$$R_D = \frac{p_D n_D - n_i^2}{\tau_n(p_D + n_i) + \tau_p(n_D + n_i)} = \frac{n_D^2 - n_i^2}{(\tau_n + \tau_p)(n_D + n_i)} = \frac{n_D - n_i}{(\tau_n + \tau_p)} = \frac{n_i(e^{qV/2kT} - 1)}{\tau_D} \quad (3.114)$$

Ο όπου  $\tau_D$  είναι η πραγματική διάρκεια ζωής στην περιοχή μείωσης. Από την εξίσωση (3.113) μεταφορέας ρεύματος στο  $x = -x_N$ , μπορεί τώρα να γραφεί ως

$$\begin{aligned} \vec{J}_n(-x_N) &= \vec{J}_n(x_P) + q \int_{-x_N}^{x_P} G(x) dx - q \int_{-x_N}^{x_P} R_D dx \\ &= \vec{J}_n(x_P) + q(1-s) \int_{\lambda} [1-r(\lambda)] f(\lambda) [e^{-\alpha(W_N-x_N)} - e^{-\alpha(W_N+x_P)}] d\lambda \\ &\quad - q \frac{W_D n_i}{\tau_D} (e^{qV/2kT} - 1) \end{aligned} \quad (3.115)$$

όπου  $W_D = x_P + x_N$ . Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (3.112), το συνολικό ρεύμα είναι τώρα



$$I = A \left[ J_p(-x_N) + J_n(x_p) + J_D - q \frac{W_D n_i}{\tau_D} (e^{qV/2kT} - 1) \right] \quad (3.116)$$

$$J_D = q(1-s) \int_{\lambda} [1 - r(\lambda)] f(\lambda) (e^{-\alpha(W_N - x_N)} - e^{-\alpha(W_N + x_p)}) d\lambda \quad (3.117)$$

είναι η παραγωγή ρεύματος από την περιοχή εξάντλησης και  $A$  είναι η ζώνη των ηλιακών κυττάρων. Ο τελευταίος όρος της εξίσωσης (3.116) αντιπροσωπεύει τον ανασυνδυασμό στην περιοχή του χώρου της επιβάρυνσης. Οι λύσεις για την εξίσωση διάχυσης (3.106) και (3.107), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της πυκνότητας ρεύματος. Αυτά μπορεί να υποκαταστήσουν την εξίσωση (3.116), η οποία, με κάποιες αλγεβρικές πράξεις γίνεται:

$$I = I_{SC} - I_{o1}(e^{qV/kT} - 1) - I_{o2}(e^{qV/2kT} - 1) \quad (3.118)$$

$$I_{SC} = I_{SCN} + I_{SCD} + I_{SCP} \quad (3.119)$$

Όπου

$$I_{SCN} = qAD_p \left[ \frac{\Delta p'(-x_N)T_{p1} - S_{F,eff}\Delta p'(-W_N) + D_p \frac{d\Delta p'}{dx} \Big|_{x=-W_N}}{L_p T_{p2}} - \frac{d\Delta p'}{dx} \Big|_{x=-x_N} \right] \quad (3.120)$$

$$T_{p1} = D_p/L_p \sinh[(W_N - x_N)/L_p] + S_{F,eff} \cosh[(W_N - x_N)/L_p] \quad (3.121)$$

$$T_{p2} = D_p/L_p \cosh[(W_N - x_N)/L_p] + S_{F,eff} \sinh[(W_N - x_N)/L_p] \quad (3.122)$$

και

$$I_{SCP} = qAD_n \left[ \frac{\Delta n'(x_P)T_{n1} - S_{BSF}\Delta n'(W_P) + D_n \left. \frac{d\Delta n'}{dx} \right|_{x=W_P}}{L_n T_{n2}} + \left. \frac{d\Delta n'}{dx} \right|_{x=x_P} \right] \quad (3.123)$$

με

$$T_{n1} = D_n/L_n \sinh[(W_P - x_P)/L_n] + S_{BSF} \cosh[(W_P - x_P)/L_n] \quad (3.124)$$

$$T_{n2} = D_n/L_n \cosh[(W_P - x_P)/L_n] + S_{BSF} \sinh[(W_P - x_P)/L_n] \quad (3.125)$$

Όπου  $I_{o1}$  είναι ο κορεσμός λόγω ανασυνδυασμού της ουδέτερης περιφέρειας,

$$I_{o1} = I_{o1,p} + I_{o1,n} \quad (3.126)$$

με

$$I_{o1,p} = qA \frac{n_i^2}{N_D} \frac{D_p}{L_p} \left\{ \frac{D_p/L_p \sinh[(W_N - x_N)/L_p] + S_{F,eff} \cosh[(W_N - x_N)/L_p]}{D_p/L_p \cosh[(W_N - x_N)/L_p] + S_{F,eff} \sinh[(W_N - x_N)/L_p]} \right\} \quad (3.127)$$

και

$$I_{o1,n} = qA \frac{n_i^2}{N_A} \frac{D_n}{L_n} \times \left\{ \frac{D_n/L_n \sinh[(W_P - x_P)/L_n] + S_{BSF} \cosh[(W_P - x_P)/L_n]}{D_n/L_n \cosh[(W_P - x_P)/L_n] + S_{BSF} \sinh[(W_P - x_P)/L_n]} \right\} \quad (3.128)$$

Αυτές είναι πολύ γενικές εκφράσεις για τις περισσότερες μορφές, όταν γίνουν οι κατάλληλες παραδοχές, όπως θα δούμε αργότερα. Το  $I_{o2}$  είναι ο κορεσμός του τρέχοντος ανασυνδυασμού στην περιοχή του χώρου της επιβάρυνσης,

$$I_{o2} = qA \frac{W_D n_i}{\tau_D} \quad (3.129)$$

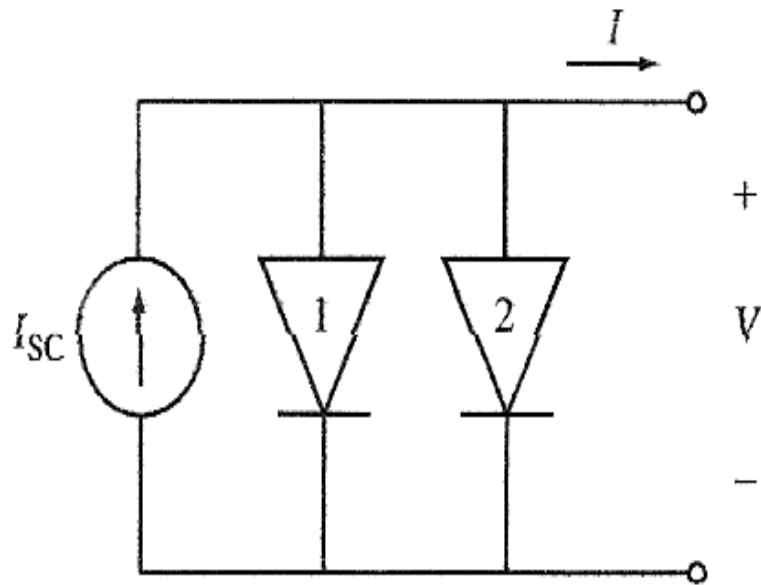
και που εξαρτώνται από το πλάτος εξάντληση,  $W_D$ , που αποτελεί συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης (εξίσωση 3.89).

### 3.4.3 Τα Χαρακτηριστικά των ηλιακών κυψελών

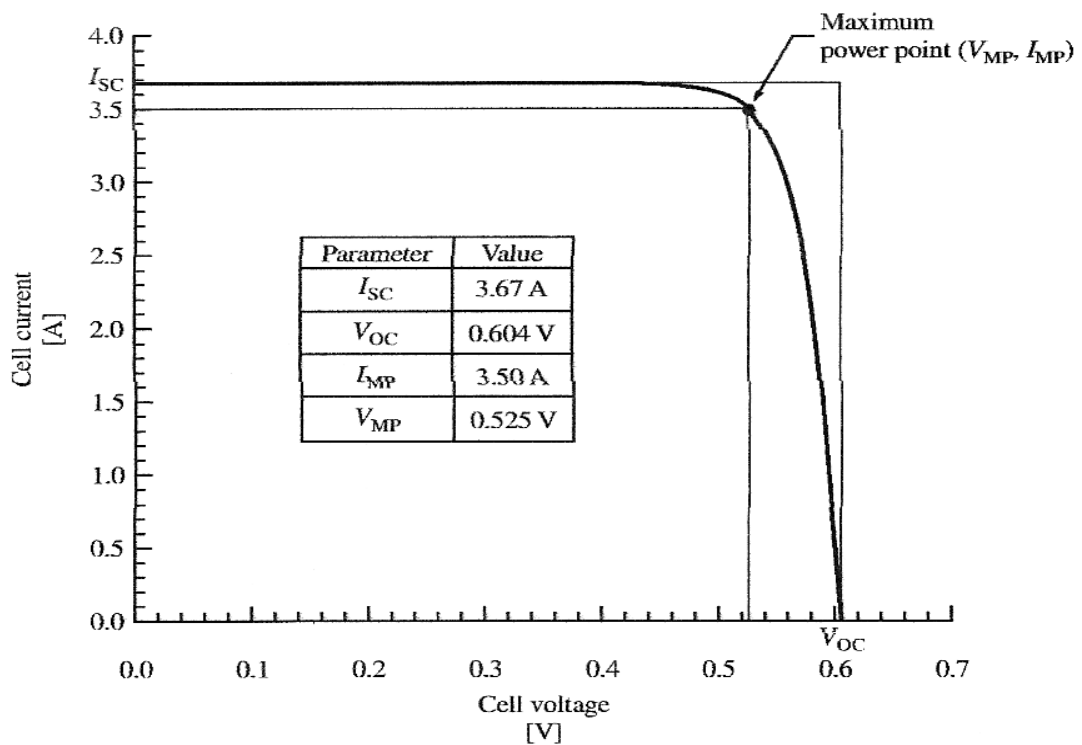
Η εξίσωση (3.118) και είναι μια γενική έκφραση για το ρεύμα που παράγεται από ηλιακό κύτταρο.

$$I = I_{SC} - I_{o1}(e^{qV/kT} - 1) - I_{o2}(e^{qV/2kT} - 1) \quad (3.130)$$

Η βραχυκύκλωση του ρεύματος και τα ρεύματα κορεσμού που έδωσε έχουν σύνθετες εκφράσεις (εξισώσεις 3,119, 3,128, 3,129 και) που εξαρτώνται από την ηλιακή δομή των κυττάρων, των υλικών και τις συνθήκες λειτουργίας. Μια πλήρης κατανόηση της ηλιακής λειτουργία κυψελών απαιτεί λεπτομερή εξέταση των όρων αυτών. Ωστόσο, μπορούμε να μάθουμε πολλά για την ηλιακή λειτουργία των κυψελών, εξετάζοντας τη βασική μορφή της εξίσωσης (3.130). Από τη σκοπιά του κυκλώματος που είναι προφανές ότι ένα ηλιακό κύτταρο μπορεί να μοντελοποιηθεί από μια ιδανική πηγή ρεύματος (ISC), παράλληλα με δύο διόδους - ένα με ένα συντελεστή ιδανικότητας του "1" και το άλλο με ιδανικότητα συντελεστή "2", όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.15. Η κατεύθυνση της τρέχουσας πηγής σε αντίθεση με την τρέχουσα ροή χρησιμεύει για το εμπρός της διόδους.



**Σχήμα 3.15** Απλό ηλιακό μοντέλο κυκλώματος κυττάρων. Η δίοδος 1 αντιπροσωπεύει την τρέχουσα ουδέτερη περιοχή, ενώ η δίοδος 2 αντιπροσωπεύει τον ανασυνδυασμό στην περιοχή μείωσης.



**Σχήμα 3.16** Τρέχουσα τάση που είναι χαρακτηριστικό του πυριτίου στα ηλιακά κύτταρα που ορίζονται στον πίνακα 3.2

Η τρέχουσα τάση (I-V) έχει χαρακτηριστικά ενός τυπικού πυριτίου με τα ηλιακά κύτταρα και σχεδιάζεται στο Σχήμα 3.16 για την παράμετρο που οι τιμές δίνονται στον πίνακα 3.2. Για λόγους απλούστευσης, το ρεύμα που οφείλεται στην περιοχή μείωσης, έχει αγνοηθεί. Αναφέρονται πολλές σημαντικές αξίες για τα ηλιακά κύτταρα όπως το ρεύμα βραχυκυκλώματος, η τάση ανοικτού κυκλώματος, και του συντελεστή πλήρωσης. Σε μικρή τάση, η δίοδος είναι αμελητέα και το ρεύμα είναι ακριβώς το ρεύμα βραχυκυκλώματος, ISC, όπως μπορεί να δει κανείς όταν το V είναι στο μηδέν στην εξίσωση (3.130). Όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι αρκετά υψηλή, γίνεται σημαντική για το ηλιακό κύτταρο.

Ο πίνακας 3.2 καταδεικνύει την τεράστια ασυμμετρία μεταξύ της εκπομπής και της p-βάσης σε ένα τυπικό ηλιακό κύτταρο. Ο πομπός είναι ~ 1.000 φορές λεπτότερο 10000 φορές πιο βαρύν και το μήκος διάδοσής τους να είναι περίπου 100 φορές μικρότερο από τις αντίστοιχες ποσότητες στη βάση. Στο ανοικτό κύκλωμα (I = 0), όλο το φως που παράγει ρεύμα, ISC, ρέει μέσα στην δίοδο 1, έτσι ώστε η τάση ανοικτού κυκλώματος να μπορεί να γραφεί ως

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{SC} + I_{o1}}{I_{o1}} \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{SC}}{I_{o1}}, \quad (3.131)$$

Όπου  $I_{SC} \gg I_{o1}$ .

**Table 3.2** Si solar cell model parameters

Parameter	Value
$A$	100 cm <sup>2</sup>
$W_N$	0.35 μm
$N_D$	$1 \times 10^{20}$ cm <sup>-3</sup>
$D_p$	1.5 cm <sup>2</sup> /V-s
$S_{F,eff}$	$3 \times 10^4$ cm/s
$\tau_p$	1 μs
$L_p$	12 μm
$W_P$	300 μm
$N_A$	$1 \times 10^{15}$ cm <sup>-3</sup>
$D_n$	35 cm <sup>2</sup> /V-s
$S_{BSF}$	100 cm/s
$\tau_n$	350 μs
$L_n$	1100 μm

Το σημείο ισχύς βρίσκεται από την επίλυση

$$\left. \frac{\partial P}{\partial V} \right|_{V=V_{MP}} = \left. \frac{\partial (IV)}{\partial V} \right|_{V=V_{MP}} = \left[ I + V \frac{\partial I}{\partial V} \right] \Big|_{V=V_{MP}} = 0 \quad (3.132)$$

για  $V = V_{MP}$  στο σημείο μέγιστης ισχύος, αυτά βρέθηκαν σύμφωνα με την εξίσωση (3.130) στο  $V = V_{MP}$ . Ο συντελεστής κάλυψης, FF, είναι ένα μέτρο του I-V και το χαρακτηριστικό είναι πάντα μικρότερο από ένα. Είναι η σχέση μεταξύ των εμβαδών στα δύο ορθογώνια παραλληλόγραμμα που φαίνονται στο Σχήμα 3.16 ή

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (3.133)$$

μια εμπειρική έκφραση για τον παράγοντα πλήρωσης

$$FF = \frac{V_{OC} - \frac{kT}{q} \ln[q V_{OC}/kT + 0.72]}{V_{OC} + kT/q} \quad (3.134)$$

Αναμφισβήτητα, το πιο σημαντικό μέγεθος που έχει σημασία για ένα ηλιακό κύτταρο είναι η μετατροπή ισχύς και η αποδοτικότητα, η οποία ορίζεται ως

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{in}} = \frac{FF V_{OC} I_{SC}}{P_{in}} \quad (3.135)$$

Ένας άλλος σημαντικός συντελεστής είναι η αποτελεσματικότητα της συλλογής, η οποία μπορεί να ορισθεί σε σχέση με οπτικό και τον ανασυνδυασμό ως μια εξωτερική αποτελεσματικότητα της συλλογής

$$\eta_C^{ext} = \frac{I_{SC}}{I_{ph}} \quad (3.136)$$

$$I_{ph} = qA \int_{\lambda < \lambda_G} f(\lambda) d\lambda \quad (3.137)$$

είναι η μέγιστη δυνατή που θα προέκυπτε αν όλα τα φωτόνια με  $E > E_G$ . Η αποδοτικότητα της απορρόφησης μπορεί επίσης να οριστεί σε σχέση με τις απώλειες ανασυνδυασμού ως τη συλλογή εσωτερικής αποδοτικότητας που είναι το φως που παράγεται ρεύμα. Αυτό αντιπροσωπεύει το σημερινό βραχυκύκλωμα που θα ήταν εάν κάθε φωτόνιο που απορροφάται συλλεγόταν. Όταν δεν υπάρχει σκίαση στο δίκτυο, δεν αντικατοπτρίζουν τις απώλειες, και το ηλιακό κύτταρο έχει άπειρο οπτικό πάχος.

iciency

$$\eta_C^{\text{int}} = \frac{I_{\text{SC}}}{I_{\text{gen}}} \quad (3.138)$$

$$I_{\text{gen}} = qA(1-s) \int_{\lambda < \lambda_G} [1-r(\lambda)]f(\lambda)(1-e^{-\alpha(W_N+W_P)}) d\lambda \quad (3.139)$$

είναι το φως που παράγει ρεύμα. Αυτό είναι το σημερινό βραχυκύκλωμα, θα ήταν από κάθε φωτόνιο που απορροφά και συλλέγει ρεύμα βραχυκύκλωσης ενώ έχω  $I_{\text{gen}} = I_{\text{inc}}$  όταν δεν υπάρχει σκίαση στο δίκτυο, δεν αντικατοπτρίζει τις απώλειες, και το ηλιακό κύτταρο έχει άπειρους οπτικούς φακούς.

### 3.4.4 Ιδιότητες των ηλιακών κυττάρων

Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία αυτά και τις ιδιότητες ενός καλού ηλιακού κυττάρου μπορεί να επιβεβαιωθεί. Από την εξίσωση, είναι σαφές ότι ένα αποδοτικό ηλιακό κύτταρο θα διαθέτει υψηλό ρεύμα βραχυκυκλώματος,  $I_{\text{SC}}$ , ένα υψηλής τάσης ανοικτού κυκλώματος, με οργανικές ενώσεις, καθώς και έναν συντελεστή κάλυψης,  $FF$ , όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο 1. Και δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$V_{\text{OC}} \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{\text{SC}}}{I_{01}} \quad (3.140)$$

που είναι λογαριθμικά ανάλογη του ρεύματος βραχυκύκλωσης και το αντίστροφο του κορεσμού ρεύματος,  $I_{01}$ , το ίδιο ισχύει και για  $I_{02}$ . Ως εκ τούτου, η μείωση του κορεσμού του ρεύματος θα αυξήσει την τάση ανοικτού κυκλώματος. Από τις εξισώσεις (3.127) και (3.128), είναι προφανές ότι  $I_{01} \rightarrow 0$  καθώς  $\tau \rightarrow \infty$  και  $S \rightarrow 0$ . Από την εξίσωση (3.134) είναι σαφές ότι η αύξηση της των πτητικών οργανικών ενώσεων θα αυξήσει τον συντελεστή πλήρωσης,  $FF$ . Έτσι, ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός αποτελεσματικού ηλιακού κυττάρου έχει δύο βασικούς στόχους:

1. Μείωση των συντελεστών ανασυνδυασμού σε ολόκληρη τη συσκευή.
2. Μεγιστοποίηση της απορρόφησης των φωτονίων με  $E > E_G$ .

Παρά την προφανή πολυπλοκότητα των εκφράσεων που περιγράφουν τη λειτουργία των ηλιακών κυψελών, οι βασικές αρχές λειτουργίας είναι εύκολο να κατανοηθούν. Τα ζεύγη που δημιουργήθηκαν μέσα στο ηλιακό κύτταρο ως αποτέλεσμα της απορρόφησης των φωτονίων για το ηλιακό κύτταρο από τον ήλιο. Ο στόχος είναι να συγκεντρωθούν οι μεταφορείς πριν χαθούν στο ανασυνδυασμού.

### 3.4.5 Διάρκεια ζωής και επιδράσεις ανασυνδυασμού επιφανείας

Τα ηλιακά χαρακτηριστικά των κυττάρων που δημιουργήθηκαν στο παρελθόν επιτρέπουν την εξέταση της εξάρτησης των ηλιακών κυψελών με επιδόσεις σε συγκεκριμένες πηγές ανασυνδυασμού. Στο σχήμα 3.17 φαίνεται πώς η βάση ζωής επηρεάζει τα VOC και τα ISC. Όταν αυτό είναι αλήθεια, η συνεισφορά του κορεσμού ρεύματος στην εξίσωση 3.128 γίνεται

$$I_{o1,n} = qA \frac{n_i^2}{N_A} \frac{D_n}{L_n} \quad (3.141)$$

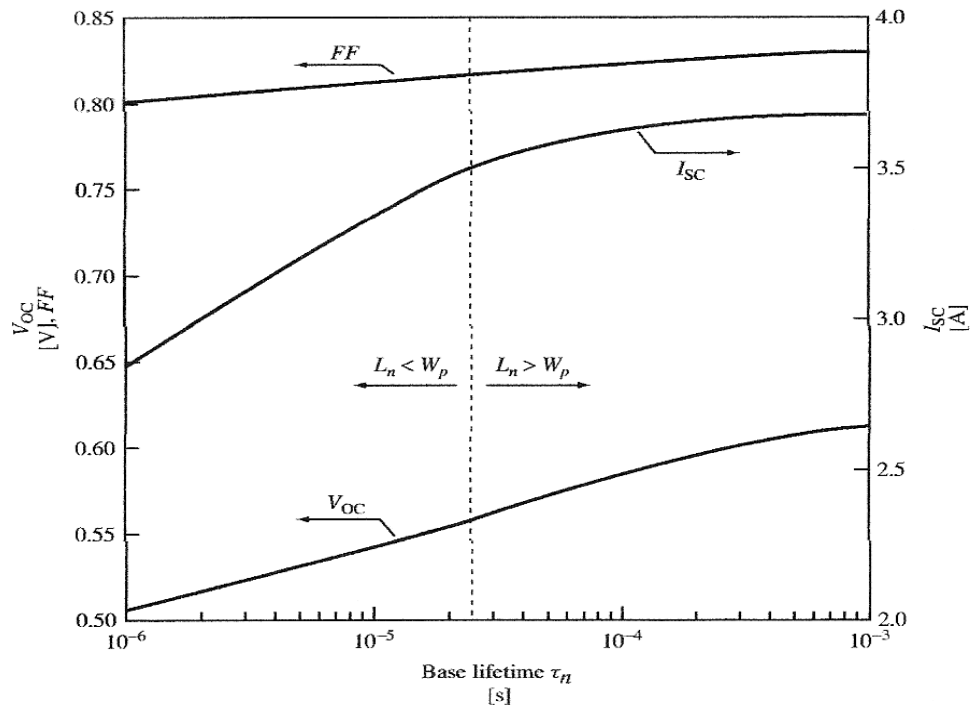
και είναι γνωστή ως η προσέγγιση μεγάλης βάσης. Στην περίπτωση αυτή, η BSF δεν έχει καμία επίδραση στο κορεσμένο ρεύμα.

$$I_{o1,n} = qA \frac{n_i^2}{N_A} \frac{D_n}{(W_P - x_P)} \frac{S_{BSF}}{S_{BSF} + D_n/(W_P - x_P)} \quad (3.142)$$

Όταν η  $S_{BSF}$  είναι πολύ μεγάλη, αυτό μειώνει την μικρή βάση προσέγγισης

$$I_{o1,n} = qA \frac{n_i^2}{N_A} \frac{D_n}{(W_P - x_P)}. \quad (3.143)$$





**Σχήμα 3.17** Επίδραση της ζωής βάσης για την ηλιακή απόδοση για το ηλιακό κελί Πίνακας 3.2. Το μήκος διάχυσης ( $L_n = \sqrt{Dn\tau_n}$ ) είναι ίσο με το πάχος βάσης (WP) όταν  $\tau_n = 25,7 \mu\text{s}$

**Table 3.3** Special cases of  $S_{F,\text{eff}}$

No grid ( $s = 0$ )	$S_{F,\text{eff}} = S_F$
Full grid ( $s = 1$ )	$S_{F,\text{eff}} \rightarrow \infty$
Dark ( $\bar{G} = 0$ )	$S_{F,\text{eff}} = \frac{S_F + sD_p/W_N}{1 - s}$
Short circuit ( $V = 0$ )	$S_{F,\text{eff}} = S_F$
V large ( $\approx V_{OC}$ )	$S_{F,\text{eff}} = \frac{S_F + sD_p/W_N}{1 - s}$

### 3.4.6 Αναλογία για την κατανόηση της Solar λειτουργία κυψελών

Η ακόλουθη αναλογία αποδεικνύει τη σημασία της ελαχιστοποίησης όλων των πηγών ανασυνδυασμού στο ηλιακό κύτταρο. Φανταστείτε μια χοάνη που έχει μια ποικιλία από τις τρύπες των διαφορετικών σχημάτων και τα μεγέθη σε αυτό. Έχει επίσης μια στρόφιγγα στο κάτω μέρος για τον έλεγχο της ροής του υγρού μέσω του

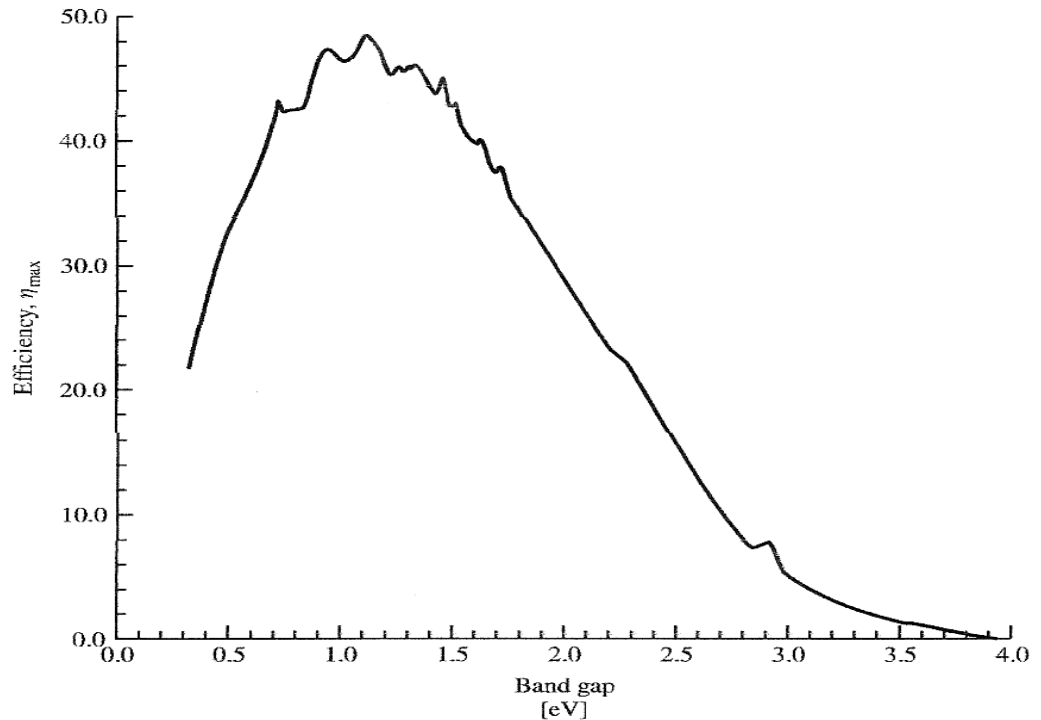
πυθμένα της χοάνης. Το νερό, που αντιπροσωπεύει το φως του ήλιου, χύνεται στην κορυφή της χοάνης. Το ύδωρ που ρέει έξω από το χωνί μέσω της στρόφιγγας αντιπροσωπεύει το ρεύμα που παραδίδεται από το ηλιακό κύτταρο. Δεδομένου ότι η χοάνη είναι γεμάτη τρύπες, ένα μέρος των υδάτων χύνεται, αντί να διαρρέει τη στρόφιγγα. Αυτή η διαρροή αντιπροσωπεύει τον ανασυνδυασμό των μεταφορών στο ηλιακό κύτταρο. Οι διαφορετικές σε σχήμα οπές αντιπροσωπεύουν διαφορετικές πηγές του ανασυνδυασμού. Για παράδειγμα, η πλατεία οπή θα μπορούσε να αντιπροσωπεύει ανασυνδυασμό της περιοχής της βάσης, με στρογγυλές οπές μπορεί και να είναι ανασυνδυασμός στην περιοχή του χώρου της επιβάρυνσης. Όταν η στρόφιγγα είναι πλήρως ανοιχτή, το νερό ρέει μέσα από τη στρόφιγγα στο μέγιστο ποσοστό της (ISC), αν και λίγο νερό θα διαρρεύσει μέσα από τις οπές, έτσι ώστε  $ISC < i_{gen}$ .

Αυτό είναι ανάλογο με την αποτελεσματικότητα της συλλογής,  $\eta_C$ , των ηλιακών κυττάρων και στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί το ύψος της διαρροής. Οι μικρότερες οπές σημαίνει λιγότερο ανασυνδυασμό και  $ISC \rightarrow i_{gen}$ . Δεδομένου ότι η στρόφιγγα είναι κλειστή, το επίπεδο του υγρού στο χωνί αυξάνεται - όπως ακριβώς η αύξηση της τάσης κυττάρων. Όταν η στρόφιγγα είναι εντελώς κλειστή, το ύψος του νερού είναι αντιπροσωπευτικό της τάσης ανοικτού κυκλώματος (VOC). Στο ανοικτού κύκλωμα όλους τους αερομεταφορείς πρέπει να ανασυνδυάζονται ακριβώς όπως όλο το νερό πρέπει να διαρρεύσει στο χωνί σε αυτή την αναλογία. Αν οι οπές είναι όλες μεγάλες, το ύψος του νερού θα είναι χαμηλό.

### 3.5.1 Αποτελεσματικότητα και το χάσμα των μπάντων

Δεδομένου ότι μόνο τα φωτόνια με  $h\nu > E_G$  μπορούν να δημιουργήσουν ζεύγη και να συμβάλουν στην παραγωγή του ηλιακού κυττάρου, είναι προφανές ότι το χάσμα ζωνών καθορίζει το πόσο καλό είναι το ηλιακό κύτταρο και συνδέεται με το ηλιακό φάσμα. Αν υποθέσουμε ότι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί από ένα φωτόνιο, π.χ. η μέγιστη δυνατή αποτελεσματικότητα μπορεί να εκφραστεί ως

$$\eta_{\max}(E_G) = \frac{\frac{1}{q} E_G I_{\text{inc}}}{P_{\text{in}}} = \frac{E_G}{(P_{\text{in}}/A)} \int_{\lambda < \lambda_G} f(\lambda) d\lambda. \quad (3.145)$$



**Σχήμα 3.19** μέγιστη Θεωρητική απόδοση ως συνάρτηση του χάσματος ημιαγωγών για μια AM1.5 παγκόσμιου φάσματος

Αυτό είναι το παγκόσμιο φάσμα και δείχνει κατ'ανώτατο όριο απόδοση του 48% σε περίπου  $EG = 1,1 \text{ eV}$ , κοντά στο χάσμα του πυριτίου. Φυσικά, αυτό είναι μόνο μια απλή εκτίμηση και υποθέτει ότι  $VOC = 1/qEG$  και  $FF = 1$ , τα οποία είναι προφανή. Σύμφωνα με τον ηλιακό φωτισμό, η πραγματική μέγιστη θεωρητική απόδοση για το πυρίτιο ηλιακών κυττάρων είναι περίπου 30%.

### 3.5.2 Η φασματική απόκριση

Η φασματική απόκριση,  $SR(\lambda)$ , των ηλιακών κυττάρων επιτρέπει την εξέταση των τρόπων στα φωτόνια με διαφορετικά μήκη κύματος (ενέργεια) που συμβάλλουν στην παραγωγή ρεύματος βραχυκύκλωσης. Ακριβώς όπως η συνολική απόδοση μπορεί να μετρηθεί είτε ως εξωτερικό ή εσωτερικό αποτέλεσμα της συλλογής. Η εξωτερική φασματική απόκριση ορίζεται ως

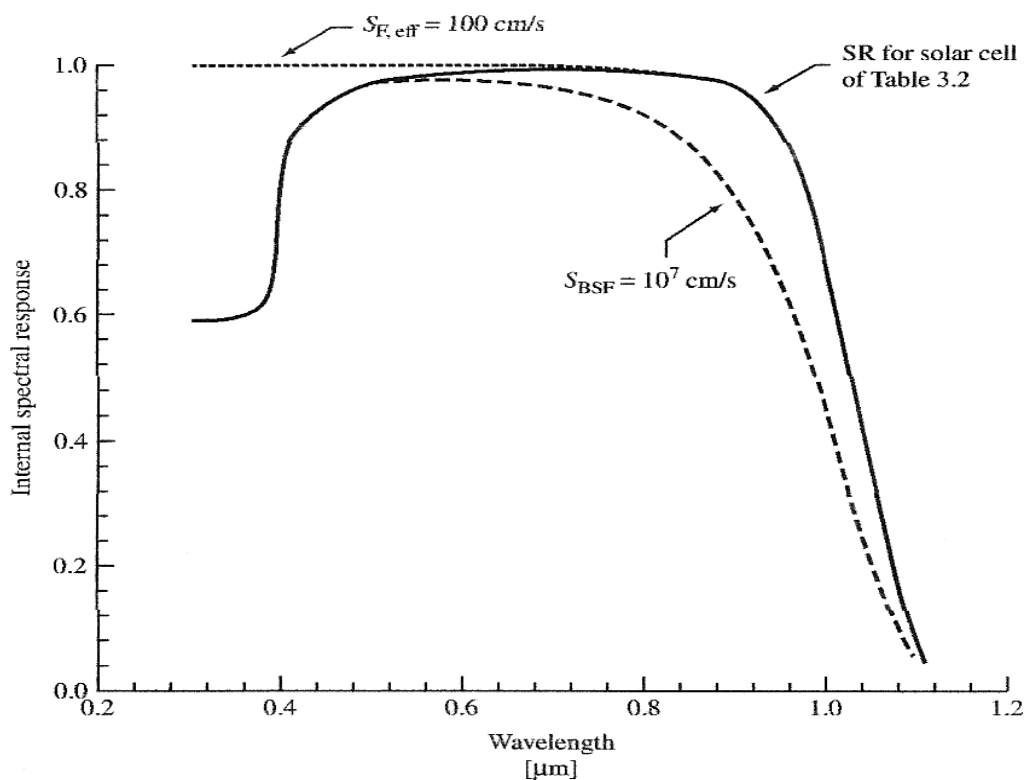
$$SR_{ext} = \frac{I_{sc}(\lambda)}{qAf(\lambda)} \quad (3.146)$$

και η εσωτερική φασματική απόκριση ως

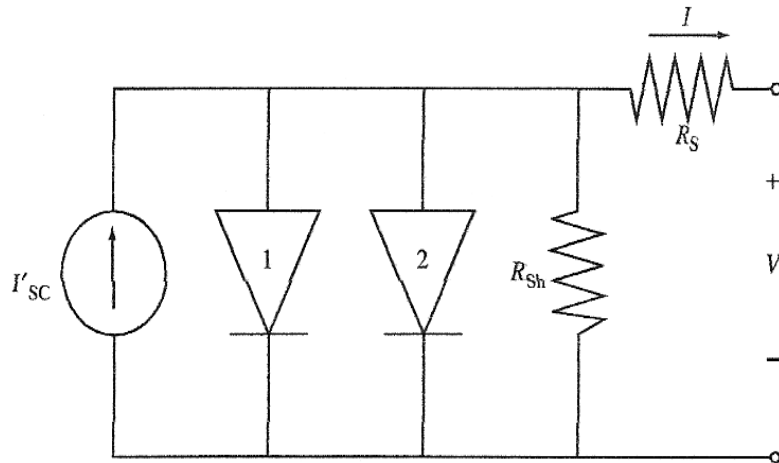
$$SR_{int} = \frac{I_{SC}(\lambda)}{qA(1-s)(1-r(\lambda))f(\lambda)(e^{-\alpha(\lambda)W_{opt}} - 1)}, \quad (3.147)$$

Το σημερινό βραχυκύκλωμα μπορεί να γραφτεί από την άποψη της εξωτερικής φασματικής απόκρισης, ως

$$I_{SC} = \int_{\lambda} SR_{ext}(\lambda) f(\lambda) d\lambda. \quad (3.148)$$



**Σχήμα 3.20** Εσωτερική φασματική απόκριση του πυριτίου στα ηλιακά κύτταρα που ορίζονται στον πίνακα 3.2



**Σχήμα 3.21** Ηλιακό κύκλωμα συμπεριλαμβανομένων των εν σειρά αντιστάσεων

δεδομένου ότι ο συντελεστής απορρόφησης είναι υψηλότερος για τα μικρού μήκους κύματα. Αντίθετα, η κατάργηση της BSF αυξάνει τις πιθανότητες ότι τα ηλεκτρόνια δημιουργούνται βαθιά μέσα στη περιφέρεια των φωτοβολταϊκών στοιχείων και θα επανασυνδυαστούν στο πίσω μέρος της επαφής και ως εκ τούτου, η μεγάλη ανταπόκριση στα μήκη κύματος είναι δραματικά μειωμένη.

### 3.5.3 παρασιτικές επιπτώσεις Αντίστασης

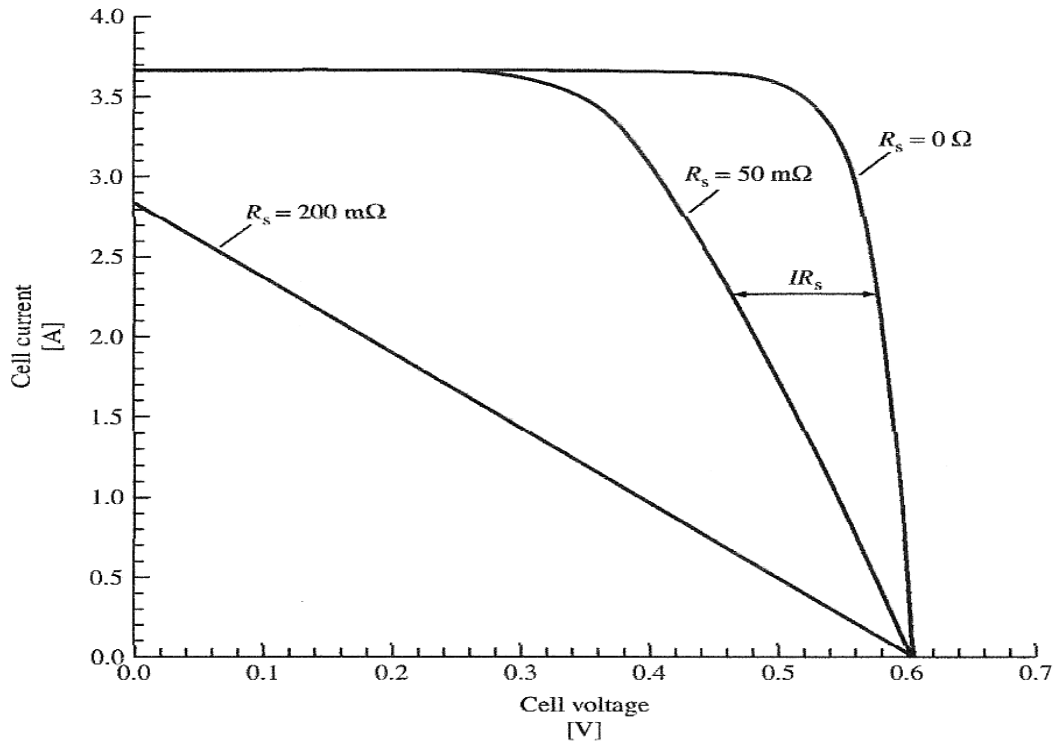
Η εξίσωση (3.130), παραμελεί την σειρά της αντίστασης που συνδέονται κατά κανόνα με πραγματικά ηλιακά κύτταρα. Η ενσωμάτωση αυτών των αντιστάσεων στο μοντέλο του κυκλώματος του σχήματος 3.15, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.21, οι αποδόσεις

$$I = I'_{SC} - I_{o1}(e^{q(V+IR_S)/kT} - 1) - I_{o2}(e^{q(V+IR_S)/2kT} - 1) - \frac{(V + IR_S)}{R_{Sh}} \quad (3.149)$$

Όπου  $I_{SC}$  είναι το ρεύμα βραχυκυκλώματος, όταν δεν υπάρχουν αντιστάσεις. Η επίδραση της σε αυτές τις αντιστάσεις για το I-V χαρακτηριστικό παρουσιάζεται στα σχήματα 3.22 και 3.23. Όπως μπορούμε επίσης να δουμε στην εξίσωση (3.149), η αντίσταση  $R_{Sh}$ , δεν έχει καμία επίδραση στην τρέχουσα, αλλά μειώνει την τάση ανοικτού κυκλώματος. Συχνά είναι καλύτερα να ξαναγράψουμε την εξίσωση (3.149), όπως

$$I = I'_{SC} - I_o(e^{q(V+IR_s)/A_o kT} - 1) - \frac{(V + IR_s)}{R_{Sh}} \quad (3.150)$$

όπου  $A_o$  είναι η δίοδος ιδανικότητας, συνήθως, έχει μια τιμή μεταξύ 1 και 2, με  $A_o \approx 1$  για δίοδο που κυριαρχείται από ανασυνδυασμό της ουδέτερης περιφέρειας και  $A_o \rightarrow 2$  όταν ο ανασυνδυασμός μειωθεί.



**Σχήμα 3.22** Επίδραση της αντίστασης σειράς για την τρέχουσα τάση που χαρακτηρίζουν μια ηλιακή κυψέλη ( $R_{Sh} \rightarrow \infty$ )

Σε βραχυκύκλωμα η εξίσωση (3.150) γίνεται

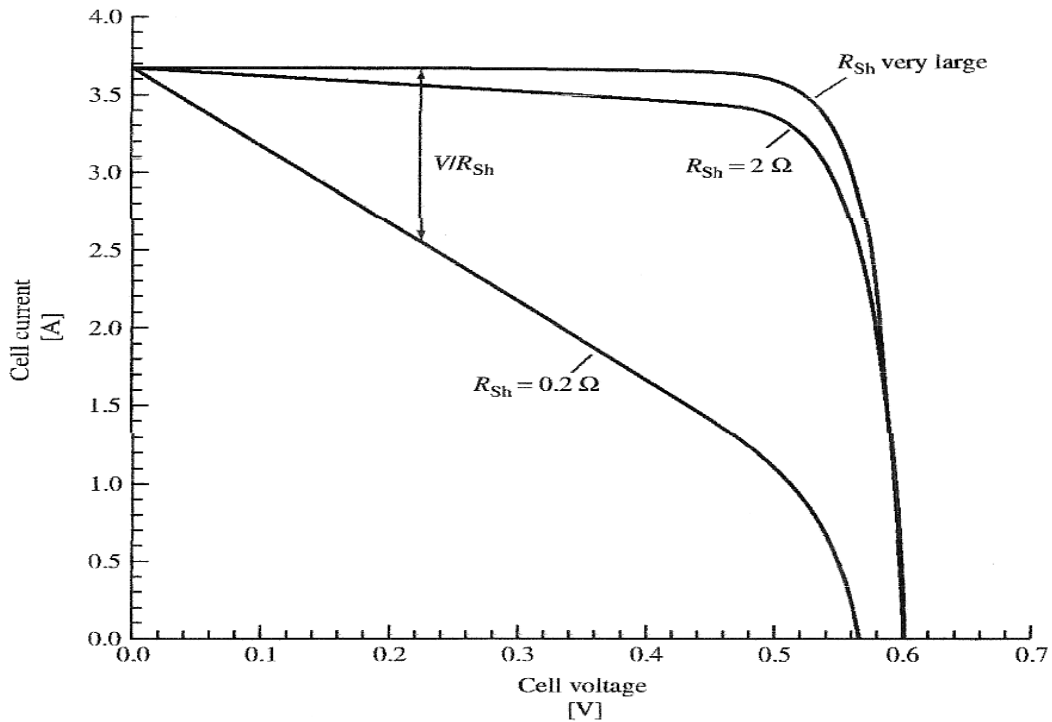
$$I_{SC} = I'_{SC} - I_o(e^{qI_{SC}R_s/A_o kT} - 1) - I_{SC}R_s/R_{Sh} \quad (3.151)$$

και σε ανοικτό κύκλωμα, καθίσταται

$$0 = I'_{SC} - I_o(e^{qV_{OC}/A_o kT} - 1) - V_{OC}/R_{Sh} \quad (3.152)$$

Όταν η σύνδεση παρίσταται γραφικώς συναρτήσει του  $V_{oc}$ , υπάρχει ένα καθεστώς όπου δεν υπάρχουν σε σειρά αντιστάσεις που είναι σημαντικές, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.24. Στο καθεστώς, όπου μόνο η αντίσταση σειράς είναι σημαντική, οι εξισώσεις (3.151) και (3.152) μπορούν να συνδυαστούν ως εξής

$$I_{sc}R_s = \frac{A_o k T}{q} \ln \left[ \frac{I_o e^{qV_{oc}/A_o k T} - I_{sc}}{I_o} \right] \quad (3.153)$$



**Σχήμα 3.23** Επίδραση της αντίστασης στις τρέχουσες τάσεις που είναι βασικό χαρακτηριστικό των ηλιακών κυψελών ( $R_s = 0$ )

Ομοίως, μόνο η  $R_{sh}$  είναι σημαντική για τις εξισώσεις (3.151) και (3.152) και μπορούν να συνδυάζονται για να δώσουν τον παρακάτω τύπο.

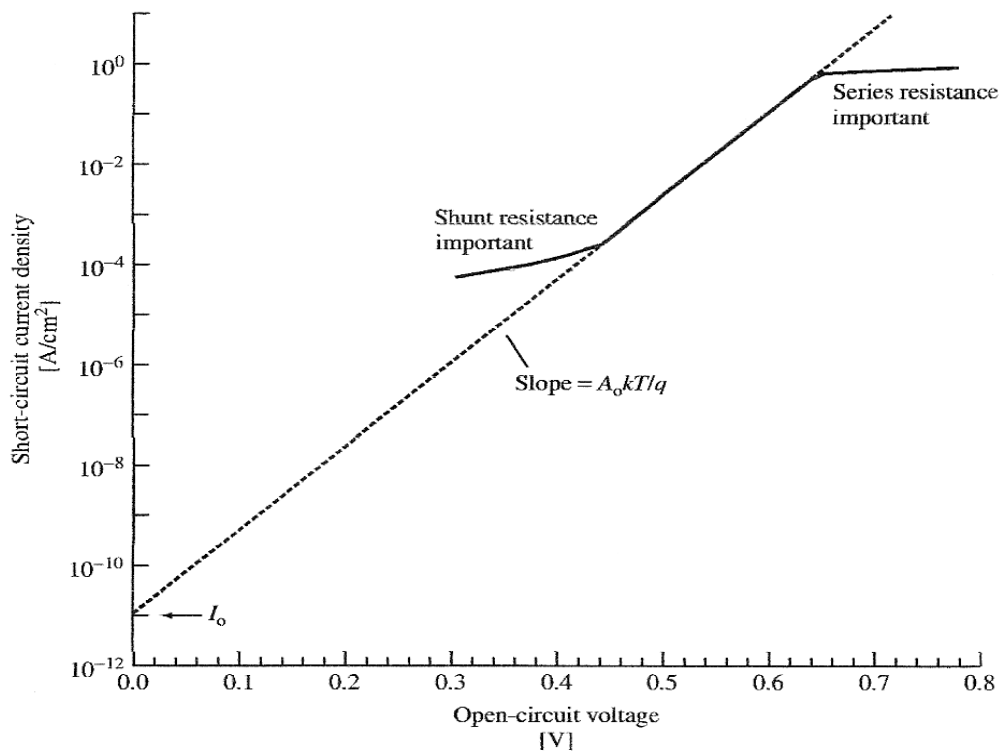
$$\frac{V_{oc}}{R_{sh}} = I_{sc} - I_o e^{qV_{oc}/A_o k T} \quad (3.154)$$

### 3.5.4 Επίδραση της θερμοκρασίας

Από εξισώσεις (3.127), (3.128) και (3.129), είναι προφανές ότι

$$I_{o1,n}, I_{o1,p} \propto n_i^2 \quad (3.155)$$

$$I_{o2} \propto n_i. \quad (3.156)$$



**Σχήμα 3.24** Ρεύμα βραχυκύκλωσης έναντι ανοικτού κυκλώματος τάσης που επεξηγεί την εξαγωγή των παραμέτρων



Η εγγενής συγκέντρωση μεταφοράς δίνεται από την εξίσωση (3.18), η οποία σε συνδυασμό με τις εξισώσεις (3.13) και (3.14), έχουν αποδόσεις

$$n_i = 2(m_n^* m_p^*)^{3/4} \left( \frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-E_G/2kT}. \quad (3.157)$$

Οι αποτελεσματικές μάζες γενικά θεωρούνται ότι είναι αδύναμες σε λειτουργίες μέσης θερμοκρασίας. Η μπάνα του χάσματος μειώνεται με τη θερμοκρασία και η θερμοκρασία εξάρτησης είναι καλά μοντελοποιημένη

$$E_G(T) = E_G(0) - \frac{aT^2}{T + \beta}. \quad (3.158)$$

όπου  $a$  και  $\beta$  είναι σταθερές ειδικές για κάθε ημιαγωγό. Είναι σαφές ότι, όπως η θερμοκρασία αυξάνει, με σταθερό ρυθμό  $n_i$  αύξησης, και έτσι αυξάνει ο ανασυνδυασμός με την απόδοση των κυττάρων να έχει υποστεί μείωση.

$$I_{SC} \approx I_{01} e^{qV_{OC}/kT} \approx BT^\zeta e^{-E_G(0)/kT} e^{qV_{OC}/kT} \quad (3.159)$$

Το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι σχετικά ανεπηρέαστο από τη θερμοκρασία του υπό συνθήκες συνθήκες λειτουργίας, τόσο με τη διαφοροποίηση σε σχέση με την  $T$ , η θερμοκρασιακή εξάρτηση της τάσης ανοικτού κυκλώματος μπορεί να εκφραστεί ως

$$\frac{dV_{OC}}{dT} = -\frac{\frac{1}{q} E_G(0) - V_{OC} + \zeta \frac{kT}{q}}{T} \quad (3.160)$$

η οποία για το πυρίτιο σε 300 K αντιστοιχεί σε περίπου 2,3 mV / °C. Η εξίσωση (3.159) μπορεί να μεταταθεί χρονικά ως εξής:

$$V_{OC}(T) = \frac{1}{q} E_G(0) - \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{BT^\zeta}{I_{SC}} \right). \quad (3.161)$$

### 3.5.5 Συμπυκνωτής ηλιακών κυψελών

Τα λειτουργικά ηλιακά κύτταρα υπό συγκεντρωμένο φωτισμό προσφέρουν δύο βασικά πλεονεκτήματα.

- Η πρώτη είναι ότι αφού είναι λιγότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία που απαιτούνται για τη συλλογή το φως του ήλιου που πέφτουν πάνω σε συγκεκριμένη περιοχή, το κόστος κατασκευής τους μπορεί να είναι ανώτερο από εκείνη για τα κύτταρα έχουν σχεδιαστεί για φωτισμό, και είναι ως εκ τούτου πιθανώς υψηλότερη η ποιότητα απόδοσης.
- Η δεύτερη είναι ότι η λειτουργία βάσει του συμπυκνωμένου φωτισμό προσφέρει ένα πλεονέκτημα αποδοτικότητας στο ηλιακό κύτταρο. Αν το φως του ήλιου είναι συγκεντρωμένο με συντελεστή  $X$ .

$$I_{SC}^{Xsuns} = X I_{SC}^{1sun}. \quad (3.162)$$

όπου  $X \gg 100$

$$\eta = \frac{FF^{Xsuns} V_{OC}^{Xsuns} I_{SC}^{Xsuns}}{P_{in}^{Xsuns}} = \frac{FF^{Xsuns} V_{OC}^{Xsuns} X I_{SC}^{1sun}}{X P_{in}^{1sun}} = \frac{FF^{Xsuns} V_{OC}^{Xsuns} I_{SC}^{1sun}}{P_{in}^{1sun}} \quad (3.163)$$

Από την εξίσωση (3.131) έχουμε,

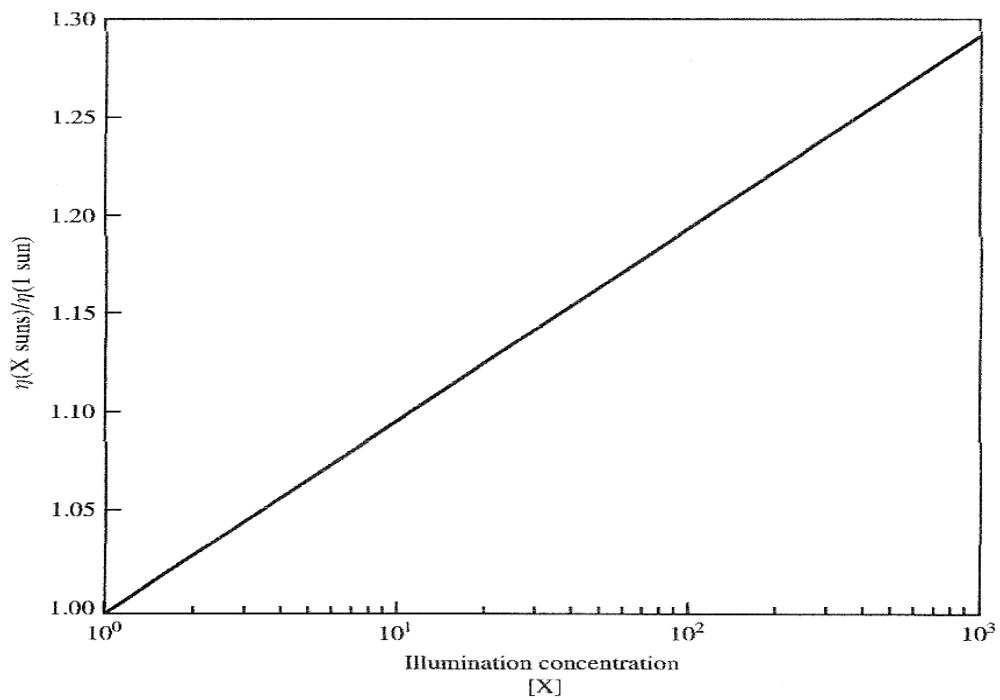
$$V_{OC}^{Xsuns} = V_{OC}^{1sun} + \frac{kT}{q} \ln X. \quad (3.164)$$

Το  $FF$  είναι συνάρτηση της  $V_{OC}$  (εξίσωση 3.134), οπότε

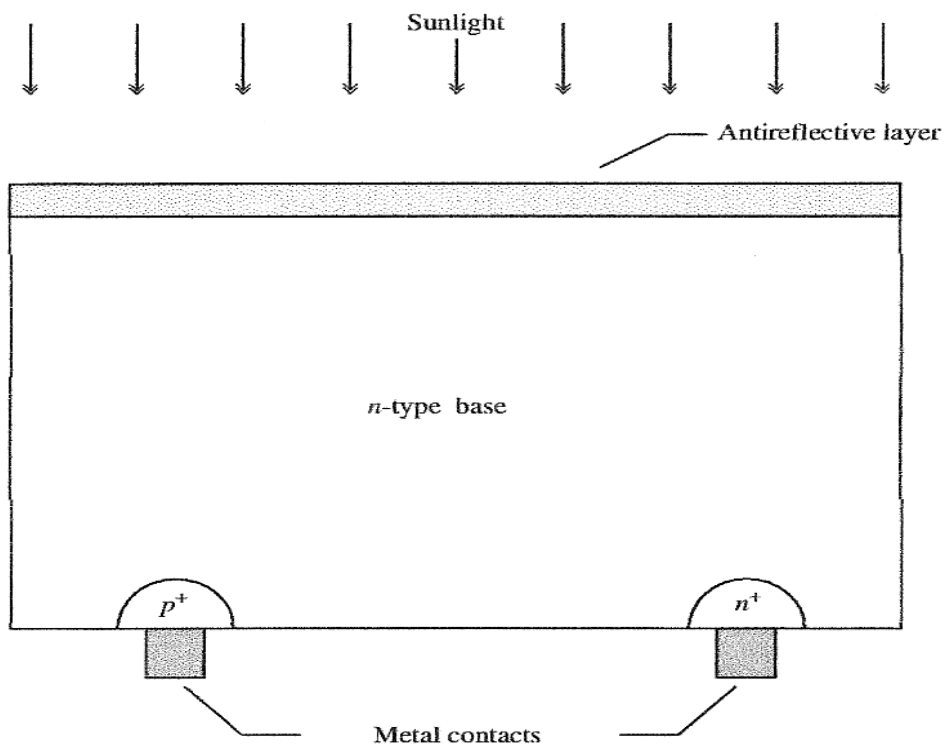
$$\eta^{Xsuns} = \eta^{1sun} \left( \frac{FF^{Xsuns}}{FF^{1sun}} \right) \left( 1 + \frac{\frac{kT}{q} \ln X}{V_{OC}^{1sun}} \right). \quad (3.165)$$

Και οι δύο παράγοντες, με πολλαπλασιασμό του 1,015 δίνουν αύξηση αποτελεσματικότητας, όπως η συγκέντρωση στον φωτισμό. Ως εκ τούτου, η αποδοτικότητα των κυττάρων συγκέντρωσης αυξάνεται καθώς η ένταση του φωτισμού αυξάνει, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.25.

### 3.5.6 Υψηλού επιπέδου Injection



Σχήμα 3.25 Η σχετική αποδοτικότητα ως συνάρτηση της συγκέντρωσης φωτισμού



Σχήμα 3.26 Σχηματική επαφής ηλιακών κυττάρων

Επιστρέφοντας στις εξισώσεις (3.76) και (3.77), μπορεί να θεωρηθεί ότι το υψηλό επίπεδο της έντασης, και το ηλεκτρικό πεδίο μπορούν να εξαλείφουν, συμφωνά με την εξίσωση διάχυσης

$$D_a \frac{d^2 p}{dx^2} - \frac{p}{\tau_n + \tau_p} = -G(x), \quad (3.166)$$

όταν ο συντελεστής διάχυσης δίνεται από τον

$$D_a = \frac{2D_n D_p}{D_n + D_p}. \quad (3.167)$$

Και το μήκος διάχυσης από

$$L_a \approx \sqrt{3}L_p \approx L_n. \quad (3.168)$$

Σε ανοικτό κύκλωμα για τον τύπο (3.166) όταν η παράγωγος γίνει μηδέν έχουμε

$$V_{OC} = \frac{2kT}{q} \ln \left[ \frac{G(\tau_n + \tau_p)}{n_i} \right]. \quad (3.169)$$

Και όταν το  $p=0$  τότε

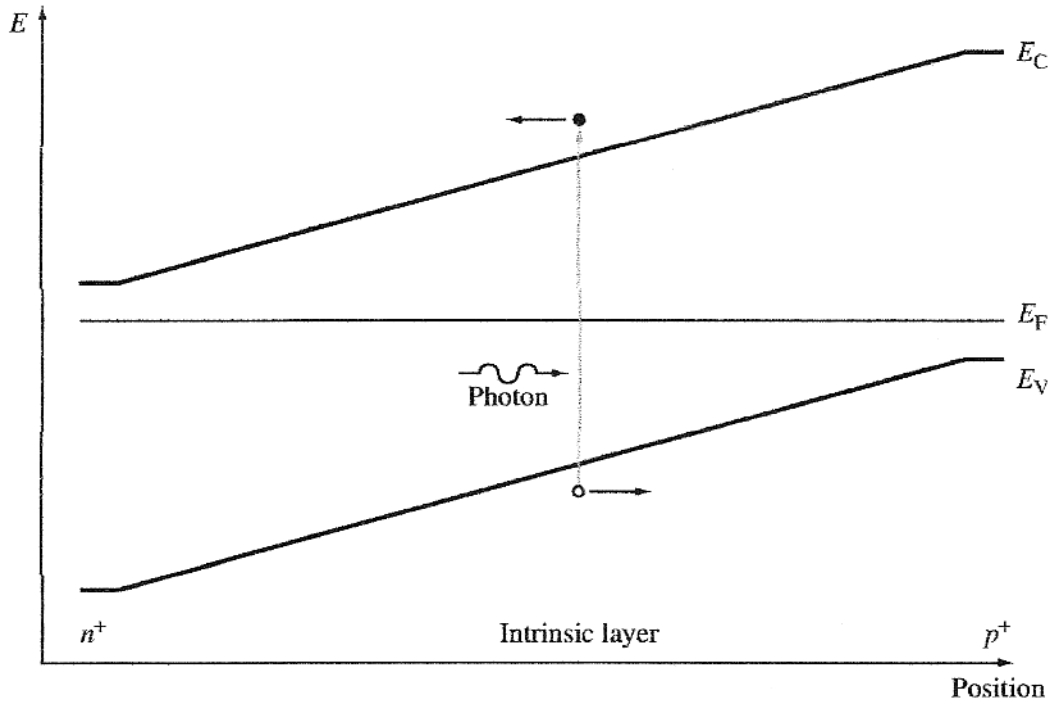
$$I_{SC} = qAL_a G \sinh(W_B/L_a) \quad (3.170)$$

η οποία, όταν η  $L_a \gg W_B$ , καθίσταται

$$I_{SC} = qAW_B G. \quad (3.171)$$

Η πιο σημαντική τροποποίηση είναι η εξίσωση (3.129) όπου το πλάτος εξάντλησης τώρα γράφεται ως

$$W_D = \chi_N + W_I + \chi_P \quad (3.172)$$



**Σχήμα 3.27** Διάγραμμα μιας ηλιακής κυψέλης αποτυπωμένη σε τομέα με ενισχυμένη συλλογή

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέχρι το πρόσφατο παρελθόν, η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας στηριζόταν κατά κόρον σε συμβατικές μεθόδους με χρήση πρώτων υλών όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας και ο λιγνίτης. Όμως η δραματική μείωση των παγκόσμιων αποθεμάτων πετρελαίου καθώς και η επιβάρυνση του φυσικού περιβάλλοντος από τα «παραπροϊόντα» των συμβατικών τρόπων παραγωγής, οδήγησαν την επιστημονική κοινότητα στην ανάπτυξη και βελτίωση εναλλακτικών μεθόδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με την αιολική και την ηλιακή να συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονη ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα των μικρών Φ/Β μονάδων διασπαρμένης παραγωγής οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο χαμηλής τάσης των αστικών περιοχών. Όμως η αποδοχή της Φ/Β τεχνολογίας από το ευρύ αγοραστικό κοινό προϋποθέτει ότι τα εμπορικά προϊόντα θα εξασφαλίζουν στον ιδιώτη παραγωγό – καταναλωτή ασφάλεια, μεγάλο βαθμό απόδοσης, μικρό κόστος αγοράς και συντήρησης της εγκατάστασης καθώς επίσης και όσο το δυνατόν συντομότερο διάστημα απόσβεσης της επένδυσης.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως στόχο της για το 2020 το 20% της κατανάλωσης ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Ως προς την ηλιοθερμική ενέργεια η Ελλάδα ήταν πρωτοπόρος χώρα στην Ευρώπη τις τελευταίες δεκαετίες με περίπου ένα εκατομμύριο εγκατεστημένους ηλιακούς θερμοσίφωνες, που συμβάλουν σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην προστασία του περιβάλλοντος, αξιοποιώντας το ανεξάντλητο ηλιακό δυναμικό. Τώρα μένει να γίνει το ίδιο και ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι προϋποθέσεις μάλιστα για τα Φωτοβολταϊκά Συστήματα είναι ακόμα καλύτερες, αφού τα Φ/Β συστήματα παρουσιάζουν την μέγιστη παραγωγή ακριβώς εκείνες τις ώρες της ημέρας που και η κατανάλωση (ζήτηση) φτάνει στο μέγιστο και η ΔΕΗ ζητά από όλους τους καταναλωτές να περιορίσουν την ζήτηση ή αναγκάζεται να κάνει περικοπές (ελεγχόμενη συσκότιση).

Τα κίνητρα αυτά έχουν ήδη δείξει τα πρώτα αποτελέσματα, και πλέον βλέπουμε τη δημιουργία φωτοβολταϊκών πάρκων σε πολλές περιοχές της χώρας, και την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε καινούργια ή και παλιότερα σπίτια. Με την τρέχουσα νομοθεσία η Ελληνική πολιτεία στοχεύει στην δημιουργία μεγάλων ως πολύ μεγάλων φωτοβολταϊκών πάρκων, σε αντίθεση με άλλες χώρες, που όπως η Γερμανία στοχεύουν στην ανάπτυξη πολλών μικρών συστημάτων.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- 1) **Steven S. Hegedus<sup>1</sup> and Antonio Luque<sup>2</sup>**, ‘Status, Trends, Challenges and the Bright Future of Solar Electricity from Photovoltaics’, 1Institute of Energy Conversion, University of Delaware, Newark, Delaware, USA, 2Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, Spain
- 2) **Ι. Κομπούγιας, Α. Κυρίτσης, Α. Νανάκος, Ε. Τατάκης**, ‘Σύγχρονες εξελίξεις σε φωτοβολταϊκά συστήματα για διασπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας’ (2008)
- 3) **Γιώργος Μανιάτης, Svetoslav Danchev**, ‘Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα’, Ίδρυμα Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών (2009)
- 4) **Νικολαΐδου Νίκη**, ‘Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας’ (2008)
- 5) <http://el.wikipedia.org>
- 6) <http://www.e-steki.gr>
- 7) <http://selasenergy.blogspot.com>
- 8) [www.martifersolar.com](http://www.martifersolar.com)
- 9) [www.φωτοβολταϊκα.com/](http://www.φωτοβολταϊκα.com/)
- 10) [www.solar-systems.gr](http://www.solar-systems.gr)