



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΤΙΤΛΟΣ: <<ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ (PV) ΙΣΧΥΟΣ>>**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΟΙΤΗΤΗ: ΠΑΠΑΣΤΕΦΑΝΟΥ ΦΑΝΗ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ: ΗΝ07926

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΣ: ΚΟΛΛΑΤΟΥ ΘΕΟΦΑΝΩ

ΚΟΖΑΝΗ , ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2022

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
1. Εισαγωγή.....	5
1.1. Ιστορική αναδρομή.....	6
1.2. Χρήσεις και γρήγορη ανάπτυξη.....	7
1.3. Βασικά στοιχεία.....	9
2. Ιδιότητες φωτοβολταϊκού κυκλώματος.....	11
3. Εφαρμογές και συστήματα.....	17
3.1. Αυτόνομες εφαρμογές.....	17
3.2. Συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο.....	19
3.3. Ισορροπία στοιχείων συστήματος (BoS).....	23
4. Μεγιστοποίηση της απόδοσης κυψέλης (κύτταρα Si).....	26
4.1. Περιοχή απόφραξης ηλεκτρικής επαφής άνω επιφάνειας (εσωτερική απώλεια ~3%) .....	28
4.2. Οπτικές απώλειες, πάνω και πίσω επιφάνειες.....	29
4.3. Ενέργεια φωτονίων μικρότερη από το χάσμα ζώνης (απώλεια ~23%).....	32
4.4. Υπερβολική ενέργεια φωτονίων (απώλεια ~33%).....	33
4.5. Αποδοτικότητα λήψης (απώλεια ~0,4%).....	33
4.6. Αποτελεσματικότητα συλλογής.....	33
4.7. Συντελεστής τάσης $Fv$ (απώλεια ~20%).....	34
4.8. Συντελεστής πλήρωσης (συντελεστής καμπύλης) $Fc$ (εγγενής απώλεια ~12%).....	35
4.9. Παράγοντας ιδεατότητας $A$ (απώλεια ~5%).....	36
4.10. Αντίσταση σειράς (απώλεια ~0,3%).....	36
4.11. Αντίσταση διακλάδωσης (αμελητέα απώλεια ~0,1%).....	37
4.12. Παρεχόμενη ισχύς.....	37
5. Κατασκευή ηλιακών κυψελών και μονάδων.....	37
5.1. Γενικά κριτήρια σχεδιασμού.....	37
6. Είδη και προσαρμογές φωτοβολταϊκών.....	38
6.1. Παραλλαγές στο υλικό Si.....	40
6.2. Παραλλαγές στη γεωμετρία των κόμβων.....	41
6.3. Άλλα υλικά υποστρώματος, χημικές ομάδες III/V και II/VI.....	44
6.4. Άλλοι μηχανισμοί ημιαγωγών, ταξινομήσεις και ορολογίες.....	45
6.5. Παραλλαγή στη διάταξη του συστήματος.....	50

7. Κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές πτυχές .....	52
7.1. Τιμές .....	52
7.2. Συστήματα που συνδέονται με το δίκτυο.....	54
7.3. Αυτόνομα συστήματα.....	55
7.4. Φ/Β για την ηλεκτροδότηση της υπαίθρου, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες .....	55
7.5. Περιβαλλοντική επίπτωση .....	59
7.6. Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία.....	59
7.7. Συμπεράσματα.....	60
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	62

## Περίληψη

Τη βασική μονάδα παραγωγής ηλιακής ενέργειας αποτελούν τα ηλιακά πάνελ, γνωστά και ως φωτοβολταϊκά ή ηλιακά πλαίσια. Βασικό στοιχείο των Φ/Β συσκευών είναι ένα στοιχείο ημιαγωγού γνωστό ως φωτοβολταϊκή κυψέλη. Τα ηλιακά πάνελ χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, το μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, την λεπτή μεμβράνη και τα φωτοβολταϊκά συγκεντρωτών και αναδύομενες τεχνολογίες. Οι εφαρμογές των φωτοβολταϊκών είναι δύο τύπων είτε αυτόνομος εξοπλισμός είτε συστήματα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο. Επιπλέον, αν και το ηλιακό στοιχείο Si επίπεδης πλάκας ήταν κυρίαρχο εμπορικό προϊόν υπάρχει μεγάλη ποικιλία εναλλακτικών τύπων που στόχο έχουν να βελτιώσουν την απόδοση και να μειώσουν το κόστος. Υπάρχει διαχωρισμός των διάφορων τύπων κυττάρων σε τρεις γενιές. . Κυψέλες <<πρώτης γενιάς>> , κύτταρα << δεύτερης γενιάς>> και κυψέλες << τρίτης γενιάς>>.

Η μαζική παραγωγή φωτοβολταϊκών μονάδων συνεχίζει να αυξάνεται δραματικά σε κλίμακα και ποιότητα. Μελλοντικός στόχος είναι η ανανεώσιμη ενέργεια που αντιπροσωπεύεται από την ηλιακή ενέργεια να αντικαταστήσει σταδιακά τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα

## **Abstract**

Solar panels, also known as photovoltaic or solar panels, are the basic unit of solar energy production. The basic element of a PV cell is a semiconductor element known as a photovoltaic cell. Solar cells are always divided into three categories, monocrystalline or polycrystalline silicon, thin film, and concentrated and emerging technologies. Applications of voltaics are of two types, either stand-alone equipment or grid-connected systems. There is a separation of the various cell types into three generations. . Cells<<first generation>>, cells<<second generation>>and cells <<third generation>>.

Mass production of photovoltaic modules continues to increase dramatically in scale and quality. The future goal is for renewable energy represented by solar energy to gradually replace traditional fossil fuels

## 1. Εισαγωγή

Επί του παρόντος, το ηλιακό φωτοβολταϊκό σύστημα (ΦΒ) έχει γίνει η κορυφαία πράσινη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο για τα νοικοκυριά και τους κοινοπρακτούντες σε περιοχές εκτός δικτύου και απομακρυσμένες περιοχές. Σε πολλές χώρες, το ηλιακό φως είναι είναι διαθέσιμο όλο το χρόνο και η δυνατότητα χρήσης ηλιακής ενέργειας έχει θεωρηθεί πολύ σημαντική (Islametal., 2006). Υπάρχει επίσης κάποιος σχεδιασμός σε εθνικό επίπεδο για την παροχή ηλιακής ενέργειας μέσω συμβατικών συστημάτων δικτύου (Mondal and Islam, 2011). Το φωτοβολταϊκό σύστημα έχει επεκταθεί ευρέως τόσο σε αστικές όσο και σε αγροτικές περιοχές καθώς έχει πολλές θετικές επιπτώσεις με τη μορφή ηλιακής στέγης, ηλιακής αντλίας, ηλιακού μίνι δικτύου, ηλιακού μικροδικτύου, ηλιακού πάρκου, ηλιακού σταθμού φόρτισης, ηλιακού συστήματος πόσιμου νερού, ηλιακού φως του δρόμου κ.λπ. Ως αποτέλεσμα, οι άνθρωποι των απομακρυσμένων περιοχών έχουν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια.

Το φωτοβολταϊκό σύστημα χρησιμοποιεί την ενέργεια φωτός και θερμότητας που εκπέμπεται από τον Ήλιο και τα μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια για την παροχή σε βιομηχανίες ή νοικοκυριά για την κάλυψη των αναγκών όπου τους αρμόζει. Δεδομένου ότι το ηλιακό φως και η θερμότητα είναι η δωρεάν παραγωγή της φύσης, και τα δύο είναι ανανεώσιμα και δεν έχουν καμία αρνητική επίδραση στο περιβάλλον. Όμως το φωτοβολταϊκό πάνελ στο τέλος της ζωής του έχει ένα σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί σωστά. Κάθε ηλιακό πάνελ έχει σχεδιασμένη διάρκεια ζωής για τη σωστή λειτουργία του. Αφού τελειώσουν την ωφέλιμη ζωή τους, μετατρέπονται σε μια μορφή επικίνδυνων αποβλήτων. Τα ηλιακά πάνελ παρέχουν υπηρεσία για μεγάλο χρονικό διάστημα. Γενικά, τα ηλιακά πάνελ έχουν 20-25 χρόνια ζωής και κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, δεν υπάρχει τίποτα ανησυχητικό για την ανακύκλωση απορριμμάτων φωτοβολταϊκών πάνελ (Tasniaetal., 2019). Ορισμένες φωτοβολταϊκές κυψέλες περιλαμβάνουν επικίνδυνα υλικά, για παράδειγμα, μόλυβδο, σελήνιο, τελλούριο και κάδμιο. Σε πολλές χώρες, οι ενώσεις του καδμίου ελέγχονται επί του παρόντος καθώς είναι ικανό να δημιουργήσει τοξικότητα στα ψάρια και την άγρια ζωή και οι άνθρωποι μπορούν να επηρεαστούν από αυτό μέσω της τροφικής αλυσίδας (McDonald and Pearce, 2010). Επιπλέον, σε κάποιο στάδιο του κύκλου ζωής τους, ορισμένα αέρια θερμοκηπίου (GHG) όπως το CO<sub>2</sub> παράγονται επίσης από Φ/Β πάνελ όπως και άλλες πηγές παραγωγής ενέργειας (Amanetal., 2015). Στη βιομηχανία

φωτοβολταϊκών πάνελ, το καθαρό μέταλλο πυριτίου (Simet) χρησιμοποιείται για την κατασκευή Φ/Β πάνελ. Για την παραγωγή Simetχρειάζεται μια βασική ανθρακοθερμική μείωση. Σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, ο χαλαζίας αντιδρά με αναγωγικό στοιχείο όπως ο άνθρακας, τα ροκανίδια, ο οπτάνθρακας και τα ηλεκτρόδια γραφίτη του κλιβάνου σε φούρνους ηλεκτρικού τόξου για την παραγωγή Simet (Amanetal., 2015).

### **1.1. Ιστορική αναδρομή**

Υπάρχουν μόνο δύο μέθοδοι για την παραγωγή σημαντικής ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη είναι η ηλεκτρομαγνητική που ανακαλύφθηκε από τον MichaelFaraday το 1821 και σε εμπορική παραγωγή το 1890. Αυτή είναι η κυρίαρχη μέθοδος σήμερα, που απαιτεί τη σχετική κίνηση ενός μαγνητικού πεδίου και ενός αγωγού που τροφοδοτείται από έναν εξωτερικό κινητήρα ή στρόβιλο (Feldmanetal.,2013).

Η δεύτερη μέθοδος είναι η φωτοβολταϊκή παραγωγή χωρίς κινούμενα μέρη χρησιμοποιώντας ηλιακά κύτταρα (τεχνικά φωτοβολταϊκά κύτταρα), τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ιδιαίτερα του φωτός, κυρίως μέσα σε υλικά ημιαγωγών. Το φωτοβολταϊκό (PV) φαινόμενο<sup>1</sup> ανακαλύφθηκε από τον Becquerel το 1839, αλλά δεν αναπτύχθηκε ως πηγή ενέργειας μέχρι το 1954 από τους Chapin, Fuller και Pearson χρησιμοποιώντας ντοπαρισμένο πυρίτιο ημιαγωγών. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι Φ/Β κυψελών, αλλά για πρακτική εφαρμογή δεν είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε την εσωτερική τους λειτουργία, καθώς μπορούν να περιγραφούν από τα χαρακτηριστικά του εξωτερικού ηλεκτρικού τους κυκλώματος (Goetzbergerand Hoffmann, 2005).



**Εικ. 1.1.** Τμήμα του ηλιακού πάρκου ισχύος 13 MW, στην αεροπορική βάση Nellis, κοντά στο Λας Βέγκας, Νεβάδα, ΗΠΑ. Οι φωτοβολταϊκές μονάδες είναι στερεωμένες σε σχεδόν 6000 πλαίσια παρακολούθησης ηλίου, στα οποία η ισχύς συνεχούς ρεύματος μετατρέπεται (αναστρέφεται) σε συμβατική τροφοδοσία εναλλασσόμενου ρεύματος για ηλεκτρική ενέργεια σε όλη τη Βάση, με μέγιστη ισχύ στα 13 MW. Η ηλιακή ηλεκτρική ενέργεια ενσωματώνεται με την τροφοδοσία από τις γεννήτριες ντίζελ της Βάσης, δίνοντας έτσι σημαντική μείωση στη χρήση καυσίμου.

## 1.2. Χρήσεις και γρήγορη ανάπτυξη

Η ισχύς των φωτοβολταϊκών είναι μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες ενεργειακές τεχνολογίες: η εγκατεστημένη ισχύς αυξήθηκε εκθετικά από ~200 MW το 1990 σε περισσότερα από 80.000 MW (80 GW) το 2012, με παρόμοιο ρυθμό ανάπτυξης να αναμένεται να συνεχιστεί (**Εικ. 1.2**). Τεχνικοί παράγοντες που καθορίζουν τη ζήτηση είναι η καθολική εφαρμογή του (η ηλιακή ακτινοβολία είναι διαθέσιμη παντού, αν και η εισροή ενέργειας και επομένως η παραγωγή ενέργειας είναι μεγαλύτερη σε πιο ηλιόλουστες τοποθεσίες), ο αρθρωτός χαρακτήρας (που επιτρέπει τη χρήση σε όλες τις κλίμακες από λίγα watt έως δεκάδες μεγαβάτ), η αξιοπιστία, μεγάλη διάρκεια ζωής, ευκολία χρήσης και έλλειψη θορύβου και εκπομπών. Η ανάπτυξη της αγοράς σχετίζεται με υποστηρικτικές πολιτικές σε πολλές χώρες, ιδιαίτερα τα «feed-in tariffs» που ενθαρρύνουν έντονα τους χρήστες ηλεκτρικής ενέργειας να εγκαταστήσουν συνδεδεμένα στο δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα για την ισχύ τους, με το πλεόνασμα να εξάγεται και να πωλείται μέσω του

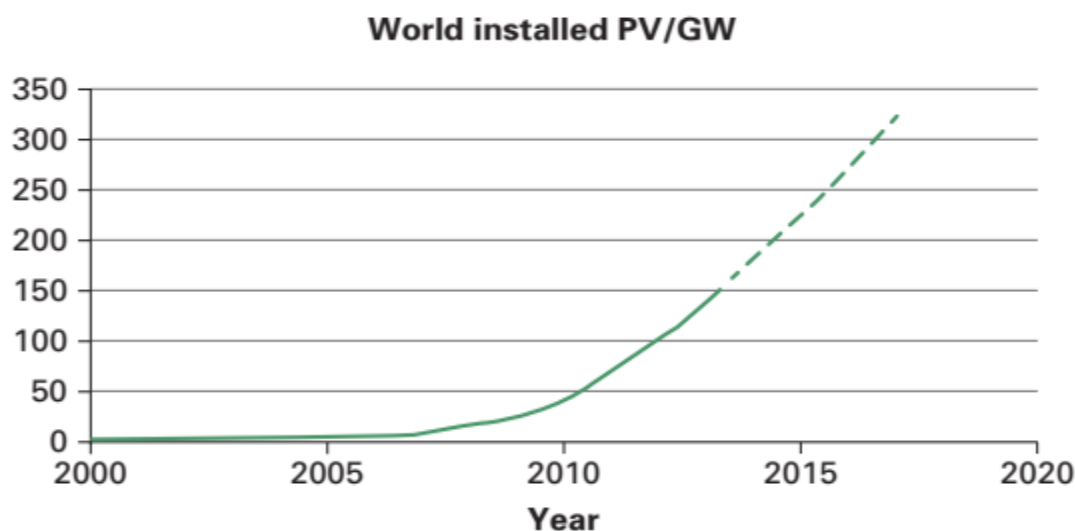


δικτύου κοινής ωφέλειας. Η ζήτηση που προκύπτει ενθαρρύνει τους κατασκευαστές να κλιμακώσουν την παραγωγή τους, γεγονός που με τη σειρά του καθιστά το κόστος μονάδας φθηνότερο

διεθνώς.

Πριν από το 2000, τα περισσότερα φωτοβολταϊκά βρίσκονταν σε αυτόνομα συστήματα, προχωρώντας από διαστημικούς δορυφόρους σε φωτισμό, άντληση νερού, ψύξη, τηλεπικοινωνίες, ηλιακά σπίτια, ιδιόκτητα αγαθά και κινητό ή απομονωμένο εξοπλισμό (π.χ. μικρά σκάφη, προειδοποιητικά φώτα, μέτρα στάθμευσης). Από το 2000 περίπου, η συνδεδεμένη στο δίκτυο φωτοβολταϊκή ισχύς (π.χ. ενσωματωμένη σε κτίρια ή σε μεγάλες αυτόνομες συστοιχίες: **Εικ. 1.1**) έχει γίνει η κυρίαρχη εφαρμογή ως αποδεκτή «κύρια» μορφή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τον 21ο αιώνα.

Προφανώς η παραγωγή πραγματοποιείται μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας και ποικίλλει ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία, επομένως η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. μπαταρίες) ή η σύνδεση με το δίκτυο είναι συνηθισμένη. Τέτοιοι μηχανισμοί εξομαλύνουν επίσης την ταχύτερη μεταβλητότητα της παραγωγής κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το εργοστασιακό κόστος ανά μονάδα χωρητικότητας μειώθηκε σε \$1/W για κυψέλες λεπτής μεμβράνης περίπου το 2009 και για κυψέλες κρυσταλλικού πυριτίου το 2011, με τις διορθωμένες με τον πληθωρισμό τιμές να μειώνονται από τότε που κατασκευάζονταν και η τεχνογνωσία διευρύνεται. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά γίνεται γρήγορα μια κύρια τεχνολογία για ενσωμάτωση στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εθνικό κλίμακα (Luque and Hegedus, 2011).



**Εικ. 1.2.** Αύξηση παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος (GW) από φωτοβολταϊκά. Η διακεκομμένη γραμμή είναι το «μεσαίο» σενάριο του EPIA (2014). Ημερομηνία Πηγή: European Photovoltaic Industry Association

Για αυτόνομη ηλεκτρική ενέργεια σε μια εύλογα ηλιόλουστη τοποθεσία ηλιακής ακτινοβολίας 20 MJ/(m<sup>2</sup> ημέρα), η μακροπρόθεσμη παραγόμενη ισχύς είναι συνήθως πολύ φθηνότερη από αυτή των γεννητριών ντίζελ. Για εκτεταμένη παροχή ρεύματος σε ηλιόλουστα κλίματα, η ισχύς των φωτοβολταϊκών είναι οικονομικά ανταγωνιστική με την ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο αιχμής κατά τη διάρκεια της ημέρας. Εάν οι ρυπογόνες μορφές παραγωγής χρεώνονταν για το εξωτερικό τους κόστος, τότε τα φωτοβολταϊκά και άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα ήταν ακόμη πιο αποτελεσματικά. Οι εμπορικές ηλιακές μονάδες με αποδεδειγμένη ενθουσίαση παρέχουν απρόσκοπτη εξυπηρέτηση, εφόσον αποφεύγεται η στοιχειώδης κατάχρηση. Η διάρκεια ζωής τουλάχιστον 20 ετών είναι εμπορικά εγγυημένη, με προσδοκίες για πολύ μεγαλύτερη επιτυχή λειτουργία.

### **1.3. Βασικά στοιχεία**

Το ηλιακό πάνελ εφευρέθηκε το 1954 στα BellTelephone Laboratories στις Ηνωμένες Πολιτείες. Σήμερα, τα φωτοβολταϊκά είναι μια από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και είναι έτοιμη να παίξει σημαντικό ρόλο στη μελλοντική παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε ένα σύστημα ηλιακής ενέργειας, η βασική μονάδα παραγωγής ενέργειας είναι τα ηλιακά πάνελ, αυτά που είναι γνωστά και ως φωτοβολταϊκά ή ηλιακά πλαίσια (PV modules). Το βασικό δομικό στοιχείο των φωτοβολταϊκών συσκευών είναι ένα στοιχείο ημιαγωγού γνωστό ως Φ/Β κυψέλη. Όταν διασυνδέονται πολλές κυψέλες, σχηματίζεται φωτοβολταϊκή μονάδα. Τα ηλιακά πάνελ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις γενιές:

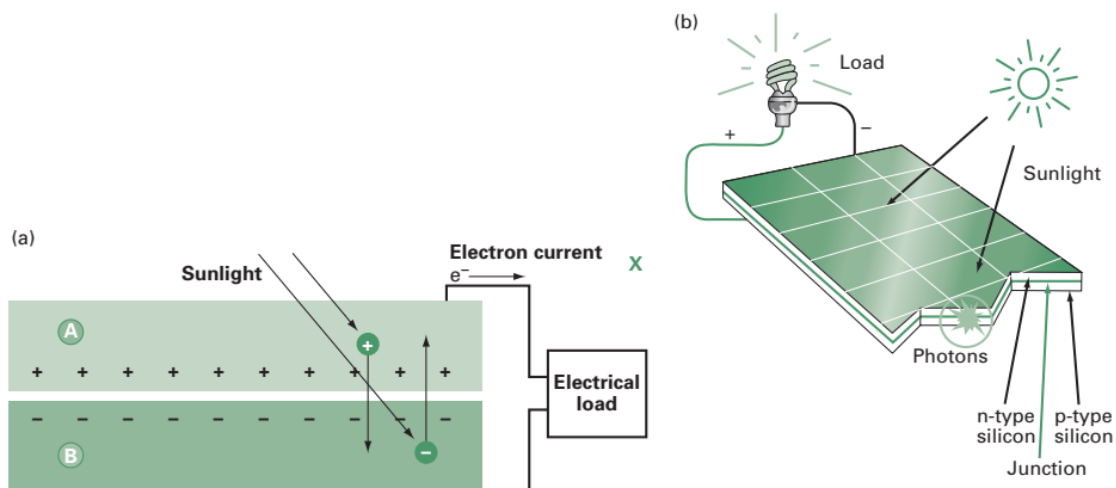
- Μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό πυρίτιο,
- λεπτή μεμβράνη, και
- φωτοβολταϊκά συγκεντρωτών και αναδύομενες τεχνολογίες.

Μεταξύ αυτών των μονάδων, τα μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά πάνελ πυρίτιου έχουν μεγαλύτερη ικανότητα μετατροπής από λεπτή μεμβράνη, και

χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον παγκοσμίως ως εμπορικά υλικά ηλιακών πάνελ. Ένα φωτοβολταϊκό πάνελ κρυσταλλικού πυριτίου αποτελείται από γυαλί, μπαταρία (πυρίτιο, κάδμιο, σελήνιο, τελλούριο, γάλλιο, μολυβδαίνιο, ίνδιο, κ.λπ.), EVA (συμπολυμερές αιθυλενίου/οξικού βινυλίου), ταμπλό (TPT, TPE , κ.λπ.), πλαίσιο από κράμα Al (97% Al). Γενικά, η σύνθεση ενός ηλιακού πάνελ, ενός ηλιακού ελεγκτή και μιας μπαταρίας ή μιας ομάδας μπαταριών δημιουργεί ένα σύστημα ηλιακής ενέργειας. Ένας μετατροπέας είναι απαραίτητος.

Η φωτοβολταϊκή παραγωγή ενέργειας προκαλείται από φωτόνια ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που διαχωρίζουν θετικούς και αρνητικούς φορείς φορτίου στο απορροφητικό υλικό (Εικ. 1.3). Εάν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο, αυτά τα φορτία μπορούν να παράγουν ρεύμα σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Τέτοια πεδία υπάρχουν μόνιμα στις συνδέσεις των φωτοβολταϊκών κυψελών ως «ενσωματωμένα» ηλεκτροστατικά πεδία που παρέχουν τη διαφορά τάσης (EMF) για την παραγωγή χρήσιμης ισχύος. Η παραγωγή ενέργειας λαμβάνεται από κύτταρα με μήκη κύματος από το υπέρυθρο ( $1 \approx 10 \mu\text{m}$ ) έως το υπεριώδες ( $1 \approx 0,3 \mu\text{m}$ ). Ωστόσο, εκτός εάν δηλώνεται διαφορετικά, θεωρούμε τα κύτταρα με  $1 \approx 0,5 \mu\text{m}$ . Τα ενσωματωμένα πεδία κοινών κυψελών ημιαγωγών παράγουν διαφορές δυναμικού περίπου 0,5 V και πυκνότητες ρεύματος περίπου 400 A/m<sup>2</sup> σε ηλιακή ακτινοβολία καθαρού ουρανού 1,0 kW/m<sup>2</sup>.

Τα εμπορικά φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση μεταξύ περίπου 12% και 25% σε συνηθισμένη ηλιοφάνεια, ανάλογα με τον τύπο και την τιμή. Σε ηλιοφάνεια με καθρέφτη, η απόδοση μπορεί να είναι σχεδόν 50%. Οι εμπορικές κυψέλες διασυνδέονται και στερεώνονται σε αδιάβροχη ενθυλάκωση ως μονάδες. Ανάλογα με τον αριθμό των κυψελών σε σειρά, οι τάσεις ανοιχτού κυκλώματος της μονάδας είναι συνήθως μεταξύ 15 και 30 V. Το ρεύμα από τις κυψέλες είναι εγγενώς συνεχές ρεύμα (DC). Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς χρησιμοποιούνται για την αλλαγή αυτού του ρεύματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Για μια δεδομένη εμπορική μονάδα σε μια βέλτιστη σταθερή θέση, η ημερήσια απόδοση ανά μονάδα επιφάνειας συλλέκτη εξαρτάται από το κλίμα, αλλά μπορεί να αναμένεται να είναι περίπου 0,5 έως 1,0 kWh/(m<sup>2</sup> ημέρα). Η παραγωγή μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας συσκευές παρακολούθησης και ηλιακούς συγκεντρωτές (McEvoyetal., 2011).



**Εικ. 1.3.** α Διαγραμματική («μικρο-όψη») απεικόνιση της παραγωγής  $\Phi/B$  από φωτόνια ηλιακού φωτός που απορροφάται κοντά σε μια επαφή-ένωση μεταξύ των στρωμάτων ημιαγωγών Α και Β με διαφορετικό ντόπινγκ. Σημειώστε ότι το συμβατικό (συνεχές) ρεύμα ρέει από το (+) στο (-), δηλαδή στην αντίθετη κατεύθυνση από το ρεύμα των ηλεκτρονίων.

β Περίγραμμα φωτοβολταϊκών στοιχείων σε ένα κύκλωμα («μακρο-προβολή»). Το διάγραμμα δείχνει πολλά κελιά διασυνδεδεμένα.

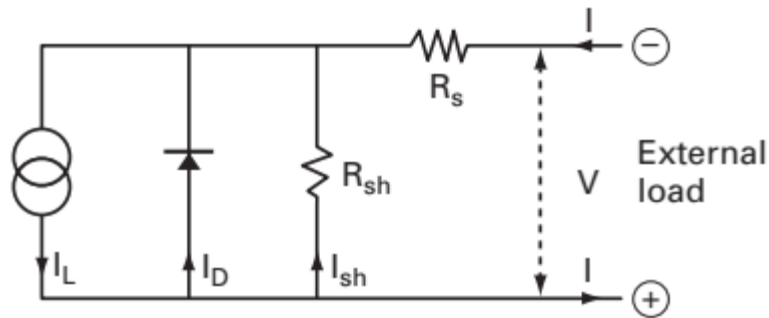
## 2. Ιδιότητες φωτοβολταϊκού κυκλώματος

Με τα φωτοβολταϊκά κύτταρα, όπως με όλες τις συσκευές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι περιβαλλοντικές συνθήκες παρέχουν μια τρέχουσα πηγή ενέργειας. Το ισοδύναμο κύκλωμα (**Εικ. 2.1**) απεικονίζει τα βασικά μακροσκοπικά χαρακτηριστικά για την παραγωγή ενέργειας  $\Phi B$ , συμπεριλαμβανομένης της εσωτερικής αντίστασης σειράς  $R_s$  και της αντίστασης διακλάδωσης  $R_{sh}$  (Green, 1998). Από το ισοδύναμο κύκλωμα,

$$I = I_L - I_D - I_{sh}, \quad (2.1)$$

όπου  $I_L$  είναι το ρεύμα που προκαλείται από το φως και  $I_{sh} = \frac{V - IR_s}{R_{sh}}$ , οπότε:

$$I = I_L - I_D - I_{sh}. \quad (2.2)$$



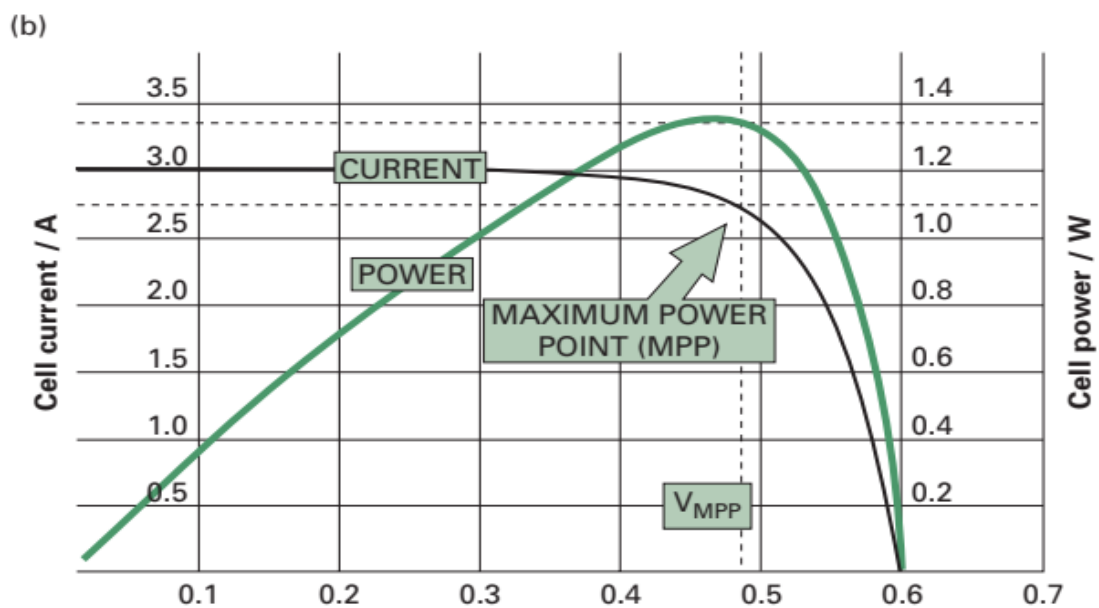
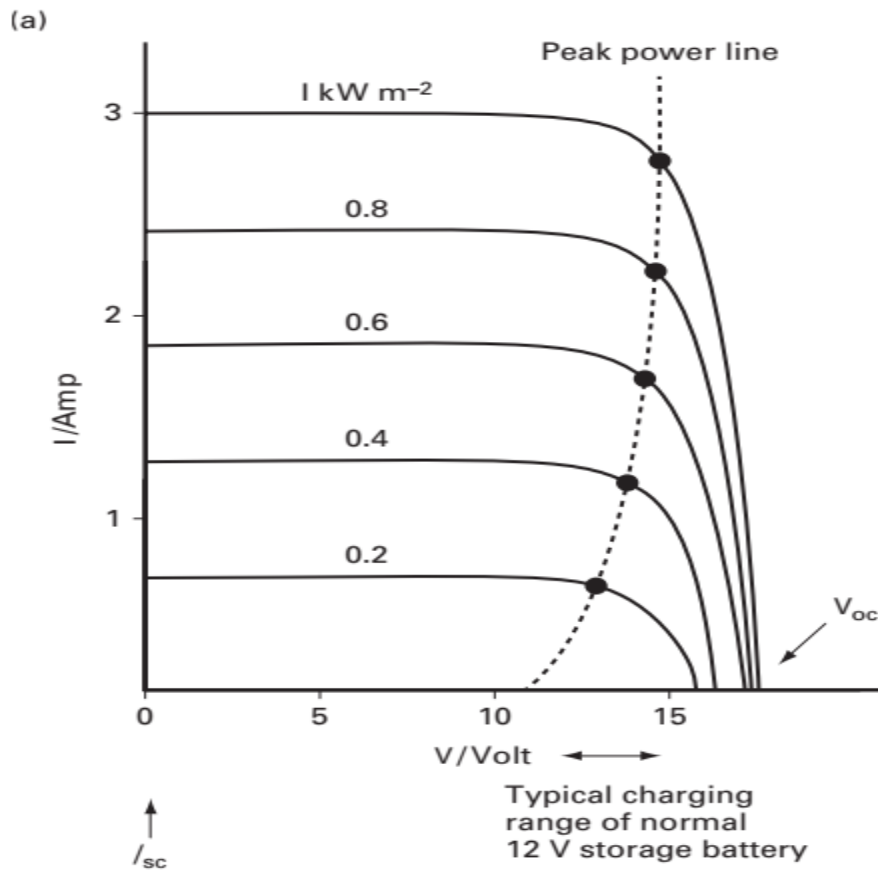
**Εικ. 2.1.** Ισοδύναμο κύκλωμα ηλιακού κυττάρου, όπου:  $I$  είναι το ρεύμα στο εξωτερικό φορτίο,  $I_L$  το ρεύμα που προκαλείται από το φως,  $I_D$  το σκοτεινό ρεύμα της διόδου,  $R_{sh}$  η αντίσταση διακλάδωσης,  $I_{sh}$  το ρεύμα διακλάδωσης,  $R_s$  το αντίσταση σειράς και  $V$  η τάση εξόδου του στοιχείου.

Κατά τη χρήση των φωτοβολταϊκών κυψελών ως γεννητριών ισχύος σε λειτουργία (δηλαδή όταν φωτίζονται), είναι σύνηθες να λαμβάνεται το ρεύμα  $I$  της συσκευής ως θετικό όταν ρέει από το θετικό τερματικό της κυψέλης (δηλαδή τη γεννήτρια) μέσω του εξωτερικού φορτίου. Αυτή είναι η σύμβαση με όλες τις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, συμπεριλαμβανομένων των μπαταριών, αλλά είναι αντίθετη με τη θεμελιώδη ανάλυση της ροής ηλεκτρονίων που προέρχεται από τη φυσική μιας απλής διόδου.

Στο **Σχ. 2.2(α)** για δεδομένο φωτισμό, η χαρακτηριστική καμπύλη είναι από  $V = 0$  (βραχυκύκλωμα, με ρεύμα  $I_{sc}$ ) έως  $V = V_{oc}$  (τάση ανοιχτού κυκλώματος, με  $I = 0$ ). Η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  αυξάνεται ελαφρώς μόνο με την ακτινοβολία, σε αντίθεση με το ρεύμα βραχυκυκλώματος  $I_{sc}$  που είναι ανάλογο με την απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία. Η ισχύς που παράγεται είναι το γινόμενο των  $I$  και  $V$ , ( $P = IV$ ). Η μέγιστη ισχύς σε κάθε φωτισμό υποδεικνύεται από τη γραμμή ισχύος αιχμής. Το **Σχ. 2.2(β)** απεικονίζει την παραγόμενη ισχύ της κυψέλης έναντι της τάσης για μία τιμή ηλιοφάνειας (Green, 2001).

Η προϋπόθεση για τη μέγιστη ισχύ σε ένα εξωτερικό κύκλωμα είναι ότι το εξωτερικό φορτίο  $R_L$  ισούται με την εσωτερική αντίσταση της πηγής  $R_{int}$ . Ωστόσο, το  $R_{int}$  εξαρτάται από την απορροφούμενη ροή φωτονίων και έτσι αλλάζει με την ηλιακή ακτινοβολία, επομένως η καλή αντιστοίχιση ισχύος σε ένα ηλιακό στοιχείο απαιτεί το  $R_L$ , όπως φαίνεται από τη συστοιχία PV, να αλλάξει σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία. Αυτή η αντιστοίχιση εκτελείται αυτόματα από μια ηλεκτρονική μονάδα διασύνδεσης που συνδέεται μεταξύ της συστοιχίας και των εξωτερικών

κυκλωμάτων. Για συστήματα που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, αυτή η αντιστοίχιση μέγιστης ισχύος ενσωματώνεται ηλεκτρονικά με έναν μετατροπέα από ηλεκτρικό ρεύμα συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα, ο οποίος βρίσκεται όλος σε ένα «κουτί ελέγχου» (Green, 2006).



**Εικ. 2.2.a.** Χαρακτηριστικό I-V μιας τυπικής μονάδας Si 36 κυψελών. Σημειώστε ότι ακόμη και χωρίς έλεγχο του μέγιστου φορτίου ισχύος, η γραμμή τροφοδοσίας αιχμής του μέγιστου IV ταιριάζει καλά με το εύρος τάσης φόρτισης των ονομαστικών μπαταριών 12 V.

b. Καμπύλη μέγιστης ισχύος και χαρακτηριστικό I-V, με ισχύ  $P = IV$  σε διάγραμμα V. Υποδεικνύεται το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP).

Για συνεχή ηλιακή ακτινοβολία, μια αύξηση στη θερμοκρασία του υλικού κυψέλης  $\theta$  επηρεάζει την απόδοση μειώνοντας το  $V_{oc}$  και αυξάνοντας το  $I_{sc}$ , με το χαρακτηριστικό να αλλάζει ανάλογα. Ουσιαστικά, το  $R_{sh}$  (συχνά λαμβάνεται ως απείρως μεγάλο) και το  $R_s$  (που γίνεται όσο το δυνατόν μικρότερο) μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Οι εμπειρικές σχέσεις για αυτές τις επιδράσεις σε ηλιοφάνεια 1 kW m<sup>-2</sup> σε υλικό Si και θερμοκρασία Κελσίου  $\theta$  είναι:

$$V_{oc}(\theta) = V_{oc}(\theta_1)[1 - a(\theta - \theta_1)], \quad (2.3)$$

$$I_{sc}(\theta) = I_{sc}(\theta_1)[1 + b(\theta - \theta_1)], \quad (2.4)$$

όπου  $\theta_1 = 25^\circ\text{C}$  είναι μια βολική θερμοκρασία αναφοράς και οι συντελεστές θερμοκρασίας είναι  $a = 3,7 \times 10^{-3} (\text{C}^\circ)^{-1}$ ,  $b = 6,4 \times 10^{-4} (\text{C}^\circ)^{-1}$ . Σημειώστε, ωστόσο, ότι σε σταθερή θερμοκρασία, το  $V_{oc}$  αυξάνεται ελαφρώς με την ηλιακή ακτινοβολία. Το καθαρό αποτέλεσμα μιας αύξησης της θερμοκρασίας σε σταθερή ηλιοφάνεια είναι η μείωση της ισχύος  $P$ . Μια εμπειρική σχέση για το κρυσταλλικό υλικό Si είναι:

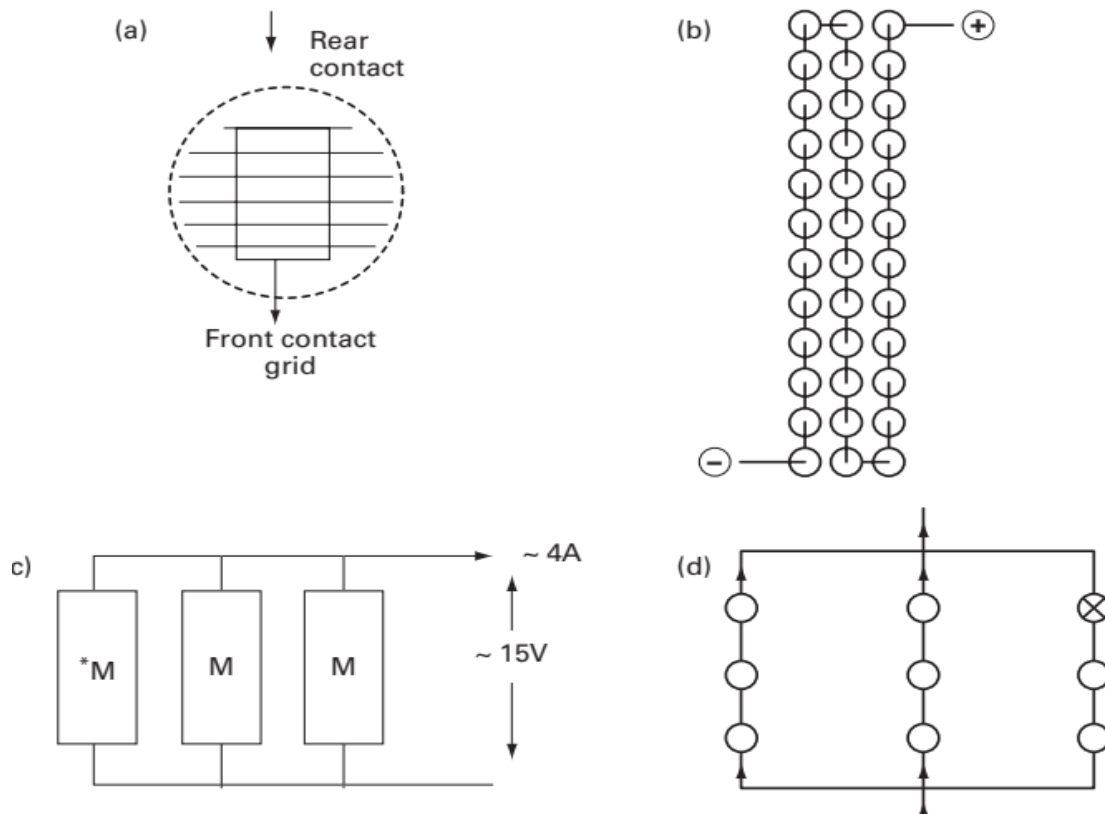
$$P(\theta) = P(\theta_1)[1 - c(\theta - \theta_1)], \quad (1.5)$$

όπου  $c = 4 \times 10^{-3} (\text{C}^\circ)^{-1}$ . Έτσι, μια μονάδα κρυσταλλικού πυριτίου που λειτουργεί στους  $65^\circ\text{C}$  (πολύ πιθανό σε ένα ηλιόλουστο περιβάλλον της ερήμου) χάνει περίπου το 16% της ονομαστικής της ισχύος. τέτοιες μονάδες είναι πιο αποτελεσματικές σε χαμηλές θερμοκρασίες. Η ικανότητα των ηλιακών πλαισίων, και επομένως των κυττάρων, να χάνουν την απορροφούμενη θερμότητα κυρίως από τη μεταφορά και την υπέρυθη ακτινοβολία είναι επομένως μια σημαντική σχεδιαστική πρόκληση, αλλά συχνά παραμελείται. Οι υπόλοιπες απαιτήσεις για καλή παραγωγή ισχύος είναι προφανείς από το ισοδύναμο κύκλωμα, και συγκεκριμένα:

1. Το  $I_L$  θα πρέπει να είναι μέγιστο(π.χ. στην επάνω επιφάνεια, ελάχιστη επιφάνεια ηλεκτρικής επαφής και ελάχιστη οπτική ανάκλαση).
2. Το  $I_D$  θα πρέπει να είναι το ελάχιστο (π.χ. από τη βέλτιστη συγκέντρωση προσμίξεων).
3. Το  $R_{sh}$  πρέπει να είναι μεγάλο (π.χ. με παρθένο σχηματισμό άκρων κυττάρων).
4. Τα  $4R_s$  πρέπει να είναι μικρά (π.χ. διασφαλίζοντας μικρές διαδρομές για τα επιφανειακά ρεύματα προς τις ηλεκτρικές επαφές και χρησιμοποιώντας επαφές και καλώδια χαμηλής αντίστασης).
5.  $R_{load} = R_{internal} = \frac{V}{I}$  για βέλτιστη αντιστοίχιση ισχύος.

Οι συστοιχίες ηλιακών κυψελών συχνά συναρμολογούνται από έναν συνδυασμό μεμονωμένων μονάδων που συνήθως συνδέονται σε σειρά και παράλληλα. Κάθε ενότητα είναι από μόνη της ένας συνδυασμός κελιών σε σειρά. Κάθε κελί είναι ένα σύνολο επιφανειακών στοιχείων που συνδέονται παράλληλα (**Εικ. 2.3**). Για μια μονάδα 36 κυψελών, το μέγιστο δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος μπορεί να είναι ~22 V, με μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος στους ακροδέκτες της μονάδας ~5,5 A σε τυπικές συνθήκες. Τέτοιες μονάδες αναπτύχθηκαν αρχικά για τη φόρτιση μπαταριών «12 Volt». Οι μεγαλύτερες μονάδες είναι πλέον κοινές, καθώς είναι πιο οικονομικά αποδοτικές για χρήση με σύνδεση στο δίκτυο (π.χ. μονάδες 72 κυψελών για 100 έως 160 W σε περίπου 32 V σε πλήρη ηλιοφάνεια, ανοιχτό κύκλωμα). Δεδομένου ότι τα κελιά είναι σε σειρά, θα προκύψουν δυσκολίες εάν ένα κελί ή στοιχείο μιας κυψέλης γίνει ελαττωματικό ή εάν η συστοιχία φωτίζεται άνισα από σκίαση ή από άνιση συγκέντρωση φωτός, επειδή μια κυψέλη που δεν φωτίζεται σωστά συμπεριφέρεται ως ανορθωτική δίοδος (Islametal., 2006)).





**Εικ. 2.3.** Τυπικές διατάξεις εμπορικών ηλιακών κυψελών Si: (a) κυψέλη. (b) μονάδα 36 κυψελών. (c) συστοιχία, (d) μονάδα καλωδιωμένη σε μπλοκ για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης μιας αποτυχημένης κυψέλης (υποδεικνύεται από τον σταυρό). Δεν σύρονται προστατευτικές δίοδοι (Vegaetal., 2018).

Επομένως, το ρεύμα που παράγεται σε ένα σωστά φωτισμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο προσπαθεί να περάσει στο επόμενο σκιασμένο στοιχείο προς την κατεύθυνση που είναι τώρα μπλοκαρισμένη, καθώς αυτό το σκιασμένο στοιχείο συμπεριφέρεται ως δίοδος «στο σκοτάδι». Έτσι, όταν οι κυψέλες συνδέονται σε σειρά με ένα σκιερό, διέρχεται ελάχιστο ρεύμα (η αναλογία αντιστοιχεί σε έναν σωλήνα νερού: εάν υπάρχει απόφραξη οπουδήποτε στον σωλήνα σταματά τη ροή του νερού). Κατά συνέπεια, δεν πρέπει ποτέ να επιτρέπεται να πέφτουν σκιές σε φωτοβολταϊκές μονάδες. Εάν η σκίαση είναι αναπόφευκτη, τότε οι συνδεδεμένες σειρές των μονάδων θα πρέπει να είναι διατεταγμένες έτσι ώστε κάθε χορδή είτε να παραμένει στον ήλιο είτε να είναι σκιασμένη.

Επιπλέον, είναι πιθανό μια σκιασμένη ή ελαττωματική κυψέλη να υπερθερμανθεί - ένα «καυτό σημείο». Τέτοια σφάλματα μπορεί να προκαλέσουν χιονοστιβάδα εκτός εάν οι προστατευτικές δίοδοι παράκαμψης έχουν ρυθμιστεί παράλληλα με μια

κυψέλη ή μια ομάδα κυψελών που συνδέεται σε σειρά. Έτσι, όταν μια ελαττωματική κυψέλη αποκτά αντίσταση, η διαφορά τάσης σε αυτό το στοιχείο ή ομάδα κυψελών αντιστρέφεται και η δίοδος παράλληλα γίνεται αγώγιμη, μειώνοντας έτσι το ρεύμα στο ελαττωματικό στοιχείο. Στην πράξη, τέτοια προστασία δεν εγκαθίσταται για κάθε κελί μέσα σε μια μονάδα, αλλά ολόκληρες μονάδες ή γραμμές μονάδων θα προστατεύονται έτσι. Επιπλέον, τα κελιά μπορούν να συνδεθούν παράλληλα μέσα σε μίνι-μπλοκ, επομένως εάν ένα κελί αποτύχει, υπάρχει μια εναλλακτική διαδρομή ρεύματος. Τα μίνι μπλοκ μπορούν στη συνέχεια να συνδεθούν παράλληλα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.3(d)**.

### **3. Εφαρμογές και συστήματα**

Οι εφαρμογές φωτοβολταϊκών είναι δύο τύπων: (1) αυτόνομος (ανεξάρτητος) εξοπλισμός, και (2) συστήματα διασυνδεδεμένα με δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας κοινής ωφέλειας. Ένα πλεονέκτημα της χρήσης φωτοβολταϊκού ηλεκτρισμού από μεμονωμένες μονάδες είναι η ασφάλεια λόγω της χαμηλής τάσης και της έλλειψης ζημιάς στη μονάδα σε περίπτωση βραχυκυκλώματος της εξόδου. Επομένως, η φωτοβολταϊκή ισχύς από μεμονωμένες κυψέλες ή μονάδες παρέχει ουσιαστική πρακτική εκπαίδευση, τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς χώρους. Ωστόσο, χρειάζεται μεγάλη προσοχή με τις διασυνδεδεμένες συστοιχίες μονάδων, καθώς τα τερματικά τους είναι «ζωντανά» στο φως της ημέρας, ακόμη και έμπειροι ηλεκτρολόγοι μπορεί να το ξεχάσουν αυτό (Boxwell, 2012).

#### **3.1. Αυτόνομες εφαρμογές**

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι πολύ αξιόπιστα, δεν έχουν κινούμενα μέρη και δεν απαιτούν συντήρηση ή παροχή καυσίμου εκτός από μια ροή ηλιακής ενέργειας. Έτσι, τα φωτοβολταϊκά προσφέρουν μία από τις καλύτερες τεχνικά λύσεις για τη διαδεδομένη σύγχρονη ενέργεια στις αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές των αναπτυσσόμενων χωρών, όπου συστήματα μόνο μερικών δεκάδων Watts μπορούν να προσφέρουν φωτισμό και τηλεπικοινωνίες, που έχουν μεγάλο κοινωνικό όφελος. Ωστόσο, η επιτυχία σε αυτές τις εφαρμογές εξαρτάται τουλάχιστον τόσο από κοινωνικούς και θεσμικούς παράγοντες όσο και από την τεχνολογία.

Τα ίδια τεχνικά πλεονεκτήματα σήμαιναν ότι γενικά οι πρώτες σημαντικές χρήσεις των φωτοβολταϊκών ήταν σε εφαρμογές όπου μια μικρή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας ήταν απαραίτητη όπου ήταν δύσκολο ή δαπανηρό να εισαχθεί καύσιμο για συμβατικές γεννήτριες. Το πρώτο σημαντικό παράδειγμα ήταν οι διαστημικοί δορυφόροι, οι οποίοι οδήγησαν σε σημαντική πρόοδη ανάπτυξη. Πολλές άλλες χρήσεις, που συνήθως συνδέονται με μπαταρίες για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και ρύθμιση τάσης, επωφελήθηκαν από αυτό. Παραδείγματα περιλαμβάνουν «ηλιακά σπίτια», απομονωμένες κοινότητες, απομακρυσμένα ιατρικά κέντρα (ειδικά για ψυγεία για φαρμακευτικά φάρμακα), μετεωρολογικές μετρήσεις, θαλάσσια προειδοποιητικά φώτα, σταθμούς τηλεπικοινωνιακού επαναλήπτη (**Εικ. 3.1**), φακούς, φορητά ραδιόφωνα και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές, κυκλοφορία και προειδοποίηση πινακίδες, μέτρα στάθμευσης, κ.λπ. Εάν ένα αυτόνομο σύστημα δεν χρειάζεται αποθήκευση μπαταρίας (π.χ. για άντληση νερού), τότε είναι σημαντική μια διεπαφή προσαρμογής φορτίου και ρύθμισης τάσης. Οι αυτόνομες εφαρμογές λειτουργούν συχνά αυτόματα, αλλά χρειάζονται περιοδικό καθαρισμό και συντήρηση της μπαταρίας από εκπαιδευμένο προσωπικό (Boxwell, 2012).

Καθώς το κόστος των φωτοβολταϊκών συστημάτων έχει μειωθεί, τόσο μειώνεται η απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο στο οποίο οι εγκαταστάσεις είναι ανταγωνιστικές ως προς το κόστος. Για παράδειγμα, είναι συχνά φθηνότερο, και πάντα ασφαλέστερο, η εγκατάσταση πινακίδων κυκλοφορίας, σταθμόμετρων αυτοκινήτων ή φωτισμού για μονοπάτια ως αυτόνομα ηλιακά συστήματα παρά η εγκατάσταση σύνδεσης στο δίκτυο και μέτρησης για τις μικρές ποσότητες ενέργειας που απαιτούνται. Επιπλέον, οι πιο πρόσφατες ηλεκτρονικές συσκευές, συμπεριλαμβανομένου του φωτισμού LED (δίοδος εκπομπής φωτός), τείνουν πάντα να καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια από τους προκατόχους τους, επομένως η ισχύς των φωτοβολταϊκών είναι ακόμη πιο πιθανό να χρησιμοποιηθεί.



(α)



(β)

**Εικ. 3.1.** Τυπικές αυτόνομες εφαρμογές φωτοβολταϊκών. (α) Τροφοδοσία ενός κιβωτίου σήματος σιδηροδρόμων σε μια απομακρυσμένη περιοχή της Αυστραλίας. (β) Φώτα τροφοδοσίας φωτοβολταϊκών μονάδων για σπίτι στα Νησιά Σολομώντα.

### 3.2. Συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο

Από το 2000, τα συστήματα που συνδέονται με το δίκτυο, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.1** και **3.2**, είναι η μεγαλύτερη και ταχύτερα αναπτυσσόμενη χρήση φωτοβολταϊκών. Γενικά, υπάρχουν δύο κατηγορίες τέτοιων «κατανεμημένων/ενσωματωμένων» πλεγμάτων:

1. «Μικροπαραγωγή» σε ένα κτίριο, όπου η φωτοβολταϊκή ισχύς συνδέεται με την πλευρά του καταναλωτή του μετρητή κοινής ωφέλειας, με την πλεονάζουσα ισχύ να εξάγεται στις τοπικές γραμμές διανομής του δικτύου.
2. «Ηλιακά πάρκα» μιας μεγάλης σειράς μονάδων συνδέονται απευθείας με τις κατάλληλα κλιμακωμένες γραμμές διανομής δικτύου.

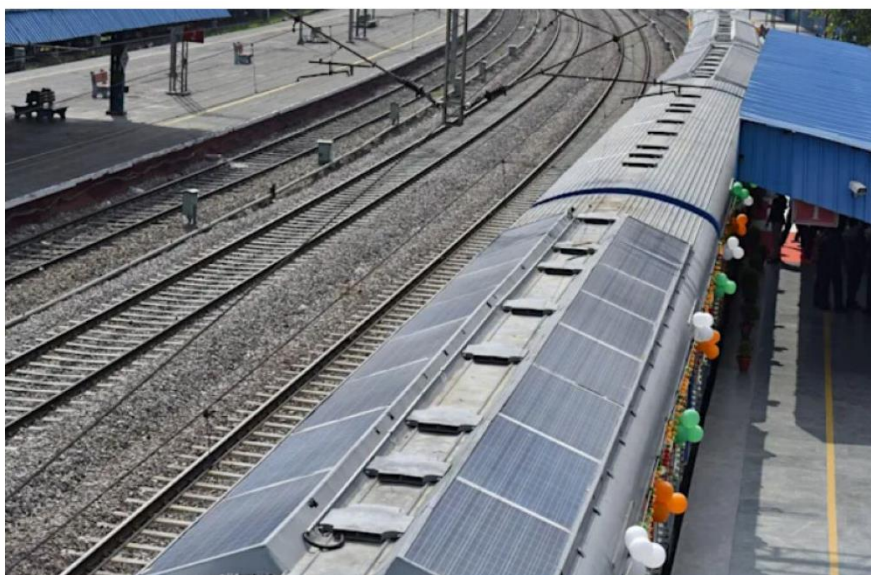
Το **Σχ. 3.3(α)** δείχνει τις ροές ισχύος και τις συνδέσεις της τυπικής μικροπαραγωγής σε ένα κτίριο. Τα ηλιακά πλαίσια (πάνελ) στερεώνονται ή ενσωματώνονται στην οροφή ή σε ανεξάρτητο πλαίσιο κοντά στο κτίριο. Η μικροπαραγόμενη ισχύς συνήθως συνδέεται με την πλευρά χρήστη του μετρητή κοινής ωφέλειας, καθώς οι ιδιοκτήτες επωφελούνται κυρίως από τη χρήση της δικής τους ενέργειας και έτσι τη μείωση της εισαγόμενης (αγορασμένης) ισχύος. Η πλεονάζουσα ισχύς ρέει μακριά από το κτίριο ως εξαγωγή στις γραμμές του δικτύου διανομής κοινής ωφέλειας, για την οποία οι ιδιοκτήτες αναμένουν να πληρωθούν. Στην ευτυχή περίπτωση ότι η πληρωμή ανά μονάδα για εξαγόμενη ισχύ είναι μεγαλύτερη από την τιμή μονάδας της εισαγόμενης ισχύος, η μικροπαραγόμενη ισχύς

θα πρέπει να συνδεθεί στην πλευρά του βοηθητικού μετρητή για να μεγιστοποιηθεί το εισόδημα. Ο συνδυασμός του μετρητή κοινής ωφέλειας και των μετρητών των ιδιοκτητών επιτρέπει τη μέτρηση τουλάχιστον τριών ροών ισχύος: (i) παραγόμενη ισχύς, (ii) εξαγόμενη ισχύς, και (iii) εισαγόμενη ενέργεια. Οι οικονομικές ρυθμίσεις για την εισαγόμενη και την εξαγόμενη ενέργεια (συνήθως αποκαλούμενη «τιμολόγιο τροφοδοσίας») ποικίλλουν ευρέως ανά χώρα και υπηρεσία κοινής ωφέλειας. Σε ορισμένα μέρη, το τιμολόγιο τροφοδοσίας περιλαμβάνει ακόμη και κάποια πίστωση για «μειωμένο άνθρακα» και «καθαρή ισχύ» (Chaurey and Kandpal, 2010).

(a)



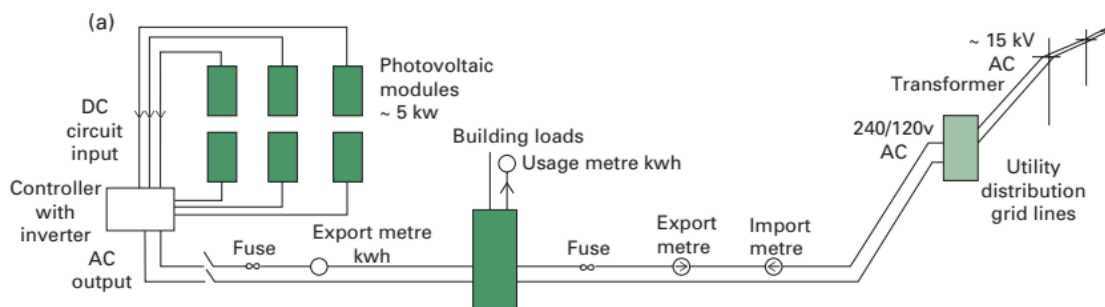
(b)



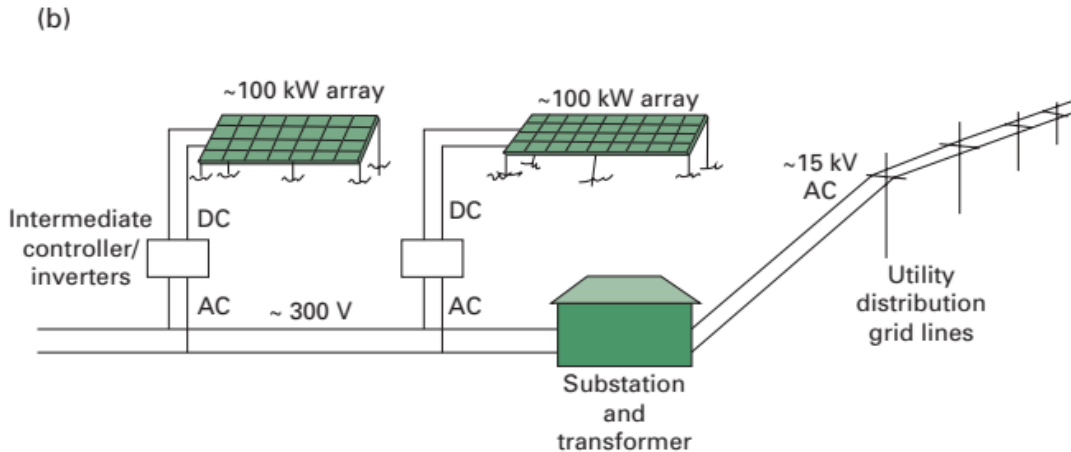
**Εικ. 3.2.** Παραδείγματα φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων συνδεδεμένων στο δίκτυο.

- a) Διαμερίσματα στο Φράμπουργκ, Γερμανία. Φ/Β συστοιχίες 11 μονάδων παρέχουν τόσο σκίαση στα παράθυρα όσο και ηλεκτρισμό σε κάθε διαμέρισμα.
- b) Ένα πρατήριο μεταφορών στην Αυστραλία με Φ/Β στέγη. Φωτογραφία από την ευγενική προσφορά της BP Solar.

Το **Σχ. 3.3(β)** δείχνει τη σύνδεση ενός ηλιακού πάρκου κλίμακας MW (π.χ. αυτό που φαίνεται στο **Σχ. 3.1**) στο δίκτυο διανομής. γενικά δεν υπάρχει κανένα τοπικό φορτίο οποιασδήποτε σημασίας. Οι μονάδες είναι τοποθετημένες εδώ σε πλαίσια σταθερού προσανατολισμού, βελτιστοποιημένα σε κλίση και κατεύθυνση για την τοποθεσία. Ωστόσο, τα ηλιακά πάρκα σε περιοχές χωρίς σύννεφα είναι πιθανό να χρησιμοποιούν πλαίσια παρακολούθησης του ήλιου. Οι γραμμές διασύνδεσης ηλεκτρικού ρεύματος βρίσκονται υπόγεια. Ολόκληρη η περιοχή μπορεί να είναι αρκετά εκτάρια σε έκταση. Οι ενδιάμεσοι μετατροπείς μετατρέπουν την ισχύ συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο ρεύμα (ίσως στα ~500 V) σε γραμμές που οδηγούν σε έναν υποσταθμό όπου οι μετασχηματιστές περνούν την ισχύ στη γραμμή διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στα 15 kV ίσως. Ο υποσταθμός περιλαμβάνει όλα τα μέτρα, τον εξοπλισμό παρακολούθησης και την ηλεκτρική ασφάλεια. Η εποπτεία γίνεται με εξ αποστάσεως ανάκριση της παρακολούθησης και με τακτικές επιθεωρήσεις (Chaurey and Kandpal, 2010).







**Εικ. 3.3.** Σχήματα (όχι διαγράμματα καλωδίωσης) για: (α) φωτοβολταϊκή μικροπαραγωγή ~5 kW συνδεδεμένη στα κυκλώματα ηλεκτρικής ενέργειας ενός κτιρίου με σύνδεση στο δίκτυο, (β) ένα ηλιακό πάρκο μεγάλης χωρητικότητας MW με πολλές αυτόνομες συστοιχίες ~100 kW συνδεδεμένες μέσω μιας τοποθεσίας υποσταθμός σε δίκτυο δικτύου διανομής κοινής ωφέλειας (βλ. επίσης **Εικ. 3.1** για ένα τέτοιο ηλιακό πάρκο).

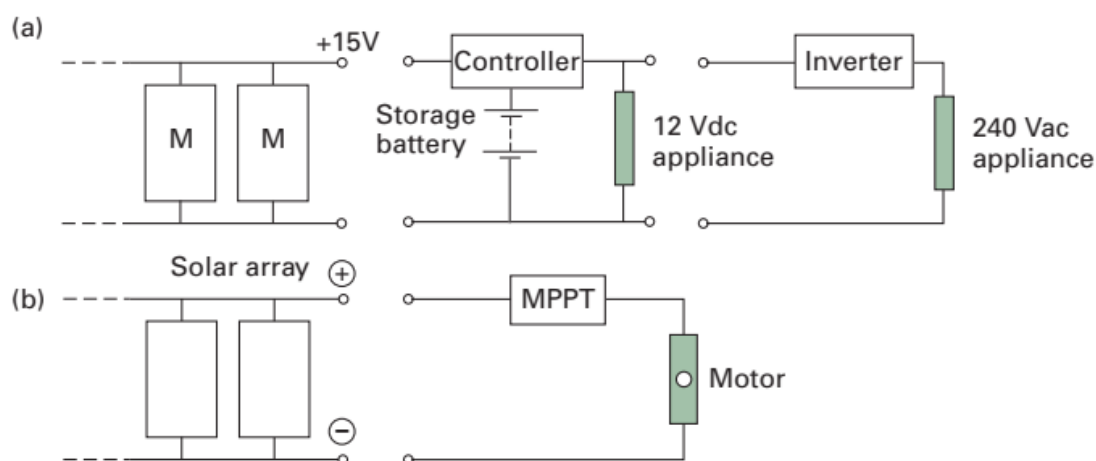
Όλα αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν μετατροπείς για να μετατρέψουν την ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες σε εναλλασσόμενο ρεύμα συμβατό με δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας κοινής ωφέλειας. Οι μετατροπείς που συνδέονται με το δίκτυο (grid-tie) διαφέρουν από τους αυτόνομους μετατροπείς. Χρησιμοποιούν την επικρατούσα συχνότητα τάσης γραμμής στην άμεση γραμμή δικτύου κοινής ωφέλειας ως παράμετρο ελέγχου, έτσι ώστε η έξοδος του φωτοβολταϊκού συστήματος να συγχρονίζεται με το δίκτυο. Η ισχύς εξάγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα όταν η τάση εξόδου του μετατροπέα γίνει μεγαλύτερη από την τάση γραμμής. Αυτό συμβαίνει καθώς η ηλιακή ενέργεια εξαναγκάζεται να εισέλθει στο ηλεκτρικό καλώδιο. Τέτοιοι μετατροπείς «μεταφοράς γραμμής» αποσυνδέονται αυτόματα εάν διακοπεί η παροχή ρεύματος, έτσι ώστε να μην εμφανίζεται απροσδόκητη και δυνητικά επικίνδυνη τάση στη γραμμή δικτύου. Οι ανιχνευτές μέγιστης ισχύος αιχμής (maximum peak power trackers, MPPT) είναι ενσωματωμένοι στους μετατροπείς ως μέρος των μονάδων σύνδεσης/ελέγχου (IEA-PVPS, 2013).

### 3.3. Ισορροπία στοιχείων συστήματος (BoS)

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα είναι πολύ περισσότερα από απλώς τις κυψέλες και τις μονάδες, παρά την πολυπλοκότητά τους. Ο άλλος εξοπλισμός και τα εξαρτήματα στερέωσης ονομάζονται στοιχεία «ισορροπίας συστήματος» (Balance of system, BoS).

(α) BoS για αυτόνομα συστήματα

Το Σχ. 3.4(α) δείχνει σχηματικά πώς η συστοιχία μπορεί να συνδεθεί με ένα φορτίο συνεχούς ρεύματος σε ένα αυτόνομο σύστημα. Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια εμφανίζεται διαμορφωμένη για ονομαστικά «12V» μπαταρίες και φορτία, αλλά είναι δυνατές άλλες διαμορφώσεις τάσης σύμφωνα με την ονομαστική τιμή της συσκευής (π.χ. 24 V). Οι μονάδες και οι συστοιχίες μονάδων έχουν ισοδύναμο κύκλωμα και χαρακτηριστικά I-V, αλλά με αριθμητικές τιμές κατάλληλα κλιμακωμένες.



**Εικ. 3.4.** Σχηματικό διάγραμμα αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

α Ονομαστικά σύστημα συνεχούς ρεύματος 12 V με ελεγκτή φόρτισης μπαταρίας, με πιθανές συσκευές AC 240 V (ή 110 V).

β σύστημα με ανιχνευτή μέγιστης ισχύος αιχμής (MPPT) (Vegaetal., 2018).

Η μέγιστη ισχύς επιτυγχάνεται με τον έλεγχο των V και I ώστε να βρίσκονται στη γραμμή μέγιστης ισχύος, καθώς η λαμβανόμενη ηλιακή ακτινοβολία και η αντίσταση φορτίου ποικίλλουν. Στην πράξη, η θερμοκρασία λειτουργίας συνήθως αυξάνεται με την ακτινοβολία. Αυτό αλλάζει την τάση και το ρεύμα από τα σταθερά χαρακτηριστικά θερμοκρασίας τους. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι ότι η γραμμή τροφοδοσίας αιχμής είναι σχεδόν κάθετη. Η τάση ακροδεκτών μιας ηλεκτρικής



μπαταρίας αποθήκευσης (που περιστασιακά ονομάζεται «συσσωρευτής») παραμένει σχεδόν σταθερή ανεξάρτητα από το ρεύμα φόρτισης, αλλά αυξάνεται με την αύξηση της κατάστασης φόρτισης. Επομένως, ταιριάζοντας τη βέλτιστη τάση της συστοιχίας και την ονομαστική τάση της μπαταρίας, η γραμμή φόρτισης  $V/I$  για φόρτιση της μπαταρίας μπορεί να προσαρμοστεί κοντά στη μέγιστη γραμμή ισχύος της συστοιχίας, εάν δεν έχει ενσωματωθεί ένας πιο εξελιγμένος ελεγκτής. Σε μια τέτοια περίπτωση, η μπαταρία ελέγχει την τάση (Wenhametal., 2011).

Σχεδόν όλα τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα απαιτούν αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας από μπαταρία, προφανώς για φωτισμό τη νύχτα αλλά και για να αντιμετωπίσουν τις υπερτάσεις φορτίου, όπως για τη μετάδοση ραδιοφώνου. Η διάρκεια ζωής και η αξιοπιστία ενός φωτοβολταϊκού συστήματος βελτιώνονται χρησιμοποιώντας μια ειδικά σχεδιασμένη «ηλιακή μπαταρία» βαθιάς εκφόρτισης και όχι μπαταρία οχήματος. Ένας ελεγκτής παρέχει τον καθορισμένο μέγιστο ρυθμό φόρτισης και βάθος εκφόρτισης και είναι σχεδόν απαραίτητος για αξιόπιστη λειτουργία. Ακόμη και με έναν ελεγκτή, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι συνήθως μόνο τρία έως έξι χρόνια – πολύ μικρότερη από τη διάρκεια ζωής της μονάδας και συχνά μικρότερη από ό,τι υπονοούν οι σχεδιαστές του συστήματος. Ο ελεγκτής μπορεί να ενσωματώνει έναν ανιχνευτή μέγιστης ισχύος αιχμής (MPPT) σε μία μονάδα.

Τα ηλεκτρικά φορτία δεν μπορούν να ρυθμίσουν άμεσα την τάση και το ρεύμα, όπως και μια μπαταρία. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται ένας ενδιάμεσος ελεγκτής για τον διαχωρισμό (αποσύνδεση) της βελτιστοποίησης τάσης και ρεύματος της Φ/Β γεννήτριας από την απαίτηση τάσης του φορτίου. Ο ελεγκτής μπορεί να ενσωματώνει ένα ηλεκτρονικό MPPT έτσι ώστε η τάση και το ρεύμα συνεχούς ρεύματος από τη συστοιχία να ελέγχονται έτσι ώστε να παράγεται μέγιστη ισχύς καθώς αλλάζει η ηλιακή ακτινοβολία. Τα MPPT είναι συχνά ενσωματωμένα σε αυτόνομα συστήματα ηλιακής άντλησης με ονόματα όπως «μεγιστοποιητής» ή «γραμμικός ενισχυτής ρεύματος» και μπορούν να επιτρέψουν στο 95% της μέγιστης απόδοσης να φτάσει στην αντλία νερού υπό διαφορετικές ηλιακές συνθήκες.

Για τη λειτουργία συσκευών εναλλασσόμενου ρεύματος (240 V/50 Hz ή 110 V/60 Hz) από παροχή DC PV απαιτείται ένας μετατροπέας. Ένας αυτόνομος μετατροπέας χρησιμοποιεί μια εσωτερική γεννήτρια συχνότητας και ένα κύκλωμα μεταγωγής για να μετατρέψει την ισχύ συνεχούς ρεύματος χαμηλής τάσης σε εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλότερης τάσης. Το σχήμα της κυματομορφής AC μπορεί να είναι ένα τετράγωνο

κύμα (φθηνός μετατροπέας) ή ένα σχεδόν καθαρό ημιτονοειδές κύμα (εξελιγμένος ηλεκτρονικός μετατροπέας στερεάς κατάστασης). Ο μετατροπέας πρέπει να έχει μέγεθος για τα ρεύματα υπέρτασης που σχετίζονται με την εκκίνηση του κινητήρα (εάν υπάρχει), αλλά όχι τόσο μεγάλο ώστε να λειτουργεί κανονικά σε ένα μικρό κλάσμα της ονομαστικής του ισχύος (ας πούμε, <15%) και επομένως με χαμηλή απόδοση (<85%). Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς στερεάς κατάστασης διατίθενται στο εμπόριο με εξαιρετική αξιοπιστία και απόδοση 95% έως 99% σε λογικό κόστος (Weir and Prasad, 2012).

#### (β) BoS για Φ/B συνδεδεμένα στο δίκτυο

Για τη μικροπαραγωγή σε κτίρια, εκτός από τις στερέωση και την καλωδίωση, η ισορροπία του εξοπλισμού του συστήματος αποτελείται από μια μονάδα ελέγχου για τη σύνδεση με τις γραμμές παροχής ρεύματος, επιπλέον μετρητή, ασφάλειες και διακόπτες ασφαλείας. Η μονάδα ελέγχου περιλαμβάνει συνήθως έναν ή περισσότερους μετατροπείς για τη μετατροπή του Φ/B DC στο AC του ηλεκτρικού ρεύματος του κτιρίου, το οποίο με τη σειρά του συνδέεται με τις τοπικές γραμμές τροφοδοσίας στα 110V/60 Hz ή 240 V/50 Hz. Ο μετατροπέας είναι πάντα «συνδεδεμένος στο δίκτυο» έτσι ώστε η έξοδός του να διατηρεί συγχρονισμό με την ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου. Εάν η τροφοδοσία δικτύου αποτύχει, τότε ο μετατροπέας διακόπτεται αμέσως, αλλά διακόπτεται αυτόματα όταν επιστρέψει η παροχή δικτύου. Οι ιδιοκτήτες μπορούν να προσθέσουν επιπλέον εξοπλισμό παρακολούθησης για αρχεία απόδοσης και για πληροφορίες για τη χρήση της επιτόπιας ισχύος (Weir and Prasad, 2012). Τα καλύμματα των μονάδων μπορεί να απαιτούν καθαρισμό, ειδικά σε ξηρά περιβάλλοντα, αλλά τα καλύμματα από «αυτοκαθαριζόμενα γυαλιά» συσσωρεύουν λιγότερα ιζήματα και αυτοκαθαρίζονται στη βροχή.

Το λεγόμενο «αυτοκαθαριζόμενο» γυαλί χρησιμοποιείται για το μπροστινό κεκλιμένο κάλυμμα πολλών μονάδων. Κατασκευάζεται με μια μονοστιβάδα ~25 nm διοξειδίου του τιτανίου (TiO<sub>2</sub>) στην επιφάνειά του που βλέπει προς τα έξω που έχει δύο ευεργετικά αποτελέσματα για τη χαλάρωση της οργανικής βρωμιάς και της σκόνης: (1) ένα καταλυτικό αποτέλεσμα που αποσυνθέτει την οργανική βρωμιά στην ηλιακή υπεριώδη ακτινοβολία (φωτοκατάλυση) και (2) μείωση της επιφανειακής τάσης και της γωνίας επιφανειακής επαφής του νερού στο κάλυμμα (υδροφιλικό φαινόμενο) που επιτρέπει στη βροχή ή το νερό του σωλήνα να τρέξει ως φύλλο,

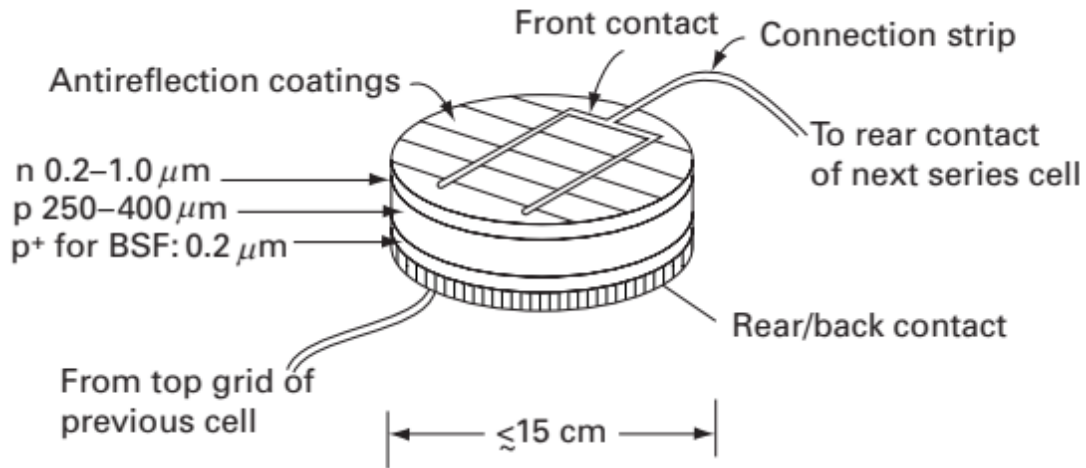
απομακρύνοντας έτσι την αποσυντιθέμενη βρωμιά. Η διαδικασία αναπτύχθηκε και κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από την PilkingtonGlass.

#### **4. Μεγιστοποίηση της απόδοσης κυψέλης (κύτταρα Si)**

Η απόδοση και η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας των φωτοβολταϊκών κυψελών βελτιώνονται συνεχώς με την έρευνα, την ανάπτυξη και την κατασκευαστική τεχνογνωσία, αλλά οι πολλές μεταβλητές και οι τύποι κυψελών κάνουν το θέμα εξαιρετικά περίπλοκο. Σε αυτήν την ενότητα, εξηγούμε κυρίως βασικές πτυχές της κυρίαρχης μορφής των κυψελών Si.

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα έχουν περιορισμένη απόδοση από πολλές απώλειες. Μερικά από αυτά μπορούν να αποφευχθούν, αλλά άλλα είναι εγγενή στο σύστημα. Ορισμένα όρια είναι προφανή και μπορεί να ελέγχονται ανεξάρτητα, αλλά άλλα είναι πολύπλοκα και δεν μπορούν να ελεγχθούν χωρίς να παράγουν αλληλένδετα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, η αύξηση της συγκέντρωσης προσμίξεων μπορεί να έχει τόσο ευεργετικά όσο και επιβλαβή αποτελέσματα. Ο **Πίνακας 4.1** απεικονίζει τυπικές απώλειες για εμπορικά ηλιακά κύτταρα μονοκρυσταλλικών κυψελών σύνδεσης Si<sub>p</sub>-n σε ακτινοβολία AM1, που λαμβάνονται με σειρά από την κορυφή της κυψέλης προς τα κάτω (βλ. **Εικ. 4.1**). Δυστυχώς δεν υπάρχει τυπική σύμβαση για τα ονόματα των παραγόντων απώλειας, τα οποία θα εξεταστούν αργότερα.

Σημειώνεται ότι οι πιο σημαντικές απώλειες είναι η εγγενής αναντιστοιχία του ηλιακού φάσματος με το χάσμα ζώνης μιας στρώσης. Μια στρατηγική για τη μείωση αυτών των απωλειών είναι η ύπαρξη συσκευών πολλαπλών επιπέδων (ετεροσύνδεσης) με στρώματα που ταιριάζουν σε διαφορετικές περιοχές του ηλιακού φάσματος. Τέτοιες βελτιώσεις της απόδοσης συνήθως επιτρέπουν στο στοιχείο να είναι λεπτό, σε πάχος ~ 2 mm αντί για ~ 200 mm, μειώνοντας έτσι την ποσότητα του ακριβού υλικού και επομένως το κόστος της κυψέλης και την ισχύ εξόδου της (Loos and vanHemert, 1999).



**Εικ. 4.1.** Βασική δομή ηλιακού κυττάρου σύνδεσης p-n. Δεν φαίνεται το κάλυμμα (γυάλινο ή μερικές φορές πλαστικό) πάνω από το στοιχείο και το πληρωτικό μεταξύ του καλύμματος και του στοιχείου. BSF: πεδίο πίσω επιφάνειας (Vegaetal., 2018).

Η ισορροπία μεταξύ κόστους, πολυπλοκότητας και απόδοσης είναι μια λεπτή γραμμή τόσο για τους κατασκευαστές όσο και για τους χρήστες ηλιακών κυψελών. Πράγματι, η μείωση του κόστους (\$/Watt) της φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένας σημαντικός μοχλός για την ανάπτυξη πολλών μορφών φωτοβολταϊκών κυψελών εκτός του κρυσταλλικού Si.

Γενικά, η μεγαλύτερη απόδοση κυψέλης επιτρέπει σε συστοιχίες δεδομένης συνολικής ισχύος να έχουν μικρότερη επιφάνεια με μικρότερο κόστος ενθυλάκωσης, μεταφοράς και εγκατάστασης. Συνεπώς, η αυξημένη απόδοση είναι ένας σημαντικός παράγοντας, αλλά όχι με μεγάλο κόστος. Υπάρχουν μερικές εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως οι ηλιακοί αγώνες αυτοκινήτων ή τα διαστημικά ταξίδια, όπου οι χρήστες αναζητούν τη μεγαλύτερη απόδοση με επαρκή αντοχή, σχεδόν ανεξάρτητα από το κόστος. Στην πράξη, ο κυρίαρχος παράγοντας που παρέχει προϊόντα χαμηλότερου κόστους είναι η αυξημένη και αυτοματοποιημένη παραγωγική ικανότητα, λόγω της ισχυρής και αυξανόμενης ζήτησης. Επιπλέον, η συμμόρφωση με τα διεθνή πρότυπα δοκιμών και πιστοποίησης παρέχει βελτιωμένη ποιότητα και ικανοποίηση των καταναλωτών.

Στις επόμενες υποενότητες εξετάζουμε ένα βασικό ηλιακό στοιχείο Si μονής στρώσης, το οποίο εξακολουθεί να είναι το κυρίαρχο υλικό εμπορικά. Οι απώλειες υποδεικνύονται ως ένα κατά προσέγγιση ποσοστό της ηλιοφάνειας σε αυτό το στάδιο, αρχικά AM1 = 100%. Τα αποτελέσματα περιγράφονται με σειρά από την κορυφή έως

τη βάση της κυψέλης, όπου οι συντελεστές απόδοσης υποδεικνύουν την αναλογία της υπολειπόμενης ακτινοβολίας που απορροφάται χρήσιμα σε αυτό το στάδιο στη φωτοβολταϊκή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ορισμένες απώλειες είναι εγγενείς (δεν μπορούν να αποφευχθούν) και ορισμένες απώλειες μπορεί να μειωθούν από την ανώτερη κατασκευή. Μέχρι το 2013, τα καλύτερα εργαστηριακά κύτταρα Si μονής στιβάδας «πρωταθλήτριες» έφτασαν σε απόδοση περίπου 25% και τα καλύτερα εμπορικά κύτταρα περίπου 20%.

#### **4.1. Περιοχή απόφραξης ηλεκτρικής επαφής άνω επιφάνειας (εσωτερική απώλεια ~3%)**

Το ηλεκτρικό ρεύμα φεύγει από την επάνω επιφάνεια με ένα πλέγμα μεταλλικών επαφών που είναι διατεταγμένες για να μειώνουν τις απώλειες σε σειρά αντίστασης στην επιφάνεια. Οι επαφές σχηματίζονται συνήθως με μια διαδικασία μεταξοτυπίας, όπως για τις μικροηλεκτρονικές συσκευές. Η διαδικασία είναι κατ' αρχήν παρόμοια με εκείνη που χρησιμοποιείται για την εκτύπωση υφασμάτων και εικόνων. Αυτές οι επαφές έχουν μια πεπερασμένη επιφάνεια κορυφής και έτσι καλύπτουν μέρος της κατά τα άλλα ενεργής επιφάνειας. Αυτή η απώλεια επιφάνειας δεν λαμβάνεται πάντα υπόψη στους υπολογισμούς της απόδοσης. Οι αυλακώσεις κοπής με λέιζερ στις οποίες τοποθετούνται οι ηλεκτρικές επαφές επιτρέπουν τη μείωση της επιφανειακής απόφραξης ενώ έχουν επαρκή ηλεκτρική επαφή.

**Πίνακας 4.1.** Κατά προσέγγιση όρια απόδοσης σε μονοστρωματικά (homo-junction) κρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα Si (Soley and Dwivedi, 2019).

<i>Cause of loss</i>	<i>Power loss/gain (approximate) %</i>	<i>Incremental efficiency change per process</i>	<i>Energy remaining %</i>
Top contact obstruction	-3	0.97	97
Top surface reflection with antireflection film in place	-3	0.97	94
Rear surface reflection	+3	1.03	97
No photovoltaic absorption: $h\nu < E_g$	-23	0.77	75
Excess photon energy lost as heat: $h\nu > E_g$	-33	0.67	50
Capture efficiency	-0.1	0.99	49
Collection efficiency	-10	0.90	44
Voltage factor $eV_B < E_g$	-20	0.8	35
Fill factor = (max. power) / $I_{sc} V_{oc}$	-12	0.88	31
Ideality factor $A$ , recombination losses	-5	0.95	29
Series resistance	0.3	0.97	26
Shunt resistance	0.1	0.99	25
Delivered power			25

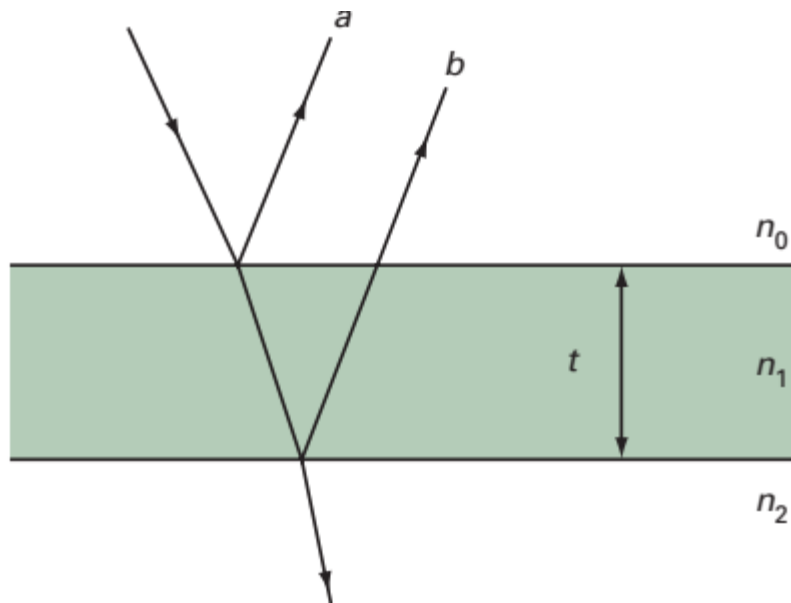
#### 4.2. Οπτικές απώλειες, πάνω και πίσω επιφάνειες

(α) Μείωση ανάκλασης στην επάνω επιφάνεια (απώλεια ~3%)

Χωρίς ειδικές προφυλάξεις, η ανάκλαση της άνω επιφάνειας από τους ημιαγωγούς είναι μεγάλη, περίπου στο 40% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Ευτυχώς αυτό μπορεί να μειωθεί δραματικά με την επεξεργασία της επιφάνειας λεπτής μεμβράνης (π.χ. με το πάχος της μεμβράνης ελεγχόμενο για την παραγωγή εποικοδομητικής παρεμβολής των ανακλώμενων δεσμών: **Εικ. 4.2**). Θεωρούμε τρία χαρακτηριστικά του προβλήματος (Wenhametal., 2011).

Χαρακτηριστικό 1: συνήθης ανάκλαση επιφάνειας. Για την ένταση του προβληματισμού, θεωρούμε τρία υλικά (αέρας, κάλυμμα, ημιαγωγός) με δείκτη διάθλασης  $n_0$ ,  $n_1$  και  $n_2$ . Για τα διηλεκτρικά ηλεκτρικά μονωτικά υλικά, η ανάκλαση στη διεπαφή αέρα/καλύμματος, η πρώτη είναι:

$$\rho_{refl} = \frac{(n_0 - n_1)^2}{(n_0 + n_1)^2}. \quad (4.1)$$



**Εικ. 4.2.** Αντιανακλαστική λεπτή μεμβράνη

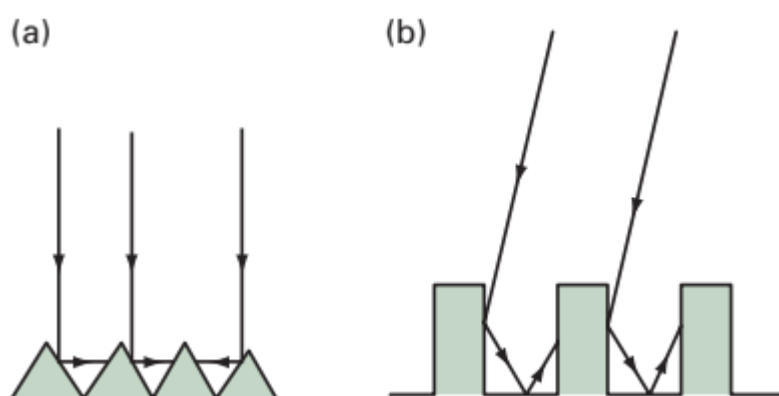
Για παράδειγμα, χωρίς παρεμβολές, για αέρα ( $n_0 = 1$ ) προς πλαστικό (π.χ.,  $n_1 = 1.6$ ), δίνει  $\rho_{refl} = \frac{0.36}{6.76} = 5.3\%$ . Για τον αέρα προς το Si, η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη καθώς οι ημιαγωγοί έχουν δείκτη διάθλασης που αντιπροσωπεύεται από έναν μιγαδικό αριθμό, καθώς είναι εν μέρει αγωγάμοι. Η ανάκλαση Si εξαρτάται επομένως από τη συχνότητα και ποικίλλει σε μέγεθος στο ενεργό φάσμα, με μέσο όρο μέγεθος περίπου  $n_2 \approx 3.5$  για το Si. Χωρίς κάλυμμα λεπτής μεμβράνης, η αντικατάσταση στο (5.6) δίνει 31% ανάκλαση Si στον αέρα, η οποία είναι πολύ μεγάλη.

Χαρακτηριστικό 2: καταστροφικές παρεμβολές. Το **Σχ. 4.2** εξηγεί πώς ένα λεπτό φιλμ μειώνει την ανάκλαση εάν τα κύρια ανακλώμενα συστατικά a και b είναι (i) ίσης έντασης και (ii) διαφέρουν στη φάση κατά  $\pi$  ακτίνια ( $1/2$  διαφορά διαδρομής). Για να είναι ίση η ανάκλαση σε κάθε επιφάνεια,  $n_1 = \sqrt{n_0 n_2}$  και για την παρεμβολή το πάχος του φιλμ πρέπει να είναι  $t = \frac{1}{4n_1}$ . Υπάρχει μόνο ένα μήκος κύματος για το οποίο αυτή η προϋπόθεση πληρούται ακριβώς. Ωστόσο, στο ηλιακό φάσμα η ευρυζωνική ανάκλαση είναι σημαντική με κάλυψη λεπτής μεμβράνης  $n_1 = 1.9$ , πάχος  $t = 0,08$  mm, για την οποία η ευρυζωνική ανάκλαση του «σάντουιτς» μειώνεται στο  $\sim 6\%$ . Πολλαπλές λεπτές στρώσεις μπορούν να μειώσουν την ευρυζωνική ανάκλαση σε  $< 3\%$  (Greenatal, 2012).

Χαρακτηριστικό 3: υφή. Μια άλλη μέθοδος για τη μείωση των απωλειών ανάκλασης της επάνω επιφάνειας χρησιμοποιεί γεωμετρικές διαμορφώσεις, υφή, που αντικατοπτρίζουν τη δέσμη για μια δεύτερη ευκαιρία απορρόφησης (βλ. σκιαγραφικά διαγράμματα και λεζάντες στο **Σχ. 4.3(α)** και **(β)**).

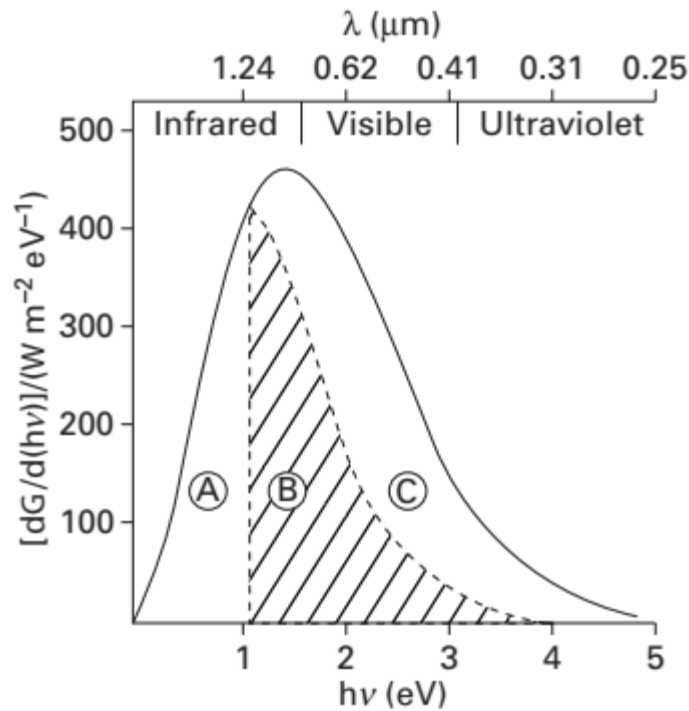
(β) Ανάκλαση πίσω επιφάνειας και παγίδευση φωτός

Τα φωτόνια που διέρχονται από το στρώμα ημιαγωγών χωρίς απορρόφηση μπορούν να ανακληθούν πίσω από την πίσω επιφάνεια για ένα δεύτερο πέρασμα. Αυτό επιτρέπει στο στρώμα ημιαγωγών να είναι λεπτότερο και μειώνει το κόστος υλικού. Εάν αυτή η οπίσθια ανάκλαση είναι ανομοιόμορφη, τότε μεγάλο μέρος της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας παγιδεύεται από τυχαία εσωτερική ανάκλαση από την επάνω επιφάνεια.



**Εικ. 4.3.** Επάνω επιφάνειες για αυξημένη απορρόφηση μετά την αρχική ανάκλαση. κλίμακα από 10 έως 100 nm: (α) εξιδανικευμένο σχήμα με υφή (π.χ. με χημική χάραξη), (β) δομημένο σχήμα (π.χ. με μηχανική κατεργασία λείζερ).





**Εικ. 4.4.** Ενδεικτική γραφική παράσταση της ηλιακής φασματικής ακτινοβολίας έναντι της ενέργειας φωτονίων για την απεικόνιση της απορρόφησης φωτονίων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλιακά κύτταρα Si μονής επαφής. Σημειώστε τις τρεις περιοχές στο διάγραμμα:

- A. Τα φωτόνια έχουν ενέργεια  $h_\nu$  μικρότερη από το διάκενο ζώνης  $E_g$  και δεν απορροφώνται.
- B. Αντιπροσωπεύει την αναλογία της φασματικής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.
- C. Αντιπροσωπεύει την αναλογία της φασματικής ακτινοβολίας που διαχέεται ως θερμότητα μέσα στο υλικό επειδή  $h_\nu > E_g$  (Vegaetal., 2018).

#### 4.3. Ενέργεια φωτονίων μικρότερη από το χάσμα ζώνης (απώλεια ~23%)

Τα φωτόνια κβαντικής ενέργειας  $h_\nu < E_g$  δεν μπορούν να συνεισφέρουν άμεσα στην παραγωγή φωτοβολταϊκού ρεύματος. Για Si ( $E_g \approx 1.1$  eV) τέτοια ανενεργά μήκη κύματος έχουν  $\lambda > 1.1$  μm και περιλαμβάνουν το 23% της ακτινοβολίας AM1. Εάν αυτά τα φωτόνια μεγαλύτερου μήκους κύματος (κάτω από τη συχνότητα κατωφλίου) απορροφηθούν στη συσκευή, λαμβάνει χώρα θέρμανση με αύξηση της θερμοκρασίας που μειώνει την παραγωγή ισχύος από τα ενεργά φωτόνια μικρότερου μήκους κύματος. Οι στρατηγικές για να ξεπεραστεί αυτή η αναποτελεσματικότητα περιλαμβάνουν: (i) την αφαίρεση των φωτονίων μεγάλου μήκους κύματος της

προσπίπτουσας δέσμης με φίλτρα (απίθανο να είναι μια πρακτική λύση). (ii) χρήση της θερμότητας σε ένα συνδυασμένο σύστημα ηλιακής θερμότητας και φωτοβολταϊκού (λογικό, αλλά όχι κοινό) και (iii) φωτοχημική «επάνω μετατροπή», όπου ομάδες πολλών φωτονίων μεγαλύτερου μήκους κύματος συνδυάζονται σε ένα φωτοχημικό υπόστρωμα για να εκπέμπουν ένα μικρότερου μήκους κύματος ενεργό φωτόνιο (έρευνα) (Knapp and Jester, 2001).

#### 4.4. Υπερβολική ενέργεια φωτονίων (απώλεια ~33%)

Ηπερίσσεια ενέργειας των ενεργών φωτονίων ( $h\nu - E_g$ ) εμφανίζεται επίσης ως θερμότητα.

#### 4.5. Αποδοτικότητα λήψης (απώλεια ~0,4%)

Τα φωτόνια με ενεργειακά κβάντα  $h\nu > E_g$  θα πρέπει να παράγουν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, δημιουργώντας έτσι το ρεύμα της συσκευής. Το κλάσμα αυτών των «ενεργών» φωτονίων που παράγουν ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών είναι η «αποτελεσματικότητα σύλληψης», η οποία συνήθως πλησιάζει το 100%, επειδή είτε (i) το πάχος του ημιαγωγού είναι επαρκές για απορρόφηση με ένα πέρασμα, είτε (ii) ανακλαστικά στρώματα στο πίσω μέρος του κυττάρου επιστρέφει τη μεταδιδόμενη ακτινοβολία για ένα δευτερόλεπτο ή περισσότερα περάσματα. Αυτό το τελευταίο είναι παγίδευση φωτός, όπως σε κυψέλες πυριτίου με λεπτό τοίχωμα που εναποτίθενται σε γυάλινο υπόστρωμα στήριξης.

#### 4.6. Αποτελεσματικότητα συλλογής

Η αποτελεσματικότητα της συλλογής είναι ένας ασαφής όρος που χρησιμοποιείται με διάφορους τρόπους από διαφορετικούς συγγραφείς. Μπορεί να εφαρμοστεί για να συμπεριλάβει τις απώλειες που περιγράφονται στις **Παραγράφους 4.3** και **4.4** ή συνήθως, όπως εδώ, στην ηλεκτρική συλλογή φορτίων μετά την παραγωγή φορέα. Ως εκ τούτου, η απόδοση συλλογής ορίζεται ως η αναλογία των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών που παράγονται από ακτινοβολία που παράγουν ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα. Για κελιά συνολικής απόδοσης 10%, η απόδοση συλλογής είναι συνήθως περίπου 0,7, αλλά 0,9 για 20% αποδοτικά κύτταρα. Επομένως, η βελτίωση της απόδοσης της συλλογής είναι ένας σημαντικός στόχος σχεδιασμού.

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του συλλέκτη. Μια βελτίωση είναι το πίσω επιφανειακό πεδίο (backsurfacefield, BSF). Ένα στρώμα αυξημένης συγκέντρωσης ρύπανσης σχηματίζεται ως ένα περαιτέρω στρώμα πέρα από την επαφή p-n (π.χ. 1 mm p+ στο p για να παραχθεί μια περαιτέρω επαφή ~200 kV m<sup>-1</sup>. Το στρώμα p κοντά σε αυτήν την περιοχή p+ 'αντανακλάται' προς τα κάτω από μια κλίση δυναμικού προς τα πίσω προς την κύρια επαφή p-n αντί προς τα επάνω από την κλίση προς την πίσω μεταλλική επαφή. Συνεπώς, ο ανασυνδυασμός ηλεκτρονίων – οπών στην πίσω επαφή μειώνεται.

Παρόμοια στρώματα που μοιάζουν με δίοδο, που παρουσιάζονται εδώ ως κύτταρο n σε p, μπορούν να προστεθούν στην μπροστινή επιφάνεια (π.χ. n+ σε n) για να παράγουν το ίδιο όφελος για τη μείωση του ανασυνδυασμού των φορέων μειοψηφίας, υπό την προϋπόθεση ότι η οπτική απορρόφηση δεν είναι σημαντική. αυτό το αποτέλεσμα ονομάζεται παθητικότητα. Κάτω από τις μεταλλικές επαφές της μπροστινής επιφάνειας, ακόμη πιο έντονα κολλημένες περιοχές (π.χ. n++) μειώνουν τον ανασυνδυασμό και μειώνουν την αντίσταση επαφής (European Photovoltaic Industry Association, 2012).

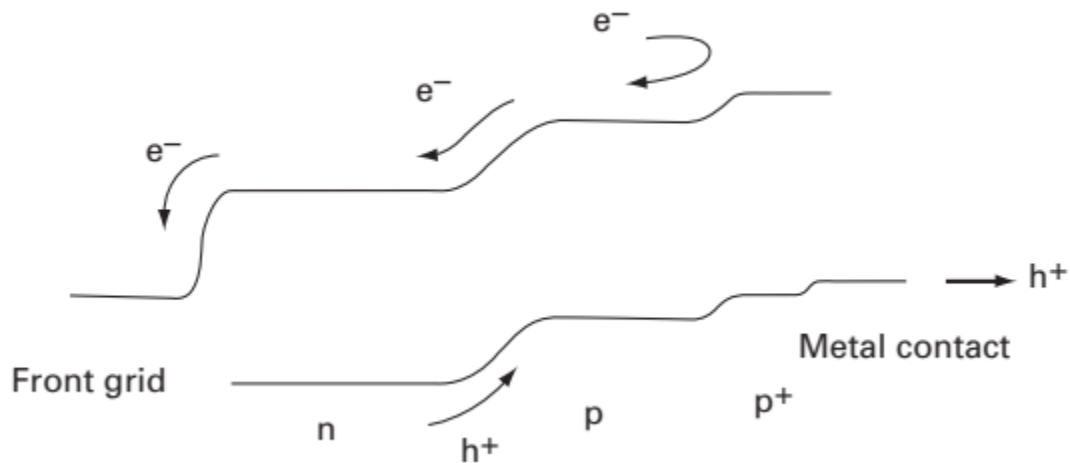
#### 4.7. Συντελεστής τάσης $F_v$ (απώλεια ~20%)

Κάθε απορροφούμενο φωτόνιο παράγει ζεύγη ηλεκτρονίων – οπών με διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού  $\frac{E_g}{e}$  (1.1 V σε Si). Ωστόσο, μόνο μέρος ( $V_B$ ) αυτού του δυναμικού είναι διαθέσιμο για το EMF ενός εξωτερικού κυκλώματος, όπου η μετατόπιση των ζωνών κατά μήκος της επαφής σε ένα ανοιχτό κύκλωμα παράγει το δυναμικό ζώνης  $V_B$ . Ο συντελεστής τάσης είναι  $F_v = \frac{eV_B}{E_g}$ . Για το Si, το  $F_v$  κυμαίνεται από ~0,6 (για υλικό 0,01 Wm) έως ~0,5 (για υλικό 0,1 W m), άρα στο Si  $V_B \approx 0.66 V$  έως 0,55 V. Στο GaAs, το  $F_v$  είναι ~0,8.

Το EMF που λείπει ( $\varphi_n + \varphi_p$ ) συμβαίνει επειδή σε ένα ανοιχτό κύκλωμα το επίπεδο Fermi κατά μήκος της επαφής ισοδυναμεί με τα επίπεδα πρόσμιξης n και p και όχι στα μετατοπισμένα επίπεδα ζώνης αγωγιμότητας προς σθένος.

Η αυξημένη συγκέντρωση προσμίξεων αυξάνει το  $F_v$  (0,01  $\Omega m$  Si έχει μεγαλύτερη  $V_B$  και  $V_{oc}$  από 0,1  $\Omega m$  Si), αλλά άλλες επιδράσεις περιορίζουν τις μέγιστες συγκεντρώσεις προσμίξεων στο Si σε  $\sim 10^{22} m^{-3}$  υλικών 0,01  $\Omega m$ . Κατά την παραγωγή ρεύματος υπό φορτίο, η κίνηση των φορέων υπό μπροστινή πόλωση

παράγει θερμότητα ως θέρμανση εσωτερικής αντίστασης αντίστασης. Αυτό μπορεί να συμπεριληφθεί ως απώλεια συντελεστή τάσης, ή, όπως εδώ, με θέρμανση σε σειρά αντίστασης (Green, 2001).



**Εικ. 4.5.** Τα επίπεδα ενέργειας σε μια κυψέλη με «πεδίο οπίσθιας επιφάνειας» (BSF) που υποδεικνύεται ως p<sup>+</sup> στην πίσω μεταλλική επαφή. Αυτό το επιπλέον στρώμα μειώνει τη διαρροή διάχυσης των φορέων ρεύματος ηλεκτρονίων στο πίσω μέρος των κυψελών, που φαίνεται εδώ ως κύτταρο «n on p» (Vegaetal., 2018).

#### 4.8. Συντελεστής πλήρωσης (συντελεστής καμπύλης) $F_c$ (εγγενής απώλεια ~12%)

Η μέγιστη ισχύς που παράγεται από μια κυψέλη δεν είναι το προϊόν  $I_{sc}V_{oc}$ , αλλά η μικρότερη ποσότητα  $P_{max}$  στο σημείο μέγιστης ισχύος. Αυτό συμβαίνει επειδή το χαρακτηριστικό I-V επηρεάζεται έντονα από το χαρακτηριστικό πόλωσης της διόδου p-n. Έτσι, καθώς η τάση εξόδου της ηλιακής κυψέλης αυξάνεται προς το  $V_{oc}$ , η διόδος πολώνεται όλο και περισσότερο προς τα εμπρός, αυξάνοντας έτσι το ρεύμα εσωτερικού ανασυνδυασμού  $I_r$  κατά μήκος της επαφής. Αυτή η απαραίτητη συμπεριφορά αντιμετωπίζεται ως θεμελιώδης απώλεια στο σύστημα, μετρούμενη από τον παράγοντα πλήρωσης:

$$F = \frac{P_{max}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (5.7)$$

Η μέγιστη τιμή του  $F$  στο Si είναι 0,88.

#### 4.9. Παράγοντας ιδεατότητας $A$ (απώλεια ~5%)

Στην πράξη, το χαρακτηριστικό στοιχείου δεν ακολουθεί ακριβώς την εξίσωση που προέρχεται από τις ιδιότητες της διόδου:

$$I = I_L - I_0[\exp(eV/AkT) - 1], \quad (5.8)$$

όπου εδώ το  $I_L$ , και επομένως το  $I$ , θεωρείται θετικό για το Φ/Β κύτταρο. Ο παράγοντας ιδανικότητας  $A$  (>2 για πολλές εμπορικές κυψέλες) επιτρέπει την απώλεια ανασυνδυασμού ηλεκτρονίου-οπής στην επαφή. Αυτό το φαινόμενο τείνει επίσης να αλλάζει το  $V_{oc}$  και το  $I_0$ , επομένως γενικά η βέλτιστη έξοδος θα συμβεί μόνο εάν  $A = 1$ . Ανεπιθύμητος ανασυνδυασμός ηλεκτρονίου-οπής έχει ήδη αναφερθεί για το πεδίο πίσω επιφάνειας (Green, 2006). Μέσα στο κύτταρο, ο ανασυνδυασμός μειώνεται εάν:

- 1) Οι διαδρομές διάχυσης είναι μεγάλες (σε Si από ~50 έως ~100 nm). Αυτό απαιτεί μεγάλη διάρκεια ζωής του φορέα μειοψηφίας (σε Si έως 100 ns).
- 2) Η επαφή βρίσκεται κοντά στην επάνω επιφάνεια (εντός 0,15 nm, αντί 0,35 nm όπως στα κανονικά κύτταρα Si).
- 3) Το υλικό έχει λίγα ελαττώματα εκτός από την πρόσμιξη.

Τα φαινόμενα ανασυνδυασμού επιφανειών έχουν επιρροή λόγω των ελαττωμάτων και των ατελειών που εμφανίζονται κατά τον τεμαχισμό των κρυστάλλων ή την εναπόθεση υλικού.

#### 4.10. Αντίσταση σειράς (απώλεια ~0,3%)

Το ρεύμα των ηλιακών κυψελών περνά μέσα από το χύμα υλικό στις μπροστινές και πίσω επαφές. Η πίσω περιοχή επαφής μπορεί να καλύψει ολόκληρη την κυψέλη και η συμβολή της στη σειρά «ωμική» αντίσταση είναι πολύ μικρή. Ωστόσο, η επάνω επιφάνεια θα πρέπει να εκτίθεται στη μέγιστη ποσότητα φωτός με την επιφάνεια επαφής της κορυφής ελαχιστοποιημένη, προκαλώντας έτσι σχετικά μεγάλα μήκη διαδρομής ρεύματος με σημαντική αντίσταση σε σειρά. Έχουν γίνει βελτιώσεις στις μπροστινές επαφές (π.χ. έχοντας στενά κανάλια κοπής με λέιζερ μέσα στα οποία μπορούν να σχηματιστούν επαφές) και με τη διευθέτηση της διάταξης των επαφών ώστε να ελαχιστοποιείται η αντίσταση στα ~0,1 W σε μια αντίσταση κυψέλης ~20 W σε μέγιστη ισχύ.

#### **4.11. Αντίσταση διακλάδωσης (αμελητέα απώλεια ~0,1%)**

Η αντίσταση διακλάδωσης παράλληλα με την αντίσταση όγκου προκαλείται από δομικά ελαττώματα σε όλη την επιφάνεια και στην άκρη της κυψέλης. Η βελτιωμένη τεχνολογία τα έχει μειώσει σε αμελητέα αποτελέσματα, επομένως η αντίσταση διακλάδωσης μπορεί να θεωρηθεί άπειρη σε μονοκρυσταλλικά κύτταρα Si. Ωστόσο, αυτό μπορεί να μην συμβαίνει στα πολυκρυσταλλικά κύτταρα.

#### **4.12. Παρεχόμενη ισχύς**

Για «υψηλής απόδοσης» κρυσταλλικά κύτταρα Si, μετά τις απώλειες που αναφέρονται στις παραπάνω ενότητες, ο **Πίνακας 4.1** υπολογίζει την ποσοστιαία ισχύ ως 25% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό προϋποθέτει τη βέλτιστη αντιστοιχία φορτίου σε πλήρη ηλιοφάνεια, χωρίς υπερθέρμανση, για την παραγωγή μέγιστης ισχύος στο χαρακτηριστικό I-V. Σημειώστε ότι οι απώλειες που σχετίζονται με την εγγενή αναντιστοιχία της ηλιακής ακτινοβολίας με το ενιαίο χάσμα ζώνης θέτουν ένα θεωρητικό όριο για την απόδοση ακόμη και ενός «τέλειου» κυττάρου Si περίπου  $(100 - 33)\% \times (100 - 23)\% = 50\%$ . Επομένως, ένας προφανής τρόπος για να αυξηθεί η απόδοση είναι να έχουμε κυψέλες πολλαπλών στρώσεων, με κάθε στρώμα να ταιριάζει σε διαφορετική περιοχή του ηλιακού φάσματος (Goetzberger and Hoffmann, 2005).

### **5. Κατασκευή ηλιακών κυψελών και μονάδων**

Η πλειονότητα των ηλιακών κυψελών που κατασκευάζονται παγκοσμίως είναι με κυψέλες πυριτίου, επομένως αρχικά περιγράφουμε την κατασκευή τυπικών κυψελών Siμονοκρυστάλλου και την κατασκευή τους σε μονάδες. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές και ο εμπορικός ανταγωνισμός οδηγεί στη συνεχή βελτίωση του τύπου κυττάρου και των μεθόδων παραγωγής.

#### **5.1. Γενικά κριτήρια σχεδιασμού**

1. Τα αρχικά υλικά πρέπει να είναι εξαιρετικής χημικής καθαρότητας με σταθερές ιδιότητες.
2. Ο σχεδιασμός της κυψέλης θα πρέπει να βελτιώσει την απόδοση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

3. Τα κύτταρα παράγονται μαζικά με ελάχιστο κόστος. Έτσι στην πράξη πρέπει να είναι λεπτότερα (λιγότερο υλικό) και μεγαλύτερης επιφάνειας (λιγότερες συνδέσεις και λιγότερο άδαιο εμβαδόν μονάδας), με γρήγορη ταχύτητα κατασκευής (περισσότερη κατασκευή ανά μονάδα εργασίας και γενικά έξοδα) χρησιμοποιώντας «ρομποτικό» έλεγχο των διεργασιών και εξαιρετική ακρίβεια (κυψέλες υψηλής απόδοσης), δηλαδή πιο λεπτά, μεγαλύτερα, πιο γρήγορα, φθηνότερα.
4. Τα ελεγμένα και διαβαθμισμένα κελιά διασυνδέονται και στη συνέχεια ενθυλακώνονται ως μονάδες.
5. Ο σχεδιασμός πρέπει να επιτρέπει την εμφάνιση ορισμένων βλαβών χωρίς αστοχία ολόκληρου του συστήματος. Έτσι, οι πλεονάζουσες ηλεκτρικές επαφές είναι χρήσιμες και οι μονάδες μπορούν να συνδέονται σε παράλληλες σειρές, έτσι ώστε εάν μια συμβολοσειρά αποτύχει, να υπάρχει ακόμα παραγωγή.
6. Οι ενότητες είναι συνήθως εγγυημένες για τουλάχιστον 20 χρόνια. Ο σχεδιασμός καλύπτει τις πιθανές ζημιές από τη μεταφορά και την κατασκευή κτιρίων επί τόπου και από την έκθεση σε εχθρικά περιβάλλοντα με σημαντικές αλλαγές θερμοκρασίας (ακόμη και χωρίς ηλιακή συγκέντρωση, η θερμοκρασία του στοιχείου μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ  $-30$  και  $+100^{\circ}\text{C}$ ). Οι ηλεκτρικές επαφές πρέπει να επιβιώνουν και να αποφεύγονται όλες οι μορφές διάβρωσης, ιδιαίτερα το νερό δεν πρέπει να εισέρχεται στη μονάδα (Luque and Hegedus, 2011).

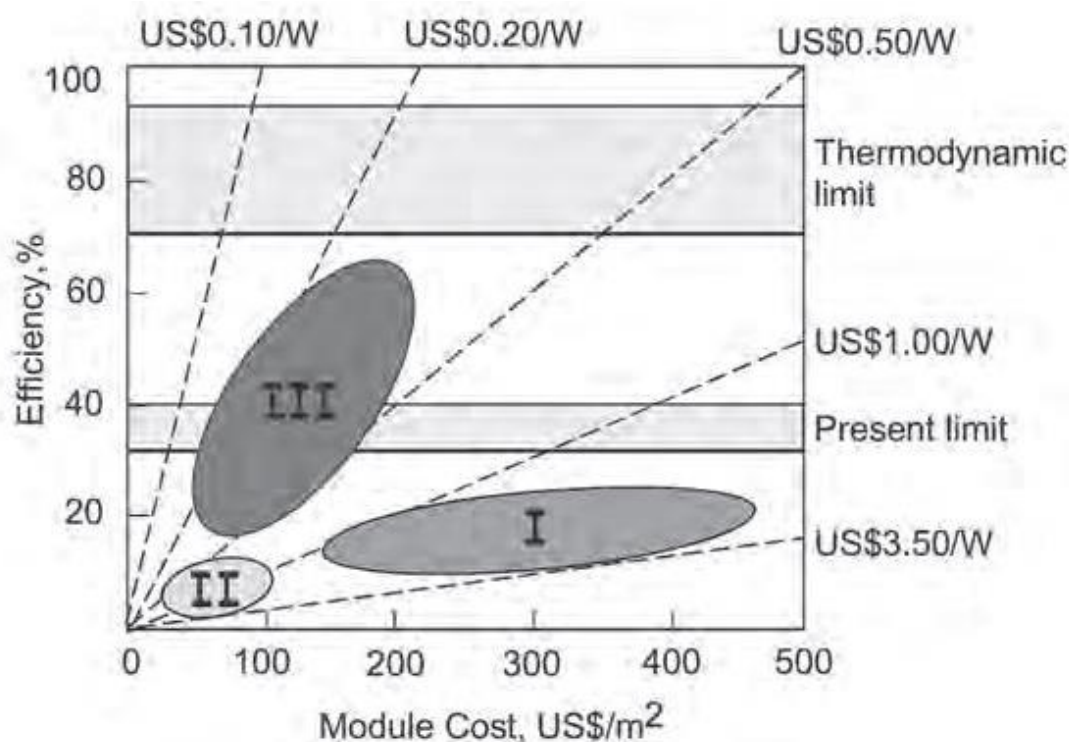
## 6. Είδη και προσαρμογές φωτοβολταϊκών

Αν και το ηλιακό στοιχείο Si επίπεδης πλάκας ήταν το κυρίαρχο εμπορικό προϊόν, υπάρχει μεγάλη ποικιλία εναλλακτικών τύπων και κατασκευών. Αυτά επιδιώκουν να βελτιώσουν την απόδοση και/ή να μειώσουν το κόστος της παραγόμενης ενέργειας μειώνοντας το κόστος κεφαλαίου. Αυτή η ενότητα συνοψίζει μια περίπλοκη και συνεχώς μεταβαλλόμενη σκηνή.

Ένας χρήσιμος τρόπος ταξινόμησης των διαφόρων τύπων κυττάρων είναι σε πρώτη, δεύτερη και τρίτη γενιά (Εικ. 6.1). Οι κυψέλες «πρώτης γενιάς» είναι αυτές που βασίζονται σε κρυσταλλικές κυψέλες μονής επαφής Si, αυτές κυριαρχούν στις τρέχουσες εγκαταστάσεις. Το κόστος κατασκευής κάτω από 1\$ ΗΠΑ/watt είναι

εφικτό με τη μείωση του κόστους κατασκευής ανά μονάδα με παραγωγή μεγαλύτερης κλίμακας και τη βελτίωση της απόδοσης προς το τελικό όριο μιας επαφής περίπου 31%. Αυτό το όριο εξαρτάται από το υλικό ημιαγωγών και το διάκενο ζώνης του και ονομάζεται όριο ShockleyQueisser.

Τα κύτταρα «δεύτερης γενιάς» χρησιμοποιούν τεχνολογία κυψελών λεπτής μεμβράνης για κύτταρα μονής σύνδεσης που βασίζεται στην εναπόθεση λεπτών στρωμάτων φωτοδραστικού υλικού σε υποστρώματα στήριξης ή υπερστρώματα, τα οποία είναι συνήθως φύλλα γυαλιού. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί πολύ λιγότερο από το πιο ακριβό υλικό (τον ημιαγωγό), έτσι, παρόλο που τα κύτταρα έχουν περιορισμένη απόδοση, τα κύτταρα και οι μονάδες λεπτής μεμβράνης είναι φθηνότερα ανά μονάδα χωρητικότητας (\$/watt), όπως φαίνεται στο Σχ. 6.1. Ο ημιαγωγός μπορεί να είναι άμορφο Si (McEvoyetal., 2011).



**Εικ. 6.1.** Προβλεπόμενο κόστος και απόδοση τριών γενεών ηλιακών κυψελών: (I) «Πρώτη γενιά» – κυψέλες μονής σύνδεσης κρυσταλλικού Si. (II) «Δεύτερη γενιά» – κύτταρα μονής σύνδεσης λεπτής μεμβράνης Si ή άλλων ημιαγωγών. (III) Κυψέλες «τρίτης γενιάς» με μεγαλύτερη απόδοση (π.χ. χρησιμοποιώντας «στοίβες» πολλών διαφορετικών ημιαγωγών).



Οι κυψέλες «τρίτης γενιάς» δεν περιορίζονται στη λειτουργία μιας επαφής. Για παράδειγμα, περιλαμβάνουν διαδοχικές κυψέλες πολλαπλών συνδέσεων/ετεροσυνδέσεων σχεδιασμένες να απορροφούν ένα ευρύτερο φάσμα του ηλιακού φάσματος από τις κυψέλες μονής σύνδεσης και έτσι έχουν τη δυνατότητα απόδοσης >30% χωρίς ηλιακή συγκέντρωση και >40% με συγκέντρωση. Υποθέτοντας τεχνολογία λεπτής μεμβράνης με κόστος κατασκευής ανά μονάδα επιφάνειας παρόμοιο με τα κύτταρα δεύτερης γενιάς, αλλά με μεγαλύτερη απόδοση, το προβλεπόμενο κόστος μειώνεται περαιτέρω. Οι έννοιες για άλλα κύτταρα τρίτης γενιάς περιλαμβάνουν κυψέλες ενδιάμεσης ζώνης, κύτταρα παραγωγής πολλαπλών εξιτονίων και κυψέλες θερμού φορέα. αυτά τα θέματα συζητούνται σε ειδικές δημοσιεύσεις.

### **6.1. Παραλλαγές στο υλικό Si**

1. Μονοκρυστάλλο. Τα κύτταρα που περιγράφηκαν μέχρι στιγμής υποθέτουν υλικό βάσης μονοκρυστάλλου (ομογενές), ειδικά κλιμακωμένες διαδικασίες Czochraski. Οι αποκοπές μικροηλεκτρονικού υλικού Si καλύτερης ποιότητας διατίθενται σχετικά φθηνά, αλλά οι ποσότητες είναι ανεπαρκείς για τη σύγχρονη βιομηχανία φωτοβολταϊκών, η οποία παράγει όλο και περισσότερο το δικό της βασικό υλικό. Τα τελευταία πρέπει να είναι λιγότερο καθαρά από ό,τι για τη μικροηλεκτρονική και μπορούν να κοπούν από πλινθώματα κλίμακας μέτρου με τμήματα πολλαπλών σπόρων από τα οποία μπορούν να ληφθούν τόσο μονές όσο και πολυκρυσταλλικές γκοφρέτες.
2. Μικτά κρυσταλλικά (ακανόνιστη αντιπαράθεση μονοκρυσταλλικών «κόκκων» μέσα σε ένα στερεό). Η βιομηχανία φωτοβολταϊκών χρησιμοποιεί μια σειρά υλικού Si, που περιγράφεται αυξάνοντας το μέγεθος των κρυσταλλικών κόκκων ως: μικροκρυσταλλικό <~1 mm, πολυκρυσταλλικό <~1 mm, πολυκρυσταλλικό <~3 cm και μονοκρυστάλλο ενός μεγάλου κόκκου. Ωστόσο, συνήθως η λέξη «πολυκρυσταλλικό» περιλαμβάνει όλες τις μορφές εκτός από το μονοκρυσταλλικό. Τέτοιο πολυκρυσταλλικό υλικό είναι φθηνότερο και ευκολότερο να αποκτηθεί από τα μονοκρυστάλλα και δεν είναι απαραίτητα δομικά αδύναμο. Ωστόσο, τα φωτοβολταϊκά ρεύματα μειώνονται όταν τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών ανασυνδυάζονται εσωτερικά στα όρια των κόκκων, μειώνοντας έτσι τη συνολική απόδοση. Έχοντας την τυπική

διάσταση μεγέθους κόκκου τουλάχιστον ίση με το πάχος της κυψέλης, καθίσταται απίθανο το ρεύμα να διασχίζει ένα όριο κόκκου, επομένως υπάρχει μικρή απώλεια απόδοσης. Επομένως, οι λεπτότερες κυψέλες είναι φθηνότερες επειδή έχουν λιγότερο υλικό και μπορούν να σχεδιαστούν για βελτιωμένη απόδοση. Σημειώστε ότι η ελεγχόμενη ανάπτυξη κρυστάλλων σε κλίμακα  $\mu\text{m}$  είναι μια πτυχή της νανοτεχνολογίας, επομένως τέτοια μικροκρυσταλλικά κύτταρα μπορούν να ονομαστούν νανοκρυσταλλικά (McEvoyetal., 2011).

3. Άμορφο. Τα άμορφα υλικά είναι στερεά με σχετικά λίγα άτομα και επομένως δεν είναι κρυσταλλικά (π.χ. συμπαγές γυαλί). Το άμορφο πυρίτιο ( $\alpha\text{-Si}$ ) μπορεί να παραχθεί με εναπόθεση λεπτής μεμβράνης με τεχνικές εναπόθεσης ατμού Si και διατηρεί τις βασικές του ιδιότητες τετραεδρικού ημιαγωγού. Ιδιαίτερα οι προσμίξεις τύπου n και p επιτρέπουν το σχηματισμό φωτοβολταϊκών συνδέσεων όπως σε κρυσταλλικό υλικό. Ωστόσο, η άμορφη δομή παράγει ένα πολύ μεγάλο ποσοστό μη προσκολλημένων «κρεμαστών» χημικών δεσμών που παγιδεύουν τα ηλεκτρόνια και τους φορείς ρεύματος οπών, μειώνοντας έτσι δραστικά την απόδοση των φωτοβολταϊκών. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, το άμορφο υλικό σχηματίζεται αρχικά σε μια ατμόσφαιρα σιλανίου ( $\text{SiH}_4$ ) έτσι ώστε τα άτομα υδρογόνου να συνδέονται χημικά στις προηγούμενες μη συνδεδεμένες θέσεις, μειώνοντας έτσι σημαντικά τον αριθμό των παγίδων ηλεκτρονίων-οπών. Το άμορφο Si χρησιμοποιείται σε ηλιακά κύτταρα λεπτής μεμβράνης χαμηλού κόστους με συνολικό πάχος ημιαγωγού περίπου  $1 \mu\text{m}$  (δηλαδή  $\sim 1/100$  του πάχους μιας συμβατικής κυψέλης μονοκρυστάλλου). Το διάκενο ζώνης του  $\alpha\text{-Si}$  είναι  $1,7 \text{ eV}$ , σε σύγκριση με το κρυσταλλικό Si  $1,1 \text{ eV}$ , το οποίο ταιριάζει καλύτερα στο ηλιακό φάσμα. Η ανάπτυξη με πολλαπλούς κόμβους εντός αυτού του  $1 \mu\text{m}$  έχει αυξήσει την απόδοση σε περίπου 10%. Μια πρακτική δυσκολία μπορεί να είναι η μειωμένη απόδοση με την ηλικία, ειδικά στα πρώτα χρόνια λειτουργίας. Ένα πλεονέκτημα είναι ότι η έξοδος των κυττάρων  $\alpha\text{-Si}$  δεν αλλάζει σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας.

## 6.2. Παραλλαγές στη γεωμετρία των κόμβων

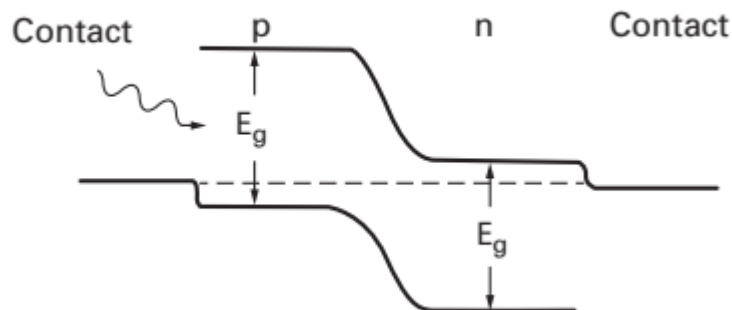
(α) Μονή επαφή (ομοσύνδεσμος)

Εάν το βασικό ημιαγωγικό υλικό παραμένει το ίδιο κατά μήκος της επαφής p-n και οι μόνες αλλαγές είναι στον τύπο ή τη συγκέντρωση του προσμίκτη, τότε πρόκειται για ομοσύνδεση. Τα κύτταρα Si που συζητήθηκαν μέχρι τώρα είναι τέτοιες απλές συνδέσεις. Το διάκενο ζώνης είναι σταθερό κατά μήκος της επαφής (Εικ. 6.2(a)).

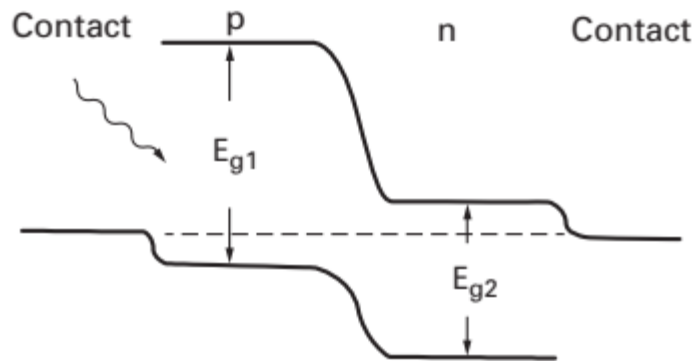
(β) Ετεροσύνδεση (πολυστρωματική, διαδοχική κ.λπ.)

Εάν το υλικό βάσης αλλάζει με το βάθος, για παράδειγμα, με την ανάπτυξη στρωμάτων ενός κρυσταλλικού ημιαγωγού σε διαφορετικό κρυσταλλικό ημιαγωγό, το διάκενο ζώνης της επαφής αλλάζει με το βάθος (π.χ. όπως φαίνεται στο Σχ. 6.2(β)). Το πλεονέκτημα είναι ότι Η απορρόφηση φωτονίων στο διάκενο ζώνης είναι σε δύο ή περισσότερες συχνότητες. Αυτό αυξάνει τη συνολική αναλογία φωτονίων που μπορεί να απορροφηθεί και έτσι μειώνει την υπερβολική απώλεια ενέργειας φωτονίων ( $h\nu - E_g$ ). Κανονικά το ευρύτερο υλικό διακενου ζώνης βρίσκεται στην επάνω επιφάνεια, έτσι τα λιγότερο ενεργητικά (μη απορροφημένα) φωτόνια συνεχίζουν να απορροφώνται στο υλικό του στενότερου κενού ζώνης. Τα πολυστρωματικά κύτταρα είναι ένας τύπος «κυττάρων τρίτης γενιάς». Εναλλακτικά, ένα διαρκώς μειούμενο χάσμα ζώνης με βάθος (το κελί διαβαθμισμένου κενού ζώνης) είναι δυνατό, αλλά δύσκολο να κατασκευαστεί (π.χ.  $Ga_{1-x}Al_x$ , όπου το  $x$  αλλάζει με το βάθος από 1,0 (με  $E_g = 2.2 eV$ ), σε 0,0 (με  $E_g = 1.4 eV$ ). Για αυτό το υλικό, το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι σχετικά μεγάλο επειδή τα φωτόνια απορροφώνται αποτελεσματικά, αλλά η τάση ανοιχτού κυκλώματος είναι σχετικά μικρή λόγω του μικρού κενού ζώνης στο χαμηλότερο βάθος (Luque and Hegedus, 2011).

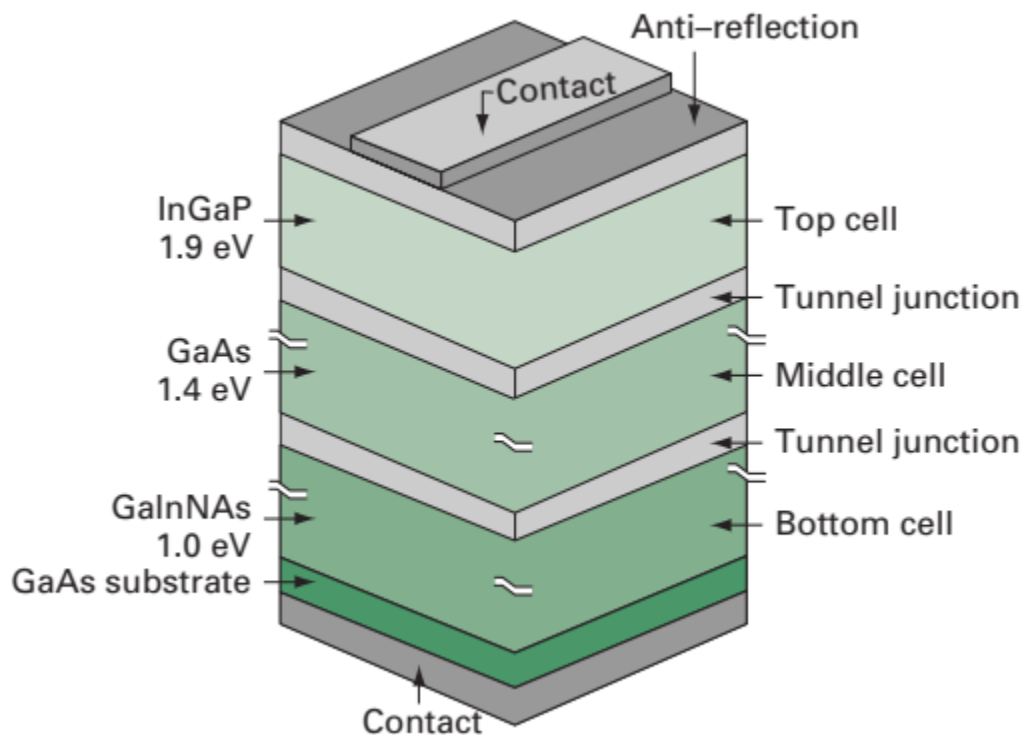
(a) Homojunction



(b) Heterojunction



**Εικ. 6.2.** Ενεργειακά επίπεδα διάφορων τύπων επαφής ηλιακών κυψελών: (α) Ομοσύζευξη: υλικό βάσης και διάκενο ζώνης σταθερά κατά μήκος της επαφής. (β) Ετεροσύνδεση: αλλαγή υλικού βάσης και κενού ζώνης κατά μήκος της διασταύρωσης(Vegaetal., 2018).



**Εικ. 6.3.** Η κυψέλη πολλαπλών στρώσεων SJ3 NREL/ηλιακής σύνδεσης έχει τρία στρώματα ημιαγωγών με διαδοχικά μικρότερο διάκενο ζώνης (InGaP 1,9 eV, GaAs 1,4 eV, GaInNAs 1,0 eV). Έχει απόδοση 43,8% σε 418 ηλιακή συμπυκνωμένη ηλιακή ακτινοβολία (Kingetal., 2009).

(γ) Λεπτά κύτταρα (ή κύτταρα λεπτής μεμβράνης)

Αυτός είναι ένας γενικευμένος όρος για κύτταρα πάχους  $\sim 20$   $\mu\text{m}$ , αντί για πάχος  $\sim 200$   $\mu\text{m}$  των τυπικών κρυσταλλικών κυττάρων Si. Παραδείγματα κυττάρων λεπτής μεμβράνης είναι το άμορφο Si και το CIGS. Συνήθως η λεπτή μεμβράνη του ενεργού υλικού εναποτίθεται σε ένα υπόστρωμα από γυαλί ή άλλο υλικό για να παρέχει μηχανική υποστήριξη. Στην πράξη οι πολυστρωματικές κυψέλες είναι συνήθως λεπτές, με σημαντικά μειωμένες ποσότητες ακριβού υλικού (Luque and Hegedus, 2011).

(δ) Άμεσο και έμμεσο χάσμα ζώνης

Οι ημιαγωγοί συμπεριφέρονται εσωτερικά με διαφορετικούς τρόπους. Ειδικότερα, το έμμεσο υλικό διάκενου ζώνης (π.χ. Si) έχει μικρότερο συντελεστή απόσβεσης (οπτικής απορρόφησης) από το υλικό άμεσου διάκενου ζώνης (π.χ. GaAs), επομένως απαιτούνται παχύτερα κελιά (κείμενα συσκευής για περαιτέρω επεξήγηση).

### 6.3. Άλλα υλικά υποστρώματος. χημικές ομάδες III/V και II/VI

Το πυρίτιο είναι στοιχείο της Ομάδας IV του Περιοδικού Πίνακα, που σημαίνει ότι κάθε άτομο έχει τέσσερα ηλεκτρόνια στο εξωτερικό του περίβλημα. Γενικά, τα άτομα σχηματίζουν ένα σταθερό εξωτερικό περίβλημα οκτώ ηλεκτρονίων μοιράζοντας ηλεκτρόνια – δεσμεύοντας – με άλλα άτομα. Ο ομοιοπολικός δεσμός με τέσσερα πλησιέστερα γειτονικά άτομα σε τετραεδρική διαμόρφωση σχηματίζει τέτοια συνεργαζόμενα σταθερά εξωτερικά κελύφη σε πυρίτιο, γερμάνιο (το οποίο είναι επίσης ημιαγωγός) και άνθρακα (διαμάντι). Μια περαιτέρω συνέπεια είναι ότι το Si σχηματίζει τετραεδρικούς κρυστάλλους σε ένα κυβικό πλέγμα με κέντρο το σώμα, με κάθε άτομο στο κέντρο ενός κύβου να έχει τέσσερις πλησιέστερους γείτονες. Αυτή η τετραεδρική δομή εμφανίζεται επίσης σε ορισμένα δύο στοιχείων (δυσιαδικά) υλικά των Ομάδων III και V (π.χ. αρσενίδιο του γαλλίου GaAs) και των Ομάδων II και VI (π. Ομάδες (I/III)/VI, όπως το  $\text{CuInSe}_2$ ) όπου ο ομοιοπολικός δεσμός επιτρέπει επίσης οκτώ κοινά ηλεκτρόνια στα εξωτερικά κελύφη. Πιο πολύπλοκα αλλά «φθυμίζόμενα» σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται ως φωτοβολταϊκά υλικά είναι τα  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  και  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$  (CIGS), όπου το  $x$  και το  $y$  κυμαίνονται μεταξύ ενός και μηδέν. Όλες αυτές οι ενώσεις είναι επίσης ημιαγωγοί, με κρυσταλλική δομή και δομή ηλεκτρονικής ζώνης συγκρίσιμες με το Si. Τέτοιοι

«όμοιοι» τετραεδρικοί σύνθετοι ημιαγωγοί μπορούν να «προσαρμοστούν» για τις επιθυμητές ιδιότητες δομής ζώνης χρησιμοποιώντας διαθέσιμα και αποδεκτά στοιχεία.

#### **6.4. Άλλοι μηχανισμοί ημιαγωγών, ταξινόμησεις και ορολογίες**

Μέχρι στιγμής έχουμε εξετάσει την παραγωγή ΦΒ από ημιαγωγούς με τετραεδρική δομή (π.χ. Si και GaAs), επειδή αυτά είναι τα πιο κοινά ΦΒ υλικά. Ωστόσο, υπάρχουν άλλα συστήματα και διαμορφώσεις. Παραδείγματα είναι τα ακόλουθα.

##### **(α) «Φ/Β θερμικοί» συλλέκτες**

Αυτό το όνομα χρησιμοποιείται για κατασκευές που συνδυάζουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά με την παραγωγή θερμότητας (π.χ. ζεστό νερό). Τα υποτιθέμενα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν: (i) η απόδοση ΦΒ αυξάνεται εάν το φωτοβολταϊκό υλικό ψύχεται. (ii) γίνεται καλύτερη χρήση του χώρου συλλογής· και (iii) το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης είναι μικρότερο από ό,τι για ισοδύναμα διαχωρισμένα συστήματα. Ωστόσο, παρά αυτά τα πλεονεκτήματα, τα μικτά συστήματα αυτού του είδους είναι ασυνήθιστα. Στην πράξη, λειτουργεί η καθιερωμένη αρχή του KISS («keep it simple stupid»).

##### **(β) Οργανικά φωτοβολταϊκά (OPV).**

Είναι σύνηθες το φως να απορροφάται σε ορισμένες οργανικές ενώσεις, παράγοντας έτσι διαχωρισμένα ηλεκτρόνια και οπές ως διεγερμένες καταστάσεις της μοριακής δομής, αλλά ζευγαρωμένα αρκετά κοντά για να σχηματίσουν μια δεσμευμένη κατάσταση ως «εξιόνια». Η μοριακή δομή έχει συχνά μια διάσταση σχετικά λίγων επαναλαμβανόμενων μορίων, δηλ. ενός oligομερούς σε αντίθεση με ένα πολυμερές. Τέτοιες διεργασίες και oligομερή αποτελούν τη βάση της φωτοσύνθεσης. Η ουσία μιας συσκευής OPV είναι να επιτρέπει στο ηλεκτρόνιο και την οπή του εξιτονίου να διαχωριστούν και να περάσουν σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Αυτό απαιτεί δύο στρώματα διαφορετικών αγώγιμων υλικών που έχουν ένα εγγενές ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ τους, δηλαδή μια τάση. Ένα πρώιμο παράδειγμα είναι ένα στρώμα οξειδίου του κασσιτέρου του ινδίου και ένα στρώμα μετάλλου χαμηλής λειτουργίας (π.χ. Al), με οργανικό υλικό μεταξύ αυτών των στρωμάτων (π.χ. η

μακρομοριακή ένωση βαφής φθαλοκυανίνη). Η εκτεταμένη γνώση της οργανικής χημείας και η πιθανή φθηνότητα των οργανικών υλικών καθιστούν τις εξελίξεις σε αυτόν τον τομέα με μεγάλο ενδιαφέρον. Έχουν επιτευχθεί αποτελεσματικότητες 10% (Greenetal. 2012).

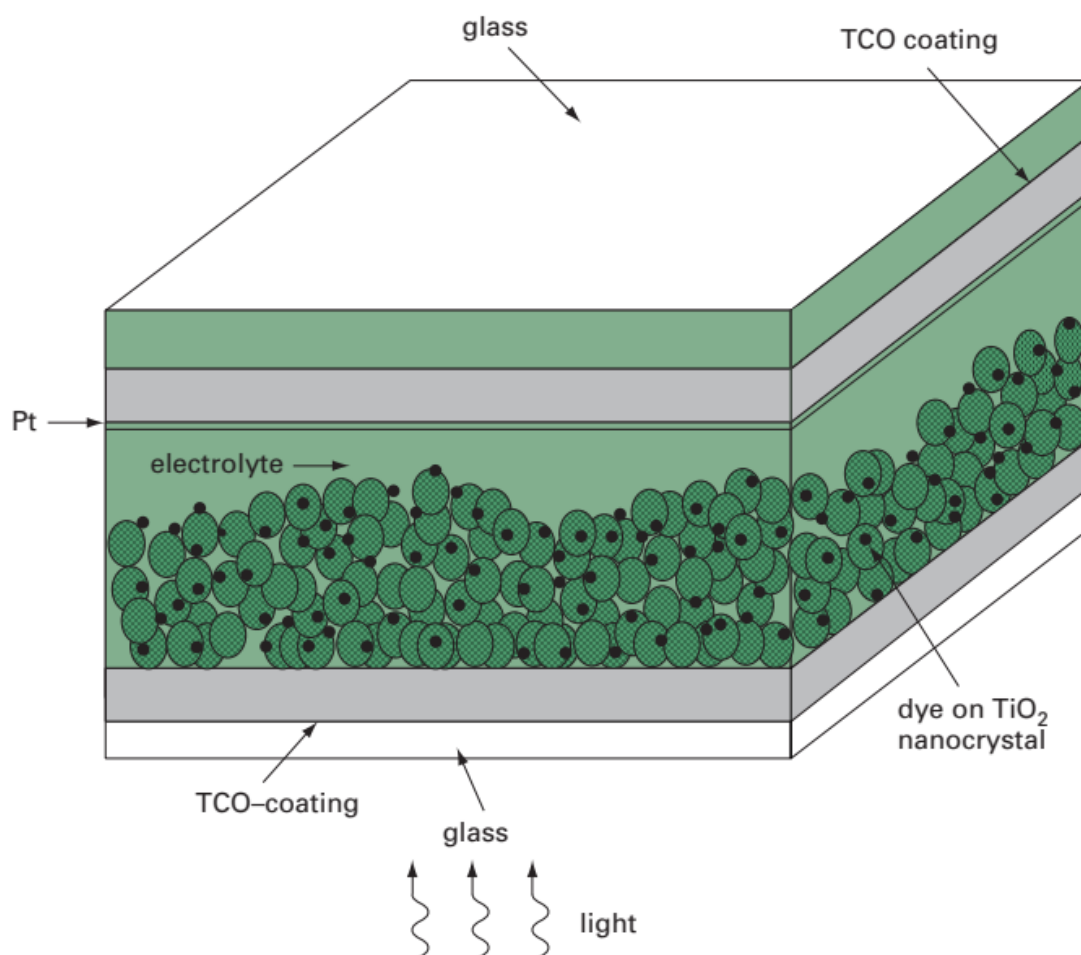
#### (γ) Συσκευές κβαντικής κουκκίδας

Οι κβαντικές κουκκίδες είναι νανοκρύσταλλοι ημιαγωγών (π.χ. Si, με διάμετρο περίπου 5 nm ( $5 \times 10^{-6}$  m)). Τα απορροφημένα ηλιακά φωτόνια δημιουργούν ένα ή περισσότερα ζεύγη οπών ηλεκτρονίων («εξιτόνια») στον νανοκρύσταλλο που είναι «κβαντικά περιορισμένα» και μόνο ικανή να ανασυνδυαστεί με την εκπομπή φωτονίων μήκους κύματος που ορίζεται από τη νανοκρυσταλλική διάσταση. Επομένως κβαντικές κουκκίδες ίδιου μεγέθους φωτοβολούν με την ίδια συχνότητα. Η φωταύγεια εμφανίζεται όταν απορροφώνται ηλιακά φωτόνια, οδηγώντας στην εκπομπή ενός ή περισσότερων φωτονίων με λιγότερο κβαντισμένο Ενέργεια σε μεγαλύτερο μήκος κύματος. Περιέχοντας το φωταυγές υλικό σε μια λεπτή γυάλινη «δεξαμενή», τα περισσότερα από τα εκπεμπόμενα φωτόνια μπορούν να ανακλώνται εσωτερικά σε ένα ακραίο τοίχωμα που καλύπτεται από μια φωτοβολταϊκή κυψέλη. Συνεπώς, το σύστημα γίνεται ένας στατικός φωτοβολταϊκός συγκεντρωτής τόσο άμεσης όσο και διάχυτης Η απόδοση της συσκευής είναι δυνητικά μεγαλύτερη από τους ημιαγωγούς ομοσύνδεσης (π.χ. ένα μόνο στρώμα Si), με τη δυνατότητα αυξημένης ηλεκτρικής παραγωγής ανά μονάδα επιφάνειας συλλέκτη και chea ανά κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (Luque and Hegedus, 2011).

#### (δ) Κύτταρα ευαίσθητα στη χρωστική ουσία (φωτοηλεκτροχημικά κύτταρα Grätzel)

Αυτή η μορφή ηλιακού κυττάρου μοιάζει με τη φωτοσύνθεση στη λειτουργία της. Αντί να απορροφάται το ηλιακό φως σε έναν ημιαγωγό, το κύτταρο απορροφά φως σε μόρια χρωστικής που περιέχουν ιόντα ρουθηνίου. Οι χρωστικές είναι χαρακτηριστικές ως προς την απορρόφηση φωτός σε διακριτά μήκη κύματος. Τέτοια μόρια βαφής επικαλύπτονται σε ολόκληρες τις εξωτερικές επιφάνειες νανοκρυστάλλων ενός ημιαγωγού ευρείας ζώνης, συνήθως TiO<sub>2</sub>, όπως φαίνεται στο **Σχ. 6.4**. Ο μηχανισμός απορρόφησης φωτονίων και η επακόλουθη μεταφορά ηλεκτρονίων «εξιτονίου» σε ένα «κέντρο επεξεργασίας» μοιάζει με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Η απορρόφηση φωτονίων φωτός μέσω της επιφάνειας του διαφανούς αγωγίμου οξειδίου (TCO) που βλέπει στον ήλιο διεγείρει τα ηλεκτρόνια στη

χρωστική σε μια ενέργεια όπου εγχέονται στη ζώνη αγωγιμότητας του παρακείμενου n-τύπου  $\text{TiO}_2$  και από εκεί στην μπροστινή επιφάνεια και στο εξωτερικό κύκλωμα. Το ρεύμα ηλεκτρονίων περνά μέσω του εξωτερικού φορτίου στο πίσω ηλεκτρόδιο, όπου μειώνει το τρι-ιωδίδιο σε ιωδίδιο, το οποίο στη συνέχεια διαχέεται μέσω του ηλεκτρολύτη για να μειώσει τα φωτοοξειδωμένα μόρια της βαφής πίσω στην αρχική τους κατάσταση. Αποδοτικότητα 11% έχει επιτευχθεί στο εργαστήριο (Greenetal., 2012). Τέτοιες τεχνολογίες, αλλά με χρήση χρωστικών απορρόφησης υπέρυθρων, έχουν τη δυνατότητα να παράγουν «οπτικά διαφανείς» μονάδες που θα είχαν μεγάλο εμπορικό ενδιαφέρον ως παράθυρα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε κτίρια. Παρόμοιες διαδικασίες που βασίζονται σε υγρά δίνουν την προοπτική μιας μεγάλης κλίμακας και σχετικά φθηνής μαζικής παραγωγής.



**Εικ. 6.4.** Ένα ηλιακό στοιχείο ευαίσθητο στις χρωστικές ουσίες. Η βαφή καλύπτει τις επιφάνειες των νανοκρυστάλλων  $\text{TiO}_2$ . TCO: διαφανές αγώγιμο οξείδιο (Kingetal., 2009).



(ε) Ενδιάμεσες μεταπτώσεις (φωσφόροι)

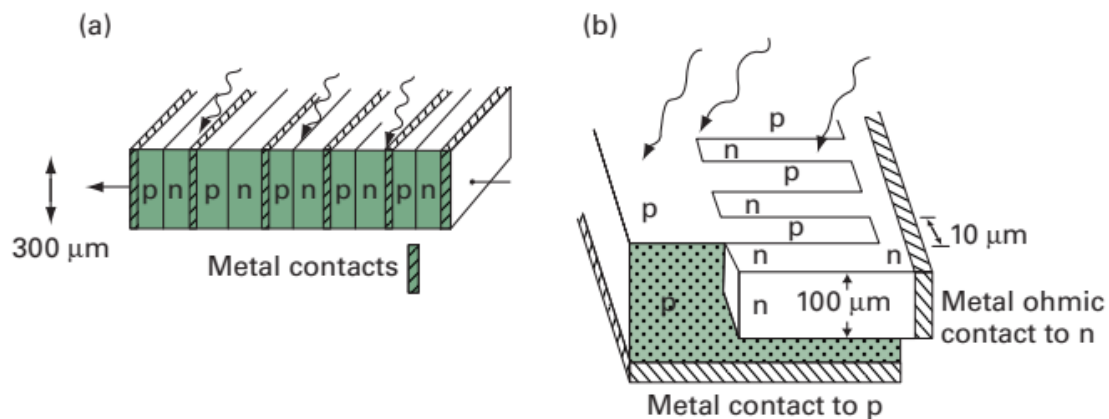
Κατ' αρχήν, η μπροστινή επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου θα μπορούσε να επικαλυφθεί με ένα φθορίζον ή φωσφορίζον στρώμα για να απορροφήσει φωτόνια ενέργειας σημαντικά μεγαλύτερης από το διάκενο ζώνης ( $h_{\nu_1} \gg E_g$ ). Ωστόσο, τα εκπεμπόμενα φωτόνια θα πρέπει ακόμα να απορροφηθούν ενεργά ( $h_{\nu_2} \leq E_g$ ). Έτσι, η περίσσεια ενέργειας των αρχικών φωτονίων ( $h_{\nu_1} - h_{\nu_2}$ ) θα διασκορπίζοταν στην επιφάνεια, ελπίζουμε με μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας του κυττάρου. Άλλες, παρόμοιες ιδέες έχουν εξεταστεί είτε για την απελευθέρωση δύο ενεργών φωτονίων από κάθε αρχικό φωτόνιο, είτε για την απορρόφηση δύο ανενεργών φωτονίων ( $h_{\nu} < E_g$ ) για την παραγωγή ενός ενεργού φωτονίου με τρόπο που θυμίζει τη φωτοσύνθεση.

(στ) Κάθετα κελιά πολλαπλών συνδέσεων (VMJ)

Τα κύτταρα σχηματίζονται έτσι ώστε το φως να εισέρχεται στις άκρες (**Εικ. 6.5**):

1. Συνδεδεμένες σειρές. Περίπου 100 παρόμοιες συνδέσεις p-n γίνονται σε ένα σωρό (**Εικ. 6.5(α)**). Το φως προσπίπτει στις άκρες, επομένως το σχετικά μεγάλο δυναμικό εξόδου (~50 V) είναι το άθροισμα των πολλών ενώσεων σε σειρά. Το ρεύμα σχετίζεται με την ηλιακή ακτινοβολία μόνο στις ακμές περιοχές και επομένως δεν είναι μεγάλο.

2. Παράλληλη σύνδεση. Αυτή είναι μια μορφή κυψέλης πλέγματος, που συνήθως κατασκευάζεται με στόχο την πιο αποτελεσματική απορρόφηση φωτονίων στην περιοχή της ένωσης (**Εικ. 5.5(β)**).



**Εικ. 6.5.** Κάθετα κελιά πολλαπλών συνδέσεων (vertical multi-junction cells, VMJs): (α) συνδεδεμένα σε σειρά. (β) παράλληλη σύνδεση (King et al., 2009).

#### (ζ) Θερμοφωτοβολταϊκά

Αυτές οι συσκευές παράγουν ηλεκτρισμό μετά την απορρόφηση της υπέρυθρης ακτινοβολίας μακρών κυμάτων από πηγές, ας πούμε, στους περίπου 1000°C. Χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί μικρού χάσματος ζώνης (π.χ. GaSb με διάκενο ζώνης 0,7 eV), οι οποίοι είναι ως επί το πλείστον υπό εργαστηριακή ανάπτυξη. Οι πιθανές χρήσεις περιλαμβάνουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από άλλως σπατάλη θερμότητας (π.χ. σε χυτήρια μετάλλων). Μια άλλη επιλογή είναι να συγκεντρωθεί η ηλιακή ακτινοβολία σε μια μαύρη απορροφητική επιφάνεια, η οποία στη συνέχεια ακτινοβολεί εκ νέου σε μια θερμο-φωτοβολταϊκή συσκευή. Ουσιαστικά η μέγιστη συχνότητα της συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας μετατοπίζεται στο υπέρυθρο για να επιτευχθεί καλύτερη αντιστοίχιση με ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μικρού κενού ζώνης.

#### (η) Νανοτεχνολογία

Όπως και με τις ηλεκτρονικές συσκευές στερεάς κατάστασης, οι διεργασίες ΦΒ εξαρτώνται από διαδικασίες ατομικής και μοριακής κλίμακας, σε αντίστοιχη κλίμακα από περίπου 1 έως 100 νανόμετρα ( $10^{-9}$  έως  $10^{-7}$  m). Τα υλικά μπορούν να «φανούν» σε αυτή την κλίμακα με ηλεκτρονικά μικροσκόπια. Συγκεκριμένα, οι επιφάνειες και τα επιφανειακά στρώματα μπορούν να διερευνηθούν σε ατομική κλίμακα χρησιμοποιώντας μια σειρά ηλεκτρονικών μικροσκοπίων σάρωσης. Τέτοια εργαλεία έχουν διευκολύνει την πολύ ακριβή «μηχανική» των φωτοβολταϊκών συσκευών (π.χ. εναπόθεση στρωμάτων ημιαγωγών και επαφών σε σχεδόν ατομική κλίμακα ως αντιανακλαστικά επιφανειακά στρώματα). Οι διαδικασίες παραγωγής με τέτοια ακρίβεια μπορούν να λειτουργήσουν για την ακριβή αναπαραγωγή εκατομμυρίων προϊόντων (δηλαδή μεγάλης κλίμακας κατασκευή συσκευών νανοκλίμακας).

#### (θ) Διάσπαση νερού για παραγωγή υδρογόνου και οξυγόνου

Η ενεργή έρευνα στη φωτοηλεκτροχημεία επιδιώκει να χρησιμοποιήσει την ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή εμπορικού υδρογόνου από άμεσες διαδικασίες «διάσπασης νερού». Ένα παράδειγμα είναι μια κοινή δομή νανοκλίμακας αιματίτη ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) με προσαρτημένο ένα ευαίσθητο στη βαφή φωτοβολταϊκό στρώμα (ένα «φωτοηλεκτρόδιο αιματίτη»), το οποίο στην πραγματικότητα παράγει επαρκή τάση για να ηλεκτρολύσει το νερό εντός της δομής «διπλής».

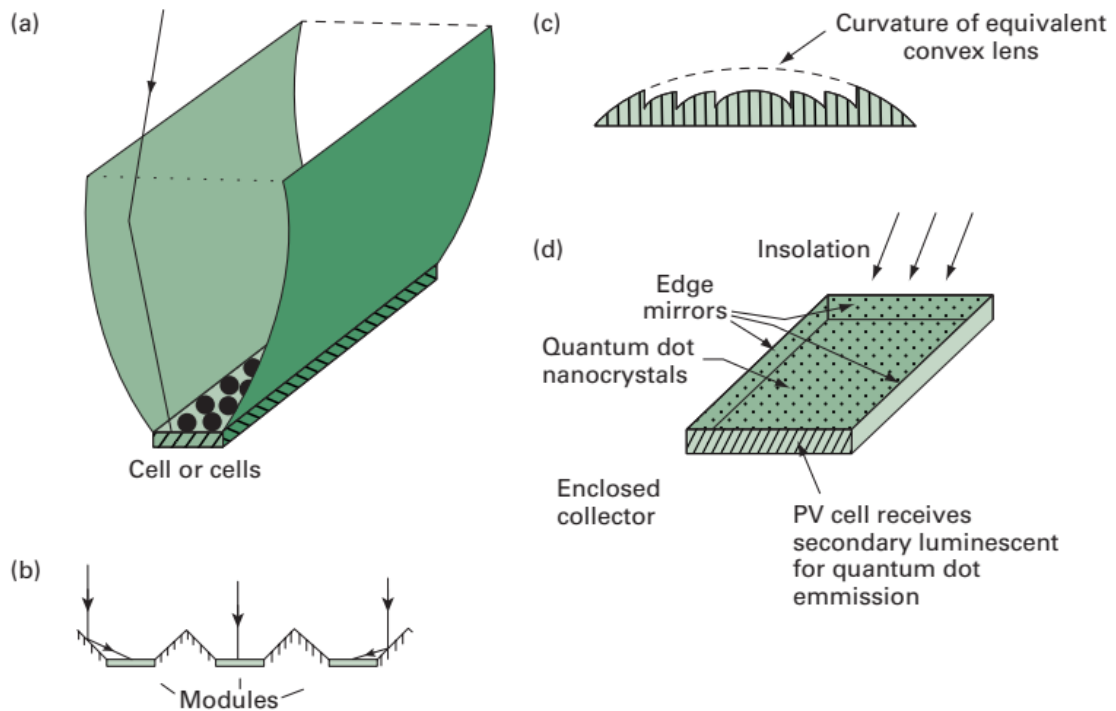
## 6.5. Παραλλαγή στη διάταξη του συστήματος

### (α) Συγκεντρωτές

Τα πλεονεκτήματα της συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας σε φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι: (i) χρειάζονται λιγότερα στοιχεία, μειώνοντας έτσι το κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος. (ii) επομένως τα κελιά που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι τα καλύτερα διαθέσιμα (πιθανόν να είναι πολυστρωματικά κελιά με ίσως 40% απόδοση). (iii) απαιτείται λιγότερη περιοχή τοποθεσίας. (iv) τα συνολικά πλαίσια και το κόστος κατασκευής ενδέχεται να μειωθούν. Τα μειονεκτήματα είναι: (i) οι μεγάλες περιόδους καθαρού ουρανού είναι απαραίτητες. (ii) για να ακολουθήσετε τον Ήλιο, ο συμπακνωτής είναι ακριβός και απαιτεί συντήρηση. (iii) η απόδοση των κυψελών μειώνεται σε αυξημένη θερμοκρασία, επομένως απαιτείται ενεργή ή παθητική ψύξη (ωστόσο, η θερμότητα που αφαιρείται στην ενεργητική ψύξη μπορεί να είναι χρήσιμη).

Η αναλογία συγκέντρωσης  $X$  είναι η αναλογία του ανοίγματος εισόδου του συγκεντρωτή προς την επιφάνεια της κυψέλης. Η πραγματική συγκέντρωση είναι συνήθως περίπου το 90% αυτής. Συστήματα με  $X \leq 5$  συνήθως δεν παρακολουθούν τον Ήλιο κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά μπορεί να αναπροσαρμολοζονται κάθε μήνα. απορροφούν άμεση και κάποια διάχυτη ακτινοβολία. Με  $X > 5$ , η παρακολούθηση του ήλιου είναι συνηθισμένη, αλλά αισθητή μόνο σε περιοχές με μεγάλο ποσοστό (>70%) άμεσης ακτινοβολίας. Οι συγκεντρωτές βασίζονται σε φακούς (συνήθως επίπεδους φακούς Fresnel), καθρέφτες και, περιστασιακά, σε άλλες μεθόδους (π.χ. εσωτερική ανάκλαση: **Εικ. 6.6(δ)**).

Με τη συμπακνωμένη ηλιακή ακτινοβολία το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι μικρό σε σύγκριση με τη δομή συγκέντρωσης. Ως εκ τούτου, είναι καλύτερο να χρησιμοποιείτε τα πιο αποτελεσματικά και επομένως ακριβά κύτταρα. Η εντύπωση ότι η χρήση συμπακνωμένης ηλιακής ακτινοβολίας βελτιώνει την αποτελεσματικότητα αυτή καθεαυτή είναι κάπως εσφαλμένη, καθώς οι ακριβές κυψέλες που χρησιμοποιούνται είναι εξίσου αποτελεσματικές στη «συνηθισμένη» ηλιακή ακτινοβολία.



**Εικ. 6.6.** Μερικά συστήματα συμπυκνωτή. Προσοχή: ο υπερβολικά άνισος φωτισμός των κυψελών ή των μονάδων μπορεί να προκαλέσει βλάβη στα κύτταρα: (α) Παραβολικός συμπυκνωτής: μπορεί να κατασκευαστεί ως ένα συμπαγές μπλοκ από διαφανές πλαστικό. (β) Πλευρικοί ανακλαστήρες. (γ) Φακός Fresnel. (δ) Συγκρότημα κβαντικής κουκκίδας, που δείχνει τους νανοκρυστάλλους κβαντικής κουκκίδας ενσωματωμένους σε ένα διαφανές μέσο. το επάνω κάλυμμα μεταδίδει την ηλιακή ακτινοβολία και τα πλευρικά τοιχώματα αντανακλούν εσωτερικά τη δευτερεύουσα φωταυγή ακτινοβολία στο Φ/Β στοιχείο τελικού τοιχώματος. ο λόγος συγκέντρωσης είναι ο λόγος του εμβαδού της άνω επιφάνειας προς το εμβαδόν της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού στοιχείου (Kingetal., 2009).

### (β) Φασματική διάσπαση

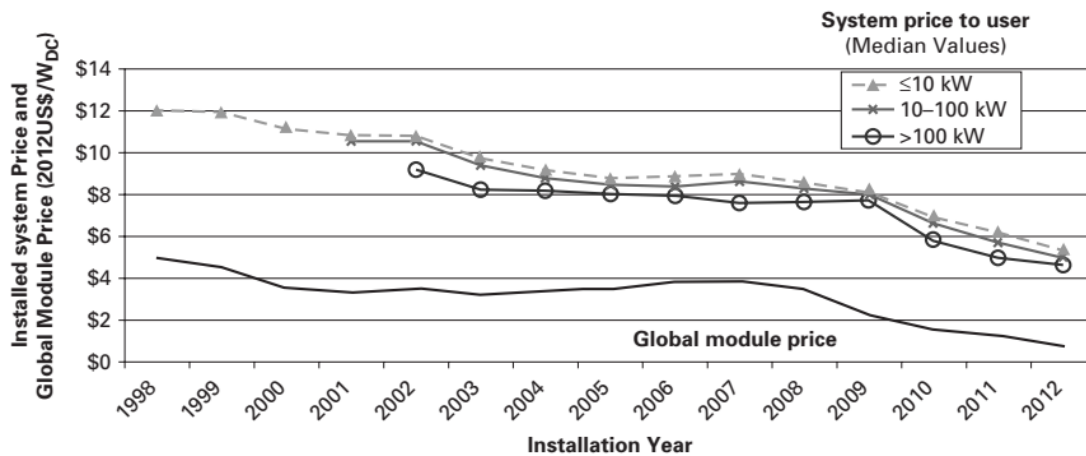
Ξεχωριστές ηλιακές κυψέλες με αυξανόμενο διάκενο ζώνης μπορούν να τοποθετηθούν κατά μήκος ενός ηλιακού φάσματος (ας πούμε, από ένα πρίσμα και που κυμαίνεται από το υπέρυθρο έως το υπεριώδες) για να επιτευχθεί βελτιωμένη αντιστοιχία συχνότητας. Όπως και με τα πολυστρωματικά κύτταρα, οι κυρίαρχες απώλειες από την αναντιστοιχία της ενέργειας φωτονίων και του κενού ζώνης σε ένα κύτταρο μεμονωμένης σύνδεσης μπορούν επομένως να μειωθούν σημαντικά. Ο φασματικός διαχωρισμός μπορεί επίσης να περιλαμβάνει συγκεντρωτές. Τελικές αποδόσεις ~40% έχουν επιτευχθεί σε δοκιμαστικά συστήματα.

## 7. Κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές πτυχές

### 7.1. Τιμές

Η τεχνολογία και η εμπορική εφαρμογή της φωτοβολταϊκής ενέργειας αυξήθηκε ραγδαία από τη δεκαετία του 1980, όταν το κόστος του εργοστασίου ήταν αρχικά ~\$40/W, αλλά μέχρι το 2013 είχε μειωθεί σε ~\$1/W. Τόσο η μείωση του κόστους όσο και η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος παγκοσμίως είναι δραματικές. Αυτά τα δύο φαινόμενα συνδέονται στενά, αποτελώντας παραδείγματα «καμπυλών μάθησης». Έως το 2013, το κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας έφτασε στην ισοτιμία του δικτύου σε ορισμένες περιοχές, δηλαδή το κόστος για έναν χρήστη ηλεκτρικής ενέργειας για την αυτοπαραγωγή ισοδυναμούσε με την τιμή εισαγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κοινής ωφέλειας (τέτοιοι υπολογισμοί εξαρτώνται από την αξία των χρημάτων, τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης και την ώρα της ημέρας, η οποία επηρεάζει την τιμή χρησιμότητας).

Οι σχετικοί παράγοντες περιλαμβάνουν: (i) τη συνεχή βελτίωση της απόδοσης στην τεχνολογία και την κατασκευή. (ii) δημόσια αποδοχή και (iii) ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Ιδιαίτερη σημασία έχει η έντονη ζήτηση για εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών σε χώρες με «θεσμικούς μηχανισμούς υποστήριξης», όπως τα τιμολόγια τροφοδοσίας (π.χ. Γερμανία). Αυτοί οι μηχανισμοί της αγοράς σχετίζονται με πολιτικές για τη μείωση των εκπομπών της κλιματικής αλλαγής από τα ορυκτά καύσιμα και την αύξηση της ενεργειακής ασφάλειας. Η ζήτηση που προέκυψε ενθάρρυνε τους κατασκευαστές να κλιμακώσουν την παραγωγή τους, γεγονός που με τη σειρά του έκανε τα φωτοβολταϊκά συστήματα φθηνότερα –συμπεριλαμβανομένων των χρηστών σε άλλες χώρες– και ως εκ τούτου ενθάρρυνε περαιτέρω πωλήσεις σε έναν συνεχή βρόχο θετικής ανάδρασης. Η ελαφρά αύξηση στην τιμή της μονάδας γύρω από το 2006 έως το 2007 οφειλόταν στο γεγονός ότι η προσφορά Si για ηλιακά κύτταρα δεν μπορούσε να συμβαδίσει με την αύξηση της ζήτησης πριν ανοίξουν νέα χυτήρια Si. Οι παρατηρητές του κλάδου αναμένουν ότι οι τιμές των μονάδων θα συνεχίσουν να μειώνονται, αν και με περιστασιακά «λόξυγγα» όπως αυτό το 2006 έως το 2007 (EPIA, 2012; IRENA, 2012).



**Σχ. 7.1.** Μειώσεις κόστους Φ/Β σε εφαρμογή. Οι καμπύλες στην κορυφή αφορούν το συνολικό κόστος ενός εγκατεστημένου συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο. Η καμπύλη στο κάτω μέρος είναι η τιμή εκ του εργοστασίου των μονάδων (χύμα). Η διαφορά είναι το κόστος ισορροπίας των στοιχείων του συστήματος και της εγκατάστασης. Σημείωση: Η τιμή για το φωτοβολταϊκό σύστημα ανά watt χωρητικότητας μειώθηκε στο ~50% μέσα σε 13 χρόνια, λόγω της ακόμη μεγαλύτερης μείωσης της τιμής για τις μονάδες. Πηγή: D. Feldman et al., Photovoltaic Pricing Trends: Historical, Recent, and Near-Term Projections, National Renewable Energy Laboratory, USA (June 2013).

Το κόστος στο **Σχ. 7.1** εκφράζεται ως δολάρια ΗΠΑ ανά watt αιχμής (\$US/W<sub>p</sub>). Αυτό είναι ένα τυπικό μέτρο κόστους που σχετίζεται με την παραγωγή υπό φως πυκνότητας ροής ακτινοβολίας 1000 W/m<sup>2</sup> με τυπική φασματική κατανομή (που αντιστοιχεί στον Ήλιο στις 48 μοίρες από κατακόρυφο, δηλαδή AM1,5) και με τη θερμοκρασία του πίνακα σταθερή στους 25° NTO. Ωστόσο, ένα πλήρως φωτισμένο πάνελ με ονομαστική (ας πούμε) 80 W<sub>p</sub> πιθανότατα θα παράγει λιγότερο από 80 W επειδή (i) η ακτινοβολία είναι μικρότερη από 1000 W/m<sup>2</sup> και/ή (ii) η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεγαλύτερη από 25°C. Το κόστος κεφαλαίου ανά watt αιχμής των εγκατεστημένων συστημάτων είναι δύο έως τρεις φορές υψηλότερο από το εκ του εργοστασίου κόστος των μονάδων λόγω του «ισορροπίου του κόστους συστήματος» για άλλα εξαρτήματα και εγκατάσταση. Συνήθως εξίσου σημαντικό με το κόστος κεφαλαίου ανά W<sub>p</sub> ενός νέου συστήματος είναι το κόστος ανά kWh παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, π.χ. σε μια μη σκιασμένη σταθερή τοποθεσία στην Καλιφόρνια, μια συστοιχία ονομαστικής ισχύος 1 kW<sub>p</sub> μπορεί να παράγει 1800

kWh/έτος, ωστόσο στο Ηνωμένο Βασίλειο αυτή η έξοδος μπορεί να απαιτεί ονομαστική ισχύ 2 kWp.

## **7.2. Συστήματα που συνδέονται με το δίκτυο**

Η μεγαλύτερη αύξηση της ζήτησης για φωτοβολταϊκά ήταν για συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο, τα οποία αυξήθηκαν από <30% της παγκόσμιας συνολικής εγκατεστημένης ισχύος το 1995 σε ~97% το 2012 (REN21 2012; IEA-PVPS 2013). Για παράδειγμα, η ηλιοφάνεια της οροφής της πλειονότητας των προαστιακών κατοικιών στην Ευρώπη, όταν καλύπτεται κυρίως από φωτοβολταϊκά συνδεδεμένα στο δίκτυο, παράγει ετησίως μια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας ίση με το 50 έως 100% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του νοικοκυριού. Αυτοί οι ιδιοκτήτες χρησιμοποιούν τη δική τους μικροπαραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ πουλούν τυχόν πλεόνασμα στο δίκτυο κοινής ωφέλειας και στη συνέχεια τη νύχτα αγοράζουν εισαγόμενη ενέργεια. Το πλέγμα λειτουργεί έτσι ως η «εικονική αποθήκευση» τους. Επειδή η οικιακή χρήση ηλεκτρικής ενέργειας είναι ακανόνιστη και η ηλιακή ακτινοβολία ποικίλλει, ένας εμπειρικός κανόνας είναι ότι το 50% της μικροπαραγόμενης ενέργειας χρησιμοποιείται στο κτίριο και το 50% εξάγεται στο δίκτυο. Η ίδια αρχή ισχύει για επαγγελματικά και εμπορικά κτίρια. Ωστόσο, εάν τα φορτία είναι μεγάλα και συνεχόμενα, ένα πολύ μεγαλύτερο ποσοστό της μικροπαραγόμενης ισχύος χρησιμοποιείται επί τόπου. Οι κυβερνητικοί θεσμικοί μηχανισμοί υποστήριξης βοηθούν τους μικροπαραγωγούς να δημιουργήσουν οικονομικά αποδοτικά συστήματα με ένα ή περισσότερα από τα εξής: (α) επιβολή υποχρεώσεων στις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να πληρώνουν για την ηλεκτρική ενέργεια μικροπαραγωγής με προτιμησιακές τιμές (τιμολόγια τροφοδοσίας και νομικές υποχρεώσεις). (β) επιδότηση του αρχικού κεφαλαίου κόστους της ηλιακής συστοιχίας. και (γ) καθιέρωση πληρωμών για «πιστώσεις» μείωσης του άνθρακα που λαμβάνονται κατ' αναλογία προς την παραγόμενη ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές. Η αρθρωτή φύση της παραγωγής φωτοβολταϊκών και το ελαφρύ βάρος των στατικών μονάδων καθιστούν σχετικά εύκολη την εγκατάσταση αυτής της κατανεμημένης (ενσωματωμένης) παραγωγής, είτε σε νεόδμητα και εγκατεστημένα κτίρια είτε σε ανεξάρτητες κατασκευές.

Η οικονομία και η ευκολία κατασκευής βελτιώνονται με την ανάπτυξη «δομικών» φωτοβολταϊκών πάνελ ενσωματωμένων στον εξωτερικό ιστό κτιρίων και στεγών, με

το κόστος εγκατάστασής τους να μειώνεται με εξοικονόμηση συμβατικών υλικών. Είναι λογικό να αναμένεται ότι μέσα σε λίγες δεκαετίες τα Φ/Β θα ενσωματωθούν τόσο στις τυπικές κατασκευές στέγης όσο το γυαλί στα παράθυρα τώρα.

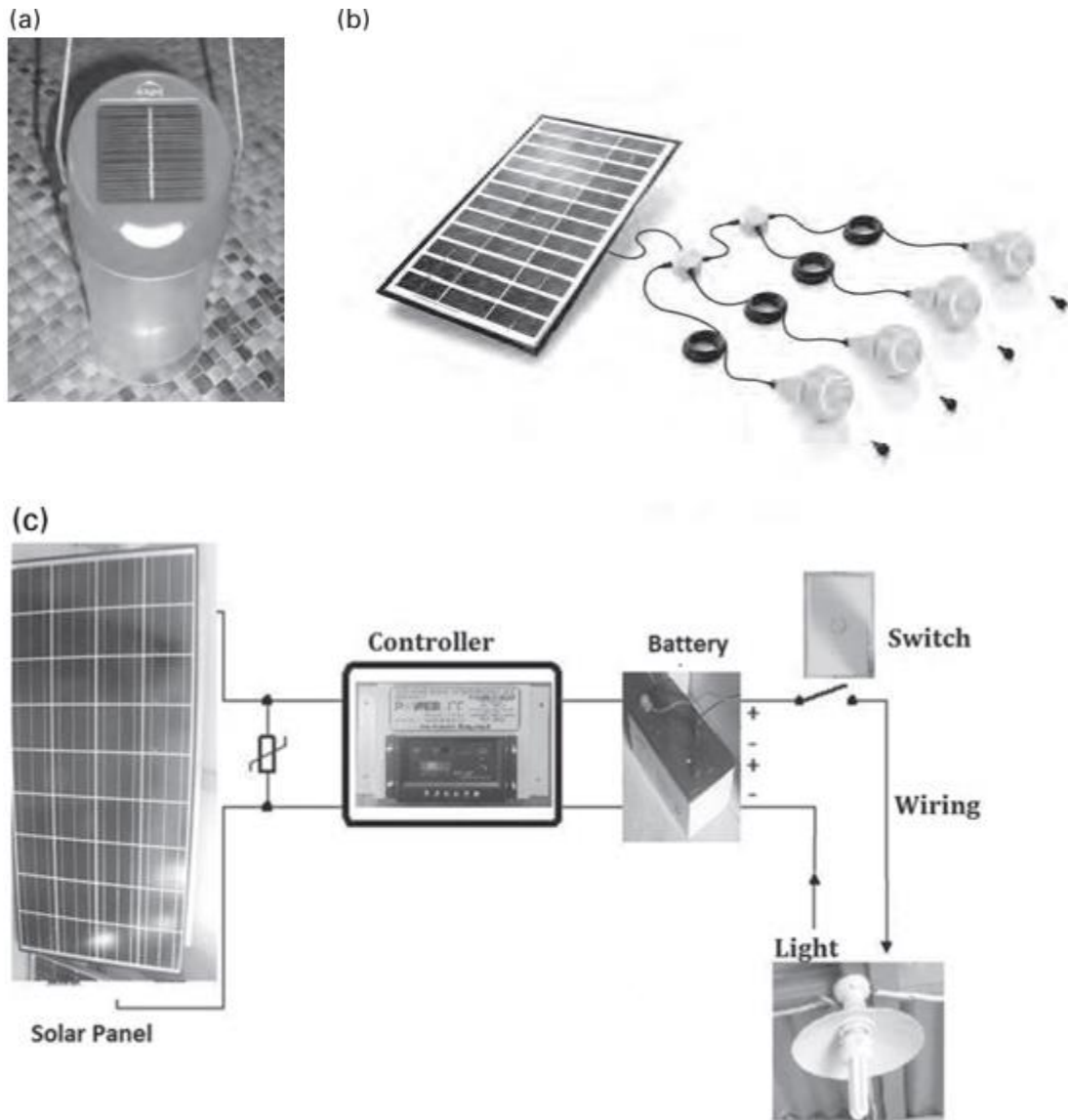
### **7.3. Αυτόνομα συστήματα**

Αυτόνομα συστήματα που εξαρτώνται από μπαταρίες αποθήκευσης είναι συνήθως δύο φορές πιο ακριβά ανά μονάδα χωρητικότητας από τα συστήματα που συνδέονται στο δίκτυο, λόγω του πρόσθετου κόστους των μπαταριών. Για αυτόνομες εφαρμογές, το πιο σημαντικό μέτρο είναι το σχετικό κόστος της υπηρεσίας που παρέχεται σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία (π.χ. σύγκριση ενός φωτοβολταϊκού φωτός ορισμένης έντασης φωτός με ένα φως που τροφοδοτείται από κηροζίνη παρόμοιας έντασης). Όσον αφορά την αποδοτικότητα χρήσης της ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχει αντιστάθμιση μεταξύ των στοιχείων του συστήματος (π.χ. οι καλύτερες ενεργειακά αποδοτικές συσκευές απαιτούν μικρότερα πάνελ και μικρότερο ισοζύγιο κόστους του συστήματος), επομένως η επένδυση στην ενεργειακή απόδοση σχεδόν πάντα προσφέρει μακροπρόθεσμες μειώσεις δαπάνη διάρκειας ζωής.

### **7.4. Φ/Β για την ηλεκτροδότηση της υπαίθρου, ειδικά στις αναπτυσσόμενες χώρες**

Η χρήση και η ζήτηση φωτοβολταϊκών συνεχίστηκαν για αγροτική ηλεκτροδότηση εκτός δικτύου – ζωτικής σημασίας για την κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη, ιδιαίτερα στις αγροτικές περιοχές των αναπτυσσόμενων χωρών, όπου δισεκατομμύρια άνθρωποι ζουν χωρίς πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου. Πριν από την έλευση των ηλιακών φωτοβολταϊκών/μπαταριών, αυτοί οι άνθρωποι βασίζονταν συνήθως σε λαμπτήρες κηροζίνης και κεριά για φωτισμό και ακριβές μπαταρίες ξηρής κυψέλης για ραδιόφωνο και κινητά τηλέφωνα ή για μεγαλύτερα φορτία σε γεννήτριες ντίζελ.





**Εικ. 7.2.** Μια εξέλιξη των κιτ ηλιακού φωτισμού. Τα συστήματα με πιο αποδοτικά φώτα (LED) που φαίνονται στα (α) και (β) είναι πολύ φθηνότερα από αυτά με τα CFL που φαίνονται στο (γ), που ήταν συνηθισμένα μέχρι πρόσφατα.

1. Ένα βασικό «ηλιακό φανάρι», με κυψέλη ονομαστικής ισχύος 0,3 Wp.
2. Σύστημα 11 W με 4 λαμπτήρες LED. Κάθε λαμπτήρας έχει ονομαστική απόδοση 23% (βλ. ~5 έως 10% για CFL) και έχει ενσωματωμένη μπαταρία ιόντων λιθίου 60 kJ και ρυθμιζόμενη ρύθμιση φωτεινότητας που της επιτρέπει να λειτουργεί έως και 12 ώρες. Οι σύνδεσμοι «Bayonet» επιτρέπουν την εύκολη εγκατάσταση.
3. Ηλιακό οικιακό σύστημα όπως είναι ευρέως εγκατεστημένο στις αναπτυσσόμενες χώρες, με κόστος ~1000\$ το 2013 (Green, 1998).

Στις αγροτικές περιοχές η λιανική τιμή της κηροζίνης και παρόμοιων καυσίμων, όπως χρησιμοποιούνται για φωτισμό, είναι συνήθως τουλάχιστον διπλάσια από την τιμή της πόλης και η διαθεσιμότητα μπορεί να είναι ασταθής. Αυτό παρέχει μια ευκαιρία για τα ηλιακά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και τις μπαταρίες να παρέχουν φως. Οι σωλήνες και οι συμπαγείς λαμπτήρες φθορισμού (CFL) χρησιμοποιήθηκαν ευρέως καθώς ήταν περίπου πέντε φορές πιο αποτελεσματικοί από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως. Τέτοιες εγκαταστάσεις, με τρία ή τέσσερα CFL, και συνήθως επίσης φορτιστές τροφοδοσίας για ραδιόφωνα και κινητά τηλέφωνα, ονομάζονται ηλιακά συστήματα οικίας (βλ. **Εικ. 7.2(γ)**). Συνήθως κοστίζουν ~1000\$ ΗΠΑ η εγκατάστασή τους. Από το 2008 περίπου, οι λαμπτήρες LED έχουν γίνει ευρέως διαθέσιμοι, παράγοντας την ίδια ποσότητα χρησιμοποιήσιμου φωτός (lumens) για το ένα τρίτο της ηλεκτρικής ενέργειας (kWh), έτσι ώστε ένα ισοδύναμο σύστημα να μπορεί να χρησιμοποιεί πολύ μικρότερα Φ/Β πάνελ για την ίδια απόδοση φωτός (**Εικ. 7.2(β)**). Σε συνδυασμό με τη μείωση των τιμών των μονάδων, αυτό έχει μειώσει σημαντικά το κόστος ενός ηλιακού συστήματος οικίας στα 300\$ ΗΠΑ, το οποίο χρηματοδοτείται πιο εύκολα. Τέτοια συστήματα <~10 Wp ονομάζονται SolarPico Systems. Περιλαμβάνουν φορητά ηλιακά φανάρια (**Εικ. 7.2(α)**), τα οποία έχουν ενσωματωμένα ηλεκτρονικά στοιχεία και μπαταρία ιόντων λιθίου και κοστίζουν μόνο ~10 έως 40 δολάρια ΗΠΑ ανάλογα με την ποιότητα και την απόδοση φωτός, γεγονός που τα καθιστά προσβάσιμα ακόμη και Φτωχός; Μέχρι το 2013, περίπου 0,5 εκατομμύρια φανάρια LED είχαν πουληθεί στην Αφρική. Όπως συμβαίνει με όλη την τεχνολογία, οι αυξημένες αγορές επιτρέπουν βελτιωμένη τεχνική υποστήριξη και ως εκ τούτου πιο βιώσιμα συστήματα (IEA-PVPS, 2013).

Οι βασικές προκλήσεις για να καταστούν βιώσιμα τέτοια συστήματα δεν είναι πλέον τεχνικές, αλλά θεσμικές και οικονομικές. Οι κατάλληλες λύσεις σε αυτές τις μη τεχνικές προκλήσεις εξαρτώνται από την τοπική κουλτούρα και κοινωνικούς παράγοντες (π.χ. εάν οι άνθρωποι λειτουργούν ως άτομα ή συνεργάζονται σε μια κοινότητα, την έκταση της εκπαίδευσης και της πρακτικής ικανότητας (συμπεριλαμβανομένης της συντήρησης), το εισόδημα σε μετρητά και την ευκολία μεταφοράς για προμηθευτές) (Chaurey και Kanpal, 2010). Μερικές φορές, όπου μια κοινότητα έχει υποδομή και κουλτούρα συνεργασίας, ένα κεντρικό σύστημα μίνι δικτύων «μικροπαραγωγής» εξυπηρετεί ένα ολόκληρο χωριό.

Συχνά με την υποστήριξη πολυμερών τραπεζών και διμερών χορηγών βοήθειας, πολλά εκατομμύρια ηλιακά συστήματα οικιακής χρήσης (SHS) έχουν εγκατασταθεί

παγκοσμίως, ειδικά στην Αφρική, την Άπω Ανατολή και τη Νότια Αμερική, μαζί με δομές αγοράς για περαιτέρω διάδοση. Αρκετές αναπτυσσόμενες χώρες διαθέτουν καινοτόμα επιχειρηματικά μοντέλα για τη μικροπαραγωγή φωτοβολταϊκών με βάση το «τέλος για την υπηρεσία», το «payasyougo» ή «προπληρωμένη μέτρηση» για τη βελτίωση της οικονομικής προσιτότητας. Η κυβέρνηση της Κίνας διένειμε περίπου 400.000 SHS μεταξύ 2005 και 2011, συμπληρώνοντας τα 2800 MW Φ/Β που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο. Σε παρόμοια περίοδο, περίπου 1,3 εκατομμύρια SHS διανεμήθηκαν στο Μπαγκλαντές από 30 συνεργαζόμενους οργανισμούς, με χρηματοδότηση από την Παγκόσμια Τράπεζα και άλλους φορείς (REN21 2012).

Σε πλουσιότερες χώρες, τα ηλιακά οικιακά συστήματα χρησιμοποιούνται σε απομακρυσμένα αγροκτήματα κ.λπ., πολύ μακριά από το δίκτυο για να δικαιολογούν τη σύνδεση. τέτοια συστήματα έχουν συνήθως μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ (>5 kW) για περισσότερες ηλεκτρικές συσκευές από ό,τι είναι προσιτό στις φτωχότερες χώρες.

Καθώς οι αγορές για μικρής κλίμακας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αυξάνονται, οι διαφορές μεταξύ αυτόνομων και συνδεδεμένων στο δίκτυο συστημάτων μικροπαραγωγής είναι λιγότερο αντίθετες. Είναι προφανώς ωφέλιμο εάν όσο το δυνατόν περισσότερα στοιχεία είναι κοινά, παρουσιάζοντας έτσι μια μεγαλύτερη συνολική αγορά και λιγότερη διαφοροποίηση μεταξύ «αναπτυσσόμενων» και «ανεπτυγμένων» περιοχών.



(1) (2)

**Εικ. 7.3.** Η δημόσια εκτίμηση και κατανόηση είναι κρίσιμης σημασίας για την επιτυχία.

1. Νοικοκυριά με ένα μικρό σύστημα φωτισμού σπιτιών στο Μπουτάν. Η εκπαίδευση των ντόπιων στη βασική συντήρηση τέτοιων συστημάτων είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία τους.
2. Μέλη του WestmillSolarCooperative στο Ηνωμένο Βασίλειο στα εγκαίνια της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 5 MW. Όλοι οι πολλοί συνεταιριστικοί μέτοχοι έχουν ίσα δικαιώματα, όποια κι αν είναι η επένδυσή τους.

### **7.5. Περιβαλλοντική επίπτωση**

Κατά τη λειτουργία, τα φωτοβολταϊκά είναι φιλικά προς το περιβάλλον, χωρίς εκπομπές και θόρυβο, αν και η κατασκευή περιλαμβάνει ορισμένες πλήρως ελεγχόμενες επιβλαβείς χημικές ουσίες και χρησιμοποιεί ενέργεια. Η εγγυημένη διάρκεια ζωής της μονάδας από τους κατασκευαστές είναι συνήθως τουλάχιστον 20 χρόνια, αλλά οι περισσότερες μονάδες θα παράγουν αποδεκτά για πολύ περισσότερο, ίσως έως ~ 100 χρόνια για μονάδες με κρυσταλλικά κύτταρα σε καλή ενθυλάκωση. Στο τέλος του κύκλου ζωής τους, οι μονάδες θα πρέπει να επιστραφούν για ανακύκλωση από ειδικούς. Δυστυχώς, τέτοιες εγκαταστάσεις δεν είναι (ακόμα) κοινές. Ο χρόνος για μια δεδομένη φωτοβολταϊκή μονάδα να παράγει ηλεκτρική ενέργεια ίση με αυτήν που χρησιμοποιείται για την κατασκευή της (η απόσβεση της ενέργειας της) εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία της τοποθεσίας και τη μέθοδο κατασκευής. Για ένα τυπικό εύκρατο κλίμα, αυτός ο χρόνος απόσβεσης ενέργειας για μονάδες ενθυλακωμένες με πυρίτιο μονού κρυστάλλου είναι περίπου δύο έως τρία χρόνια. για τεχνολογίες λεπτής μεμβράνης και για πιο ηλιόλουστες τοποθεσίες είναι λιγότερο.

### **7.6. Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία**

Οι μέσες παγκόσμιες θερμοκρασίες έχουν αυξηθεί σημαντικά από τη βιομηχανική επανάσταση και η τελευταία δεκαετία (2011-2020) ήταν η θερμότερη δεκαετία που έχει καταγραφεί. Από τα 20 θερμότερα χρόνια, τα 19 έχουν συμβεί από το 2000. Τα στοιχεία δείχνουν ότι το 2020 ήταν επίσης η θερμότερη χρονιά που έχει καταγραφεί για την Ευρώπη. Τα περισσότερα στοιχεία δείχνουν ότι αυτό οφείλεται στην αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) που παράγονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Η μέση παγκόσμια θερμοκρασία είναι σήμερα 0,95 έως 1,20 °C

υψηλότερη από ό,τι στα τέλη του 19ου αιώνα. Οι επιστήμονες θεωρούν ως όριο με επικίνδυνες και καταστροφικές συνέπειες για το κλίμα και το περιβάλλον την αύξηση κατά 2°C σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η διεθνής κοινότητα συμφωνεί ότι η υπερθέρμανση του πλανήτη πρέπει να παραμείνει πολύ κάτω από μια αύξηση 2°C.

Το 2021, η ΕΕ καθόρισε την κλιματική ουδετερότητα, τον στόχο των μηδενικών καθαρών εκπομπών έως το 2050, νομικά δεσμευτική στην ΕΕ. Έθεσε ενδιάμεσο στόχο μείωσης των εκπομπών κατά 55% έως το 2030. Αυτός ο στόχος των μηδενικών καθαρών εκπομπών κατοχυρώνεται στη νομοθεσία για το κλίμα. Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία είναι ο οδικός χάρτης για να γίνει η ΕΕ κλιματικά ουδέτερη έως το 2050. Η συγκεκριμένη νομοθεσία που θα επιτρέψει στην Ευρώπη να επιτύχει τους στόχους της Πράσινης Συμφωνίας ορίζεται στη δέσμη Fit for 55 που παρουσίασε η Επιτροπή τον Ιούλιο του 2021. Θα περιλαμβάνει την αναθεώρηση της υφιστάμενης νομοθεσίας για τη μείωση των εκπομπών και την ενέργεια, η οποία επεξηγείται περαιτέρω παρακάτω. Η ΕΕ εργάζεται επίσης για την επίτευξη μιας κυκλικής οικονομίας έως το 2050, δημιουργώντας ένα βιώσιμο σύστημα τροφίμων και προστατεύοντας τη βιοποικιλότητα και τους επικονιαστές.

Προκειμένου να χρηματοδοτήσει την Πράσινη Συμφωνία, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε τον Ιανουάριο του 2020 το Επενδυτικό Σχέδιο Βιώσιμης Ευρώπης, το οποίο στοχεύει στην προσέλκυση τουλάχιστον 1 τρισεκατομμυρίου ευρώ δημόσιων και ιδιωτικών επενδύσεων την επόμενη δεκαετία. Σύμφωνα με το επενδυτικό σχέδιο, το Ταμείο JustTransition έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει περιφέρειες και κοινότητες που πλήττονται περισσότερο από μια πράσινη μετάβαση, για παράδειγμα περιοχές που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον άνθρακα.

### **7.7. Συμπεράσματα**

Η μαζική παραγωγή φωτοβολταϊκών μονάδων συνεχίζει να αυξάνεται δραματικά σε κλίμακα και ποιότητα, με σχετική μείωση της τιμής, επομένως ένα μέλλον όπου η πλειονότητα των νέων στεγών σε κτίρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια είναι προβλέψιμο. Ως μηχανισμός για τέτοια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η φωτοβολταϊκή ισχύς είναι απaráμιλλη – δεν υπάρχουν εκπομπές, δεν υπάρχει θόρυβος, σχεδόν κανένα κόστος λειτουργίας, η διάρκεια ζωής είναι τουλάχιστον αρκετές δεκαετίες, το νέο κόστος μειώνεται.

Μεταξύ των διαφόρων τύπων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα ηλιακά φωτοβολταϊκά έχουν τραβήξει τη μεγαλύτερη προσοχή λόγω της χαμηλής ρύπανσης, του άφθονου αποθέματος και της ατελείωτης παροχής. Η ηλιακή φωτοβολταϊκή τεχνολογία έχει θετικές και αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η περιβαλλοντική απώλεια από την ηλιακή φωτοβολταϊκή τεχνολογία είναι μικρότερη από εκείνη από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με καύση άνθρακα. Οι αρνητικές επιπτώσεις της παραγωγής ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων περιλαμβάνουν τη ρύπανση των λυμάτων και των απερίων, ενώ περιέχουν φθόριο, χρώμιο με λύματα και υδροφθόριο και αέριο τετραχλωριούχο πυρίτιο. Τα ηλιακά πάνελ είναι επίσης πηγή φωτορύπανσης. Η ακατάλληλη απόρριψη των ηλιακών κυψελών που έχουν φτάσει στο τέλος της διάρκειας ζωής τους βλάπτει το περιβάλλον μέσω της δυσοσμίας που παράγουν και της ζημιάς που προκαλούν στο έδαφος. Επομένως, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι θετικές και αρνητικές επιπτώσεις της τεχνολογίας παραγωγής φωτοβολταϊκών ενέργειας πράσινης ενέργειας στο περιβάλλον.

Τα ενεργειακά προβλήματα εξακολουθούν να περιορίζουν την οικονομική ανάπτυξη. Επί του παρόντος, οι κύριες παγκόσμιες πηγές ενέργειας, όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, παρέχουν μη ανανεώσιμη ενέργεια (Xuetal., 2010). Τα ορυκτά καύσιμα, συμπεριλαμβανομένου του άνθρακα, του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, είναι περιορισμένος πόρος (Shafiee and Toral, 2009). Η μη ανανεώσιμη ενέργεια γίνεται ολοένα και πιο σπάνια και υπόκειται σε αυστηρά περιβαλλοντικά πρότυπα. Έτσι, αποτελεσματικές μέθοδοι χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αναπτύσσονται παγκοσμίως (Fan, 2011). Η ηλιακή ενέργεια, η οποία είναι άφθονη, ανεξάντλητη, ευρέως διανεμημένη και χωρίς ρύπανση, έχει προκαλέσει μεγάλη προσοχή (Dehghanetal.,2014;Rath and Marder, 2007). Η εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας αντιπροσωπεύεται από την ηλιακή φωτοβολταϊκή τεχνολογία. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί άφθονη ηλιακή ενέργεια και περιλαμβάνει μια ασφαλή και καθαρή διαδικασία παραγωγής ενέργειας (Slocumetal., 2011). Η εκτεταμένη εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Huang, 2010). Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως χαμηλό κόστος συντήρησης λειτουργίας εξοπλισμού, απουσία περιφερειακών περιορισμών στην εγκατάσταση και χαμηλό κόστος γραμμών μεταφοράς (Theocharisetal., 2005).

Το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας στην ενεργειακή δομή παραμένει χαμηλό σε όλο τον κόσμο, αλλά ο μελλοντικός στόχος είναι η ανανεώσιμη ενέργεια, που

αντιπροσωπεύεται από την ηλιακή ενέργεια, να αντικαταστήσει σταδιακά τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα. Τα φωτοβολταϊκά (PV) ήταν μια από τις καλύτερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έχοντας τις λιγότερες αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον (Solangietal., 2011; Santosetal., 2014; Ndiayeetal., 2014; Versoetal., 2015; Moosavianetal., 2013). Οι κυβερνήσεις έχουν θεσπίσει μια σειρά νόμων και κανονισμών για την υποστήριξη της ηλιακής βιομηχανίας και οι επιστήμονες επιδιώκουν μια πιο αποτελεσματική και οικονομική τεχνολογία ηλιακών φωτοβολταϊκών με στόχο να αυξήσουν το ποσοστό των ηλιακών φωτοβολταϊκών στην ενεργειακή δομή.

Ωστόσο, οι αρνητικές επιπτώσεις της ηλιακής φωτοβολταϊκής τεχνολογίας δεν έχουν εξεταστεί επαρκώς και μάλιστα αγνοούνται. Η διαδικασία των ηλιακών φωτοβολταϊκών παράγει απόβλητα αέρια (Turconi, 2013), τα οποία είναι δύσκολο να εξαλειφθούν, και ρύπανση των λυμάτων (Kaygusuz, 2009; Kang, 2011; Xiongetal., 2010). Ένα ηλιακό φωτοβολταϊκό σύστημα που έχει ξεπεράσει την ωφέλιμη ζωή του γίνεται απόβλητο που μολύνει το περιβάλλον. Η πηγή ρύπανσης σε ένα εργοστάσιο ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα είναι κυρίως η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα, η ηλιακή φωτοβολταϊκή τεχνολογία περιλαμβάνει κυρίως τη διαδικασία παραγωγής φωτοβολταϊκών μονάδων (Piemonteetal., 2011). Ο όγκος των εκπομπών αποβλήτων από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία παραγωγής είναι μικρότερος από αυτόν των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα και πετρελαίου.

### **Βιβλιογραφικές αναφορές**

- [1] AmanM.M., SolangiK.H., hossainM.S., BadarudinA., etal. A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015; 41: 1190-1204.
- [2] Bang Y.Y., Hong N.J., Lee D.S., Lim S.R. Comparative assessment of solar photovoltaic panels based on metal-derived hazardous waste, resource depletion, and toxicity potentials. *Int. J. Green Energy.* 2018; 15: 550-557.
- [3] Boxwell, M. (2012, 6th edn). *Solar Electricity Handbook*, Greenstream Publishing, UK. Well described by its subtitle, 'A simple practical guide to solar energy: how to design and install photovoltaic solar electric systems'. See also [www.SolarElectricityHandbook.com](http://www.SolarElectricityHandbook.com).

- [4] Chaurey, A. and Kandpal, T.C. (2010). ‘Assessment and evaluation of PV based decentralized rural electrification: an overview’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2266–2278. Excellent worldwide review, focusing on the social and institutional issues and the various ways used to meet them in different parts of the world.
- [5] Dehghan AA, Movahedi A, Mazidi M, et al. (2014). Experimental investigation of energy and exergy performance of square and circular solar ponds. *Sol Energy*, 97: 273-284.
- [6] Elizabeth H, MacDonald J et al (2011) The costs and benefits of largescale solar photovoltaic power production in Abu Dhabi, United Arab Emirates. *Renew Energy* 36: 789-796
- [7] European Commission (1999). ExternE. In: *Global warming*, vol. 8.
- [8] European Photovoltaic Industry Association (2012). *Global Market Outlook for Photovoltaics until 2016*, available at [www.epia.org](http://www.epia.org).
- [9] Fan DL (2011). World energy status and the future. *Metal Heat Treatment* 36: 119-131.
- [10] Feldman, D. et al. (2013). *Photovoltaic Pricing Trends: Historical, recent, and near-term projections*, National Renewable Energy Laboratory, USA (June).
- [11] Goetzberger, A. and Hoffmann, V.U. (2005). *Photovoltaic Solar Energy Generation*, Springer Series in Optical Science, Springer.
- [12] Green, M.A. (1998). *Solar Cells: Operating principles, technology and system application*, Prentice-Hall, New York. Reprinted by the University of New South Wales, Australia. A basic text from nearly first principles.
- [13] Green, M.A. (2001). *Photovoltaic Physics and Devices*, in J.E. Gordon (ed.), *Solar Energy: The state of the art*, James & James, London, pp. 291-355.
- [14] Green, M.A. (2006). *Third Generation Photovoltaics*, Springer, New York.
- [15] Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. and Dunlop, E.D. (2012). ‘Solar cell efficiency tables (version 39)’, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 20, 12–20. Continuing series of reports; see e.g. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.2163/full>.
- [16] Huang Q, (2010). Introduction to solar power. *Science and technology of heaven and earth*, 23: 33.



- [17] IEA-PVPS (2013). Pico Solar PV Systems for Remote Homes. Useful summary, also including some history of ‘solar home systems’ for developing countries; available from [www.ica-pvps.org](http://www.ica-pvps.org).
- [18] IRENA (2012). Renewable Energy Cost-analysis Series: Issue 4, Photovoltaics, International Renewable Energy Agency, [www.irena.org](http://www.irena.org).
- [19] Islam A.K.M.S., Islam M., Rahman T. Effective renewable energy activities in Bangladesh. *Renew. Energy*. 2006;31:677-688. [https://www.leonics.com/support/article2\\_13j/articles2\\_13j\\_en.php](https://www.leonics.com/support/article2_13j/articles2_13j_en.php) LEONICS.
- [20] Islam, S., Woyte, A., Belmans, R., Heskes, P., Rooij, P.M. and Hogedoom, R. (2006). ‘Cost effective second generation AC-modules: development and testing aspects’, *Energy*, 31(12), 1897-1920.
- [21] Kang CC (2011). Solar cell production of waste gas pollutants and handling measures. *Sci Channel 6*: 100-104.
- [22] Kaygusuz K (2009). Environmental impacts of the solar energy systems. *Energy Sources 31*: 1376-1386.
- [23] King R. R. et al., (2009). Band-Gap-Engineered Architectures for High-Efficiency. Multijunction Concentrator Solar Cells. 24th European Photovoltaic Solar Energy.
- [24] Knapp, K. and Jester, T. (2001). ‘Empirical investigation of the energy payback time for photovoltaic modules’, *Solar Energy*, 71, 165-172. See also the more optimistic estimates of energy payback times by Alsema, E. (1998) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2, 387-415; also Fthenak, V. et al. (2005). *Progress in Photovoltaics*, 13, 713-723, and (2008) *Environment, Science and Technology*, 42, 2168-2174.
- [25] Krauter, S. (2006). *Solar Electric Power Generation*, Springer, New York. Useful on basic circuits, etc.; also some modeling of uses.
- [26] Labouret, A. and Viloz, M. (2011). *Solar Photovoltaic Energy*, The Institution of Engineering and Technology, London. Translated from 4th edn of an accessible French work.
- [27] Loos, G. and van Hemert, B. (eds) (1999). *Stand-alone Photovoltaic Applications: Lessons learned*, International Energy Agency, Paris, and James & James, London.
- [28] Luque, A. and Hegedus, S. (eds) (2011, 2nd edn). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, Wiley, NewYork.

- [29] McDonald N.C., Pearce J.M. Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules. *Energy Pol.* 2010; 38: 7041-7047.
- [30] McEvoy, A., Markvart, T. and Castañer, L. (eds) (2011). *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and applications*, Elsevier, Oxon.
- [31] Mondal M.A.H., Islam A.K.M.S. Potential and viability of grid-connected solar PV system in Bangladesh. *Renew. Energy.* 2011; 36: 1869-1874.
- [32] Moosavian SM, Rahim NA, Selvaraj J et al (2013). Energy policy to promote photovoltaic generation. *Renew SustEnerg Rev* 25: 44-58.
- [33] Ndiaye A, Cheikh MF et al (2014) Degradation evaluation of crystalline silicon photovoltaic modules after a few operation years in a tropical environment. *Sol Energy* 103: 70-77.
- [34] Piemonte V, Falco MD, Tarquini P, Giaconia A (2011) Life cycle assessment of a high temperature molten salt concentrated solar power plant. *Sol Energy* 85: 1101-1108.
- [35] Rath BB, Marder JM (2007) Powering the future: does the fuel gage read empty? *Adv Mater Progresses* 165: 28-29.
- [36] REN21 (2012). *Global Status Report 2012*. This is an annual survey of RE use and policies around the world, available at [www.ren21.org](http://www.ren21.org).
- [37] Santos T, Gomes N, Freire S et al (2014). Applications of solar mapping in the urban environment. *Appl Geogr* 51: 48-57.
- [38] Shafiee S, Topal E (2009). When will fossil fuel reserves be diminished? *Energy Policy* 37: 181-189.
- [39] Slocum AH, Codd DS, Buongiorno J, Forsberg C et al (2011). Concentrated solar power on demand. *Sol Energy* 85: 1519-1529.
- [40] Solangi KH, Islam MR, Saidur R et al (2011). A review on global solar energy policy. *Renew SustEnerg Rev* 15: 2149-2163.
- [41] Soley, S.S .; Dwivedi, A. D. D. (2019). Advances in high efficiency crystalline silicon homo junction solar cell technology. *AIP Conference Proceedings*, Volume 2104, Issue 1, id.030033
- [42] Tasnia K., Begum S., Tasnim Z., Khan M.Z.R. ICECE 2018 - 10th Int. Conf. Electr. Comput. Eng. 2019. End-of-life management of photovoltaic modules in Bangladesh; pp. 445-448.
- [43] Theocharis T, Niki F, Vassilis G (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy* 33: 289-296.

- [44] Turconi R (2013) Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: overview, comparability and limitations. *Renew SustEnergy Rev* 28: 555-565.
- [45] Vega Garita, V., Ramirez Elizondo, L., Narayan, N., & Bauer, P. (2018). Integrating a photovoltaic storage system in one device: A critical review. *Progress in Photovoltaics: research and applications*, 27 (2019)(4), 346-370.
- [46] Verso A, Martin A, Amador J, Dominguez J (2015) GIS-based method to evaluate the photovoltaic potential in the urban environments: the particular case of Miraflores de la Sierra. *Solar Energy* 117: 236-245.
- [47] Weir, T. and Prasad, S. (2012). 'Adoption of climate-smart technologies: the case of rural solar electricity in the Pacific Islands', available at [www.climate2012.de](http://www.climate2012.de).
- [48] Wenham, S.R., Green, M.A., Watt, M.E., Corkish, R. and Sproul, A. (2011, 3rd edn). *Applied Photovoltaics*, Routledge, Oxon.
- [49] Xiong Y, Wang BD, Jiang LR (2010). Fluoride wastewater's treatment technology of crystalline silicon solar battery production. *Ground Water* 32: 58-60.
- [50] Xu LC, Guo YH, Gong YW (2010). Introduction to China's major energy utilization present situation and development trend of future energy. *Energy TechnolManag* 3: 155-157.

*Journals and websites*

- [51] *Progress in Photovoltaics*, bimonthly by Wiley, Chichester.
- [52] [www.solarbuzz.com](http://www.solarbuzz.com).
- [53] [www.solarserver.com/](http://www.solarserver.com/). International Solar Energy information.
- [54] [www.nrel.gov/pv/](http://www.nrel.gov/pv/). US National Center for Photovoltaics. Strong on R&D, US government programs, and case studies.
- [55] [www.iea-pvps.org](http://www.iea-pvps.org). Website of IEA Task Force on Photovoltaic Power Systems.