

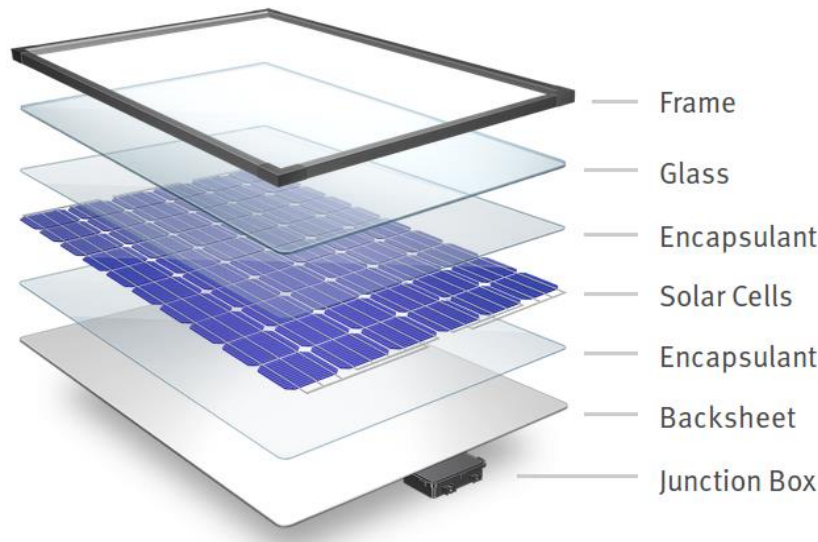


---

## ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΚΕΛΙΩΝ

---

### ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



### ΟΝΟΜΑΤΑ ΦΟΙΤΗΤΩΝ:

**ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΠΑΣΓΙΑΝΝΗΣ & ΚΥΡΙΑΚΟΣ ΕΥΦΡΑΙΜΙΔΗΣ**

### ΑΡΙΘΜΟΙ ΜΗΤΡΩΟΥ:

**ΜΗ09279 & ΜΗ09289**

### ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:

**ΑΘΗΝΑ ΚΡΕΣΤΟΥ**

**ΑΚΑΔΗΜΑΙΚΟ ΕΤΟΣ 2022/2023**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, οφείλουμε να ευχαριστήσουμε την καθηγήτριά μας Αθηνά Κρέστου.

Επίκουρος Καθηγήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας που βρίσκεται στην Κοζάνη του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών και Βιομηχανικού Σχεδιασμού, για τις χρήσιμες συμβουλές της και τις υποδείξεις της, καθώς και για την απαραίτητη καθοδήγηση που μας παρείχε.

Θα θέλαμε ,επίσης, να ευχαριστήσουμε και τους αγαπημένους μας συγγενείς και φίλους οι οποίοι μας βοήθησαν να συνεχίσουμε στις δύσκολες στιγμές και να προσπαθήσουμε για το καλύτερο αποτέλεσμα αυτής της πτυχιακής.

Τέλος, αυτή η πτυχιακή ελπίζουμε να μας βοηθήσει να βάλλουμε τις βάσεις για την καριέρα μας στο μέλλον της μηχανολογίας.

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Εισαγωγή.....	5
Κεφάλαιο 1ο: Φωτοβολταϊκά κελιά.....	6
1.1.Τι είναι φωτοβολταϊκά κελιά – συστοιχίες.....	6
1.2.Η χρησιμότητα των φωτοβολταϊκών κελιών.....	9
1.3 Η άνθηση της αγοράς των φωτοβολταϊκών.....	10
1.4. Φωτοβολταϊκά μεγέθη αξίας.....	12
1.5. Κορυφαίες χώρες φωτοβολταϊκής ενέργειας παγκοσμίως.....	12
Κεφάλαιο 2° : Η δομή των φωτοβολταϊκών κελιών.....	16
2.1.Στρώματα φωτοβολταϊκών στοιχείων των κελιών.....	16
2.2.Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.....	17
2.3.Απόδοση των ηλιακών κελιών.....	18
Κεφάλαιο 3° :Υλικά κατασκευής των φωτοβολταϊκών κελιών ανά γενιά και η απόδοση τους .....	21
3.1Φωτοβολταϊκά κελιά πρώτης γενιάς.....	21
3.2.Φωτοβολταϊκά κελιά δεύτερης γενιάς.....	23
3.3. Φωτοβολταϊκά κελιά τρίτης γενιάς.....	27
3.4.Φωτοβολταϊκά κελιά τέταρτης γενιάς.....	43
3.5.Φωτοβολταϊκά κελιά πέμπτης γενιάς.....	47
Κεφάλαιο 4° :Ανάπτυξη νέων υλικών για την κατασκευή κελιών για καλύτερες ενεργειακές αποδόσεις.....	50
4.1.Υλικά για εύκαμπτο ηλιακό κύτταρο πυριτίου.....	50
4.2.Υλικά για εύκαμπτα ηλιακά στοιχεία ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες.....	51
4.3.Υλικά για εύκαμπτο ηλιακό κύτταρο περοβσκίτη.....	52
4.4.Υλικά για ηλιακό κύτταρο Cu(In, Ga)Se <sub>2</sub> .....	53
Συμπέρασμα και Μελλοντικές προοπτικές.....	55
Βιβλιογραφία.....	57

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών κυψελών έχει αναπτυχθεί τρομερά ως βιώσιμη πηγή ενέργειας λόγω των αυξανόμενων ανησυχιών σχετικά με τον αντίκτυπο των πηγών ενέργειας που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, στην υπερθέρμανση του πλανήτη και στην κλιματική αλλαγή. Τα διαφορετικά φωτοβολταϊκά στοιχεία που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις και για κάποιους σε πέντε κύριες κατηγορίες που ονομάζονται γενιές, με την τρέχουσα αγορά να καλύπτεται κυρίως από τις δύο πρώτες γενιές. Η πρώτη γενιά (μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό πυρίτιο και αρσενίδιο του γαλλίου) περιλαμβάνει γνωστές τεχνολογίες μεσαίου/χαμηλού κόστους με μέτριες αποδόσεις. Η δεύτερη γενιά περιλαμβάνει έναν λιγότερο αποδοτικό εξοπλισμό, αν και είναι λιγότερο δαπανηρή η κατασκευή τους. Η τρίτη γενιά κάνει χρήση νέων υλικών, καθώς περιλαμβάνει και μεγάλη μεταβλητότητα στο σχεδιασμό αλλά εξαιρετικά αποδοτικές μπαταρίες. Η τέταρτη γενιά, γνωστή και ως "ανόργανη-οργανική", συνδυάζει το χαμηλό κόστος/ευελιξία των πολυμερών μεμβρανών με νέες ανόργανες νανοδομές (δηλαδή νανοσωματίδια μετάλλων και οξειδία μετάλλων) με οργανικά νανοϋλικά με βάση τους νανοσωλήνες άνθρακα, το γραφένιο και τη σταθερότητα των παραγώγων τους. Ο κύριος σκοπός αυτής της μελέτης είναι να παρουσιάσει την τεχνολογία αιχμής των φωτοβολταϊκών κυψελών όσον αφορά τα δομικά υλικά και την απόδοσή τους. Πραγματοποιείται μια ολοκληρωμένη ανάλυση των πέντε γενεών, συμπεριλαμβανομένων των αρχιτεκτονικών συσκευών, των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών τους. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην τέταρτη γενιά, η οποία αναφέρεται στους διαφορετικούς ρόλους των οργανικών και των νανο-συστατικών. Τέλος, συνοψίζονται τα συμπεράσματα και οι μελλοντικές προοπτικές εξέλιξης του εν λόγω τομέα.

**Λέξεις-κλειδιά :** Φωτοβολταϊκά υλικά, φωτοβολταϊκή απόδοση, δραστηριότητες έρευνας και ανάπτυξης, φωτοβολταϊκή πολιτική.

## Abstract

In recent years, photovoltaic cell technology has been terribly developed as a sustainable source of energy due to increasing concerns about the impact of fossil fuel-based energy sources and climate change. The different photovoltaic elements that have been developed to date can be divided into four main categories called Generations (GEN), with the current market being covered mainly by the first two generations. 1Gen (single or polypotype and arsenide of Galli) includes well-known medium/low-cost technologies with moderate yields. 2Gen (diluted water technology) includes less efficient equipment, although their construction is less expensive. 3Gen has the use of new materials, as well as high design variability and includes non-critical but extremely efficient batteries. 4GEN, also known as "inorganic-organic", combines low cost/flexibility of polymer membranes with new inorganic nanodes (ie metal nanoparticles and metal oxides) with organic nanomas based on carbon nanotubes, graphus and stability of derivatives. The main purpose of this review is to present cutting-edge technology in photovoltaic cell technology in terms of building materials, performance and production costs. A comprehensive comparative analysis of the four generations, including architectural devices, advantages and restrictions, is performed. Particular emphasis is placed on 4Gen, which discusses the different roles of organic and nano-constituents. Finally, the conclusions and future prospects are summarized.

**Keywords** :Photovoltaic materials, photovoltaic efficiency, research and development activities, photovoltaic policy.

## Εισαγωγή

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως αλλάζουν. Η παγκόσμια ζήτηση και η εξάρτηση από την ηλεκτρική ενέργεια αυξάνονται και οι περιβαλλοντικές ανησυχίες για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου γίνονται πιο έντονες (Energy World, 2015). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ενός εξευγενισμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζεται σε μεγάλο όγκο παραγωγής μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που θα προέρχεται κυρίως από τα αιολικά και ηλιακά φωτοβολταϊκά (PV). Η τεχνολογία των ηλιακών φωτοβολταϊκών είναι μία από τις ανανεώσιμες τεχνολογίες που έχουν τη δυνατότητα να διαμορφώσουν ένα καθαρό, αξιόπιστο, κλιμακωτό και προσιτό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στο μέλλον. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό το γεγονός, σε όλο τον κόσμο οι κυβερνήσεις ενθαρρύνουν την ανάπτυξη της ηλιακής φωτοβολταϊκής τεχνολογίας (Boer 2011). Ένα ευρύ φάσμα φωτοβολταϊκών υλικών είναι διαθέσιμο παγκοσμίως. Σε παγκόσμιο επίπεδο, υπάρχουν εκατοντάδες εταιρείες που εμπλέκονται στην κατασκευή φωτοβολταϊκών μονάδων με ποικίλα αποτελέσματα και περιορισμούς. Ταυτόχρονα, το κόστος εγκατάστασης διαφέρει σύστημα σε σύστημα και από έργο σε έργο. Στόχος αυτής της μελέτης είναι να αναθεωρήσει τις πιο πρόσφατα δημοσιευμένες πληροφορίες σχετικά με τα φωτοβολταϊκά υλικά και την αποδοτικότητά τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Action Plan for Achieving a Low Carbon Society 2008).

## Κεφάλαιο 1ο: Φωτοβολταϊκά κελιά

### 1.1.Τι είναι φωτοβολταϊκά κελιά - Συστοιχίες

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί βασικό πόρο για την ανάπτυξη των ανθρώπινων πολιτισμών και είναι δυνατόν να συνδεθεί με το βιοτικό πρότυπο και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μιας κοινωνίας. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να ληφθεί από διάφορους πόρους και με διαφορετικές μεθόδους παραγωγής, από την καύση των πρώτων υλών (όπως ο άνθρακας, το φυσικό αέριο, η βιομάζα κ.λπ.) μέχρι σε σύνθετα συστήματα πυρηνικών αντιδραστήρων. Τα τελευταία 50 χρόνια, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε, εξαιτίας της ισχυρής παρουσίας των ορυκτών καυσίμων (Boutchich et al. 2012).

Ωστόσο, στις μέρες μας εξαιτίας της ανησυχίας που επικρατεί για την κλιματική αλλαγή, η παραγωγή ενέργειας πρέπει να αναπροσανατολιστεί προς πιο ανανεώσιμους πόρους, όπως η ηλιακή ενέργεια, εις βάρος άλλων απολιθωμένων ενεργειών όπως ο άνθρακας. Η χρήση αυτής της πρωταρχικής πηγής ενέργειας (ορυκτά καύσιμα) συνεπάγεται όχι μόνο σοβαρές εκπομπές ρύπων, αλλά και πολύ υψηλή κατανάλωση νερού, σε μια εποχή που η έλλειψη αυτού του στοιχείου έχει γίνει, για πολλές χώρες, βασικό πρόβλημα της καθημερινότητας τους (Boutchich et al. 2012).

Η ηλιακή ενέργεια είναι η ενέργεια που λαμβάνεται από την ηλιακή ακτινοβολία και θεωρείται ανανεώσιμη, καθώς η ζωή του ήλιου υπολογίζεται ότι θα φτάσει τα 5000 και 10.000 δισεκατομμύρια έτη. Επιπλέον, αυτό το είδος ενέργειας είναι διαθέσιμο στα περισσότερα μέρη της Γης. Η φωτοβολταϊκή ενέργεια είναι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται απευθείας από την ακτινοβολία του ήλιου, η οποία ανακαλύφθηκε το 1839 από τον φυσικό Alexandre-Edmond Becquerel (Darghouth et al, 2011).

Αυτή η επίδραση βρίσκεται σε υλικά ημιαγωγών, που αναπτύσσεται μεταξύ ενός αγωγού και ενός μονωτήρα. Όταν η προσπίπτουσα ακτινοβολία με τη μορφή φωτονίων φτάσει στο υλικό, αυτά συλλαμβάνονται από τα ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα να παράγεται υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο και εάν ξεπεραστεί μια τιμή που ονομάζεται «ενεργειακό χάσμα», μπορούν να σπάσουν οι δεσμοί των πυρήνων και να κυκλοφορούν ελεύθερα μέσω του υλικού. Αυτή η ροή ηλεκτρονίων δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών και με την εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου στον ημιαγωγό, τα ηλεκτρόνια κινούνται προς την κατεύθυνση του πεδίου,

δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα (Gloucester Marine Terminal Rooftop Solar Array 2015).

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού αποτελέσματος. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα παρουσιάζουν μια αρχιτεκτονική βασισμένη στην ένωση δύο περιοχών ημιαγωγών με διαφορετική συγκέντρωση ηλεκτρονίων, αυτά τα υλικά μπορούν να είναι ο τύπος N (ημιαγωγοί με περίσσεια ηλεκτρονίων) ή ο τύπος P (ημιαγωγοί με περίσσεια θετικών φορτίων, που ονομάζονται οπές), αν και στις δύο περιπτώσεις το υλικό είναι ηλεκτρονικά ουδέτερο (Bundesbericht 2013). Όταν και οι δύο περιοχές P και N βρίσκονται σε επαφή, οι οπές ρέουν από την περιοχή P και τα ηλεκτρόνια από την περιοχή μέσω της διασταύρωσης P-N (ρεύμα διάχυσης). Επιπλέον, τα σταθερά ιόντα κοντά στη διασταύρωση παράγουν ένα ηλεκτρικό πεδίο προς την αντίθετη κατεύθυνση της διάχυσης, η οποία οδηγεί στο ρεύμα μετατόπισης. Σε ισορροπία, το ρεύμα διάχυσης ισορροπείται με το ρεύμα μετατόπισης, έτσι ώστε το καθαρό ρεύμα να είναι μηδέν. Σε αυτή την κατάσταση, δημιουργείται ένα δυνητικό φράγμα στη διασταύρωση P-N. Καθώς το φως χτυπά το κύτταρο, η ενεργειακή συμβολή των φωτονίων μπορεί να απορροφηθεί από τα ηλεκτρόνια, που μπορούν να σπάσουν τους δεσμούς τους, παράγοντας ζεύγη ηλεκτρονίων. Αυτοί οι φορείς φόρτισης ωθούνται από το ηλεκτρικό πεδίο και εξάγονται μέσω της διασταύρωσης P-N (International Energy Agency 2014).

Τα διαφορετικά φωτοβολταϊκά κύτταρα που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα μπορούν να ταξινομηθούν σε 4 κύριες κατηγορίες που ονομάζονται γενιές :

- Πρώτη γενιά (1<sup>st</sup> Gen): βασίζεται σε τεχνολογίες κρυσταλλικού πυριτίου, μονοκρυσταλλικές και πολυκρυσταλλικές, και στο αρσενίδιο του γαλλίου (GaAs)
- Δεύτερη γενιά (2<sup>nd</sup> Gen): Περιλαμβάνει το άμορφο πυρίτιο (A-SI) και τα μικροκρυσταλλικά πυριτικά (μC-SI) ηλιακά κύτταρα, το κάδμιο και το τελλουρίδιο.
- Τρίτη γενιά (3<sup>rd</sup> GEN): Περιλαμβάνει τεχνολογίες που βασίζονται σε νεότερες ενώσεις που περιλαμβάνουν νανοκρυσταλλικές μεμβράνες, ενεργές κβαντικές κουκίδες, διαδοχικά ή στοιβαγμένα πολυεπίπεδα ανόργανων που βασίζονται σε υλικά III-V, ευαισθητοποιημένα ηλιακά κύτταρα, κλπ. και



- Τέταρτη γενιά (4<sup>th</sup> GEN): Επίσης γνωστή ως "ανόργανη-οργανική", συνδυάζει το χαμηλό κόστος/ευελιξία των λεπτών μεμβρανών των πολυμερών με τη σταθερότητα των νέων ανόργανων νανοδομών όπως τα μεταλλικά νανοσωματίδια και τα μεταλλικά οξείδια ή τα νανοϋλικά με βάση τα νανοσωματίδια , όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα, το γραφένιο και τα παράγωγά του (Liu et al. ,2010).

Από την άποψη αυτή, οι υπολογισμοί καθώς και τα οικονομικά και τα χαρακτηριστικά της χρηματοδότησης ενός τέτοιου έργου πρέπει να γίνουν πριν από το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος . Από την άλλη πλευρά, υπάρχει έλλειψη συμφωνίας στη βιβλιογραφία σχετικά με την ταξινόμηση των φωτοβολταϊκών κυττάρων και αρκετοί συγγραφείς τις ταξινομούν σε διαφορετικές γενιές όπως συμβαίνει με το αρσενίδιο του γαλλίου και το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο ή τους νανοσωλήνες πυριτίου . Επιπλέον, υπάρχει διαμάχη σχετικά με την ύπαρξη της τέταρτης και της πέμπτης γενιάς , καθώς ορισμένοι συγγραφείς τα περιλαμβάνουν στην πρώτη και δεύτερη γραμμή της τρίτης γενιάς , ενώ άλλοι πιστεύουν ότι είναι διαφορετικές (Liu et al. ,2010) .

Επομένως , με όσα έχουν λεχθεί ανωτέρω η φωτοβολταϊκή κυψέλη είναι η βασική μονάδα σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα . Ένα μεμονωμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο παράγει τυπικά μεταξύ 1 και 2 watt, ικανοποιητική ισχύ για τη μεγαλύτερη πλειονότητα των εφαρμογών. Η ισχύς αυτή μπορεί να αυξηθεί συνδέοντας τις κυψέλες μεταξύ τους προκειμένου να σχηματιστούν μεγαλύτερες κυψέλες που ονομάζονται μονάδες. Οι μονάδες αυτές , με τη σειρά τους, μπορούν να συνδεθούν και να σχηματίσουν ακόμη μεγαλύτερες μονάδες γνωστές ως συστοιχίες, οι οποίες μπορούν να διασυνδεθούν μεταξύ τους για να παράγουν περισσότερη ισχύ κ.λπ. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα που να καλύπτει σχεδόν κάθε ανάγκη ρεύματος, ανεξάρτητα από το πόσο μικρή ή μεγάλη είναι (Nicholson 2015).

Οι μονάδες ή οι συστοιχίες, από μόνες τους, δεν αποτελούν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Πρέπει επίσης να έχουμε δομές τις οποίες να τις τοποθετούμε και να τις στρέφουμε προς τον ήλιο, και εξαρτήματα που να παίρνουν την ηλεκτρική ενέργεια συνεχούς ρεύματος που παράγεται από τις μονάδες ή τις συστοιχίες και να ρυθμίζουν την ηλεκτρική ενέργεια , ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Αυτές οι δομές και τα εξαρτήματα αναφέρονται ως ισορροπία συστήματος (Nicholson 2015).

Οι συστοιχίες είναι οι μεγαλύτεροι παραγωγοί ισχύος και αποτελούνται από πολλές μονάδες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή έως και πολλών μεγαβάτ ηλεκτρικής ενέργειας (Osamu 2003).

### 1.2. Η χρησιμότητα των φωτοβολταϊκών κελιών

Η πρώτη χρήση του πρώτου πρακτικού φωτοβολταϊκού στοιχείου ήταν μια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας για δορυφόρους σε τροχιά γύρω από τη Γη. Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες επιλέχθηκαν επειδή θεωρήθηκαν ασφαλέστερες από την πυρηνική ενέργεια. Στη Γη, τα φωτοβολταϊκά κύτταρα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μέρη που δεν είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ή όπου είναι πολύ δαπανηρό να χρησιμοποιηθεί ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από το δίκτυο. Αυτό συμβαίνει συχνά σε απομακρυσμένες περιοχές.

Οι άνθρωποι που ζουν σε απομονωμένα σπίτια ή που θέλουν να είναι ανεξάρτητοι από το ηλεκτρικό δίκτυο χρησιμοποιούν φωτοβολταϊκά στοιχεία για να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στα σπίτια τους λόγω της προσαρμοστικότητάς τους. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα μπορούν να τροφοδοτήσουν τις περισσότερες οικιακές συσκευές, όπως τηλεοράσεις, ψυγεία και υπολογιστές, και μπορούν επίσης να τροφοδοτήσουν ηλεκτρικούς φράκτες και τροφοδότες για τα ζώα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αγροκτήματα για την τροφοδοσία αντλιών που παρέχουν νερό για τα ζώα σε περιοχές βόσκησης που βρίσκονται πολύ μακριά από την κύρια φάρμα (Muhammad-Sukki et al. 2014).

Άλλα ανεξάρτητα, συχνά απομονωμένα, αντικείμενα χρησιμοποιούν φωτοβολταϊκά στοιχεία με παρόμοιους τρόπους. Οι φάροι πλοήγησης μπορούν να τροφοδοτούνται από φωτοβολταϊκά κύτταρα, όπως και οι σταθμοί εξοπλισμού απομακρυσμένης παρακολούθησης για συστήματα σωληνώσεων, συστήματα ποιότητας νερού και μετεωρολογικές πληροφορίες. Πολλά σήματα κυκλοφορίας, οδικές πινακίδες, πινακίδες, φώτα στάσης λεωφορείου, πινακίδες αυτοκινητοδρόμων, φωτισμός ασφαλείας και τηλέφωνα έκτακτης ανάγκης στο δρόμο χρησιμοποιούν επίσης αυτήν την τεχνολογία (Muhammad-Sukki et al. 2014).

Η χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων έχει πολλές θετικές πτυχές. Δεν κάνουν θόρυβο, απαιτούν ελάχιστη έως καθόλου συντήρηση και είναι αξιόπιστα. Δεν απαιτείται ειδική εκπαίδευση για τη λειτουργία ενός συστήματος φωτοβολταϊκών κυψελών. Επιπλέον,

τα φωτοβολταϊκά κύτταρα μπορούν να κατασκευαστούν σε διάφορα μεγέθη από πολύ μικρά έως πολύ μεγάλα, παρέχοντας ευελιξία στη χρήση. Επιπλέον, πολλά φωτοβολταϊκά κύτταρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπουδήποτε, επειδή μπορούν να χρησιμοποιήσουν τόσο το άμεσο ηλιακό φως όσο και το διάχυτο ηλιακό φως. Τέλος, τα συστήματα φωτοβολταϊκών κυψελών έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής που φτάνει τα είκοσι έως και τα τριάντα χρόνια. Έτσι, παράγουν πολύ περισσότερη ενέργεια μέσω της λειτουργίας τους κατά τη διάρκεια της ζωής τους από αυτή που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους (Nicholson 2015).

Όπως σε πολλές τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας, ένα σημαντικό μειονέκτημα για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι ότι δεν παράγουν ενέργεια, όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια. Εάν ο καιρός είναι κακός και ο ήλιος είναι κρυμμένος, όπως όταν βρέχει ή χιονίζει, αυτά τα κύτταρα δεν παράγουν ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα επίσης δεν παράγουν ρεύμα τη νύχτα. Εξαιτίας αυτής της κατάστασης, απαιτείται κάποιου είδους εφεδρικό σύστημα ή μια εναλλακτική παροχή ρεύματος (Nicholson 2015).

### 1.3 Η άνθηση της αγοράς των φωτοβολταϊκών

Η παγκόσμια ετήσια κατανάλωση ενέργειας προβλέπεται να αυξηθεί από τα 13 Tw/yr στα 30 Twyr έως το 2050. Καθώς αγωνιζόμαστε να καλύψουμε αυτή την τεράστια ζήτηση, ο παγκόσμιος ενεργειακός τομέας θα αντιμετωπίσει επίσης δύο πιεστικά ζητήματα: την μείωση των αποθεμάτων των ορυκτών και την αλλαγή του κλίματος που προκαλείται από τα αέρια του θερμοκηπίου. Η πυρηνική ενέργεια θεωρείται κύριος υποψήφιος για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μειωμένου άνθρακα. Υπάρχει, ωστόσο, η αβεβαιότητα σχετικά με το μέγεθος των αποθεμάτων των πυρηνικών καυσίμων, την αποτελεσματικότητα των πυρηνικών αντιδραστήρων κατά τη χρήση ουρανίου χαμηλότερου βαθμού και την πιθανότητα εξεύρεσης ικανοποιητικών λύσεων για διάθεση των πυρηνικών αποβλήτων (Sweetnam et al., 2013).

Από την άποψη των ανανεώσιμων πηγών, η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι μία από τις κυρίαρχες τεχνολογίες σήμερα, αλλά η αύξηση της προσφοράς είναι περιορισμένη. Η αιολική ενέργεια προσεγγίζει την ανταγωνιστικότητα με τη συμβατική παραγωγή ενέργειας και πρέπει να θεωρηθεί ως σημαντική πηγή για την κάλυψη των μελλοντικών ενεργειακών αναγκών. Ορισμένες εκτιμήσεις, ωστόσο, τοποθετούν τη συνολική παραγωγή αιολικής ενέργειας των ΗΠΑ στο εύρος 2-4 Twyr, πολύ μικρότερο από το

επίπεδο των 30 Twhyr. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να είναι η μόνη πηγή ανανεώσιμης ενέργειας με την ικανότητα να ανταποκρίνεται σε πολλές μελλοντικές ανάγκες (Sweetnam et al. ,2013) .

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις για τη δέσμευση ηλιακής ενέργειας. Τα ηλιακά θερμικά συστήματα μετατρέπουν την ακτινοβολία του ήλιου σε θερμική ενέργεια για εφαρμογές θέρμανσης ή, σε συνδυασμό με την ηλιακή συγκέντρωση, σε ηλεκτρική ενέργεια (Osamu 2003).

Αυτή η ενότητα αναφέρεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά και το βασικό ζήτημα είναι το κόστος. Υποθέτοντας μια διάρκεια ζωής του συστήματος 20 ετών, το σημερινό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά κυμαίνεται από \$ 0,25- \$ 0,65/kWh, σε σύγκριση με το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από άνθρακα, το οποίο είναι πιο κοντά στα \$ 0,04/kWh. Η δημιουργία ενός σημαντικού κλάσματος μελλοντικών ενεργειακών απαιτήσεων που θα καλύπτεται από τα φωτοβολταϊκά αποτελεί μια σημαντική πρόκληση, ιδίως επειδή η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά είναι σχεδόν ασήμαντη σε σχέση με την παραγωγή ενέργειας με βάση τα ορυκτά καύσιμα. Το 2003 στις Ηνωμένες Πολιτείες, η ηλιακή ενέργεια παρήγαγε το 0,1% της ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με την ενέργεια που παράγεται από τα ορυκτά καύσιμα. Ταυτόχρονα, τα έξοδα των φωτοβολταϊκών έχουν φτάσει σε ένα ευρώ , όπου η ζήτηση είναι πολύ ελαστική, με μικρές μειώσεις της τιμής που οδηγούν σε μεγάλες αυξήσεις των πωλήσεων (Sunshot Initiative 2014).

Κατά συνέπεια, η παραγωγή φωτοβολταϊκών αυξάνεται κατά 30% ετησίως . Το 2010, η φωτοβολταϊκή αγορά ξεπέρασε τα 15 δισεκατομμύρια δολάρια. Η αύξηση αυτή οφείλεται σε κυβερνητικές πολιτικές (επιδότησεις), κυρίως της Ιαπωνίας και της Γερμανίας . Αυτή η αύξηση της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας αγοράς θα οδηγήσει σε μειώσεις των τιμών. Η ιστορική καμπύλη μάθησης για την παραγωγή φωτοβολταϊκών μονάδων δείχνει μείωση των τιμών κατά 20% για κάθε διπλασιασμό των συσσωρευμένων πωλήσεων. Η επίτευξη ενός ανταγωνιστικού κόστους με την τρέχουσα ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από άνθρακα θα διαρκέσει 30-40 χρόνια. Αν και αυτή η παρέκταση εξαρτάται από τις υποθέσεις ανάπτυξης και την καμπύλη της αγοράς, οι περισσότερες εκτιμήσεις δίνουν παρόμοια χρονικά πλαίσια. Εάν αυτές

οι εκτιμήσεις αποδειχθούν αληθινές, τα φωτοβολταϊκά θα είναι ικανά να καλύψουν σε μεγάλο βαθμό τις ενεργειακές ανάγκες το 2050 (Sunshot Initiative 2014).

#### 1.4. Φωτοβολταϊκά μεγέθη αξίας

Μέχρι το τέλος του 2014, η σωρευτική παγκόσμια φωτοβολταϊκή χωρητικότητα έφτασε τα 177 GW (Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας, 2014), πράγμα που σημαίνει ότι το 1% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από φωτοβολταϊκά. Επιπλέον, μέχρι το τέλος του έτους 2014, υπήρχαν 20 χώρες σε όλο τον κόσμο που έχουν περάσει το σημείο αναφοράς του 1 GW της σωρευτικής φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας, 2015a). Για το έτος 2014, έχει παρατηρηθεί ότι η Ασία κατείχε την πρώτη θέση με περίπου το 60% των παγκόσμιων φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων να της ανήκουν. Η Κίνα, εγκατέστησε 10,6 GW το 2014, ενώ οι Η.Π.Α. 6,2 GW. Ωστόσο, η Ευρώπη έπεσε από τα 22 GW το 2011 στα 7 GW το 2014. Παρ' όλα αυτά, το έτος 2014, τα φωτοβολταϊκά συμβάλλουν στο 3,5% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη (Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας, 2015A). Το Ηνωμένο Βασίλειο δημιουργώντας φωτοβολταϊκά πάρκα 5 GW κατέχει την πρώτη θέση στις ευρωπαϊκές χώρες, ακολουθούμενη από τη Γερμανία (1,9 GW) και τη Γαλλία (0,9 GW) (Colville, 2020).

#### 1.5. Κορυφαίες χώρες φωτοβολταϊκής ενέργειας παγκοσμίως

Σύμφωνα με το Διεθνές Οργανισμό Ενέργειας, οι μεγάλες χώρες όσον αφορά την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών είναι η Κίνα, η Ιαπωνία, οι ΗΠΑ, η Γερμανία και το Ηνωμένο Βασίλειο. Με βάση μια έκθεση που δημοσιεύθηκε από την πολυεθνική εταιρεία παροχής συμβουλών Ernst & Young, η οποία κατατάσσει τις χώρες βάσει των δυνατοτήτων τους όσον αφορά τις επενδύσεις στην ανανεώσιμη ενέργεια και τις ευκαιρίες ανάπτυξης, αυτές οι πέντε χώρες κατέχουν το 80% των φωτοβολταϊκών στον κόσμο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η Κίνα και η Ιαπωνία εγκατέστησαν πέντε φορές περισσότερα φωτοβολταϊκά από τη Γερμανία και στη συνέχεια τέσσερις φορές περισσότερα από το Ηνωμένο Βασίλειο. Ωστόσο, οι ΗΠΑ έχουν τις μισές εγκαταστάσεις σε σχέση με την Κίνα. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η Γερμανία κατέχει την πρώτη θέση από τη δεκαετία 2000, όσον αφορά τις σωρευτικές εγκαταστάσεις. Ωστόσο, λόγω της δημιουργίας πολλών και σημαντικών εγκαταστάσεων το έτος 2014, η Ιαπωνία και η Κίνα αποτελούν σκληρό ανταγωνιστή της Γερμανίας.

Η Κίνα έχει εξαιρετικά πλούσιους πόρους ηλιακής ενέργειας και η φωτοβολταϊκή της βιομηχανία αυξάνεται με ταχύτερο ρυθμό από οποιαδήποτε άλλη χώρα στον κόσμο (Liu et al., 2010, Wigmore et al., 2012). Η ανάπτυξη αυτή έγινε δυνατή λόγω της σημαντικής υποστήριξης των κυβερνητικών κινήτρων και πολιτικών. Το πρόγραμμα φωτεινότητας και ηλεκτρισμού των δήμων είναι μία από τις κύριες κινητήριες δυνάμεις πίσω από την επέκταση της ηλιακής φωτοβολταϊκής αγοράς στην Κίνα. Το πρόγραμμα φωτεινότητας εφαρμόστηκε το 1996 με στόχο τη χρήση φωτοβολταϊκών μονάδων και την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για τις καθημερινές ανάγκες του πληθυσμού της Κίνας (Zhang et al., 2013). Μετά από αυτό το 2002, η Εθνική Επιτροπή Ανάπτυξης και Μεταρρυθμίσεων παρουσίασε ένα πρόγραμμα ηλεκτροδότησης δήμων για τις απομακρυσμένες περιοχές και τις δυτικές περιοχές της Κίνας. Σύμφωνα με αυτό το πρόγραμμα, κατασκευάστηκαν 20 MW ηλιακών φωτοβολταϊκών σταθμών σε 688 πόλεις και ήταν η πρώτη προσπάθεια μεγάλης κλίμακας της κινεζικής κυβέρνησης να επιλύσει τις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας για περιοχές χωρίς ηλεκτροδότηση .

Με βάση την επιτυχία αυτής της προσπάθειας, η κυβέρνηση υποστηρίζει αυτό το πρόγραμμα όλο και περισσότερο και, ως εκ τούτου, η βιομηχανία παραγωγής φωτοβολταϊκών μονάδων αυξάνεται ταχέως (Κινεζική κυβέρνηση, 2015).

Οι πολιτικές της Ιαπωνίας είναι πάντα υπέρ της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών. Έχει παρατηρηθεί ότι αυτές οι πολιτικές είτε στοχεύουν στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών ή στο ζήτημα της κλιματικής αλλαγής. Μετά την πετρελαϊκή κρίση το 1973, η Ιαπωνία εισήγαγε την πρώτη της φωτοβολταϊκή βιομηχανία . Το έργο υποστήριξης ονομάστηκε Sunshine Project, το οποίο θεσπίστηκε από το Υπουργείο Οικονομίας, Εμπορίου και Βιομηχανίας το 1974 (Lewis et al., 2009). Σκοπός αυτού του έργου ήταν η έρευνα και η ανάπτυξη τεχνολογίας καθαρής ενέργειας. Το μεγαλύτερο μέρος του προϋπολογισμού της Ιαπωνίας δαπανάτε για την ηλιακή θερμική τεχνολογία (Kurokawa και Osamu, 2001). Ωστόσο, το New Sunshine Project , το οποίο θεσπίστηκε το 1993 (Chowdhury et al., 2014) δίνει μεγάλη έμφαση στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών και στο πρόγραμμα παρακολούθησης του συστήματος των κατοικιών. Το έργο αυτό παρέιχε επιδοτήσεις στους καταναλωτές για την αντιστάθμιση του αρχικού κόστους του οικιακού φωτοβολταϊκού συστήματος. Εξαιτίας της επιτυχίας αυτών των προγραμμάτων και των επιδοτήσεων, εισήχθη ένα νέο πρόγραμμα το 1997 για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών συστημάτων μεγάλης κλίμακας . Στο πλαίσιο αυτού του προγράμματος, εισήχθη ένα σύστημα καθαρής

μέτρησης, το οποίο επέτρεψε στους καταναλωτές να πουλήσουν την υπερβολική ηλεκτρική ενέργεια που παρήγαγε το φωτοβολταϊκό τους σύστημα στην κυβέρνηση.

Το 2008 το Υπουργείο Παιδείας, Πολιτισμού, Αθλητισμού, Επιστήμης και Τεχνολογίας, το Υπουργείο Περιβάλλοντος, το Υπουργείο Γεωργίας, Υποδομών, Μεταφορών και το Υπουργείο Τουρισμού εφάρμοσαν από κοινού το σχέδιο δράσης για την προώθηση της παραγωγής ηλιακής ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτού του προγράμματος, το 50% της επιδότησης θα αφορά το κόστος εγκατάστασης συστημάτων παραγωγής ηλιακής ενέργειας σε δημόσιες εγκαταστάσεις, συμπεριλαμβανομένου του αεροδρομίου, των πάρκινγκ των αυτοκινητοδρόμων και των σιδηροδρόμων (Meti, 2008). Επιπλέον, πολλές άλλες επιδοτήσεις θα παρέχονται από την τοπική αυτοδιοίκηση και τον προϋπολογισμό της.

Στην Ιαπωνία, υπάρχουν διάφορα συνεχόμενα προγράμματα. Ο Νέος Οργανισμός Ανάπτυξης Τεχνολογίας και Βιομηχανικής Τεχνολογίας χρηματοδοτεί προγράμματα όπως καινοτόμα ηλιακά κύτταρα και σύστημα δημιουργίας φωτοβολταϊκών επιδόσεων για το μέλλον, την ανάπτυξη οργανικών φωτοβολταϊκών για μια κοινωνία χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Σύμφωνα με το Πρόγραμμα καινοτόμων ηλιακών κυττάρων, υπάρχουν τρία έως πέντε ερευνητικά έργα, τα οποία αναμένεται να ολοκληρωθούν μέχρι το τέλος του 2022 (Ιαπωνία International Corporation Agency, 2011). Ενώ ειδικά για την οργανική φωτοβολταϊκή τεχνολογία, το Πανεπιστήμιο του Τόκιο διεξάγει ένα πρόγραμμα, σχετικά με την ανάπτυξη οργανικών φωτοβολταϊκών για μια κοινωνία χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Η κύρια ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις ΗΠΑ οφείλεται κυρίως στο ότι η ενέργεια ρυθμίζεται σε κρατικό επίπεδο και όχι σε εθνικό, σε αντίθεση με άλλες χώρες που ενεργούν σε κρατικό ή περιφερειακό επίπεδο. Παρ' όλα αυτά, είναι αρκετά δύσκολο να αναλυθεί ποια συγκεκριμένη πολιτική επηρεάζει την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στις Η.Π.Α.. Ωστόσο, ορισμένες πολιτικές αναφέρονται παρακάτω (Nicholson 2015).

Είναι μία από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους για την ενθάρρυνση της ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ωστόσο η ενίσχυση της ποικίλλει ανάλογα με τις πολιτείες.

Στις ΗΠΑ, το Τμήμα Ενέργειας επικεντρώνεται στο Πρόγραμμα Solar Energy Technologies. Η έρευνα που χρηματοδοτείται από το SETP περιλαμβάνει υπο-

προγραμματισμό για την εφαρμογή επιστημονικής έρευνας για την ηλιακή φωτοβολταϊκή θέση προκειμένου να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητά της, η πρόοδος στις νέες έννοιες της καινοτομίας των νέων υλικών και της διαδικασίας παραγωγής (Nicholson 2015). Τον Φεβρουάριο του 2018, η πρωτοβουλία Sunshot υποστηρίχθηκε από το DOE, με στόχο να μειωθεί το κόστος των ηλιακών τεχνολογιών. Στόχος τους είναι να μειώσουν το κόστος της ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι £ 0,04/kWh (0,06 USD/kWh). Επιπλέον, για να επιτευχθεί αυτό, η DOE λαμβάνει βοήθεια και υποστήριξη από όλους τους τομείς όπως ο ακαδημαϊκός χώρος, οι ιδιωτικές βιομηχανίες και τα εθνικά εργαστήρια, τα οποία με τη σειρά τους θα παράγουν έως το 18% της ηλεκτρικής ενέργειας έως το 2030 (Talavera et al.2019).

Η κυβέρνηση του Ηνωμένου Βασιλείου, εδώ και πολύ καιρό προσπαθεί να κάνει κάποιες πολύτιμες αλλαγές στις πολιτικές της και να αυξήσει την ευαισθητοποίηση για την ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών, προσελκύοντας μεγαλύτερο δημόσιο ενδιαφέρον για την ηλιακή τεχνολογία. Το πρώτο πρόγραμμα που ονομάστηκε Solar θεσπίστηκε το 1998, ως συνεκτικό πρόγραμμα για την ευαισθητοποίηση και την κατανόηση της χρησιμότητας των φωτοβολταϊκών σε εθνικό επίπεδο. Το πρόγραμμα αυτό κοστολογήθηκε στα £ 2,5 εκατομμύρια που το £ 1 εκατομμύριο προερχόταν από την κεντρική κυβέρνηση και το υπόλοιπο από σχολεία και κολέγια που συμμετείχαν στο πρόγραμμα (Wolfe και Conibeer, 1998). Στο πλαίσιο αυτού του προγράμματος, πραγματοποιήθηκαν 100 μικρά φωτοβολταϊκά έργα σε σχολεία και κολέγια με μέγεθος μεταξύ 2 και 3 kW έκαστο.

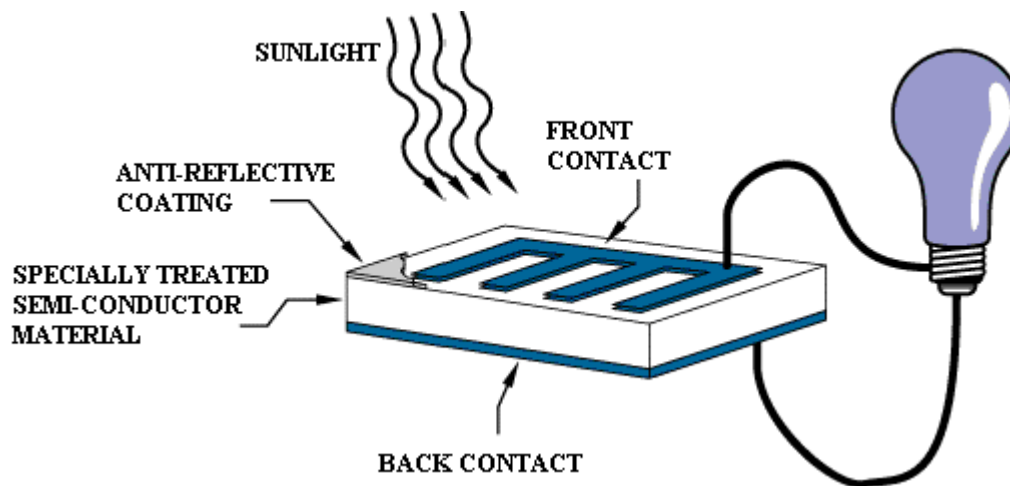


## Κεφάλαιο 2° : Η δομή των φωτοβολταϊκών κελιών

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι ένα τεχνολογικό εργαλείο συλλογής ενέργειας , που μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο . Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τύποι φωτοβολταϊκών κυψελών που όλες χρησιμοποιούν ημιαγωγούς για να αλληλεπιδράσουν με τα εισερχόμενα φωτόνια του ήλιου προκειμένου να δημιουργήσουν ηλεκτρικό ρεύμα (R.M. Swanson, 2006) .

### 2.1.Στρώματα φωτοβολταϊκών στοιχείων των κελιών

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από πολλά στρώματα υλικών, το καθένα με συγκεκριμένο σκοπό. Το πιο σημαντικό στρώμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι το ειδικά επεξεργασμένο στρώμα ημιαγωγών. Αποτελείται από δύο διακριτά στρώματα και είναι αυτό που στην πραγματικότητα μετατρέπει την ενέργεια του ήλιου σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο . Και στις δύο πλευρές του ημιαγωγού υπάρχει ένα στρώμα αγωγίμου υλικού που «συλλέγει» την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Η πίσω πλευρά ή η σκιασμένη πλευρά της κυψέλης μπορεί να καλύψει πλήρως τον αγωγό, ενώ η μπροστινή ή η φωτισμένη πλευρά πρέπει να χρησιμοποιεί τους αγωγούς με φειδώ για να αποφευχθεί η υπερβολική ακτινοβολία του ήλιου να φτάσει στον ημιαγωγό. Η τελική στρώση που εφαρμόζεται μόνο στη φωτισμένη πλευρά της κυψέλης είναι η αντι-ανακλαστική επίστρωση. Δεδομένου ότι όλοι οι ημιαγωγοί είναι φυσικά ανακλαστικοί, η απώλεια ανάκλασης μπορεί να είναι σημαντική. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση ενός ή περισσοτέρων στρωμάτων μιας αντι-ανακλαστικής επίστρωσης (παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στα γυαλιά οράσεως και στις κάμερες) για να μειωθεί η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που αντανακλάται στην επιφάνεια του κυττάρου (Conibeer, 2007). Στην ακόλουθη Εικόνα 1 παρουσιάζεται η βασική λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού κελιού.



**Εικόνα 1.** Η βασική λειτουργία μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης (Πηγή : [Διαδίκτυο](#) )

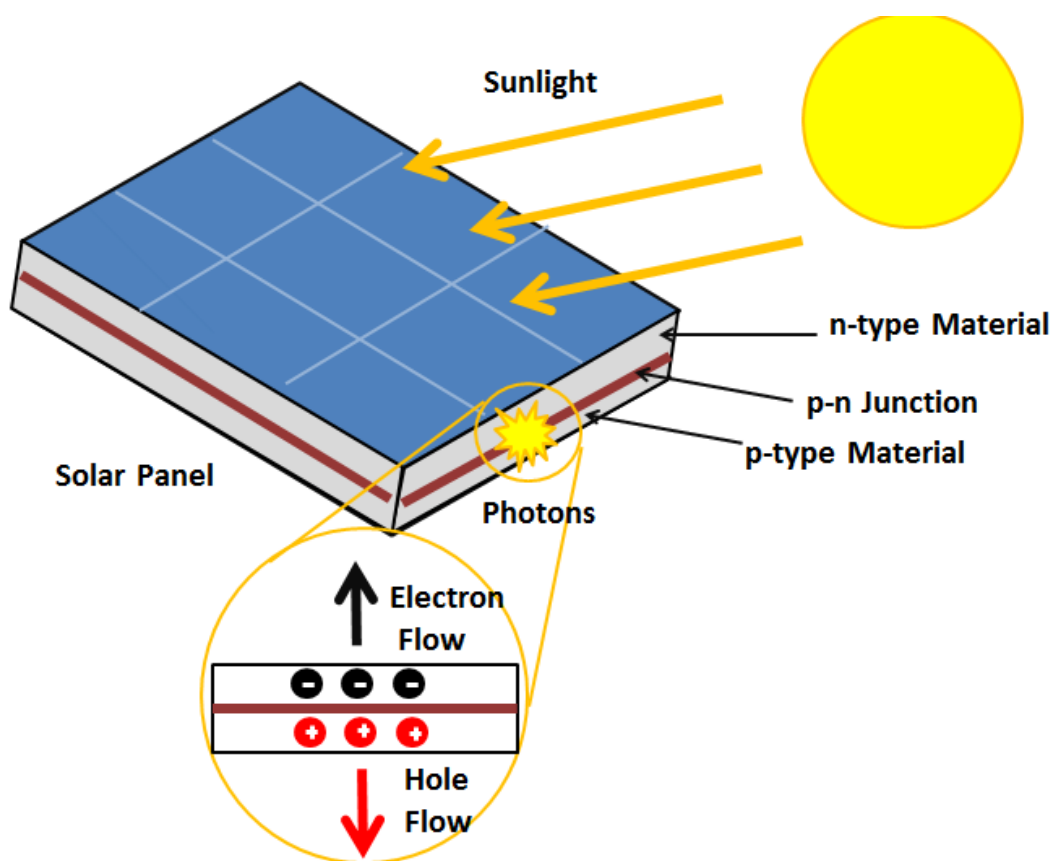
## 2.2.Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι μια διαδικασία που δημιουργεί τάση ή ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο όταν αυτό εκτίθεται στο ηλιακό φως . Είναι αυτό το φαινόμενο που κάνει τους ηλιακούς συλλέκτες χρήσιμους, καθώς είναι ο τρόπος με τον οποίο τα κύτταρα μέσα στο πάνελ μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρική ενέργεια . Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ανακαλύφθηκε για πρώτη φορά το 1839 από τον Edmond Becquerel. Όταν έκανε πειράματα που αφορούσαν υγρά κύτταρα , σημείωσε ότι η τάση του στοιχείου αυξήθηκε όταν οι ασημένιες πλάκες του εκτέθηκαν στο φως του ήλιου (Osamu , 2003).

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο εμφανίζεται στα ηλιακά κύτταρα. Αυτά τα ηλιακά κύτταρα αποτελούνται από δύο διαφορετικούς τύπους ημιαγωγών - έναν p-type και έναν n-type που ενώνονται μεταξύ τους για να δημιουργήσουν μια σύνδεση p-n. Ενώνοντας αυτούς τους δύο τύπους ημιαγωγών, σχηματίζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή της διασταύρωσης καθώς τα ηλεκτρόνια μετακινούνται προς τη θετική πλευρά p και οι οπές στην αρνητική πλευρά n. Αυτό το πεδίο κάνει τα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια να κινούνται προς τη μία κατεύθυνση και τα θετικά φορτισμένα σωματίδια προς την άλλη κατεύθυνση (Kojima et al ,2009).

Το φως αποτελείται από φωτόνια , τα οποία είναι απλές μικρές δέσμες ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ή ενέργειας . Αυτά τα φωτόνια μπορούν να απορροφηθούν από ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο - το είδος του στοιχείου που συνθέτει

τα ηλιακά πάνελ. Όταν φως κατάλληλου μήκους κύματος προσπίπτει σε αυτά τα κύτταρα, η ενέργεια από το φωτόνιο μεταφέρεται σε ένα άτομο του ημιαγωγικού υλικού στη διασταύρωση p-n. Συγκεκριμένα, η ενέργεια μεταφέρεται στα ηλεκτρόνια του υλικού. Αυτό αναγκάζει τα ηλεκτρόνια να μεταπηδήσουν σε μια υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση γνωστή ως ζώνη αγωγιμότητας. Αυτό αφήνει πίσω μια «οπή» στη ζώνη σθένους την οποία απομακρύνθηκε το ηλεκτρόνιο. Αυτή η κίνηση του ηλεκτρονίου ως αποτέλεσμα της προστιθέμενης ενέργειας δημιουργεί δύο φορείς φορτίου, ένα ζεύγος ηλεκτρονίων-οπών (Kojima et al, 2009). Στην ακόλουθη Εικόνα 2 παρουσιάζεται διάγραμμα που δείχνει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.



**Εικόνα 2.** Διάγραμμα που δείχνει το φωτοβολταϊκό φαινόμενο (Πηγή : [Διαδίκτυο](#))

### 2.3.Απόδοση των ηλιακών κελιών

Η απόδοση είναι η σύγκριση της παραγωγής ενέργειας με την εισροή ενέργειας ενός δεδομένου συστήματος. Για τα ηλιακά φωτοβολταϊκά κύτταρα, αυτό σημαίνει την αναλογία της χρήσιμης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγουν προς την ποσότητα της

ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στο στοιχείο υπό τυποποιημένες συνθήκες δοκιμής. Αν και ορισμένα πειραματικά ηλιακά κύτταρα έχουν επιτύχει απόδοση κοντά στο 50%, οι περισσότερες εμπορικές κυψέλες είναι κάτω του 30%. Σε αντίθεση με την απόδοση Carnot που περιορίζει τη θερμική απόδοση των θερμικών μηχανών, η απόδοση των ηλιακών κυψελών περιορίζεται από το ενεργειακό χάσμα (Hoang et al.2013).

Η φυσική των ημιαγωγών απαιτεί μια ελάχιστη ποσότητα ενέργειας για την αφαίρεση ενός ηλεκτρονίου από μια κρυσταλλική δομή, γνωστή ως ενέργεια διάκενου ζώνης. Για τα ηλιακά κύτταρα, αυτή η ενέργεια παρέχεται από σωματίδια φωτός που ονομάζονται φωτόνια, τα οποία είναι μικροσκοπικά πακέτα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που απελευθερώνονται από τον Ήλιο. Το ηλιακό φως περιέχει ένα ευρύ φάσμα φωτονίων με διαφορετικά μήκη κύματος και ενέργεια. Εάν ένα φωτόνιο προσκρούσει σε ένα ηλιακό κύτταρο και έχει λιγότερη ενέργεια από το διάκενο ζώνης, απορροφάται ως θερμική ενέργεια. Αν έχει αρκετή ενέργεια έχει την πιθανότητα να «χτυπήσει» ένα ηλεκτρόνιο και να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Για το πυρίτιο, η ενέργεια του κενού ζώνης είναι 1,12 ηλεκτρονιοβόλτ. Το μεγαλύτερο μήκος κύματος (που αντιστοιχεί στη χαμηλότερη ενέργεια) που είναι ικανό να αφαιρέσει ένα ηλεκτρόνιο είναι 1,1 μm (Bella et al.2014).

Ακόμα και από το φως που μπορεί να απορροφηθεί, εξακολουθεί να υπάρχει πρόβλημα. Οποιαδήποτε ενέργεια πάνω από την ενέργεια της κενής ζώνης θα μετατραπεί σε θερμότητα. Αυτό μειώνει επίσης την απόδοση επειδή αυτή η θερμική ενέργεια δεν χρησιμοποιείται σε καμία χρήσιμη εργασία. Από τα ηλεκτρόνια που παράγονται, δεν θα φτάσουν όλα στην μεταλλική επαφή και δεν θα παράγουν ηλεκτρισμό. Αυτό συμβαίνει επειδή μερικά από αυτά δεν θα επιταχυνθούν επαρκώς από την τάση στο εσωτερικό του ημιαγωγού. Εξαιτίας των λόγων που αναφέρονται, παραπάνω, η θεωρητική απόδοση των φωτοβολταϊκών κυψελών του πυριτίου είναι περίπου 33% (Bella et al.2014).

Υπάρχουν τρόποι βελτίωσης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών κυψελών, οι οποίοι συνοδεύονται από αυξημένο κόστος. Ένας τρόπος είναι να μειωθεί ο αριθμός των «ακαθαρσιών» των ημιαγωγών και οι παραμορφώσεις της κρυσταλλικής δομής. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της παραγωγής μονοκρυσταλλικών κυττάρων. Ένα πιο καθαρό και ομοιόμορφο κύτταρο έχει περισσότερες πιθανότητες να αλληλεπιδράσει με τα εισερχόμενα φωτόνια (Wang et al,2014).

Μια άλλη μέθοδος είναι η χρήση ενός πιο αποτελεσματικού ημιαγωγίμου υλικού όπως το αρσενίδιο του γαλλίου . Αν και είναι πολύ πιο σπάνιο και ακριβό από το πυρίτιο, το αρσενίδιο του γαλλίου έχει βέλτιστο διάκενο ζώνης 1,4 ηλεκτρονιοβόλτ , επιτρέποντας την αξιοποίηση υψηλότερου ποσοστού της ενέργειας του ήλιου. Πολλαπλές στρώσεις υλικού ημιαγωγών που ονομάζονται διασταυρώσεις p-n μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της απόδοσης των κυψελών. Αυτές οι κυψέλες πολλαπλών συνδέσεων αξιοποιούν ενέργεια από πολλαπλά τμήματα του ηλιακού φάσματος καθώς κάθε διασταύρωση έχει διαφορετική ενέργεια διάκενου ζώνης . Η απόδοση μπορεί επίσης να αυξηθεί μέσω συγκεντρωμένων φωτοβολταϊκών . Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει τη συγκέντρωση της ενέργειας του ήλιου μέσω διαφόρων μεθόδων για την αύξηση της έντασης της ενέργειας που χτυπά το ηλιακό κύτταρο (Wang et al.,2012).

### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>:Υλικά κατασκευής των φωτοβολταϊκών κελιών ανά γενιά και η απόδοσή τους.

Αυτή η ενότητα θα αναφερθεί στην τρέχουσα κατάσταση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών κυττάρων όσον αφορά τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της συσκευής, την αποδοτικότητα και το σχετικό κόστος. Ακόμη, πραγματοποιείται λεπτομερής συγκριτική ανάλυση των τεσσάρων γενεών των ηλιακών κυττάρων εστιάζοντας στις διαφορετικές αρχιτεκτονικές τους δομές, τα οφέλη και τα μειονεκτήματά τους. Ιδιαίτερη προσοχή δίδεται στην τέταρτη γενιά, όπου απεικονίζονται οι λειτουργίες των οργανικών και νανο-συστατικών, μαζί με τις δυσκολίες που σχετίζονται με την κατασκευή τέτοιων συσκευών.

#### 3.1Φωτοβολταϊκά κελιά πρώτης γενιάς

##### i) Κρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si)

Η πρώτη γενιά περιλαμβάνει φωτοβολταϊκή τεχνολογία βασισμένη σε παχιές κρυσταλλικές μεμβράνες, δηλαδή κύτταρα που βασίζονται στο πυρίτιο, το οποίο είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό ημιαγωγού για εμπορικά ηλιακά κύτταρα και των κυττάρων που βασίζονται σε αρσενίδιο του γαλλίου, τα οποία πιο συχνά εφαρμόζονται στην κατασκευή ηλιακών συλλεκτών. Αυτά είναι τα παλαιότερα και τα πιο χρησιμοποιούμενα κύτταρα λόγω της υψηλής αποτελεσματικότητάς τους, αν και είναι σχετικά δαπανηρά στην παραγωγή τους (Kavan et al.,2014). Η χρήση του πυριτίου στην παραγωγή φωτοβολταϊκών κελιών έχει κάποια πλεονεκτήματα:

- Είναι το δεύτερο πιο άφθονο υλικό στην επιφάνεια της Γης, πράγμα που σημαίνει ότι η διαθεσιμότητα της πρώτης ύλης θα είναι επαρκής στο μέλλον και το κόστος απόκτησης του θα μπορούσε να μειωθεί.
- Είναι ένα σταθερό και μη τοξικό χημικό στοιχείο και μπορεί να καθυστερήσει τις διαδικασίες μόλυνσης και την απώλεια ανθεκτικότητας που μπορεί να εμφανιστούν όταν χρησιμοποιείται ως κυτταρικό υλικό. και
- Τα φωτοβολταϊκά κελιά πυριτίου είναι εύκολα συμβατά με τη βιομηχανία μικροηλεκτρονικής με βάση το πυρίτιο (δηλ. ενσωματωμένα κυκλώματα, τρανζίστορ κ.λπ.), επιτρέποντας έτσι τη χρήση γνωστών και καλά αναπτυγμένων τεχνολογιών (Kavan et al.,2014).

Από την άλλη πλευρά, το αρσενίδιο του γαλλίου είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για κύτταρα πολλαπλών διασταυρώσεων, εκείνα που περιλαμβάνουν πολλαπλές συνδέσεις P -N κατασκευασμένες από διαφορετικά υλικά ημιαγωγών και φωτοβολταϊκά κελιά υψηλής απόδοσης για αρκετούς λόγους , οι οποίοι παρουσιάζονται κάτωθι:

- Έχει ένα κενό ζώνης 1,43 eV, το οποίο είναι πολύ κοντά στην ιδανική τιμή για τα φωτοβολταϊκά κελιά μιας διαστάυρωσης.
- Παρουσιάζει μια πολύ υψηλή απορροφητικότητα, επομένως ένα κύτταρο μικρού πάχους είναι αρκετό για να απορροφήσει το χρησιμοποιούμενο φάσμα του ηλιακού φωτός που αντιστοιχεί στο κενό της ζώνης, ενώ το κρυσταλλικό πυρίτιο απαιτεί κύτταρα 100 microns ή ακόμα και παχύτερα.
- Επιτρέπει έναν ευέλικτο σχεδιασμό κυττάρων, καθώς η ενσωμάτωση διαφορετικών ουσιών και ο συνδυασμός με άλλα υλικά III-V εντός της κυτταρικής δομής αλλάζουν σημαντικά τις οπτοηλεκτρονικές ιδιότητες.
- Είναι πολύ ανθεκτικό στην υποβάθμιση της ακτινοβολίας, η οποία σε συνδυασμό με την υψηλή απόδοση το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές χώρου. και
- Σε αντίθεση με τα κύτταρα που βασίζονται σε πυρίτιο , αυτά που βασίζονται στο αρσενίδιο του γαλλίου έχουν συντελεστές χαμηλής θερμοκρασίας, έτσι ώστε η απόδοσή τους να επηρεάζεται λιγότερο από τη θερμοκρασία. Η πρώτη γενιά φωτοβολταϊκών κελιών μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε τρεις κατηγορίες: μονοκρυσταλλικό και πολυκρυσταλλικό πυρίτιο , καθώς και κύτταρα αρσενιδίου του γαλλίου (Zhang et al.2014) .

### Ia Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο

Η τεχνολογία μονοκρυσταλλικού πυριτίου έχει επιτύχει την αποτελεσματικότητα της τάξης του στο 24,4% . Τα κύτταρα του μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από τη διαδικασία Czochralski , η οποία συνίσταται στην ανάπτυξη των κρυστάλλων πυριτίου από μικρούς σπόρους μονοκρυσταλλικού πυριτίου και στη συνέχεια κόβονται για να ληφθούν πλακίδια μονοκρυσταλλικού πυριτίου . Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την παραγωγή κρυστάλλων με διαμέτρους που κυμαίνονται από 10 έως 300 mm και μήκη από 50 cm έως 2 m (Kavan et al.,2014). Ωστόσο, η διαδικασία Czochralski περιλαμβάνει υψηλό κόστος παραγωγής εξαιτίας πολλών παραγόντων που αναφέρονται κάτωθι :

- Απαιτεί το πυρίτιο να έχει πολύ υψηλή καθαρότητα (γνωστή ως πυρίτιο της ηλιακής ποιότητας) για να αποφευχθεί η μόλυνση της πρώτης ύλης , καθώς θα οδηγούσε σε ελαττώματα στη δομή και επιδείνωση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων.
- Η κατανάλωση ενέργειας είναι υψηλή, λόγω της απώλειας θερμότητας μέσω της αγωγιμότητας και της ακτινοβολίας μέσω του σπόρου και
- Η θερμοκρασία πρέπει να ελέγχεται για να διατηρηθεί η ανάπτυξη των κρυστάλλων κατά τη διάρκεια των μεγάλων χρόνων παραγωγής (Sunshot Initiative 2014) .

### *Ib Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο*

Τα κύτταρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται σε πλακίδια πολυκρυστάλλου , τα οποία αποτελούνται από μικρούς κρυστάλλους πυριτίου τυχαία προσανατολισμένους . Παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο καθώς απαιτούν λιγότερη ενέργεια για την παραγωγή τους και σχετίζονται λιγότερο με το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Zhang et al.2014). Ωστόσο, αυτός ο τύπος φωτοβολταϊκών κελιών μπορεί να φτάσει μόνο στην αποτελεσματικότητα του 19,9% , ποσοστό μικρότερου από τα κύτταρα που βασίζονται σε μονοκρυσταλλικό πυρίτιο . Ο κύριος λόγος για αυτή τη μικρότερη απόδοση είναι η χαμηλότερη ποιότητα του υλικού λόγω των ορίων και των ελαττωμάτων των κόκκων και η υψηλότερη συγκέντρωση ακαθαρσιών (Zhang et al.2014).

Επομένως, η επίδραση του ανασυνδυασμού σε κύτταρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι υψηλότερη από ό, τι στα κύτταρα μονοκρυσταλλικού πυριτίου , γεγονός που οδηγεί σε ελαφρώς χαμηλότερη τάση. Το ρεύμα είναι επίσης χαμηλότερο λόγω της ελλιπούς συλλογής φορέα σε αυτές τις συσκευές. Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο μπορεί να ληφθεί σε βιομηχανική κλίμακα μέσα από τη διαδικασία που χρησιμοποιεί η Siemens, που αρχικά αναπτύχθηκε για ηλεκτρονικές εφαρμογές στη δεκαετία του 1950 . Γενικά, η διαδικασία αποτελείται από την αεριοποίηση του μεταλλουργικού βαθμού του πυριτίου , την απόσταξη του προϊόντος και την τελική εναπόθεση του για την απόκτηση εξαιρετικής ποιότητας πυριτίου (Kavan et al.,2014).

### [3.2.Φωτοβολταϊκά κελιά δεύτερης γενιάς](#)

Η δεύτερη γενιά φωτοβολταϊκών κελιών επικεντρώνεται στις τεχνολογίες λεπτών υδατών με στόχο τη μείωση του υψηλού κόστους που συνδέεται με την πρώτη γενιά



χρησιμοποιώντας χαμηλότερη ποσότητα υλικού και φτωχότερης ποιότητας, που χρησιμοποιείται σε φθηνά υποστρώματα. Βασίζεται σε υλικά που αναγνωρίζονται ως δυνητικά χρήσιμα κατά την ανάπτυξη της πρώτης γενιάς και εξελίχθηκε ώστε να περιλαμβάνει άμορφο πυρίτιο , κρυσταλλική σιλικόνη και ηλιακό στοιχείο σεληνιούχου γαλλίου χαλκού ινδίου (Boer 2011) . Τα φωτοβολταϊκά κελιά δεύτερης γενιάς παρουσιάζουν τα ακόλουθα γενικά πλεονεκτήματα :

- Φθηνότερα σε σύγκριση με τα ηλιακά κύτταρα που βασίζονται σε πυρίτιο
- Δραστική μείωση της ποσότητας των απαιτούμενων υλικών. Μερικές φορές απαιτείται μόνο ένα λεπτό στρώμα πάχους .
- Υψηλός συντελεστής απορρόφησης.
- Μπορεί να χρησιμοποιήσει τη διαδικασία κενού και μη βακτού.
- Οι περισσότερες τεχνολογίες επιτρέπουν την άμεση ενσωμάτωση σε μια μονάδα υψηλότερης τάσης (δηλ. άμορφου πυριτίου ), η οποία μειώνει τον αριθμό των σταδίων παραγωγής σε σύγκριση με την πρώτη γενιά φωτοβολταϊκών κελιών (Sheehan et al.2015).

Ωστόσο, παρουσιάζουν επίσης μερικά μειονεκτήματα:

- Χαμηλότερη απόδοση: Η καλύτερη απόδοση που επιτεύχθηκε στο εργαστήριο είναι 20,3% για τα ηλιακά στοιχεία σεληνιούχου γαλλίου και χάλκινου ινδίου.
- Αποικοδόμηση που προκαλείται από το φως στα πρώτα στάδια της υπαίθριας χρήσης. Υψηλότερη αποικοδόμηση σε υπαίθριες χρήσεις: Ο ημιαγωγός που εναποτίθεται πάνω σε γυαλί μπορεί να δημιουργήσει ροή ιόντων στο γυαλί. Στην περίπτωση του άμορφου πυριτίου, αυτό το πρόβλημα μπορεί να προκύψει ακόμη και αν το υπόστρωμα δεν είναι γυαλί. Η μόλυνση του περιβάλλοντος ξεκινά από τη διαδικασία κατασκευής.
- Σε ορισμένες τεχνολογίες, η διαθεσιμότητα παραγωγικών υλικών μπορεί να μην είναι άφθονη (Sheehan et al.2015).

Η χρήση του άμορφου πυριτίου μπορεί να οδηγήσει σε επιχειρησιακά προβλήματα, καθώς μπορεί να υποβαθμιστεί από το ηλιακό φως. Το πάχος του στρώματος θα μειωθεί με την πάροδο του χρόνου και θα απαιτούνται παχύτερα στρώματα για να εξασφαλιστεί μακροπρόθεσμη λειτουργία. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί συσκευές μιας διασταύρωσης και πολλαπλών διαστάσεων με υψηλή απόδοση και μέτρια καλή

σταθερότητα . Επιπλέον, εάν η διαδικασία περιλαμβάνει υψηλή συγκέντρωση υδραργύρου , μπορεί να σχηματιστεί κρυσταλλική σιλικόνη , η οποία έχει λιγότερα ελαττώματα από το άμορφο πυρίτιο και είναι πιο σταθερή η παρουσία της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι εργαστηριακές αποδόσεις της κρυσταλλικής σιλικόνης κυμαίνονται από 11,9% για κύτταρα μιας διασταύρωσης και 14,0% για κύτταρα πολλαπλών διασταυρώσεων (Ruan et al ,2015) .

#### i) Τεχνολογία λεπτής μεμβράνης

Η τεχνολογία λεπτής μεμβράνης είναι μια εναλλακτική τεχνολογία, η οποία χρησιμοποιεί λιγότερο ή καθόλου πυρίτιο στη διαδικασία κατασκευής. Η πιο σε βάθος ανασκόπηση του ηλιακού κυττάρου του άμορφου πυριτίου και κρυσταλλικής λεπτής μεμβράνης πραγματοποιήθηκε από τον Roedern (2003) και στις αρχικές φάσεις ανάπτυξης ηλιακών κυττάρων λεπτού φιλμ, η απόδοση έφτασε το 10,7% (Yamamoto et al. 2001).

#### ii) Άμορφο πυρίτιο (a-Si)

Το ηλιακό στοιχείο σεληνιούχου γαλλίου και χάλκινου ινδίου είναι ένα υλικό ημιαγωγού με γενική φόρμουλα της σύνθεσης νανοκρυστάλλων  $Cu (inxGA1-X) SE2$  που μεταβάλλει την τιμή του χάσματος της ζώνης μεταξύ 1,0-1,7 eV ανάλογα με την αναλογία των στοιχείων της ένωσης . Συντίθεται με την παρασκευή ενός τετηγμένου μείγματος που περιέχει την επιθυμητή ποσότητα κάθε στοιχείου (Perovo Solar Power Station 2015) .

#### iii) Τα κύτταρα ηλιακών στοιχείων σεληνιούχου γαλλίου και χάλκινου ινδίου κατασκευάζονται συνήθως σε πέντε βήματα:

(1) Ένα υπόστρωμα όπως το ανθρακικό νάτριο, ένα μέταλλο, ένα κεραμικό ή ένα φύλλο πολυμερούς τοποθετείται για να υποστηρίξει το υπόλοιπο κύτταρο.

(2) Το υπόστρωμα καλύπτεται με την οπίσθια επαφή, η οποία είναι συνήθως μόλυβδος με τη μορφή δισελενιδίου του μολυβδαινίου .

(3) Το στρώμα ηλιακού στοιχείου σεληνιούχου γαλλίου και χάλκινου ινδίου\_(τύπος P) αναπτύσσεται με μια διαδικασία της συν-εξάτμισης.

(4) Ένα στρώμα ρυθμιστικού διαλύματος (τύπου N-τύπου), που σχηματίζεται επί του παρόντος από το οξείδιο του ψευδαργύρου

(5) Τέλος, μια αντί-ανακλαστική επικάλυψη εφαρμόζεται για τη βελτίωση της απόδοσης των κυττάρων (Archer et al ,2014).

Παρόλο που η συν-εξάτμιση είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική παραγωγής, άλλες τεχνικές όπως μια διαδικασία εναπόθεσης θερμού σταδίου διερευνώνται επί του παρόντος ως εναλλακτική λύση για τη μείωση του κόστους παραγωγής, καθώς οι διαδικασίες συν-εξάτμισης απαιτούν μεγάλη ενέργεια(Archer et al ,2014) .

#### iv) Τελλουρίδιο του καδμίου (CdTe)/θειούχο κάδμιο (CdS).

Το τελλουρίδιο του καδμίου είναι μια ένωση ημιαγωγών με κενό ζώνης 1,45 eV, γεγονός που το καθιστά καλό υποψήφιο για τη μετατροπή του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρικό ρεύμα σε κύτταρα μιας διασταύρωσης (Muhammad-Sukki et al. 2014) . Τα κύτταρα του τελλουρίδιου του καδμίου επιτυγχάνουν εργαστηριακή αποτελεσματικότητα περίπου 21% και μπορούν να ληφθούν κυρίως με τρεις διαφορετικές διαδρομές:

- Άμεση αντίδραση του τελλουρίδιου και του καδμίου σε υψηλή θερμοκρασία σε σφραγισμένο κενό σωλήνα χαλαζία.
- Έκθεση διαλύματος τελλουρίδιου σε αέρια υδροτελλουρίου υπό αδρανή ατμόσφαιρα και
- Προσθήκη τελλουριδίου σε διάλυμα αλκαλικού μετάλλου(Muhammad-Sukki et al. 2014) .

Τα κύτταρα τελλουρίδιου του καδμίου κατασκευάζονται με μια διαδικασία πολλαπλής εναπόθεσης που διαρκεί λιγότερο από 2,5 ώρες . Πρώτον, ένα στρώμα σουλφιδίου του καδμίου εναποτίθεται με ατμό σε μια διαφανή αγωγήμη μεμβράνη οξειδίου, με εμπρόσθια επαφή [-], η οποία υποστηρίζεται σε ένα γυαλί που υποβλήθηκε σε σκλήρυνση με θέρμανση. Έπειτα, ένα στρώμα τελλουριδίου του καδμίου εναποτίθεται σε στρώμα θειούχου καδμίου. Μια κοπή με λέιζερ περνά μέσα από τα τρία στρώματα για να εισαγάγει τον μονωτή στη μονάδα. Στη συνέχεια, πολλές περικοπές γίνονται με το λέιζερ για να επιτευχθεί η διασταύρωση των στρωμάτων του τελλουριδίου του καδμίου και του θειούχου του καδμίου , με εναπόθεση ψεκασμού στο πίσω στρώμα της επαφής. Τέλος, όταν το κελί είναι ενθυλακωμένο και τα καλώδια είναι συνδεδεμένα τοποθετείται το οπίσθιο γυαλί (Muhammad-Sukki et al. 2014) .

### 3.3. Φωτοβολταϊκά κελιά τρίτης γενιάς

Η τρίτη γενιά φωτοβολταϊκών κελιών προκύπτει από την ιδέα της αύξησης της απόδοσης της συσκευής και της μείωσης της απόστασης μέχρι το όριο Carnot, το οποίο είναι ~62% πάνω από το όριο Shockley-Queisser (33%). Στόχος του είναι να αναπτύξει συσκευές με υψηλή απόδοση χρησιμοποιώντας τις τεχνικές εναπόθεσης λεπτής στρώσης που χρησιμοποιούνται για την δεύτερη γενιά ή και τις νέες αρχιτεκτονικές δομές ή τα υλικά. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του κόστους της περιοχής, αλλά το κόστος ανά watt κορυφής θα μειωθεί. Επιπλέον, όπως τα κύτταρα βασισμένα στο πυρίτιο, τα φωτοβολταϊκά κελιά τρίτης γενιάς χρησιμοποιούν μη τοξικά και πολύ φθηνά υλικά, επομένως είναι κατάλληλα για την εφαρμογή των φωτοβολταϊκών κυψελών μεγάλης κλίμακας (Fu et al, 2018).

Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιούν νέα νανοδομημένα ή οργανικά υλικά που θα μπορούσαν να επιτύχουν υψηλές αποδόσεις μετατροπής (πάνω από 60%) χρησιμοποιώντας φαινόμενα όπως η συλλογή θερμών φορέων, η δημιουργία πολλαπλών φορέων (ιοντισμός κρούσης) ή νέες αρχιτεκτονικές δομές ημιαγωγών που περιέχουν πολλαπλά επίπεδα ενέργειας. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στις διαδικασίες φόρτισης και μεταφοράς ενέργειας, καθώς και στις διαδρομές για τη βελτιστοποίηση της συλλογής φορτίου και τη βελτίωση της δέσμευσης ενέργειας εντός του ηλιακού φάσματος (Fu et al, 2018).

Οι πιο σημαντικές τεχνολογίες που περιλαμβάνονται στα φωτοβολταϊκά κελιά τρίτης γενιάς είναι:

- Ηλιακά κύτταρα ευαισθητοποιημένα με χρωστικές ουσίες (DSSCs)
- Οργανικά και πολυμερή ηλιακά κύτταρα
- Κύτταρα περοβσκίτη
- Κυψέλες κβαντικής κουκκίδας. και
- Κυψέλες πολλαπλών συνδέσεων (Fu et al, 2018)

Τα κύρια πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών κελιών τρίτης γενιάς είναι:

- Τεχνολογικές επεξεργάσιμες λύσεις.

- Κατάλληλα για παραγωγή μεγάλης κλίμακας.
- Μηχανική στιβαρότητα και
- Υψηλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες (Fu et al, 2018).

Ωστόσο, η βασική τους πρόκληση είναι η μείωση του κόστους/watt της παραδοθείσας ηλιακής ηλεκτρικής ενέργειας.

#### i) Ηλιακά κύτταρα ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες

Τα ηλιακά κύτταρα ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες είναι ηλιακά κύτταρα χαμηλού κόστους με τη μορφή λεπτών υμεναίων που βασίζονται σε έναν ημιαγωγό που σχηματίζεται μεταξύ μιας φωτοευαισθητοποιημένης ανόδου και ενός ηλεκτρολύτη. Αποτελούν πέντε διαφορετικά στρώματα :

- Μια διαφανής άνοδος που κατασκευάζεται με ένα φύλλο γυαλιού, επεξεργασμένο με ένα διαφανές αγωγίμο στρώμα οξειδίου (γυαλί TCO).
- Ένα στρώμα μεσοπόρου του οξειδίου (συνήθως  $TiO_2$ ) που εναποτίθεται στην άνοδο για τη βελτίωση της ηλεκτρονικής αγωγιμότητας.
- Μια μονοστιβάδα βαφής μεταφοράς φορτίου συνδεδεμένη ομοιοπολικά στην επιφάνεια του μεσοπορώδους στρώματος οξειδίου για να ενισχύσει την απορρόφηση του φωτός.
- Ένας ηλεκτρολύτης που περιέχει έναν οξειδοαναγωγικό μεσολαβητή σε έναν οργανικό διαλύτη, ο οποίος βελτιώνει την αναγέννηση της βαφής. και
- Μια κάθοδος κατασκευασμένη με κρύσταλλο επικαλυμμένο με καταλύτη (συνήθως πλατίνα) για να διευκολύνει τη συλλογή ηλεκτρονίων (Zhang et al., 2018).

Όταν τα ηλιακά κύτταρα ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες εκτίθενται στο ηλιακό φως, η ευαισθητοποιητική χρωστική ουσία διεγείρεται και ένα ηλεκτρόνιο κινείται προς τη ζώνη αγωγιμότητας του φιλμ μεσοπορώδους οξειδίου. Η χρωστική προωθεί τη διάχυση των ηλεκτρονίων προς την άνοδο και στη συνέχεια επαναχρησιμοποιείται στο εξωτερικό φορτίο (άνοδος) πριν γίνει μέρος της καθόδου, ολοκληρώνοντας έτσι τον κύκλο της βαφής (International Energy Agency 2014).

Για να βελτιωθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η δέσμευση του φωτός στα πίσω στρώματα, χρησιμοποιείται ένας αγωγίμος κρύσταλλος, ο πιο συνηθισμένος είναι το οξείδιο του κασσιτέρου εμποτισμένο με ίνδιο (ITO) και το οξείδιο του ψευδαργύρου εμποτισμένο με φθόριο (FTO). Η επιλογή κρυστάλλου εξαρτάται από τη διαμόρφωση του κύτταρου και τα υλικά του. Το ηλεκτρόδιο ημιαγωγών είναι συνήθως ένα στρώμα λεπτής μεμβράνης (~5–30 μm) νανοκρυσταλλικού διοξειδίου του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ) που εναποτίθεται πάνω στο αγωγίμο γυαλί και παίζει σημαντικό ρόλο τόσο στον διαχωρισμό των εξιτονίων όσο και στη διαδικασία μεταφοράς ηλεκτρονίων. Το πορώδες και η μορφολογία του στρώματος  $\text{TiO}_2$  είναι σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν την ποσότητα των μορίων βαφής που απορροφάται στην επιφάνειά του, επιτρέποντας έτσι τη συλλογή περισσότερο ή λιγότερο προσπίπτοντος φωτός (Zaidi, 2018).

Από τότε που εισήχθη το πρώτο ηλιακό κύτταρο ευαισθητοποιημένο σε χρωστικές ουσίες, έχουν συντεθεί πολλά μόρια τεχνητής βαφής και μερικά από αυτά έχουν κυκλοφορήσει με επιτυχία στην αγορά, όπως τα λεγόμενα N3, N719 και Z907. Τα μόρια της βαφής πρέπει να πληρούν ορισμένες απαιτήσεις, όπως η αντιστοίχιση του ηλιακού φάσματος, η μακροπρόθεσμη λειτουργική σταθερότητα και η ισχυρή προσκόλληση στην επιφάνεια του ημιαγωγού (Fang et al., 2015). Επιπλέον, το δυναμικό της οξειδοαναγωγής πρέπει να είναι αρκετά υψηλό ώστε να διευκολύνει την αντίδραση της αναγέννησης με τον μεσολαβητή της οξειδοαναγωγής. Αυτός ο τύπος κυψελών είναι ιδανικός σε εφαρμογές χαμηλής πυκνότητας όπως οι ηλιακοί συλλέκτες ταράτσας, όπου η μηχανική στιβαρότητα και το μικρό βάρος του συλλέκτη χωρίς γυαλί είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Αντίθετα, δεν είναι χρήσιμα για αναπτύξεις μεγάλης κλίμακας όπου, οι κυψέλες υψηλότερης απόδοσης και υψηλότερου κόστους είναι πιο κατάλληλες (Fang et al., 2015).

Τα ηλιακά κύτταρα ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα. Για παράδειγμα, λειτουργούν ακόμη και σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού, επομένως είναι σε θέση να δουλεύουν κάτω από τον συννεφιασμένο ουρανό και το έμμεσο ηλιακό φως, ενώ τα συμβατικά σχέδια θα έχουν μια «διακοπή» σε κάποιο χαμηλότερο όριο φωτισμού (Bella et al. 2014). Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η μηχανική στιβαρότητα της κυψέλης που έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες αποδόσεις σε υψηλότερες θερμοκρασίες, ενώ οι παραδοσιακές κυψέλες πυριτίου έχουν σημαντικές μειώσεις στην απόδοση καθώς τα κύτταρα θερμαίνονται εσωτερικά. Τα ηλιακά

κύτταρα ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες περιλαμβάνουν συνήθως μόνο ένα λεπτό αγώγιμο πλαστικό ως μπροστινό στρώμα, το οποίο επιτρέπει την απλή και γρήγορη απαγωγή της θερμότητας. Επομένως λειτουργεί σε χαμηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες (Bella et al.2014).

Το κύριο μειονέκτημα των ηλιακών κυττάρων ευαισθητοποιημένων σε χρωστικές ουσίες είναι η χρήση υγρού ηλεκτρολύτη που έχει όμως προβλήματα σταθερότητας θερμοκρασίας. Ο ηλεκτρολύτης μπορεί να παγώσει σε χαμηλές θερμοκρασίες, τερματίζοντας την παραγωγή ενέργειας και συχνά προκαλώντας ζημιά(Wang et al,2014). Αντίθετα, οι υψηλότερες θερμοκρασίες προκαλούν διαστολή του υγρού, καθιστώντας τη στεγανοποίηση των πάνελ ένα σημαντικό πρόβλημα. Η αντικατάσταση του υγρού ηλεκτρολύτη από ένα στερεό είναι ένα σημαντικό πεδίο έρευνας. Οι δοκιμές με στερεοποιημένα λιωμένα άλατα είναι ελπιδοφόρες, αν και δεν είναι εύκαμπτες και παρουσιάζουν μεγαλύτερη υποβάθμιση κατά τη συνεχή λειτουργία (Wang et al,2014).

Ένα επιπλέον μειονέκτημα είναι ότι το διάλυμα ηλεκτρολύτη περιέχει πτητικές οργανικές ενώσεις που είναι τοξικές για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον, οι οποίες σε συνδυασμό με τη διαπερατότητα των διαλυτών μέσω των πλαστικών, έχουν αποτρέψει τις εφαρμογές μεγάλης κλίμακας σε εξωτερικούς χώρους και την ενσωμάτωση σε εύκαμπτη δομή (Wang et al,2014).

Οι εξελίξεις στα ηλιακά κύτταρα ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες βασίζονται κυρίως στις ακόλουθες ερευνητικές γραμμές :

- Συμπλέγματα ρουθηνίου (Ru);
- Οργανικές ενώσεις απαλλαγμένες από μέταλλα.
- Ευαισθητοποιητές κατασκευασμένοι από κβαντικές κουκκίδες.
- Ευαισθητοποιητές με βάση τον περοβσκήτη.
- Μαλακτικές βαφές και
- Φυσικές βαφές (Zhang et al.,2018).

Τα συμπλέγματα του Ru ταξινομούνται σε πολυπυριδυλκαρβοξυλικές βαφές Ru, φωσφονικές βαφές Ru και πολυπυρηνικές βαφές διπυριδυλίου Ru . Έχουν ενισχύσει

την απόδοση από ~7,1% το 1991 σε 11,2% το 2005 και παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα όπως εξαιρετική σταθερότητα, υψηλή απορρόφηση στο ορατό φάσμα, εξαιρετική έγχυση ηλεκτρονίων και καλή απόδοση μεταφοράς φορτίου μεταξύ των μετάλλων και του προσδέματος . Ωστόσο, το Ru είναι τοξικό και ακριβό, καθώς είναι ένα σπάνιο μέταλλο, επομένως η τρέχουσα έρευνα στοχεύει στην αναζήτηση χρωστικών χωρίς Ru , όπως οργανικές βαφές χωρίς μέταλλα και σύνθετες βαφές μετάλλου-πορφυρίνης. Επιπλέον, το Ru είναι ένας μη ανανεώσιμος πόρος και τείνει να υποστεί υποβάθμιση στην παρουσία νερού, επομένως, είναι περιορισμένης χρήσης σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας (Zhang et al.,2018).

Από την άλλη πλευρά, οι οργανικές βαφές χωρίς μέταλλα είναι φθηνότερες και παρουσιάζουν ένα ευρύτερο φάσμα μοριακών δομών. Η επιτυχία αυτών των χρωστικών έγκειται στις συντονισμένες φυσικοχημικές τους ιδιότητες, καθώς και στον καλό συντελεστή εξαφάνισής τους στο ορατό φάσμα . Συνήθως ταξινομούνται σε δότες, συνδικάτα ή αποδέκτες και επιτυγχάνουν αποδοτικότητες ενεργειακές μετατροπές της τάξης του 5-9%, αν και η καλύτερη απόδοση που επιτυγχάνεται από τις ενωτικές βαφές είναι ~10% (Zhang et al.2014). Το 2011, προτάθηκε μια μέθοδος για τη λήψη ευαισθητοποιητών χωρίς μέταλλα με βαφές πορφυρίνης, με αποτέλεσμα πολύ υψηλή απόδοση της τάξης του 12,3%. Πολυάριθμες βαφές πορφυρίνης έχουν αναγνωριστεί ως συστατικά συλλογής φωτός για τα ηλιακά κύτταρα ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες λόγω της ισχυρής απορρόφησής τους στο ορατό φάσμα και των οξειδοαναγωγικών ιδιοτήτων τους για την ευαισθητοποίηση των φύλλων TiO<sub>2</sub> (Zhang et al.2014).

Τα ηλιακά κύτταρα ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες με κβαντικές κουκκίδες (QDs) βασίζονται στην υποκατάσταση της χρωστικής από ανόργανα νανοσωματίδια κβαντικών κουκκίδων. Αυτή η προσέγγιση αναπτύσσεται επί του παρόντος , καθώς επιτρέπει τη διεξαγωγή της μετάβασης εξιτονίων με υψηλότερη ενέργεια και χαμηλότερους ρυθμούς οπτικής μετάβασης λόγω του συντονιζόμενου μεγέθους, της υψηλής οπτικής απορρόφησης και των καλών μαγνητικών ιδιοτήτων των QDs . Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας έχει πραγματοποιηθεί με ενώσεις καδμίου, φτάνοντας την απόδοση κοντά στο 6,76% (Jayawardena et al. 2013) .

Τα ηλιακά κύτταρα ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες που βασίζονται σε ευαισθητοποιητές περοβσκίτη άρχισαν να εφαρμόζονται το 2009 με απόδοση της



τάξης του 3,1–3,8% , αν και επί του παρόντος η απόδοση είναι κοντά στο 20% , καθώς αυτοί οι ευαισθητοποιητές είναι εξαιρετικοί συλλέκτες φωτός(Jayawardena et al. 2013).

Οι φυσικές βαφές απομονώνονται από φυσικές ενώσεις όπως φρούτα, λαχανικά, βακτήρια, λουλούδια, κ.λπ. έχουν υψηλούς μοριακούς συντελεστές εξαφάνισης στην ορατή περιοχή και εξαρτώμενες από το pH ιδιότητες οξειδοαναγωγής .Οι χρωστικές είναι παρούσες στο διαφορετικό μέρος του φυτού, συμπεριλαμβανομένων των πετάλων των λουλουδιών, των καρπών, των φύλλων, των μίσχων και των ριζών (Sunshot Initiative 2014). Τα κύρια πλεονεκτήματα των φυσικών βαφών είναι η απορρόφησή τους στο ορατό φάσμα, η ευκολία παρασκευής και η οικολογική βιωσιμότητα , καθώς και το χαμηλό κόστος παραγωγής τους λόγω της απουσίας ευγενών μετάλλων. Οι αποδόσεις που επιτυγχάνονται με αυτές τις βαφές είναι χαμηλές, μεταξύ 0,03 και 1,50%, αν και το 2008 μια συσκευή έφτασε το 1,7% . Επομένως, απαιτείται περισσότερη έρευνα προτού τα φυσικά βαμμένα πλακίδια μπορούν να γίνουν μια οικονομικά αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον επιλογή μεγάλης κλίμακας (Sunshot Initiative 2014).

Οι αρωματικές βαφές είναι ένας τύπος συνθετικών χρωστικών που εφαρμόζονται σε υφαντικές ίνες λόγω της προσθήκης μυρωδικών, που είναι συνήθως ενώσεις όπως το χλωριούχο νάτριο, τα στυπτηρία χρωμίου ή μέταλλα όπως σίδηρος, χρώμιο, χαλκός κ.λπ.

Αυτές οι βαφές που είναι πολύ φθηνότερες από τα Ru, είναι απαλλαγμένες από βαρέα μέταλλα και κατασκευάζονται σε βιομηχανική κλίμακα. Οι Millington et al.(2015) μελέτησαν την απόδοση 49 εμπορικών μυρωδικών χρωστικών ως ευαισθητοποιητών σε ηλιακά κύτταρα ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες και τις συνέκρινε με αυτήν του συμπλέγματος ρουθηνίου N3. Αν και το N3 οδήγησε στην υψηλότερη απόδοση, έξι βαφές παρήγαγαν φωτορεύματα υψηλότερα από 0,2 mA και τα ορατά υπεριώδη φάσματα των συμπλεγμένων με χρωστική φωτοανόδους υποδηλώνουν ότι ορισμένες χρωστικές ουσίες δεσμεύονται πιο ισχυρά στην επιφάνεια  $TiO_2$  από το N3. Επιπλέον, η φωτοκαταλυτική οξείδωση αυτών των χρωστικών δεν λαμβάνει χώρα σε περιβάλλον ηλιακών κυττάρων ευαισθητοποιημένων σε χρωστικές ουσίες. Απαιτείται πρόσθετη έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση για να καθοριστεί εάν

η χρήση καθαρισμένων δειγμάτων βαφής θα βελτιώνει την απόδοσή τους για εμπορικές χρήσεις (Millington et al.2015) .

#### ii) Ηλιακά φωτοβολταϊκά κελιά Quantum Dot

Οι κβαντικές κουκκίδες (QD) είναι υλικά ημιαγωγών νανοκλίμακας, που ανήκουν στις ομάδες II–VI, III–V ή IV–VI του περιοδικού πίνακα, που έχουν ένα διακριτό φάσμα κβαντισμένης ενέργειας, καθώς η κίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών περιορίζεται στις τρεις κατευθύνσεις του χώρου. Λόγω των διαστάσεων τους σε νανοκλίμακα, συνήθως μεταξύ 2-10 nm , παρουσιάζουν ιδιότητες που είναι ενδιάμεσες μεταξύ αυτών των χύδην ημιαγωγών και εκείνων των διακριτών ατόμων ή μορίων. Σε ένα τυπικό ημιαγωγικό υλικό, τα ηλεκτρόνια μεταπηδούν από το σθένος στη ζώνη αγωγιμότητας όταν παρέχεται ενέργεια μεγαλύτερη από το διάκενο ζώνης. Ωστόσο, λόγω του φαινομένου του κβαντικού περιορισμού, οι δύο ζώνες είναι τόσο κοντά μεταξύ τους που μπορούν να θεωρηθούν ως συνεχείς ζώνες . Λόγω του μικρού μεγέθους των QDs, οι τιμές αυτών των ζωνών είναι κβαντισμένες, με τρόπο που μια τροποποίηση του μεγέθους των QDs συνεπάγεται αλλαγή στην τιμή του κενού ζώνης και στο φάσμα απορρόφησης (Nuclear Energy Data, 2006 ).

Τυπικά, τα QDs έχουν μια δομή που αποτελείται από έναν πυρήνα στον οποίο εναποτίθενται στρώματα διαφορετικών ενώσεων με στόχο τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας μειώνοντας τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ του εξιτονίου και της επιφάνειας του νανοσωματιδίου . Είναι επίσης δυνατή η ενσωμάτωση QD σε μια μήτρα άλλου υλικού(Nuclear Energy Data, 2006 ).

Η απόδοση μετατροπής αυτού του τύπου κυψελών έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, όντας επί του παρόντος πάνω από 11% .Αυτή η τιμή είναι δύσκολο να αυξηθεί λόγω της διάχυσης των φορέων φορτίου, επομένως απαιτούνται νέες δομές κυψελών ή ο συνδυασμός της τεχνολογίας QDs με άλλους τύπους κυψελών . Είναι επίσης εφικτό να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα μέσω ντόπινγκ με άλλα υλικά .Για παράδειγμα, το ντόπινγκ πυριτίου μπορεί να αυξήσει την αποτελεσματικότητα από 11,3% σε 17,0% (Nuclear Energy Data, 2006 ).

Η ποσότητα των QDs είναι ένας άλλος βασικός παράγοντας στη μεταφορά και τον ανασυνδυασμό των φορτίων, που επηρεάζει έντονα την απόδοση της κυψέλης. Έτσι, έχουν αναφερθεί διακυμάνσεις έως και 40% ανάλογα με τη συγκέντρωση QDs (Nuclear Energy Data, 2006 ).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η τρέχουσα έρευνα στα QDs συνδυάζεται με άλλες τεχνολογίες, όπως τα ηλιακά κύτταρα ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες . Από αυτή την άποψη, η προσθήκη QDs έχει βελτιώσει την απόδοση των κυττάρων από περίπου 1% σε 11,6% . Παρόλα αυτά, το θεωρητικό όριο απόδοσης της τεχνολογίας QDs εκτιμάται ότι είναι 63% .

Συνολικά, τα κύρια πιθανά οφέλη των φωτοβολταϊκών κυψελών που βασίζονται σε QDs είναι :

- Ευνοϊκή αναλογία ισχύος προς βάρος.
- Υψηλή απόδοση
- Η εξοικονόμηση μάζας και επιφάνειας καθώς και η ευελιξία που οδηγεί σε μικρογραφία.
- Χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.
- Ευστροφία
- Αυξημένη ηλεκτρική απόδοση με χαμηλό κόστος παραγωγής και
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ολόκληρα κτίρια συμπεριλαμβανομένων των παραθύρων και όχι μόνο σε στέγες(R.M. Swanson, 2006).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτή η τεχνολογία εξακολουθεί να βρίσκεται σε εργαστηριακή κλίμακα, επομένως τα υποδεικνυόμενα πλεονεκτήματα πρέπει να δοκιμαστούν σε βιομηχανικό πλαίσιο(M.A. Green et al. ,2007).

Αντίθετα, τα μειονεκτήματα αυτών των κυττάρων προέρχονται από την τεχνολογική ανωριμότητα και την έλλειψη εμπειρίας στις διαδικασίες ανάπτυξης και κατασκευής. Περαιτέρω, ορισμένα QD είναι εξαιρετικά τοξικά στη φύση τους (δηλαδή, CdSe) και απαιτούν πολύ σταθερό πολυμερές κέλυφος . Επιπλέον, τα κελύφη μπορούν να αλλάξουν τις οπτικές ιδιότητες και η αποικοδόμηση αυξάνεται υπό υδατικές συνθήκες και συνθήκες υπεριώδους ακτινοβολίας. Το μέγεθος των σωματιδίων είναι επίσης δύσκολο να ελεγχθεί (M.A. Green et al. ,2007).

### iii) Οργανικές και Πολυμερές Ηλιακές Κυψέλες

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά κύτταρα (OPVC) είναι αυτά που χρησιμοποιούν αγωγίμα οργανικά πολυμερή ή μικρά οργανικά μόρια για την απορρόφηση φωτός και τη

μεταφορά φορτίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλιακό φως (Zhang et al.2014).

Ο μηχανισμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα OPVC διαφέρει από αυτόν των ανόργανων κυψελών, αφού δεν παράγονται δωρεάν φορείς φόρτισης. Περιλαμβάνουν υλικά δότη ηλεκτρονίων και δέκτη ηλεκτρονίων: ο δότης απορροφά τα φωτόνια από την ηλιακή ακτινοβολία, όπου δημιουργούνται και περιορίζονται διεγερμένες καταστάσεις (ή εξιτόνια) . Ένα εξιτόνιο είναι μια δεσμευμένη κατάσταση ενός ηλεκτρονίου και μιας ηλεκτρονιακής οπής που έλκονται μεταξύ τους με ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις, οι οποίες μπορούν να διαχωριστούν σε ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρονίων-οπών με αποτελεσματικά ηλεκτρικά πεδία. Ο δέκτης είναι το υλικό που προσλαμβάνει τα ηλεκτρόνια από τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που έχουν διαχωριστεί (Zhang et al.2014).

Η διάσταση εξιτονίων είναι αποτελεσματική στη διεπιφάνεια μεταξύ υλικών με διαφορετική συγγένεια ηλεκτρονίων (EA) και δυναμικό ιοντισμού (IP). Το χάσμα ζώνης σε αυτά τα υλικά ορίζεται ως η διαφορά ενέργειας μεταξύ των επιπέδων HOMO και LUMO. Η τάση ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  είναι η διαφορά μεταξύ του HOMO του υλικού δότη και του LUMO του υλικού δέκτη. Οι διαφορές μεταξύ του EA και του IP και των δύο υλικών δημιουργούν ηλεκτροστατικές δυνάμεις στη διεπιφάνεια που επιτρέπουν τη δημιουργία ισχυρότερων ηλεκτρικών πεδίων που μπορούν να σπύσουν τα εξιτόνια πιο αποτελεσματικά. Κατά συνέπεια, κάθε εξιτόνιο δημιουργεί έναν φορέα χωρίς φορτίο που μπορεί να συλληχθεί από το ηλεκτρόδιο του υλικού με υψηλότερη EA, ενώ η οπή γίνεται αποδεκτή από το υλικό με χαμηλότερη IP (Zhang et al.2014).

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά κύτταρα μπορούν περαιτέρω να ταξινομηθούν σε δύο ομάδες ανάλογα με τη χημική δομή του ημιαγωγού δότη ηλεκτρονίων (τύπου p): ηλιακά κύτταρα πολυμερών (PSCs) και ηλιακά κύτταρα μικρού μορίου. Τα PSC είναι συνήθως κατασκευασμένα από ένα αγωγίμο γυαλί οξειδίου του κασσιτέρου του ινδίου (ITO) που καλύπτεται από ένα στρώμα μεταφοράς πολυμερών οπών, ένα ενεργό στρώμα, ένα στρώμα μεταφοράς ηλεκτρονίων και ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο χαμηλής λειτουργίας όπως το Al (Fang et al.,2015) . Αντίθετα, μια ανεστραμμένη συσκευή περιλαμβάνει ένα γυαλί ITO με ένα στρώμα ρυθμιστή ως κάθοδο και η άνοδος είναι ένα μέταλλο υψηλής λειτουργικότητας όπως το Ag ή το Au . Απαιτούνται ένα μέταλλο υψηλής λειτουργικότητας (υψηλότερο από αυτό του στρώματος μεταφοράς οπών) και

ένα μέταλλο χαμηλής λειτουργίας (χαμηλότερο από αυτό του στρώματος μεταφοράς ηλεκτρονίων) για την υλοποίηση ωμικών επαφών, αποτρέποντας το σχηματισμό συνδέσεων Schottky (που παρουσιάζουν διορθωτική συμπεριφορά, αυξάνοντας τη δυσκολία εξαγωγής ρεύματος και μειώνοντας την απόδοση της συσκευής) (Fang et al.,2015).

Η τάξη και η χημική φύση των στρωμάτων και του μεταλλικού ηλεκτροδίου καθορίζουν έντονα την απόδοση των PSC και κατά συνέπεια την αποτελεσματικότητά τους (Nicholson 2015) .

Τα PSC μπορούν να διαμορφωθούν ως μονής διασταύρωσης ή έτερο-συνδέσμου. Η αρχιτεκτονική έτερο-διασταύρωσης συνίσταται σε μια σύνδεση σάντουιτς οργανικών υλικών μεταξύ δύο μεταλλικών αγωγών, τυπικά ITO, που χωρίζονται από μια μεταλλική επίστρωση όπως Al, Mg ή Ca. Το οργανικό στρώμα με την υψηλότερη τιμή EA και IP θα είναι ο αποδέκτης, ενώ το άλλο θα είναι ο δότης. Μια πιο αποτελεσματική επιλογή είναι η χρήση χύδην έτερο-συνδέσεων (BHJ) , που σχηματίζονται με ανάμειξη ενός συζευγμένου πολυμερούς πλούσιου σε ηλεκτρόνια ως δότη και ενός φουλερενίου με έλλειψη ηλεκτρονίων ως δέκτη με ένα ασυνεχές δίκτυο αλληλοδιείσδυσης νανοκλίμακας. Δεδομένου ότι η περιοχή της διεπαφής DA έχει αυξηθεί σημαντικά, η απόδοση διάστασης εξιτονίων βελτιώνεται σε σύγκριση με τις άλλες αρχιτεκτονικές δομές (Nicholson 2015).

Ένα πολύ ευρύ φάσμα πολυμερών έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή PSC. Οι εναλλασσόμενοι διπλοί δεσμοί άνθρακα-άνθρακα είναι κοινοί σε όλους και είναι υπεύθυνοι για τις ηλεκτρονικές τους ιδιότητες, τις οπτικές μεταπτώσεις χαμηλής ενέργειας και τις υψηλές συγγένειες ηλεκτρονίων. Τα ακατέργαστα συζευγμένα πολυμερή είναι συνήθως μονωτές και γίνονται αγωγά μέσω οξείδωσης (*p*-doping) ή αναγωγής (*n*- doping) (Nicholson 2015) .

Οι εξελίξεις στα PSC μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το στρώμα στο οποίο εισάγονται τα πολυμερή. Για τον σχεδιασμό του υποστρώματος, είναι επιθυμητό το μικρό πάχος και η ευελιξία. Έτσι, το τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο (PET) ή το ναφθαλικό πολυαιθυλένιο (PEN) χρησιμοποιούνται συχνά, καθώς έχουν καλές θερμικές και μηχανικές ιδιότητες και καλή σταθερότητα κατά τη διάρκεια των επεξεργασιών με διαλύτες (Nicholson 2015).

Σχετικά πρόσφατα, το (PEDOT:PSS) έχει τραβήξει το ενδιαφέρον των επιστημόνων λόγω της ευελιξίας και της ικανότητας επεξεργασίας του σε διάλυμα . Επιπλέον, το PEDOT:PSS έχει καλή διαφάνεια, μηχανική αντίσταση, ικανότητα μεταφοράς οπών, υψηλή λειτουργία εργασίας και καλή σταθερότητα σε θερμοκρασία δωματίου. Έχει εφαρμοστεί ως άνοδος, κάθοδος και ως δύο ηλεκτρόδια ταυτόχρονα (Kavan et al.,2014). Από αυτή την άποψη, οι Hau et al.(2013) ανέπτυξαν λειτουργικές συσκευές επεξεργασμένες με λύση, αν και παρουσίασαν χαμηλή απόδοση . Από την άλλη πλευρά, το PEDOT:PSS έχει αρκετές αδυναμίες, συμπεριλαμβανομένου του υγροσκοπικού χαρακτήρα και των ανομοιογενών ηλεκτρικών ιδιοτήτων που έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλή αντοχή (Wang et al,2014) .

Το πολυ(3-εξυλοθειοφαίνιο) (P3HT), με ευρύ διάκενο ζώνης 1,9 eV, χρησιμοποιείται επίσης ευρέως σε PSC λόγω των ανώτερων ηλεκτρονικών ιδιοτήτων του σε συνδυασμό με την ικανότητά του να αυτοσυναρμολογείται και να διαλύεται εύκολα σε οργανικούς διαλύτες. Η πολυανιλίνη (PANI) είναι επίσης πολύ ελκυστική λόγω της χαμηλής τιμής, της απλής σύνθεσης και της υψηλής περιβαλλοντικής σταθερότητας. Επιπλέον, δείχνει μια απόκριση ντόπινγκ οξέος/βάσης και οι ηλεκτρικές του ιδιότητες μπορούν να συντονιστούν αλλάζοντας την κατάσταση οξειδωσης και πρωτονίωσης (Wang et al,2014) . Από την άλλη πλευρά, άλλα πολυμερή εμφανίζουν χαμηλή διαλυτότητα όπως το πολυ(ρ-φαινυλενο-βινυλένιο) (PPV), η πολυπυρρόλη (PPy) και το πολυ(ρ-φαινυλένιο) (PPP), γεγονός που περιορίζει την εφαρμογή τους. Επιπλέον, το PPV υποφέρει από κακή απορρόφηση και φωτοαποδόμηση (Wang et al,2014).

Τα PSC υποφέρουν από διαφορετικούς τύπους καταπονήσεων, ατμοσφαιρική έκθεση και ηλεκτρική πόλωση . Για να βελτιωθεί η σταθερότητα των PSCs, μπορούν να εφαρμοστούν φθοριοπολυμερή επικαλύψεις και στις δύο πλευρές της κυψέλης. Πρόσφατα, τα φθοριοπολυμερή έχουν ενσωματωθεί στα PSC λόγω των εξαιρετικών οπτικών και μηχανικών ιδιοτήτων τους και της εξαιρετικής σταθερότητάς τους έναντι της υπεριώδους ακτινοβολίας (Ruan et al ,2015). Έτσι, το πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE) έχει χρησιμοποιηθεί ως ρυθμιστικό στρώμα ITO λόγω της χαμηλής του χημικής αντιδραστικότητας, της υψηλής θερμικής σταθερότητας, της εξαιρετικής αντοχής στην υγρασία, της ευελιξίας, του μικρού βάρους και του χαμηλού κόστους (Ruan et al ,2015).

Μια άλλη πτυχή που πρέπει να ληφθεί υπόψη για την ανάπτυξη ηλεκτροδίων είναι η λειτουργία εργασίας, καθώς πρέπει να μειώνεται σταδιακά για σωστή μεταφορά φορτίου. Επί του παρόντος, έχουν προταθεί μέθοδοι για τη μείωση των τιμών των ηλεκτροδίων χρησιμοποιώντας αιθοξυλιωμένη-πολυαιθυλενιμίνη (PEIE) και πολυαιθυλενιμίνη (PEI) (Ruan et al ,2015).

Τα οργανικά φωτοβολταϊκά κύτταρα παρουσιάζουν χαμηλότερη απόδοση από τα κύτταρα που βασίζονται σε ανόργανες ενώσεις , λόγω της τεχνολογικής τους ωριμότητας και της ωριμότητας της αγοράς και άλλων παραγόντων όπως το μεγάλο διάκενο ζώνης. Οι υψηλότερες αναφερόμενες αποδόσεις κυμαίνονται μεταξύ 9,7-11,2% , και λαμβάνοντας υπόψη την αυξητική τάση που διαπιστώθηκε τα τελευταία χρόνια, αναμένεται ότι θα βελτιωθούν περαιτέρω. Η καλύτερη εργαστηριακή τους απόδοση (22,4%) έχει επιτευχθεί με το P3HT ως υλικό δότη (Perovo Solar Power Station 2015) .

Συνολικά, τα οργανικά φωτοβολταϊκά κύτταρα εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές, όπως ευελιξία, ελαφρύ βάρος, χαμηλότερο κόστος επεξεργασίας και λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επιπλέον, τα στρώματα κυψελών μπορούν να εναποτεθούν μέσω μεθόδων που βασίζονται σε διάλυμα, όπως η επίστρωση με περιστροφή ή η εκτύπωση, που επιτρέπουν την κατασκευή συσκευής σε μεγάλη κλίμακα σε χαμηλές θερμοκρασίες, μειώνοντας έτσι το σχετικό κόστος. Τα PSC μπορούν επίσης να είναι διαφανή σε βάρος της χαμηλότερης απόδοσης, η οποία είναι ενδιαφέρουσα για εφαρμογές σε παράθυρα, τοίχους, ευέλικτα ηλεκτρονικά κ.λπ. Τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι η χαμηλή τους απόδοση και ότι είναι ευαίσθητα σε φωτοχημική αποδόμηση (Perovo Solar Power Station 2015) .

#### iv) Ηλιακά κύτταρα περοβσκίτη

Τα ηλιακά κύτταρα περοβσκίτη περιλαμβάνουν μια δομημένη ένωση περοβσκίτη , συνήθως ένα υβριδικό οργανικό-ανόργανο υλικό με βάση το μόλυβδο ή το αλογονίδιο κασσίτερου, ως το ενεργό στρώμα συγκομιδής φωτός, το οποίο τοποθετείται μεταξύ του στρώματος μεταφοράς ηλεκτρονίων (ETL) (συνήθως μεσοπορώδες υλικό ή επίπεδο  $TiO_2$  ) και του στρώματος μεταφοράς οπών (HTL) . Στην τυπική διαμόρφωση της συσκευής, το μπροστινό διαφανές ηλεκτρόδιο είναι ένα φύλλο οξειδίου του κασσίτερου με πρόσμειξη φθοριδίου (FTO) και το πίσω

ηλεκτρόδιο είναι ένα στρώμα χρυσού που έχει εξατμιστεί θερμικά (Sunshot Initiative 2014).

Τα ηλιακά κύτταρα περοβσκίτη διαθέτουν επίσης διεπαφή DA. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα οργανικά ηλιακά κύτταρα περοβσκίτη, τα εξιτόνια δεν χρειάζεται να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, καθώς η απορρόφηση φωτονίων έχει πρακτικά ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ελεύθερων φορέων φορτίου. Αυτή η φύση των εξιτονίων χωρίς παραγωγή είναι κρίσιμη για την απόδοση της συσκευής. Η αποδοτική παραγωγή ηλεκτρονίων και οπών σε ένα μόνο στάδιο είναι ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών κυψελών περοβσκίτη, αφού αποφεύγονται οι απώλειες ενέργειας λόγω της δημιουργίας εξιτονίων, η κίνηση και η διάστασή τους (Sunshot Initiative 2014). Επιπλέον, οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται και οι μέθοδοι κατασκευής (όπως οι τεχνικές εκτύπωσης) είναι και οι δύο χαμηλού κόστους. Είναι απλά στην κατασκευή και ο υψηλός συντελεστής απορρόφησης τους επιτρέπει την απορρόφηση ολόκληρου του ορατού ηλιακού φάσματος με εξαιρετικά λεπτά φιλμ (~500 nm). Αυτά τα χαρακτηριστικά τους καθιστούν ιδανικούς υποψηφίους για την κατασκευή φωτοβολταϊκών μονάδων χαμηλού κόστους, υψηλής απόδοσης, λεπτών, ελαφριών και εύελικτων (Sunshot Initiative 2014).

Από την άλλη πλευρά, μία από τις κύριες προκλήσεις για τις φωτοβολταϊκές κυψέλες περοβσκίτη είναι η βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη σταθερότητα. Η αστάθειά τους σχετίζεται κυρίως με την υγρασία και το οξυγόνο του περιβάλλοντος, τη θερμική επίδραση, τη θέρμανση και την εφαρμοζόμενη τάση, τα υπεριώδη και ορατά φώτα και τη μηχανική ευθραυστότητα (Sunshot Initiative 2014).

Συγκεκριμένα, η υδατοδιαλυτότητα του απορροφητικού υλικού καθιστά τα κύτταρα ιδιαίτερα επιρρεπή σε γρήγορη αποικοδόμηση σε υγρά περιβάλλοντα. Αυτή η υποβάθμιση μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τη βελτιστοποίηση των συστατικών υλικών, της αρχιτεκτονικής των κυψελών, των διεπαφών και των περιβαλλοντικών συνθηκών κατά τα στάδια της κατασκευής. Για παράδειγμα, έχει αναφερθεί ότι η ενθυλάκωση του απορροφητή περοβσκίτη μέσα σε ένα σύνθετο νανοσωλήνα άνθρακα και μια μήτρα αδρανούς πολυμερούς εμποδίζει την αποικοδόμηση σε υγρή ατμόσφαιρα και σε υψηλές θερμοκρασίες (Fang et al., 2015).

Μια άλλη βασική πρόκληση για αυτόν τον τύπο κυψελών είναι ότι οι καμπύλες ρεύματος-τάσης τους δείχνουν μια υστερητική συμπεριφορά ανάλογα με τις συνθήκες



μέτρησης (π.χ. κατεύθυνση σάρωσης, ταχύτητα σάρωσης, διαβροχή φωτός, πόλωση). Έχουν προταθεί διάφοροι λόγοι για να εξηγηθεί μια τέτοια συμπεριφορά, όπως η κίνηση ιόντων, η πόλωση, τα σιδηροηλεκτρικά φαινόμενα, η πλήρωση καταστάσεων παγίδας, αν και η ακριβής προέλευση δεν είναι ακόμη γνωστή (Fang et al.,2015) .

Στα φωτοβολταϊκά κελιά περοβσκίτη, ο διαχωρισμός των φορτίων μπορεί να γίνει είτε με την έγχυση των ηλεκτρονίων που δημιουργούνται στο ETL είτε με την έγχυση των οπών στο HTL. Περαιτέρω, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται κοντά στη διεπιφάνεια περοβσκίτη/HTL θα πρέπει να διαχέονται σε όλο το πάχος του στρώματος προτού εξαχθούν στη διεπιφάνεια ETL/περοβσκίτη, γεγονός που αυξάνει τις δυνατότητες ανασυνδυασμού. Παρόμοιο φαινόμενο συμβαίνει στις οπές κοντά στη διεπαφή ETL/περοβσκίτη. Πρόσφατες εργασίες έδειξαν ότι και οι δύο διαδικασίες λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα (Talavera et al.2019) .

Οι κυψέλες περοβσκίτη έχουν βελτιώσει την απόδοσή τους από μια αρχική τιμή 3,8% το 2009 σε 22,13% το 2018 σε αρχιτεκτονικές μονής διασταύρωσης . Η τρέχουσα έρευνα επικεντρώνεται στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας, ενώ προσπαθεί να λύσει τις προαναφερθείσες προκλήσεις αυτού του τύπου κυττάρων . Έχει αναφερθεί ότι τα κύτταρα περοβσκίτη στερεάς κατάστασης παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση από εκείνα με υγρούς ηλεκτρολύτες, επομένως συνιστάται η χρήση στερεών ηλεκτρολυτών (Talavera et al.2019). Η βελτίωση της απόδοσης συνήθως προσεγγίζεται μέσω της βελτιστοποίησης της σύνθεσης περοβσκίτη, της μεθόδου εναπόθεσης που εφαρμόζεται και της αρχιτεκτονικής της συσκευής :

- Σύνθεση: οι υψηλότερες αποδόσεις (21,1–21,6%) έχουν επιτευχθεί με την ανάμειξη διαφορετικών κατιόντων για να σχηματιστεί ο περοβσκίτης . Επιπλέον, τα διάκενα ζώνης είναι συντονισμένα και μπορούν να βελτιστοποιηθούν για το ηλιακό φάσμα αλλάζοντας την περιεκτικότητα σε αλογονίδια στο φιλμ (δηλ. με ανάμειξη I και Br).
- Μέθοδος εναπόθεσης: μια καλή διεπαφή μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων κυττάρων βελτιώνει την απόδοση. Από αυτή την άποψη, έχει επιτευχθεί μια τιμή 19,7% όταν χρησιμοποιούνται DMF και DMSO ως διαλύτες κατά τη διαδικασία επικάλυψης με περιδίνηση . και

- Αρχιτεκτονική κυψέλης: αυτή η παράμετρος επηρεάζει έντονα την τελική απόδοση κυψέλης. Για παράδειγμα, η χρήση του  $\text{TiO}_2$  με φουλερένιο ως ETL επέτρεψε την κατασκευή μιας συσκευής χωρίς υστέρηση, με απόδοση 19,1%. Θα πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη πρόσθετα στρώματα, όπως η αντι-ανακλαστική επίστρωση, καθώς και το πάχος και η αντοχή κάθε στρώσης (Talavera et al.2019).

#### ν) Ηλιακά κύτταρα πολλαπλών συνδέσεων

Οι ηλιακές κυψέλες πολλαπλών συνδέσεων (MJ) περιλαμβάνουν πολλαπλές συνδέσεις p-n από διαφορετικά υλικά ημιαγωγών και καθεμία από αυτές παράγει ηλεκτρικό ρεύμα ως απόκριση σε διαφορετικά μήκη κύματος φωτός, αυξάνοντας έτσι τη μετατροπή του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός σε ηλεκτρική ενέργεια και αυξάνει την απόδοση της συσκευής. Η ιδέα της χρήσης διαφορετικών υλικών με διαφορετικό διάκενο ζώνης προτείνεται για να αξιοποιηθούν τα μέγιστα δυνατά φωτόνια. Ολόκληρη η κυψέλη μπορεί να κατασκευαστεί από το ίδιο υλικό ή από διαφορετικά, προσφέροντας ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων σχεδίασης. Μια σχηματική αναπαράσταση της γενικής δομής ενός διαδοχικού κυττάρου με δύο συνδέσεις γνωστές επίσης ως κυψέλες διπλής σύνδεσης, συνήθως περιλαμβάνουν τα ακόλουθα στοιχεία:

- Ένα διαφανές ηλεκτρόδιο (δηλαδή, TCO), το οποίο καλύπτει ένα μεγαλύτερο κελί ζώνης που θα είναι το πρώτο που θα συλλάβει την ακτινοβολία.
- Ένα στρώμα ανασυνδυασμού, το οποίο εφαρμόζεται είτε ως σύνδεση σήραγγας είτε ως TCO ανάλογα με το αν απαιτείται σειριακή ή παράλληλη σύνδεση των κυψελών.
- Ένα κελί με χαμηλότερο διάκενο ζώνης από το προηγούμενο.
- Μια πίσω επαφή.

Γενικά, υπάρχουν δύο τύποι σχεδίων: το μονολιθικά ενσωματωμένο tandem και το μηχανικά στοιβαγμένο tandem. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η τεχνολογία μηχανικής στοιβαξης είναι δύσκολο να αναπτυχθεί και είναι σχετικά ακριβή στις μέρες μας. Η κατασκευή συσκευών πολλαπλών συνδέσεων είναι πρόκληση, καθώς η εξαγωγή ρευμάτων δεν είναι ασήμαντη (Conibeer, 2017).

Σαφώς, όσο αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων, αυξάνεται και η απόδοση. Ωστόσο, ένας μεγάλος αριθμός διασταυρώσεων καθιστά δύσκολη την επιλογή των διαφορετικών στρωμάτων και αυξάνει την πολυπλοκότητα της συσκευής. Επομένως, πρέπει να διερευνηθεί η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ αυτών των τριών παραμέτρων (Conibeer, 2017).

Αυτός ο τύπος κυψελών φαίνεται να είναι η μόνη ρεαλιστική επιλογή για την επίτευξη εξαιρετικά υψηλών αποδόσεων και η μονολιθική δομή θα οδηγήσει στα καλύτερα αποτελέσματα. Ωστόσο, η κατασκευή μεγάλων κυψελών επιφάνειας απαιτεί δαπανηρές διαδικασίες παραγωγής, επομένως η συνδυασμένη χρήση πολλαπλών μικρότερων κυψελών για την κάλυψη της ίδιας περιοχής φαίνεται να είναι οικονομικά πιο βιώσιμη στις μέρες μας. Μια εναλλακτική λύση για την αύξηση της απόδοσης είναι ο συνδυασμός αυτών των μικρότερων κυψελών με τεχνολογίες συγκέντρωσης, οι οποίες συγκεντρώνουν εκατοντάδες ή χιλιάδες φορές το ηλιακό φως, οδηγώντας σε υψηλότερη παραγωγή ενέργειας (Conibeer, 2017) .

Μια καλά μελετημένη εναλλακτική τα τελευταία χρόνια είναι η μεταμορφική ανάπτυξη, η οποία βασίζεται στην προοδευτική μονολιθική ανάπτυξη υλικών με σταδιακά υψηλότερες σταθερές πλέγματος . Αυτή η ανάπτυξη πιθανότατα θα μειώνει την τιμή των υποστρωμάτων που χρησιμοποιούνται σε κύτταρα που βασίζονται σε χημικές ενώσεις των ομάδων III-V. Επί του παρόντος, έχουν επιτευχθεί αποδόσεις κοντά στο 40% υπό συγκέντρωση ηλιακού φωτός, αν και οι θεωρητικοί υπολογισμοί δείχνουν υψηλότερες τιμές (Conibeer, 2017).

Ομοίως με τα οργανικά φωτοβολταϊκά κελιά περοβσκίτη, η ανεστραμμένη κυτταρική ανάπτυξη είναι εφικτή, καθώς και ο συνδυασμός της με άλλες τεχνικές όπως η μεταμορφική ανάπτυξη για την επίτευξη καλύτερης αποτελεσματικότητας . Ένα από τα πλεονεκτήματα της ανεστραμμένης ανάπτυξης είναι ότι η ανάπτυξη του ρυθμιστικού στρώματος καθυστερεί, επομένως οι πιθανές εξαρθρώσεις λόγω της μεταφοράς της σταθεράς του πλέγματος δεν επηρεάζουν τα κύτταρα που βρίσκονται στην κορυφή. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του κάτω κυττάρου μπορεί να είναι πιο εύκαμπτο ανάλογα με το εάν μια επιταξιακή ανάπτυξη πραγματοποιείται με ή χωρίς Ge (Nicholson et al,2018).

Επιπλέον, το υπόστρωμα μπορεί να ανακυκλωθεί για την κατασκευή πολλών κυψελών, γεγονός που θα μειώνει το κόστος παραγωγής μεγάλης κλίμακας. Με την εφαρμογή

αυτής της ανεστραμμένης μεταμορφικής ανάπτυξης, έχουν αναπτυχθεί κύτταρα με απόδοση μεταξύ 40-44,4% (Nicholson et al,2018) .

Συνολικά, αν και τα ηλιακά πάνελ MJ είναι πολύ αποδοτικά, είναι πιο ακριβά από άλλες τεχνολογίες, και αυτό συνεπάγεται διαφορετικές εφαρμογές: τα ηλιακά κύτταρα MJ προτιμώνται στο διάστημα, ενώ τα ηλιακά κύτταρα c-Si είναι καλύτερα για επίγειες εφαρμογές. Προκειμένου να επεκταθεί η χρήση των κυψελών MJ, πρέπει να αναπτυχθούν διαδικασίες κατασκευής μεγάλης περιοχής, οικονομικά αποδοτικές και εξαιρετικά αναπαραγωγικές. Ωστόσο, τα ηλιακά κύτταρα MJ έχουν τη δυνατότητα να έχουν σημαντική διείσδυση σε επίγειες εφαρμογές με συστήματα συμπυκνωτή (Nicholson et al,2018).

#### 3.4.Φωτοβολταϊκά κελιά τέταρτης γενιάς

Τα φωτοβολταϊκά ηλιακά κύτταρα τέταρτης γενιάς συνδυάζουν τα οφέλη των προηγούμενων γενεών, όπως το χαμηλότερο κόστος, την ευελιξία και την υψηλή σταθερότητα των νανοϋλικών τρίτων γενιάς, τα μεταλλικά οξειδία, το γραφένιο και οι νανοσωλήνες άνθρακα. Αυτά τα χαρακτηριστικά θα δώσουν βελτιωμένες συσκευές ηλιακών κυττάρων με την απαραίτητη παραγωγή χαμηλού κόστους καθώς και ανθεκτικότητα και τη χρήση νανοϋλικών σε ηλιακές συσκευές θα βοηθήσουν στην αύξηση της διάστασης και της μεταφοράς φορτίου εντός των κυττάρων. Λόγω των εκπληκτικών ιδιοτήτων του και των αλλοτροπικών μορφών που εμφανίζονται και στις τέσσερις διαστάσεις, το γραφένιο είναι ένα υποψήφιο υλικό ηλιακών κυττάρων με μεγάλες επιστημονικές ελπίδες για τα τεχνολογικά επιτεύγματα της τέταρτης γενιάς (Soldano et al,2010).

##### i) Ηλιακά κύτταρα με γραφένιο

Δεδομένης της επιθυμίας για πηγές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της πλήρους συμβολής τους στην τεχνολογική πρόοδο, η ζήτηση για ηλιακά κύτταρα έχει αυξηθεί με το πρόσθετο όφελος το χαμηλό κόστος και την απλή λειτουργία. Τα ηλιακά κύτταρα δεν είναι πολύ αποτελεσματικά γενικά. Είναι η ουσία τους που τα κάνει έτσι. Οι πρόσφατες εξελίξεις στα ηλιακά κύτταρα με βάση το γραφένιο ενίσχυαν την αποτελεσματικότητά τους περίπου 20% μειώνοντας την αντανάκλαση του προσπίπτοντος φωτός. Για να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα των ηλιακών κυττάρων, το γραφένιο μπορεί να προσβληθεί με διάφορους τρόπους. Ακολουθεί μια

λεπτομερής ανάλυση των ηλιακών κυττάρων με βάση το γραφένιο και των παραλλαγών ντόπινγκ που εξετάζονται και ερευνούνται σε όλο τον κόσμο (Singh et al ,2011).

#### ii) Αρχές των ηλιακών κυττάρων με βάση το γραφένιο

Τα ηλιακά κύτταρα που βασίζονται σε γραφένιο λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο όπως τα συμβατικά ανόργανα ηλιακά κύτταρα σήμερα, αλλά η μόνη διαφορά είναι ότι τα υλικά που βασίζονται σε γραφένιο αντικαθιστούν τα ανόργανα συστατικά. Η χρήση του γραφενίου ως υποσχόμενου υλικού στα ηλιακά κύτταρα βελτιώνει την προσαρμοστικότητα μαζί με την επιρροή των ηλιακών κυττάρων, ενώ ο αριθμός των στρωμάτων γραφενίου σε μια συσκευή και τα αποτελέσματα του ντόπινγκ είναι δύο βασικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα των συσκευών που βασίζονται σε γραφένιο (Singh et al ,2011).

#### iii) Ηλιακά κύτταρα γραφενίου -σιλικόνης

Τα ηλιακά κύτταρα μπορούν επίσης να εφαρμοστούν χρησιμοποιώντας αλλοτροπίες άνθρακα που χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και τα καθιστούν οικονομικά αποδοτικά. Ορισμένα από τα αλλοτροπία άνθρακα παρουσιάζουν αξιοσημείωτα αποτελέσματα, ενώ μερικά δεν είναι πολύ αποτελεσματικά λόγω της αδυναμίας να συντονίσουν τις ηλεκτρονικές τους ιδιότητες και το πάχος του στρώματος. Τα ηλιακά κύτταρα με βάση το γραφένιο διαθέτουν τέτοιες αποτελεσματικές ιδιότητες, όπως η ικανότητα τροποποίησης του πάχους του στρώματος σύμφωνα με την απαίτηση καθώς και την ικανότητα συντονισμού των ιδιοτήτων που βασίζονται στον συνδυασμό υλικών. Το γραφένιο χρησιμοποιείται σε ηλιακά κύτταρα συνδυαστικά με την σιλικόνη γραφενίου τόσο με έτερο-λειτουργίες τύπου N όσο και από την απόδοση του τύπου N και σύμφωνα με την αναφερθείσα βιβλιογραφία, η απόδοση του καθαρού πυριτικού ηλιακού κυττάρου είναι ο καλύτερος από οποιοδήποτε συνδυασμό. Ωστόσο, η επιλογή του γραφενίου είναι πολύ καλύτερη στην περίπτωση των υβριδικών ηλιακών κυττάρων και στη φάση της προόδου για να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητά του σε σύγκριση με το καθαρό πυρίτιο (Bonaccorso et al, 2012).

Σύμφωνα με τις διαθέσιμες έρευνες, οι ετεροδιαλειτούργιες τύπου N δημιουργούν περίπου 0,55 εσωτερικές τάσεις για τον διαχωρισμό του ζεύγους των ηλεκτρονίων, ενώ οι διασταυρώσεις Schottky παράγουν απόδοση 1,5% με συντελεστή πλήρωσης 56%. Ως αποτέλεσμα, ανάλογα με το δελτίο, η απόδοση μπορεί να αυξηθεί και τα σωματίδια χρυσού που προσδιορίστηκαν σε φύλλα γραφένιου έδειξαν αύξηση κατά 40% στην απόδοση (Bonaccorso et al, 2012) .

#### iv) Ηλιακά κύτταρα πολυμερούς γραφένιου

Τα ηλιακά κύτταρα που βασίζονται σε πολυμερές γραφένιο κερδίζουν δημοτικότητα στην αγορά και αυτά τα πολυμερή υλικά μπορεί να είναι οργανικά και ευεργετικά λόγω της απλής μεθόδου παραγωγής τους, του χαμηλού κόστους και της επιτυχίας τους στις εφαρμογές . Το γραφένιο έχει χρησιμοποιηθεί σε πιθανές εφαρμογές επίστρωσης, στρωματοποίησης και ανάκτησης της θερμοκρασίας σε ηλεκτρόδια ως υβριδικό υλικό με συνδυασμό με οργανικά-ανοργυρωτικά υλικά . Το επίπεδο Fermi των φύλλων γραφένιου και των ημιαγωγών είναι καταλληλότερο για τις εφαρμογές έγχυσης φορτίου και έχουν ισχυρά ενεργειακά χαρακτηριστικά. Το γραφένιο μπορεί να συνδυαστεί με πολυμερή για να παράγει ένα υβριδικό υλικό με αναφερθείσα ζώνη 3,6 V που εμποδίζει την κάθοδο στην μεταφορά των ηλεκτρονίων των ηλεκτροδίων. Τα στρώματα γραφένιου με πάχος 2 nm παρέχουν καλύτερα αποτελέσματα από την άποψη της βελτιωμένης ηλεκτρικής αντίστασης και της μετάδοσης των ηλεκτρονίων (Hwee Ling Poh et al, 2012).

#### v) Ηλιακά κύτταρα graphene-quantum dot

Οι αλλοτροπίες άνθρακα όπως οι νανοσωλήνες γραφένιου και άνθρακα όταν συνδυάζονται με κβαντικές κουκκίδες μπορούν να παράγουν αποτελεσματικά ηλιακά κύτταρα και ο συνδυασμός dot graphene-quantum έχει πιθανές εφαρμοστέες χρήσεις. Συντίθενται χρησιμοποιώντας μια μέθοδο εναπόθεσης ηλεκτροφορητικών και χημικών λουτρών, η οποία παράγει ένα στρωματοποιημένο πρότυπο γραφένιου και κβαντικών κουκκίδων που έχουν 18 στρώματα και των δύο υλικών. Αυτός ο συνδυασμός λέγεται ότι έχει αποδοτικότητα 16%, ενώ οι νανοσωλήνες του ανθρακούχου γραφένιου έχουν απόδοση 7%. Ο συνδυασμός του γραφένιου και των κβαντικών κουκκίδων παρέχει ένα ανώτερο πλαίσιο καθώς και ταχεία μεταφορά ηλεκτρονίων μεταξύ του γραφένιου και των κβαντικών κουκκίδων ενώ περιορίζει τον ανασυνδυασμό του φορτίου (Hwee Ling Poh et al, 2012).

#### vi) Τα ηλιακά κύτταρα οξειδίου του γραφενίου

Τα διαδοχικά ηλιακά κύτταρα αποτελούνται από περισσότερα από δύο υπο-κύτταρα που συνδυάζονται μαζί που ονομάζονται ηλιακά κύτταρα πολλαπλών διασταυρώσεων. Σύμφωνα με μελέτες, ένα μοναδικό ηλιακό κύτταρο είναι σχεδόν 40% αποτελεσματικό, αλλά τα διαδοχικά ηλιακά κύτταρα με βάση τα οξείδια του γραφενίου είναι μέχρι 86% αποτελεσματικά και ως εκ τούτου μπορεί να βελτιώσει τη διαμόρφωση της ενεργειακής μετατροπής των ηλιακών κυττάρων (Sekhar C. Ray, 2015).

#### vii) Γραφένιο σε ηλιακά κύτταρα περοβσκίτη

Τα ηλιακά κύτταρα περοβσκίτη έχουν μια ενδιαφέρουσα ζώνη που έχει ως αποτέλεσμα αξιοσημείωτες ιδιότητες απορρόφησης, οι οποίες τελικά οδηγούν σε αυξημένη απόδοση μετατροπής ενέργειας ενός ηλιακού κυττάρου και λόγω της τυποποιημένης δομής τους, αυτός ο τύπος ηλιακού κυττάρου μπορεί εύκολα να συντονιστεί με την αλλαγή του απαιτούμενου υλικού. Αυτά τα κύτταρα διαθέτουν επίσης ένα στρώμα γραφενίου το οποίο αντιπροσωπεύει μόνο το 0,6 βάρος του κυττάρου και οποιαδήποτε άλλη αναλογία μειώνει την απόδοση της συσκευής. Αυτή η διάταξη κυττάρων είναι λίγο πιο περίπλοκη, αλλά έχει ως αποτέλεσμα την υψηλότερη απόδοση μετατροπής ενέργειας σε σύγκριση με τα ηλιακά κύτταρα του οξειδίου του γραφενίου. Όταν τα υλικά οξειδίου του γραφενίου χρησιμοποιούνται σε αυτό το είδος του ηλιακού κυττάρου και σε συνδυασμό με έναν απορροφητή φωτός χρησιμεύουν ως αγωγός οπών (Sekhar C. Ray, 2015). Λαμβάνοντας υπόψη τις άλλες εφαρμογές του οξειδίου του γραφενίου, γίνεται κατανοητό ότι το στοιχείο αυτό αυξάνει τη διαβρεξιμότητα της διεπαφής στην επιφάνεια ενός ηλιακού κυττάρου περοβσκίτη και μειώνει τη γωνία επαφής της μεταφοράς των οπών. Επιπλέον, οι δεσμοί C-C των φύλλων γραφενίου απορροφούν τα μόρια στρώματος μεταφοράς οπών που βελτιώνουν τις διεπιφανειακές επαφές των ηλιακών κυττάρων και οδηγούν σε καλύτερη απόδοση των συσκευών (Sekhar C. Ray, 2015).

#### viii) Οργανικά ηλιακά κελιά γραφενίου

Τα οργανικά ηλιακά κύτταρα, όπως τα ανόργανα, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις βιομηχανικές εφαρμογές και λόγω της αντοχής τους και του χαμηλού κόστους, οι οργανικές συσκευές γίνονται όλο και πιο δημοφιλείς στην τεχνολογία. Σημαντικά ανόργανα συστατικά στα ηλιακά κύτταρα αντικαθίστανται από υβριδικά οργανικά-ανοργάνωτα συστατικά που παρουσιάζουν ανώτερα φυσικά και χημικά

χαρακτηριστικά καθώς και εύκολη επεξεργασία, εύκολη διαθεσιμότητα, περιβαλλοντική φιλικότητα και το πιο σημαντικό , οικονομική αποδοτική σύνθεση και παραγωγή. Το κύριο μειονέκτημα των ηλιακών κυττάρων αυτής της κατηγορίας είναι οι περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις. Ωστόσο, τα οργανικά συστατικά αντιμετωπίζουν αυτό το ζήτημα προσφέροντας σταθερότητα κατά της χημικής φθοράς, της θερμοκρασίας, της υγρασίας και άλλων παραγόντων (Pudikov et al ,2016).

#### Viv) Ηλιακά κύτταρα χύδην γραφενίου

Το γραφένιο είναι ένα δυνητικό υλικό που χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές, όπως ηλεκτρόδια, στρώματα δότη , καθώς και ενεργά στρώματα λόγω των υποσχόμενων ιδιοτήτων του, όπως η αγωγιμότητα, η ευελιξία και η διαφάνεια, που το καθιστούν αποτελεσματικό υλικό. Τα ηλιακά κύτταρα πολλαπλών διασταυρώσεων εξαρτώνται επίσης από τις ιδιαιτερότητες του γραφενίου, όπως το πάχος, τη θερμοκρασία ανόπτησης, τη συγκέντρωση ντόπινγκ κ.ο.κ. Οι ετεροεξοδικές διαδρομές του γραφενίου χρησιμοποιούν επίσης ηλιακά κύτταρα με βάση το γραφένιο και όλοι βασίζονται στο πώς τα παράγωγα του αναμειγνύονται σε αυτά τα κύτταρα. Τα διαφανή ηλεκτρόδια, τα ηλιακά κύτταρα γαλλίου και τα φωτοβολταϊκά στρώματα αποτελούν τα πρωτεύοντα συστατικά των ηλιακών κυττάρων της έτερο-λειτουργίας του γραφενίου (Pudikov et al ,2016) .

#### 3.5.Φωτοβολταϊκά κελιά πέμπτης γενιάς

Η τρέχουσα έρευνα για τις γενιές και τις κατηγορίες τους επικεντρώνεται σε δύο κύριες πτυχές:

(α) την αντικατάσταση των υλικών που χρησιμοποιούνται σε προηγούμενα κύτταρα για τη βελτίωση ορισμένων ιδιοτήτων ή τη μείωση του κόστους · και

(β) την ενσωμάτωση σε υλικά που έχουν μελετηθεί προηγουμένως, οδηγώντας σε βελτιωμένη απόδοση των κυττάρων (Shuai Ren et al,2018).

##### i) Αντικατάσταση γραφενίου με άλλα υλικά

Η αντικατάσταση ορισμένων υλικών από τις γενιές οφείλεται στην ανεύρεση νέων υλικών που μπορούν να βελτιώσουν τη λειτουργία των κυττάρων και την οικονομική ανταγωνιστικότητά τους . Ωστόσο, η βελτίωση της απόδοσης μπορεί οδηγεί σε ζημία . Για παράδειγμα, η χρήση ενός λεπτού φύλλου G ως υποκατάστατο της PT για την



κατασκευή ηλεκτροδίων .Το PSS μειώνει την απόδοση από 4,39% σε 3,95%, αν και η ανθεκτικότητα των κυττάρων βελτιώνεται και η απόδοση διατηρείται μεταξύ 2,37-3,23% μετά από 100 κύκλους κάμψης, τιμές σημαντικά υψηλότερες από αυτές που λαμβάνονται χρησιμοποιώντας PT (2,08%) (Zhang et al.,2018) . Επίσης στα ηλιακά στοιχεία ευαισθητοποιημένα με χρωστικές ουσίες, τα υγρά ηλεκτρόδια έχουν αντικατασταθεί από RGO με πηκτές ηλεκτρολυτών (όπως το πολυαιθυλενοξείδιο (PEO) που έχουν συνδυαστεί με γάμμα-βουτυρολακτόνη, LiI και I2 για να βελτιώσουν την απόδοση (Talavera et al.2019).

Στην περίπτωση του PEO, οι τιμές απόδοσης 5,7% επιτεύχθηκαν λόγω της ταχύτερης διάχυσης των ιόντων I3 και άλλων ιοντικών ειδών και της πλαστικοποίησης των φύλλων άνθρακα. Στον τομέα των ανόργανων κυττάρων, το G μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση των σχεδίων. Για παράδειγμα, ένα το κύτταρο ενός περοβσκίτη χρησιμοποίησε ένα ETL που βασίζεται σε σύνθετο G/πολυμερές (ένα μεσοπορώδες στρώμα RGO/PANI που έχει τοποθετηθεί σε ένα υπόστρωμα ITO) για την επίλυση ζητημάτων θερμικής και χημικής σταθερότητας . Αυτός ο τύπος συνδυασμού επιτρέπει την επίτευξη απόδοσης 13,8% υπό ηλιακό φωτισμό. Περαιτέρω, ορισμένοι συγγραφείς πρότειναν την υποκατάσταση του ITO για CVD-Grown G ή τη χρήση του ως διαφανή αντι-ανακλαστική επικάλυψη. Έτσι, ένα στρώμα G/PEDOT: PSS τοποθετήθηκε με επίστρωση ψεκασμού ως κάθοδος σε ένα ανεστραμμένο PSC, αν και η απόδοση μειώθηκε ελαφρώς σε σύγκριση με τη συσκευή με ITO, γεγονός που υποδεικνύει ότι απαιτείται βελτιστοποίηση. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι το ITO εργάστηκε καλύτερα στην περιοχή μακρού μήκους κύματος, ενώ το Gο εργάστηκε καλύτερα με μικρά μήκη κύματος (Talavera et al.2019).

## ii) Νανοσωλήνες άνθρακα

Οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs) είναι αλλοτροπία άνθρακα που ανακαλύφθηκαν από το IJIMA το 1991 και παρουσιάζουν μια σωληνοειδή δομή που σχηματίζεται από τα φύλλα G . Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι CNTs: Τα CNTs (SWCNTs), τα οποία αποτελούνται από ένα μόνο σωλήνα γραφένιου και CNTs πολλαπλών τοιχώματος (MWCNTs) που αποτελούνται από αρκετούς ομόκεντρους σωλήνες G. Τα SWCNTs μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω σε ημιαγωγούς μεταλλικών και χαμηλών συγκροτημάτων ζώνης, ενώ τα MWCNTs έχουν μεταλλική φύση . Διαφορετικές τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για τη σύνθεση CNTs, συμπεριλαμβανομένης της εκ

φόρτισης του τόξου και της αφαίρεσης με λέιζερ του άνθρακα υψηλής πίεσης. Τα CNTs έχουν μοναδικές ηλεκτρονικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες που τους καθιστούν ενδιαφέροντα υλικά για μια σειρά εφαρμογών. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζουν πολύ υψηλή αναλογία μήκους προς την διάμετρο, στην περιοχή 103-105, και είναι από τα ισχυρότερα και σκληρότερα γνωστά υλικά με ελαστικό μέτρο κοντά στο 1 TPA (Shuai Ren et al,2018) .

Εμφανίζουν επίσης πολύ υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Οι μεταλλικοί νανοσωλήνες μπορούν να μεταφέρουν πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος  $4 \times 10^9$  A/cm, η οποία είναι 1000 φορές μεγαλύτερη από εκείνη των μετάλλων όπως το Cu . Επιπλέον, είναι πολύ καλοί θερμικοί αγωγοί κατά μήκος του σωλήνα και δείχνουν την βαλλιστική αγωγιμότητα σε θερμοκρασία δωματίου. Τα SWCNTs παρουσιάζουν θερμική αγωγιμότητα  $\sim 3500$  W  $\cdot$  m<sup>-1</sup>  $\cdot$  k<sup>-1</sup> , σημαντικά υψηλότερη από αυτή του Cu (385 W  $\cdot$  m<sup>-1</sup>  $\cdot$  k<sup>-1</sup>), και διαθέτουν πολύ υψηλή θερμική σταθερότητα κάτω και από αδρανείς συνθήκες. Κυρίως, τα CNTs μπορούν να εφαρμοστούν σε PVSCs με τρεις τρόπους: ως TCES, ως στρώμα μεταφοράς ή σε ενεργά στρώματα (Shuai Ren et al,2018).

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> :Ανάπτυξη νέων υλικών για την κατασκευή κελιών για καλύτερες ενεργειακές αποδόσεις

Η ηλιακή ενέργεια είναι ένας από τους πιο ελπιδοφόρους ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους, αλλά η τεχνολογία υψηλού κόστους και η περιπλοκότητα των ηλιακών κυττάρων γίνεται η αιτία της συμφόρηση της εφαρμογής με πολλούς τομείς. Η πιο σημαντική παράμετρος για τα ηλιακά κύτταρα είναι η απόδοση μετατροπής, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη πιο αποτελεσματικές τεχνολογίες κατασκευής και ευέλικτες δομές . Ειδικά με την ταχεία ανάπτυξη φορητών συσκευών, οι άνθρωποι προσβλέπουν στην αξιοποίηση της τεχνολογίας των ηλιακών κυττάρων σε διάφορους τομείς της ζωής (Lee et al.,2020) . Σε αυτή την ενότητα θα γίνει αναφορά στην πρόοδο των ευέλικτων υλικών που χρησιμοποιούνται πλέον στα ηλιακά κύτταρα και τις τεχνολογίες παραγωγής , ενώ αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων διαδικασιών παραγωγής τους.

### 4.1.Υλικά για εύκαμπτο ηλιακό κύτταρο πυριτίου

Τα ηλιακά κύτταρα πυριτίου έχουν σημειώσει τεράστια πρόοδο αυτά τα χρόνια, αφού χρησιμοποιούνται από πολλές εφαρμογές στη ζωή μας. Οι άφθονοι πόροι του πυριτίου και τα σχετικά σύνθετα στοιχεία όπως το βόριο και το άζωτο επιτρέπουν τη συνεχή παραγωγή τέτοιων ηλιακών κυττάρων. Τα ηλιακά κύτταρα πυριτίου παρέχουν σταθερότητα, ασφάλεια , εξαιρετική διάρκεια ζωής και χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς όπως τα κτίρια και τα οχήματα. Επί του παρόντος, υπάρχουν τρία είδη ηλιακών κυττάρων πυριτίου, συμπεριλαμβανομένου του μονοκρυσταλλικού πυριτίου, του πολυκρυσταλλικού πυριτίου και του άμορφου πυριτίου. Τα μονοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα πυριτίου έχουν την υψηλότερη απόδοση μετατροπής έως και 26% και γνωρίζουν ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Με την χρήση ενός λεπτού στρώματος πυριτίου ως υπόστρωμα παγίδευσης φωτός, οι ερευνητές έχουν σχεδιάσει διαφορετικές δομές ηλιακών κυττάρων με αξιοπρεπείς ιδιότητες (Lee et al.,2020). Οι Fang et al. (2019) στην έρευνα τους ανέφεραν την δημιουργία ενός εξαιρετικά εύκαμπτου ηλιακού κυττάρου με την χρήση ενός υποστρώματος πυριτίου για την υποστήριξη των νανοσωματιδίων πυριτίου .

Τα ηλιακά κύτταρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου και τα άμορφα ηλιακά κύτταρα πυριτίου έχουν χαμηλή απόδοση σε σύγκριση με τα μονοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα

πυριτίου, αλλά έχουν χαμηλότερο κόστος και οι συνθήκες παραγωγής του συγκεκριμένου πυριτίου είναι λιγότερο αυστηρές . Μια άλλη υπεροχή του μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι ο υψηλότερος συντελεστής οπτικής απορρόφησης που οδηγεί σε καλύτερη απόδοση σε ασθενέστερο φως και χαμηλότερο κόστος (Lee et al.,2020).

Οι Plentz et al.(2017) στην έρευνα τους ανέφεραν ένα εύκαμπτο ηλιακό κύτταρο κατάλληλο για υφάσματα που είναι κατασκευασμένα από γυάλινες ίνες . Με τα πλεονεκτήματα της ευελιξίας και της θερμικής σταθερότητας, η γυάλινη ίνα είναι μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική επιλογή για την αντικατάσταση των παραδοσιακών γυαλιών ή των μεταλλικών υποστρωμάτων. Για την ικανοποίηση της απαίτησης απορρόφησης φωτός, ένα στρώμα οξειδίου ψευδαργύρου με αλουμίνιο εναποτίθεται ως διαφανές στρώμα επαφής και το στρώμα τιτανίου πίσω μειώνεται σε ημιδιαφανές για καλύτερο φωτισμό.

Τα σωματίδια Ag Nano αντανakλούν αποτελεσματικά και διασκορπίζονται στο φως και αντίστοιχα η πυκνότητα ρεύματος αυξάνεται κατά 19,5% .

Οι Águas et al.(2018) ανέφεραν μια εφαρμογή χαρτιού κυτταρίνης στην κατασκευή ηλιακών κυττάρων . Το χαρτί με υδρόφιλο μεσοπορώδες στρώμα παρέχει ένα ευρύ, ελαφρύ και υψηλό υπόστρωμα θερμικής σταθερότητας στα ηλιακά κύτταρα πυριτίου. Η σύγκριση με τα ηλιακά κύτταρα που εναποτίθεται σε γυαλί δείχνει ότι το χαρτί όχι μόνο σχηματίζει μια ευέλικτη συσκευασία για το κύτταρο αλλά δεν έχει καμία επίδραση στην απόδοση. Τα ηλιακά κύτταρα πυριτίου είναι σχετικά σταθερά συστήματα ισχύος με μια σταθερή δομή και η αποτελεσματικότητα των εύκαμπτων κυττάρων αυξάνεται σταδιακά.

#### [4.2.Υλικά για εύκαμπτα ηλιακά στοιχεία ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες](#)

Το 1991, οι Grätzel et al.(1991) ανέφεραν ένα νέο είδος ηλιακού κυττάρου ευαισθητοποιημένο σε βαφές, ανοίγοντας έναν νέο τρόπο για τις εξερευνήσεις και τις χρήσεις της ηλιακής ενέργειας . Τα ηλιακά στοιχεία ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες έχουν τα πλεονεκτήματα των άφθονων πηγών πρώτων υλών, χαμηλού κόστους και σχετικά απλή τεχνική παραγωγής. Με την ευρύτερη αποδοχή της καθαρότητας των υλικών και το σχετικά χαμηλότερο κόστος, τα ηλιακά στοιχεία ευαισθητοποιημένα

σε χρωστικές ουσίες παρουσιάζουν υψηλή ανταγωνιστικότητα με τα συμβατικά ηλιακά κύτταρα. Μέχρι την ανάπτυξη των ηλιακών στοιχείων ευαισθητοποιημένων σε χρωστικές ουσίες, η αποτελεσματικότητα έχει φτάσει το 13% .

Τα ηλιακά στοιχεία ευαισθητοποιημένα με χρωστικές ουσίες αποτελούνται από έναν αγωγό, έναν φωτοευαισθητοποιητή βαφής, μια μεμβράνη ημιαγωγού νανοσωματιδίου, τα ηλεκτρόδια μετρητών και τον ηλεκτρολύτη. Ο μετρητής του ηλεκτροδίου είναι η σκελετική δομή των ηλιακών στοιχείων ευαισθητοποιημένων σε χρωστικές ουσίες , επομένως τα εύκαμπτα ηλιακά στοιχεία ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες απαιτούν και τα δύο ηλεκτρόδια να είναι ευέλικτα (Song et al. 2020). Συνήθως το στοιχείο αυτό υπάρχει στα γυαλιά, π.χ. το γυαλί που επικαλύπτει το οξείδιο του κασσίτερου (ITO) και το γυαλί που επικαλύπτει το οξείδιο του κασσίτερου (FTO) είναι ο διαφανής αγωγός που έχει επικαλυφθεί με οξείδιο του κασσίτερου (ITO) και το γυαλί που επικαλύπτει το οξείδιο του κασσίτερου (FTO) χρησιμοποιούνται για να είναι ο διαφανής αγωγός. Ωστόσο, η εφαρμογή των γυαλιών περιορίζεται εξαιτίας της ευθραυστότητας και του υψηλού βάρους του (Song et al. 2020).

Το οξείδιο του κασσίτερου του ινδίου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο πιο πεδίο των ηλιακών κυττάρων αλλά η έλλειψη πόρων ινδίου και η διαδικασία παραγωγής επιδεινώνουν το κόστος των ηλιακών κυττάρων και θέτουν ένα όριο στην παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Ως εκ τούτου, απαιτείται η ανεύρεση νέων εναλλακτικών υλικών για την αντικατάσταση του οξειδίου του κασσίτερου του ινδίου. Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες κατασκευής ηλιακών στοιχείων ευαισθητοποιημένων σε χρωστικές ουσίες χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια με βάση τα υφάσματα αλλά χωρίς αξιόπαινα αποτελέσματα (Song et al. 2020) .

#### [4.3.Υλικά για εύκαμπτο ηλιακό κύτταρο περοβσκίτη](#)

Τα ηλιακά κύτταρα του περοβσκίτη παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά το 2009. Η απόδοση φωτοηλεκτρικού μετασχηματισμού ήταν μόνο 3,8% εκείνη την περίοδο . Οι Zhou et al. (2014) ανήγαγαν την απόδοση στο 16,6% κατά μέσο όρο, με την υψηλότερη απόδοση να αγγίζει το 19,3% το 2014. Σήμερα η αποτελεσματικότητα του φτάνει το 20,1% (Li et al.2022) . Η ταχύτητα ανάπτυξης αυτής της τεχνολογίας είναι άνευ προηγουμένου και αξίζει την μέγιστη προσοχή των ερευνητών . Το υλικό του στρώματος απορρόφησης του φωτός είναι  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$  . Η κυτταρική δομή ήταν

παρόμοια με τα τυπικά ηλιακά στοιχεία ευαισθητοποιημένα σε χρωστικές ουσίες . Οι Kim et al.(2012) ανέφεραν ένα ηλιακό κύτταρο περοβσκίτη το 2012 . Χρησιμοποίησαν νανοσωματίδια περοβσκίτη και παρήγαγαν μεγάλα φωτοκύματα που υπερέβησαν τα 17 MA/cm<sup>2</sup>.

Η έρευνα σχετικά με τα ευέλικτα ηλιακά κύτταρα περοβσκίτη σημείωσε σημαντικές εξελίξεις τα τελευταία χρόνια. Το οξειδίο του ψευδαργύρου παρείχε ένα εναλλακτικό υλικό στρώματος ηλεκτρονίων-μεταφοράς, το οποίο είναι πολύ λεπτότερο, όπως αναφέρθηκε από τους Liu et al.(2013). Χωρίς τη διαδικασία πυρ συσσωμάτωσης, η θερμοκρασία μπορεί να μειωθεί. Τα ηλιακά κύτταρα που βασίζονται σε αυτόν τον σχεδιασμό έδειξαν ωραία ευελιξία και εμφάνισαν απόδοση μετατροπής έως και 15,7%. Οι κβαντικές κουκίδες οξειδίου του ψευδαργύρου είναι επικαλυμμένες στο υπόστρωμα ITO/GR με τη μέθοδο του ατμοσφαιρικού πίδακα πλάσματος. Η ανάλυση δείχνει ότι η λεπτή μεμβράνη που έχει υποβληθεί σε επεξεργασία jetre -fites κατασκευάζει το ηλιακό κύτταρο περοβσκίτη με ενισχυμένη πυκνότητα ρεύματος. Επιπλέον, η διαδικασία κατασκευής με απλοποιημένες διαδικασίες, με μακροπρόθεσμη σταθερότητα και ευέλικτη δομή αποκαλύπτει τα υψηλά αναπτυσσόμενα δυναμικά στοιχεία αυτών των νέων ηλιακών κυττάρων περοβσκίτη (Liu et al.2013) .

#### [4.4.Υλικά για ηλιακό κύτταρο Cu\(In, Ga\)Se<sub>2</sub>](#)

Τα ηλιακά κύτταρα λεπτού φιλμ του χαλκού (CIGSS) αναπτύσσονται γρήγορα μετά τη δεκαετία του 1980 μεταξύ των διαφόρων τύπων ηλιακών κυττάρων. Με τα πλεονεκτήματα της υψηλής απόδοσης, του χαμηλού κόστους και του ευέλικτου δυνατού, τα ηλιακά κύτταρα λεπτού φιλμ του χαλκού θεωρούνται ότι είναι η καλύτερη δυναμική επιλογή ηλιακής παραγωγής. Η υψηλότερη απόδοση μετατροπής των ηλιακών κυττάρων λεπτού φιλμ χαλκού που αναφέρθηκε μέχρι στιγμής είναι 20,8%, με την εναπόθεση τους σε ένα άκαμπτο γυάλινο υπόστρωμα . Συγκρίνοντας με τα παραδοσιακά ηλιακά κύτταρα λεπτού φιλμ χαλκού, τα εύκαμπτα ηλιακά κύτταρα λεπτού φιλμ του χαλκού είναι ελαφρύτερα, πτυσσόμενα και μπορούν να εφαρμοστούν σε ανομοιογενή επιφάνεια (Yoon et al,2021) .

Το ευέλικτο υπόστρωμα ηλιακών κυττάρων λεπτού φιλμ χαλκού ανοίγει επίσης περισσότερες δυνατότητες εφαρμογής στο έδαφος και το διάστημα. Οι μέθοδοι όπως

η εξάτμιση, ο ψεκασμός και η εναπόθεση είναι κατάλληλες για την παραγωγή ευέλικτων ηλεκτροδίων. Η επιλογή του ευέλικτου υποστρώματος θα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις της καλής θερμικής σταθερότητας. Τα εύκαμπτα φύλλα είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα εύκαμπτα υποστρώματα, ενώ χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος, αποτελεσματικότητα και ευελιξία (Yoon et al,2021).

Ο συνδυασμός εύκαμπτων φύλλων και πολυμερών έχει επίσης τη δυνατότητα να χρησιμεύσει ως ένα πολλά υποσχόμενο ηλιακό υπόστρωμα με απόδοση από ~ 10% (Yoon et al,2021).

## Συμπέρασμα και Μελλοντικές προοπτικές

Επί του παρόντος, η φωτοβολταϊκή τεχνολογία θεωρείται ως μέρος της λύσης στην αναπτυσσόμενη ενεργειακή πρόκληση και ως βασικό στοιχείο της μελλοντικής παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας. Σε αυτό το έργο, έχει παρασχεθεί μια σύντομη περιγραφή της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Οι διαφορετικές τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν μέχρι σήμερα έχουν χωριστεί σε τέσσερις γενιές και τα χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί κάθε γενιάς μαζί με τις πιο πρόσφατες έρευνες έχουν συζητηθεί λεπτομερώς σε αυτή την εργασία .

Οι περισσότερες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην πρώτη και την δεύτερη γενιά είναι ιδιαίτερα τυποποιημένες και έχουν υποβληθεί σε λίγες αλλαγές τα τελευταία χρόνια. Παρουσιάζουν υψηλή αποτελεσματικότητα (20-25%) και είναι συνήθως δαπανηρές, αν και έχει σημειωθεί μείωση του κόστους των κυττάρων που βασίζονται σε πυρίτιο. Από την άλλη πλευρά, η πλειονότητα των φωτοβολταϊκών κυττάρων τρίτης και τέταρτης γενιάς βρίσκονται ακόμη σε στάδιο έρευνας και εξέλιξης. Τα εργαστηριακά πρωτότυπα που οδηγούν σε καλά αποτελέσματα έχουν αναπτυχθεί, αλλά δεν έχουν εφαρμοστεί σε βιομηχανική κλίμακα.

Ωστόσο, τα κύτταρα πολλαπλών διασταυρώσεων της τρίτης γενιάς είναι ήδη εμπορικά και έχουν επιτύχει πολύ υψηλή παραγωγή ενέργειας (> 40%), καθιστώντας τα έτσι την καλύτερη εναλλακτική λύση. Τα κύτταρα της τέταρτης γενιάς που βασίζονται σε νανοσωλήνες άνθρακα ή τα παράγωγά του βρίσκονται σε κατάσταση πρώιμης έρευνας, επομένως αποτελούν ένα πολύ ελπιδοφόρο πεδίο για έρευνα. Η ευέλικτη φύση τέτοιων νανοδομών άνθρακα που επιτρέπει την ενσωμάτωσή τους σε όλη την αρχιτεκτονική PSC, συμπεριλαμβανομένων των στρώσεων μεταφοράς, του ενεργού στρώματος και των ηλεκτροδίων, με στόχο την επίτευξη φθηνών σταθερών συσκευών με βελτιωμένη απόδοση. Τόσο το γερμάνιο όσο και οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν αποδειχθεί ότι μπορούν να αντικαταστήσουν αποτελεσματικά τα παραδοσιακά ηλιακά υποστρώματα. Επιπλέον, το ντόπινγκ νανοσωλήνων άνθρακα έχει αποδειχθεί αποτελεσματικό για τον συντονισμό της μεταφοράς φορτίου εντός των ενεργών στρωμάτων.



Παρά τις ολοένα και πιο εμφανείς βελτιώσεις στην απόδοση της PSC λόγω της προσθήκης των νανοδομών άνθρακα, δεν έχουν εισαχθεί ακόμη στην αγορά, καθώς πρέπει να αντιμετωπιστούν αρκετά ζητήματα.

Παρά τις βελτιώσεις που έχουν επιτευχθεί προς αυτή την κατεύθυνση, οι τρέχουσες μέθοδοι περιορίζονται σοβαρά από τις χαμηλές αποδόσεις τους και αυτό πρέπει να αντιμετωπιστεί πριν από τη χρήση τους σε εμπορικές εφαρμογές. Προβλέπεται ότι στο άμεσο μέλλον και μετά από ολοκληρωμένη έρευνα στον τομέα, τα φωτοβολταϊκά κελιά τέταρτης γενιάς που ενσωματώνουν νανοϋλικά με βάση τον άνθρακα θα προσφέρουν υψηλά επίπεδα επιδόσεων για να ανταγωνιστούν εκείνα των παραδοσιακών κυττάρων που βασίζονται σε πυρίτιο, παρέχοντας έτσι μια νέα προοπτική για τη βιομηχανία της ηλιακής ενέργειας.

## Βιβλιογραφία

Aboudi M (2011) Solar PV balance of system (BOS): Technologies and markets blog. GTM Research.

Action Plan for Achieving a Low Carbon Society (2008)

Boer KW (2011) Cadmium sulfide enhances solar cell efficiency. *Energy Conversion and Management* 52: 426–430.

Boutchich M, Alvarez J, Diouf D, et al. (2012) Amorphous silicon diamond based hetero junctions with high rectification ratio. *Journal of Non-Crystalline Solids* 358: 2110–2113.

Bundesbericht Energieforschung (2013) Innovation durch Forschung – Jahresbericht zur Forschungsförderung im Bereich der erneuerbaren Energien.

Cost of Solar (2013) Cost of solar panels-10 charts tell you everything.

Creative Research for Clean Energy Generation Using Solar Energy (2011)

Darghouth NR, Barbose G and Wiser R (2011) The impact of rate design and net-metering on the billsavings from distributed PV for residential customers in California. *Energy Policy* 39(9): 5243–5253.

Gloucester Marine Terminal Rooftop Solar Array (2015) Clean energy.

International Energy Agency (2014) Trends 2014 in photovoltaic applications.

Liu LQ, Wang ZX, Zhang HQ, et al. (2010) Solar energy development in China – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(1): 301–311.

Muhammad-Sukki F, Abu-Bakar SH, Munir AB, et al. (2014) Feed-in tariff for solar photovoltaic: The rise of Japan. *Renewable Energy* 68: 636–643.

Nicholson J (2015) FIT and the green deal for solar PV installations.

Osamu I (2003) Present status and future prospects of PV activities in Japan. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 75: 729–737.

Perovo Solar Power Station (2015) Clean energy. Available at: <http://www.cleanenergyactionproject>.

Sunshot Initiative (2014) Tackling challenges in solar: 2014 portfolio. Available at: [http://energy.gov/sites/prod/files/2014/08/f18/2014\\_SunShot\\_Initiative\\_Portfolio8.13.14.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2014/08/f18/2014_SunShot_Initiative_Portfolio8.13.14.pdf).

Sweetnam T, Spataru C, Clifffen B, et al. (2013) PV system performance and the potential impact of the green deal policy on market growth in London, UK. *Energy Procedia* 42: 347–356.

Ruan K., Ding K., Wang Y., Flexible graphene/silicon heterojunction solar cells, *J. Mater. Chem. A*, 2015, 27(3), 14370-14377.

Archer M.D., Green M.A., Clean electricity from photovoltaics, 2014, World Scientific.

Fu X., Xu L., Li J., Sun X., Peng H., Flexible solar cells based on carbon nanomaterials, *Carbon*, 2018, 139, 1063-1073.

Zhang X., Öberg V. A., Du J., Johansson E. M. J., Extremely lightweight and ultra-flexible infrared light-converting quantum dot solar cells with high power-per-weight output using a solution-processed bending durable silver nanowire-based electrode, *Royal Soc. Chem.*, 2018, 11, 354-364.

Cao B., Yang L., Jiang S., Lin H., and Li X., Flexible quintuple cation perovskite solar cells with high efficiency, *J. Mater. Chem. A*, 2019, 7, 4960-4970.

Zhang Z., Chen X., Chen P., Integrated polymer solar cell and electrochemical supercapacitor in a flexible and stable fiber format, *Adv. Mater.*, 2014, 26, 466-470.

Fang X., Li Y., Wang X., Ultrathin interdigitated back-contacted silicon solar cell with light-trapping structures of Si nanowire arrays, *Solar Energy*, 2015, 116, 100-107.

Kavan L., Liska P., Zakeeruddin S.M., Macroscopic, Flexible, High-Performance Graphene Ribbons, *ACS Appl. Mater. Interf.*, 2014, 6, 22343-22350.

Wang W., Zhao Q., Li H., Transparent, Double-Sided, ITO-Free, Flexible Dye-Sensitized Solar cells Based on Metal Wire/Zno Nanowire Arrays, *Adv. Funct. Mater.*, 2012, 22, 2775-2782.

Wang J., Fang Z., Zhu H., Flexible, transparent, and conductive defrosting glass, *Thin Solid Films*, 2014, 556, 13-17.

Sheehan S., Surolia P.K., Byrne O., Flexible glass substrate based dye sensitized solar cells, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2015, 132, 237-244.

Hoang T.T., Nguyen P.H., Huynh T.P., *Photovoltaic Specialists Conference*, 2013, 39, 2713-2715.

Bella F., Lambertti A., Sacco A., Bianco S., Novel electrode and electrolyte membranes: Towards flexible dye-sensitized solar cell combining vertically aligned TiO<sub>2</sub> nanotube array and lightcured polymer network, *J. Membr. Sci.*, 2014, 470, 125-131.

Kojima A., Teshima K., Shirai Y., Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells, *J. Amer. Chem. Soc.*, 2009, 131, 6050-6051.

M.A. Green, K. Emery, D.L. King, Y. Hisikawa, and W. Warta, *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.* 15 (2007) p. 35. 15.

R.M. Swanson, *Prog. Photovoltaics: Res. Appl.* 14 (2006) p. 443.

Basic Research Needs for Solar Energy Utilization: Report on the Basic Energy Sciences Workshop on Solar Energy Utilization, April 18–21, 2005 (Office of Science, U.S. Department of Energy, 2005).

Nuclear Energy Data, Edition 2006 (OECD Publishing, Paris, 2006).

Zaidi, B. Introductory Chapter: Introduction to Photovoltaic Effect. In *Solar Panels and Photovoltaic Materials In Tech Open*: London, UK, 2018; pp. 1–8.

Jayawardena, K.D.G.I.; Rozanski, L.J.; Mills, C.A.; Beliatas, M.J.; Nismy, N.A.; Silva, S.R.P. 'Inorganics-in-Organics': Recent developments and outlook for 4G polymer solar cells. *Nanoscale* 2013, 5, 8411–8427.

Conibeer, G. Third-generation photovoltaics. *Mater. Today* 2007, 10, 42–50. [CrossRef]

Talavera, D.L.; Muñoz-Cerón, E.; Casa, J.D.L.; Lozano-Arjona, D.; Theristis, M.; Pérez-Higueras, P.J.

Complete Procedure for the Economic, Financial and Cost-Competitiveness of Photovoltaic Systems with Self-Consumption. *Energies* 2019, 12, 345.

Pudikov D.A., Zhizhin E.V., Rybkin A.G., Rybkina A.A., Zhukov Y.M., Vilkov O. Yu., Shikin A.M. (2016). "Electronic structure of graphene on Ni surfaces with different orientation", *Materials Chemistry and Physics*, Volume 179, Pages 189-193

Soldano C., Mahmood A., Dujardin E. (2010). "Production, properties and potential of graphene", *Elsevier, Carbon*, Volume 48, Issue 8, Pages 2127-2150

Virendra Singh, Daeha Joung, Lei Zhai, Soumen Das, Saiful I. Khondaker, Sudipta Seal, (2011). "Graphene based materials: Past, present and future" , *Elsevier, Progress in Materials Science*, 56, p. 1178–1271

Francesco Bonaccorso, Antonio Lombardo, Tawfique Hasan, Zhipei Sun, Luigi Colombo, and Andrea C. Ferrari. (2012). "Production and processing of graphene and 2d crystals", *Materials today*, Volume 15, Issue 12, Pages 564-589

Shuai Ren, Ping Rong, Qi Yu, (2018). "Preparations, properties and applications of graphene in functional devices: A concise review", *Elsevier, Ceramics International*, Volume 44, Issue 11, Pages 11940-11955

Sekhar C. Ray, (2015). "Applications of Graphene and Graphene-Oxide Based Nanomaterials", William Andrew, "Application and Uses of Graphene" , A volume in *Micro and Nano Technologies*, Pages 1–38

Hwee Ling Poh, Filip Sanek, Adriano Ambrosi, Guanxia Zhao, Zdenek Sofer and Martin Pumera, (2012). "Graphenes prepared by Staudenmaier, Hofmann and Hummers methods with consequent thermal exfoliation exhibit very different electrochemical properties", *Nanoscale*, Issue 11, 4, p. 3515-3522

K. Lee et al., "The Development of Transparent Photovoltaics", *Cell Reports Physical Science*, vol. 1, no. 8, p. 100143, 2020. Available: [10.1016/j.xcrp.2020.100143](https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100143).

W. Song et al., "Over 14% Efficiency Folding-Flexible ITO-free Organic Solar Cells Enabled by Eco-friendly Acid-Processed Electrodes", *iScience*, vol. 23, no. 4, p. 100981, 2020. Available: [10.1016/j.isci.2020.100981](https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.100981)

P. Li et al., "Foldable solar cells: Structure design and flexible materials", *Nano Select*, 2021. Available: [10.1002/nano.202000163](https://doi.org/10.1002/nano.202000163)

J. Yoon et al., "Foldable Perovskite Solar Cells Using Carbon Nanotube-Embedded Ultrathin Polyimide Conductor", *Advanced Science*, vol. 8, no. 7, p. 2004092, 2021. Available: [10.1002/advs.202004092](https://doi.org/10.1002/advs.202004092)