



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και  
Συστημάτων Πληροφορικής

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ  
ΜΕ ΑΠΟΘΕΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ  
ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ ΤΟΞΟΥ  
(ESD)**

Διπλωματική εργασία

Ροκάς Μιχαήλ

Επίβλεψη: Ευάγγελος Χριστοφόρου, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2017





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και  
Συστημάτων Πληροφορικής

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ  
ΜΕ ΑΠΟΘΕΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ  
ΕΚΚΕΝΩΣΗΣ ΤΟΞΟΥ  
(ESD)**

Διπλωματική εργασία

Ροκάς Μιχαήλ

**Επίβλεψη:** Ευάγγελος Χριστοφόρου, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την .....Ιουλίου 2017

.....  
Ε.Χριστοφόρου  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ν.Θεοδώρου  
Καθηγητής ΕΜΠ  
Αθήνα, Ιούλιος 2017

.....  
Π.Τσαραμπάρης  
Επ.Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ροκάς Μιχαήλ

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

Copyright © Ροκάς Μιχαήλ, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με τη μέθοδο της απόθεσης διάσπασης διακένου (Electrospark deposition). Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται η αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών κυψελών, οι διάφορες τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών κυψελών καθώς και οι αποδόσεις αυτών και στη συνέχεια γίνεται εκτενής αναφορά στη δομή, στις ιδιότητες και στις εφαρμογές του διοξειδίου του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ) που αποτελεί και το υλικό απόθεσης στις κυψέλες που δημιουργήσαμε. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή τόσο της πειραματικής μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε στη κατασκευή όσο και στη μεθοδολογία με την οποία έγιναν οι μετρήσεις της τάσης ανοιχτού κύκλου  $V_{OC}$  και του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{SC}$ . Επιπλέον σε αυτό το κεφάλαιο υπάρχουν και οι εικόνες SEM των φωτοβολταϊκών κυψελών. Στο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται σχολιασμός των ηλεκτρικών και μορφολογικών αποτελεσμάτων της εργασίας.

## **ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ**

Απόθεση διάσπασης διακένου, φωτοβολταϊκές κυψέλες,  $\text{TiO}_2$ , SEM



## **ABSTRACT**

The purpose of this diploma thesis is the development of photovoltaic cells with the method of electrospark deposition. In the first chapter the principles of photovoltaic cells, the various technologies and the efficiency rates are analyzed, and also there is an extended reference in the structure, properties and applications of titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ), which is the deposition material used in this thesis. In the second chapter a description of the experimental method used in the manufacturing of the photovoltaic cells is made, and also a description of the measurements taken, including open circuit voltage ( $V_{OC}$ ) and short circuit current ( $I_{SC}$ ). In addition there are the SEM images of the photovoltaic cells. In the third and final chapter there is a comment on electrical and morphological results.

## **KEY WORDS**

Electrospark deposition, photovoltaic cells,  $\text{TiO}_2$ , SEM





### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2016-2017 υπό την επίβλεψη του κ. Ευάγγελου Χριστοφόρου, καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το θέμα αυτό. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Στέλιο Μορέ της εταιρίας AKMELOGI SMPC, ο οποίος μου παραχώρησε τον απαραίτητο εξοπλισμό για την περάτωση του πειραματικού μέρους της εργασίας μου. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την αμέριστη και άνευ όρων συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τις θυσίες της και για όλα αυτά που μου έχει προσφέρει μέχρι τώρα.

# Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	12
1.1 Ηλιακή Ενέργεια – Ακτινοβολία .....	12
1.2 Αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.....	13
1.3 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	14
1.3.1 Ημιαγωγοί.....	15
1.3.2 Δομή ενεργειακών ζωνών.....	15
1.3.3 Επεξήγηση ηλεκτρικής αγωγιμότητας μέσω της θεωρίας των ζωνών.....	16
1.3.4 Επαφή p – n.....	17
1.3.5 Ορθή και ανάστροφη πόλωση διόδου.....	18
1.4 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	19
1.4.1 Χαρακτηριστική I-V φωτοβολταϊκού στοιχείου.....	19
1.4.2 Ρεύμα Βραχυκύκλωσης $I_{sc}$ .....	23
1.4.3 Τάση Ανοιχτοκυκλώσεως $V_{oc}$ .....	23
1.4.4 Μέγιστη παροχή ισχύος.....	23
1.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	24
1.5.1 Θερμοκρασία κυττάρου.....	25
1.5.2 Ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου.....	25
1.5.3 Ρύπανση.....	26
1.5.4 Σκίαση.....	26
1.5.5 Γήρανση.....	27
1.5.6 Απώλειες του φωτοβολταϊκού συστήματος.....	27
1.5.7 Οπτικές απώλειες.....	27
1.6 Είδη φωτοβολταϊκών – διάφορες τεχνολογίες.....	28

# Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

1.6.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου.....	28
1.6.2 Φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου.....	28
1.6.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια Άμορφου πυριτίου .....	29
1.6.4 Φωτοβολταϊκά πλαίσια δισεληνοϊνδούχου χαλκού .....	30
1.6.5 Φωτοβολταϊκά πλαίσια τελουριούχου καδμίου (CdTe) .....	31
1.6.5 Φωτοβολταϊκά πλαίσια αρσενιούχου Γαλλίου (GaAs) .....	31
1.6.7 Φωτοβολταϊκά στοιχεία ετεροεπαφής HIT.....	32
1.6.8 Οργανικά / πολυμερή φωτοβολταϊκά .....	32
1.7 Φωτοβολταϊκά κύτταρα TiO <sub>2</sub> (TiO <sub>2</sub> Photovoltaic Cells) .....	33
1.7.1 TiO <sub>2</sub> : μορφή – ιδιότητες – εφαρμογή .....	33
1.7.2 Τεχνικές απόθεσης σε φωτοβολταϊκά κύτταρα λεπτού υμενίου .....	34
1.7.3 Το διοξείδιο του τιτανίου στην κατασκευή φωτοβολταϊκών κυψελών .....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	36
2.1 Απόθεση διάσπασης διακένου (electrospark deposition) .....	36
2.1.1 Πειραματική διάταξη .....	37
2.2 Πειραματικές μετρήσεις.....	41
2.2.1 Τάση ανοιχτοκύκλωσης.....	41
2.2.2 Τάση υπό φορτίο.....	42
2.3 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning electron microscopy) .....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ .....	47
3.1 Ανάλυση εικόνων SEM .....	47
3.2 Αποτελέσματα – παρατηρήσεις δειγμάτων .....	53
4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	57
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	60
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	72



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 1.1 Ηλιακή Ενέργεια – Ακτινοβολία

Ο ήλιος είναι αστέρας του ηλιακού μας συστήματος. Είναι σχεδόν τέλεια σφαίρα με διάμετρο 1.4 εκατομμύρια χιλιόμετρα και μάζα  $20 \cdot 10^{30}$  kg. Είναι δηλαδή περίπου 109 φορές μεγαλύτερος από τη γη και η μάζα του αποτελεί το 99,86% της μάζας του ηλιακού συστήματος. Η απόσταση της γης από τον ήλιο είναι 150.000.000 km. Το 75% της μάζας του αποτελείται από υδρογόνο, ενώ το υπόλοιπο 25% είναι κυρίως ήλιο και πολύ μικρές ποσότητες οξυγόνου, άνθρακα, νέον και σιδήρου.

Η ενέργεια παρέχεται με τη μορφή ακτινοβολίας, ενέργεια χωρίς την οποία η ύπαρξη ζωής θα ήταν αδύνατη. Ο ήλιος αποτελεί μια τέλεια πηγή ακτινοβολίας σε θερμοκρασία γύρω στους 5800 K. Η προσπίπτουσα ροή ενέργειας πάνω σε μια μονάδα επιφάνειας κάθετη προς τη διεύθυνση της δέσμης έξω από τη γήινη ατμόσφαιρα είναι γνωστή ως ηλιακή σταθερά και ισούται με  $1370 \text{ W/m}^2$ . Ο ήλιος μπορεί να θεωρηθεί ανεξάντλητη πηγή ενέργειας καθώς έχει χρόνο ζωής τουλάχιστον άλλα πέντε δισεκατομμύρια έτη χρόνια.

Η παραγωγή ενέργειας γίνεται στον πυρήνα του ήλιου, όπου συντελούνται αυτοσυντηρούμενες πυρηνικές αντιδράσεις. Πιο συγκεκριμένα, τέσσερα νουκλεόνια υδρογόνου συγχωνεύονται μέσα σ' έναν πυρήνα ηλίου. Η μάζα η οποία χάνεται σε αυτή τη διαδικασία είναι περίπου 4,3 τόνοι/δευτερόλεπτο. Η μάζα αυτή μετατρέπεται σε ενέργεια και μεταδίδεται είτε ως ακτινοβολία(ηλεκτρομαγνητικό κύμα) ή θερμότητα. Στην ουσία ο ήλιος είναι ένας τεράστιος πυρηνικός αντιδραστήρας (Πάσχος, 2012).

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει ταχύτητα διάδοσης στο κενό είναι  $c=3 \cdot 10^8$  m/s, άρα ο χρόνος που απαιτείται για να διανυθεί η απόσταση Ήλιου-Γης είναι περίπου 8,3 λεπτά. Τα μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι από  $10^{-14}$  -  $10^{10}$  m και αντιστοιχούν σε συχνότητες από  $10^{22}$  έως  $10^{-2}$  Hz. Με βάση τα παραπάνω παίρνουμε το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα το οποίο αποτελείται από τρεις ζώνες:

1. Την υπεριώδη
2. Την ορατή
3. Την υπέρυθρη

Σημαντικό ρόλο παίζει η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία ορίζεται ως η ποσότητα της ηλιακής ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο το δευτερόλεπτο. Δηλαδή

$$B = \frac{E}{St} \rightarrow B = \frac{P}{S} \quad (1)$$

Όπου:

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

E= ηλιακή ενέργεια

P= ισχύς

S= εμβαδόν επιφάνειας

t= χρόνος

Από τον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι η ηλιακή ακτινοβολία ελαττώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης. Έτσι ο παραπάνω τύπος για την επιφανειακή ένταση της ατμόσφαιρας γίνεται

$$B = \frac{E}{4\pi t R^2} = \frac{P}{4\pi R^2}, \quad (2) \text{ όπου } R = \text{η απόσταση ήλιου-γης.}$$

Άρα το ποσοστό της ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της γης λόγω της τεράστιας απόστασης που πρέπει να διανύσει είναι υπερβολικά μικρό και αντιστοιχεί περίπου σε 1 kWh/m<sup>2</sup>. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας εκτός από την απόσταση που διανύει στην ατμόσφαιρα, εξαρτάται και από την γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνεια της γης. Για αυτό το λόγω η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι πολύ μεγαλύτερη κατά τη θερινή περίοδο σε σχέση με τη χειμερινή (Ρούση, 2014).

### 1.2 Αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας

Η ηλιακή ενέργεια είναι μιας ήπιας μορφής ενέργεια που μας δίνει την δυνατότητα να την αξιοποιήσουμε με διάφορους τρόπους. Ανάλογα με τη μορφή που τη μετατρέπουν, τα διάφορα συστήματα χωρίζονται σε παθητικά, ενεργητικά και στα φωτοβολταϊκά ηλεκτρικά συστήματα.

Στα ενεργητικά ηλεκτρικά συστήματα η ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται με τη χρήση ηλιακών συστημάτων σε θερμότητα σε κάποια δεξαμενή. Τα πλέον διαδεδομένα ενεργητικά ηλιακά συστήματα είναι οι Ηλιακοί Συλλέκτες για παραγωγή θερμού νερού χρήσης. Επίσης, στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι Ηλιακοί Συλλέκτες Κενού, ο συνδυασμός τους με ψύκτες προσρόφησης (Absorption Chillers) για κάλυψη ψυκτικών αναγκών και τα Ηλιακά Υψηλής Ενθαλπίας για άμεση παραγωγή Ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση αμοστροβίλων ή Οργανικών Κύκλων.

Στα παθητικά ηλεκτρικά συστήματα, συμπεριλαμβάνονται τα δομικά στοιχεία των οικοδομικών κατασκευών που υποβοηθούν στην καλύτερη άμμεση ή έμμεση εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας είτε για θέρμανση των κτηρίων το χειμώνα είτε για να διατηρούνται δροσερά το καλοκαίρι. Όλα τα παθητικά ηλιακά συστήματα πρέπει να έχουν προσανατολισμό περίπου νότιο, ώστε να υπάρχει ηλιακή πρόσπτωση στα ανοίγματα κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια της ημέρας το χειμώνα. Εφαρμογές των παθητικών ηλεκτρικών συστημάτων είναι οι ηλιακοί τοίχοι, ηλιακοί χώροι και τα ηλιακά αίθρια.

Στα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουμε απευθείας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από το φωτοβολταϊκό ηλεκτρικό

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

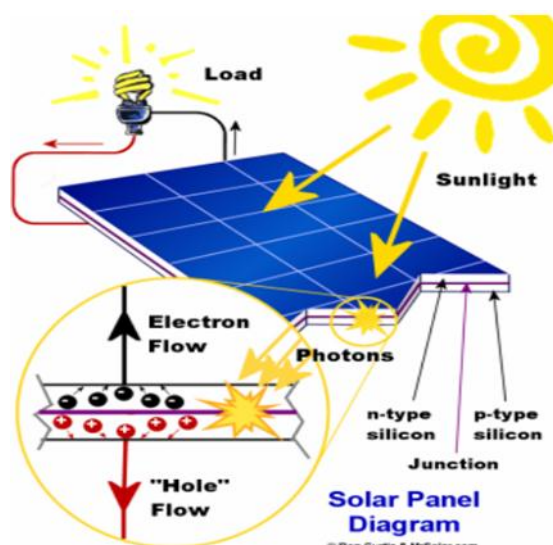
---

πλαίσιο (ηλιακή γεννήτρια ρεύματος) και διάφορα ηλεκτρικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η αποθήκευση της ενέργειας μπορεί να γίνει και με μπαταρίες. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να μετατρέψουν από 8-21% της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν (Duxbury).

- Εξοικονόμηση χρημάτων
- Μείωση των απωλειών μεταφοράς(αποφεύγονται οι σημαντικές απώλειες της μεταφοράς και διανομής του ηλεκτρισμού και κατ' αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας περίπου 10% σε σχέση με τη συμβατική παραγωγή)
- Εξομάλυνση των αιχμών φορτίου
- Μείωση κόστους κατασκευής των κτιρίων
- Αειφόρος ανάπτυξη

### 1.3 Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Η συνήθης εμπορική τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο αφορά τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Becquerel. Στηρίζεται στην άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Το ηλιακό φως είναι ουσιαστικά μικρές δέσμες ενέργειας (φωτόνια) που περιέχουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος. Όταν τα φωτόνια προσκρούσουν σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο (ουσιαστικά ένας ημιαγωγός) άλλα ανακλώνται, άλλα το διαπερνούν και άλλα απορροφώνται από αυτό. Αυτά τα τελευταία είναι που παράγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Δηλαδή τα φωτόνια που απορροφώνται από το ημιαγωγικό υλικό δημιουργούν ζεύγη οπών ηλεκτρονίου-ηλεκτρονίου κάτω από την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου και καθοδηγούνται μέσω εξωτερικού κυκλώματος. Δεδομένου ότι από το ευρύ φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, η ροή ηλεκτρονίων παρατηρείται μόνο σε συγκεκριμένα μήκη κύματος υπάρχει περιορισμένη απόδοση (Πάσχος, 2012) (Ρούσση, 2014).



Σχήμα 1. Αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών (ιδία επεξεργασία).

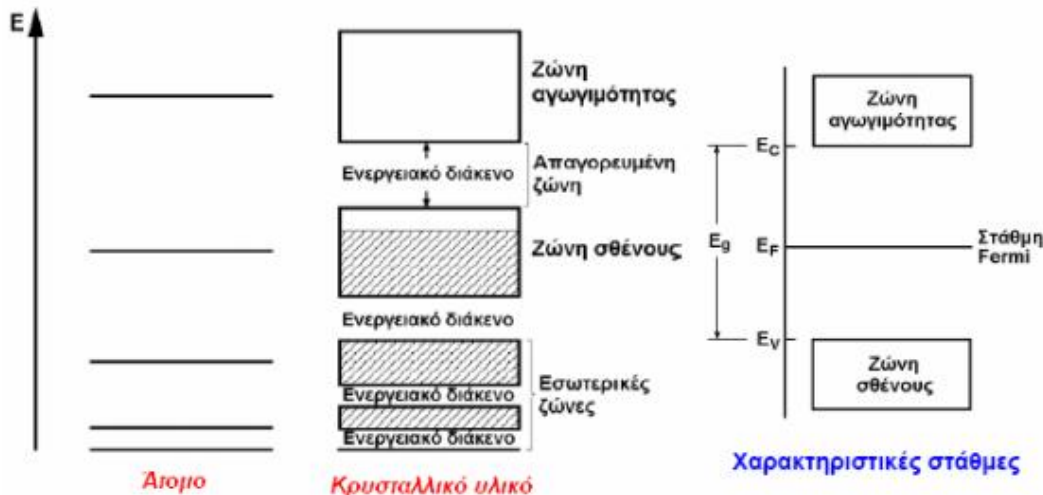
### 1.3.1 Ημιαγωγοί

Ημιαγωγοί (semiconductors) είναι υλικά με ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταξύ των τιμών που αντιστοιχούν σε αγωγούς και μονωτές και η οποία αυξάνεται με αύξηση της θερμοκρασίας. Αντιπροσωπευτικά υλικά είναι στερεά ιοντικής και ομοιοπολικής κατασκευής καθώς και ορισμένα στερεά μοριακής κατασκευής (Hummel, 2001).

### 1.3.2 Δομή ενεργειακών ζωνών

Σε ένα διάγραμμα τιμών ενέργειας, οι ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων σθένους των ατόμων του σώματος, καθώς διαφέρουν πολύ λίγο μεταξύ τους, σχηματίζουν μια ενεργειακή ζώνη, που ονομάζεται ζώνη σθένους. Αντίστοιχα οι ενεργειακές ζώνες των ελεύθερων ηλεκτρονίων, που είναι υπεύθυνα για την εκδήλωση ηλεκτρικής αγωγιμότητας, σχηματίζουν, τη ζώνη αγωγιμότητας (ή ζώνη αγωγής). Η απόσταση ανάμεσα στις δύο ζώνες, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της ενέργειας του λιγότερου ενεργού από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, στον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας, και του περισσότερο ενεργού από τα δεσμευμένα ηλεκτρόνια, στην κορυφή της ζώνης σθένους, ονομάζεται ενεργειακό διάκενο ή ενεργειακό χάσμα. Συνήθως συμβολίζουμε την ενέργεια της κορυφής της ζώνης σθένους με  $E_v$ , την ενέργεια του πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας με  $E_c$  και το ενεργειακό διάκενο με  $E_g$ . Οι τιμές της ενέργειας των ηλεκτρονίων σε κάθε σώμα είναι περιορισμένες μέσα στις ενεργειακές ζώνες. Δηλαδή, σε ένα απολύτως καθαρό σώμα, χωρίς καθόλου προσμίξεις και με τέλειο κρυσταλλικό πλέγμα, δεν υπάρχουν ηλεκτρονικές στάθμες στο διάκενο ανάμεσα στις δυο ζώνες που αναφέραμε και έτσι η περιοχή μεταξύ  $E_v$  και  $E_c$  αποτελεί μια απαγορευμένη ενεργειακή ζώνη για τα ηλεκτρόνια. Τέλος το ενεργειακό διάκενο δίνεται από τον τύπο  $E_g = (E_c - E_v)/2$ , ενώ υπάρχει και η ενέργεια Fermi  $E_f$  που αντιστοιχεί στην μέση τιμή περίπου των  $E_v$ ,  $E_c$  (Oswald & Menges) (Blythe, 1979).



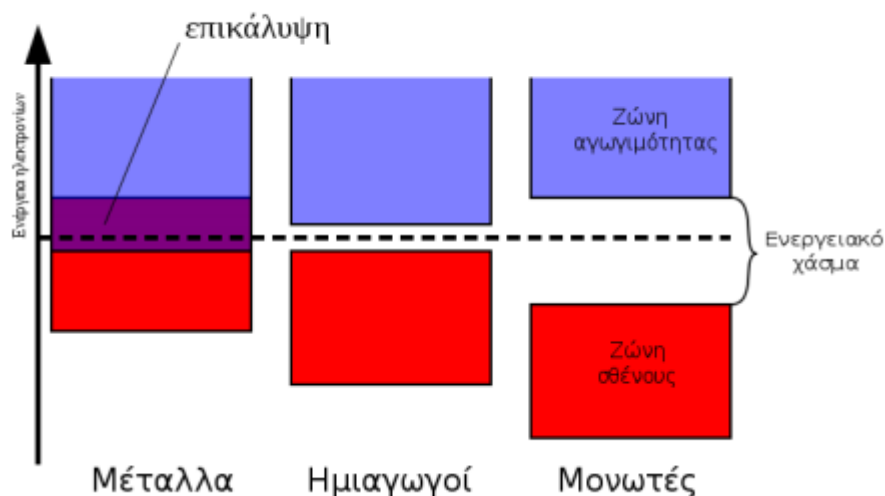


Σχήμα 2. Ενεργειακές ζώνες και στάθμες σε κρυσταλλικό υλικό (ιδία επεξεργασία).

### 1.3.3 Επεξήγηση ηλεκτρικής αγωγιμότητας μέσω της θεωρίας των ζωνών

Με βάση το ενεργειακό χάσμα στα διάφορα στοιχεία, μπορούμε να τα διαχωρίσουμε σε αγωγούς, ημιαγωγούς και μονωτές. Στους αγωγούς (μέταλλα), δεν υπάρχει ενεργειακό χάσμα κι έτσι η ζώνη σθένους και η ζώνη αγωγιμότητας είναι ενωμένες. Κάτω από την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου, κάποια ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους αποκτούν την απαιτούμενη ενέργεια ώστε να μεταπηδήσουν εύκολα στη ζώνη αγωγιμότητας, όπου και μπορούν να κινηθούν υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, οπότε δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα. Στους μονωτές αντίθετα, το ενεργειακό χάσμα είναι μεγάλο, της τάξης των μερικών ηλεκτρονιοβόλτ (eV). Η ενέργεια που μπορεί να προσφερθεί από ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο δεν μπορεί να υπερκαλύψει το ενεργειακό χάσμα, κι έτσι τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας, οπότε στα υλικά αυτά δεν επιτρέπεται η ροή ηλεκτρικού ρεύματος.

Τέλος, στους ημιαγωγούς, το ενεργειακό χάσμα είναι σχετικά μικρό, περίπου ένα ηλεκτρονιοβόλτ (eV). Στη θερμοκρασία του απολύτου μηδενός, οι ημιαγωγοί φέρονται ως μονωτές, αλλά η αγωγιμότητά τους αυξάνει σημαντικά με την άνοδο της θερμοκρασίας. Όσο αυξάνει η θερμοκρασία, τα ηλεκτρόνια σθένους αποκτούν μεγαλύτερη ενέργεια και έτσι είναι δυνατόν μερικά από αυτά να μπορέσουν να υπερπηδήσουν το ενεργειακό χάσμα και να βρεθούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Όσο πιο μεγάλη είναι η θερμοκρασία, τόσο πιο πολλά ηλεκτρόνια είναι σε θέση να κάνουν το άλμα αυτό, οπότε η αγωγιμότητα των ημιαγωγών αυξάνεται (Ohanian, 1987).



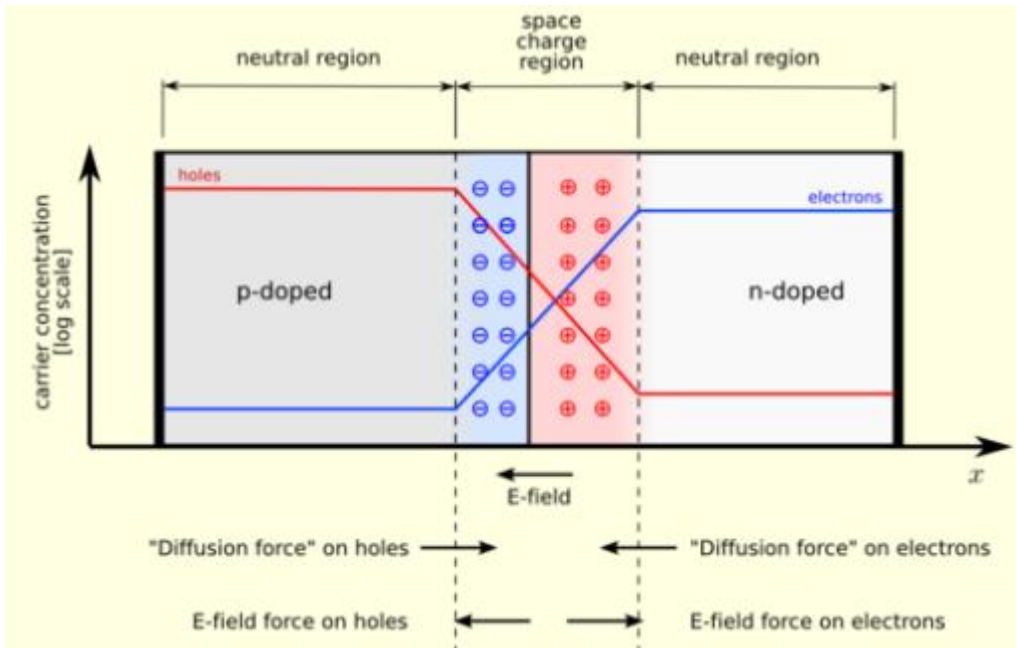
Σχήμα 3. Ενεργειακές ζώνες σε μέταλλα, ημιαγωγούς και μονωτές (ίδια επεξεργασία).

### 1.3.4 Επαφή p – n

Κάθε κρυσταλλικός ημιαγωγός, για να έχει ικανοποιητικές ιδιότητες για φωτοβολταϊκές και γενικότερα ηλεκτρονικές εφαρμογές, θα πρέπει να είναι πολύ μεγάλης καθαρότητας και το κρυσταλλικό του πλέγμα να μην έχει αταξίες δομής. Τα άτομα των ημιαγωγικών υλικών, συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς οι οποίοι είναι δυνατόν να σπάσουν υπό την επίδραση της ακτινοβολίας ή θερμότητας, και με αυτό τον τρόπο απελευθερώνονται ηλεκτρόνια (αρνητικοί φορείς  $n$ ) και αφήνουν κενές θέσεις, τις οπές (θετικοί φορείς  $p$ ).

Οι σημαντικότερες ιδιότητες και εφαρμογές των διατάξεων ημιαγωγών, οφείλονται περισσότερο στη διάχυση των φορέων τους. Βασική διάταξη για την εκδήλωση των ιδιοτήτων αυτών, είναι η ένωση p-n που θεωρούμε ότι σχηματίζεται όταν έλθουν σε στενή επαφή ένας ημιαγωγός τύπου p με έναν τύπου n. Στη συνέχεια, ένα μέρος από τις οπές του ημιαγωγού τύπου p διαχέεται προς τον ημιαγωγό τύπου n όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού τύπου n διαχέεται προς τον ημιαγωγό τύπου p, όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι επίσης πολύ λιγότερα.

Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται η ζώνη εξάντλησης φορέων ή περιοχή αραίωσης, μία περιοχή στην οποία υπάρχουν λίγοι φορείς αγωγιμότητας. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα ωστόσο συνεχίζουν να βρίσκονται στη περιοχή n και τα αρνητικά στην περιοχή p. Έτσι, δημιουργείται ένα ηλεκτροστατικό πεδίο, το οποίο αντισταθμίζεται στην κίνηση των φορέων αγωγιμότητας, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα η παραπάνω διάχυση να μη συνεχίζεται επ' άπειρον. Η αποκατάσταση των συνθηκών ισορροπίας γίνεται με επανασυνδέσεις φορέων, μέχρι οι συγκεντρώσεις τους να πάρουν τέτοιες τιμές ώστε να ικανοποιείται ο νόμος δράσης των μαζών. Η διάταξη ημιαγωγών που αποτελείται από μία ένωση p-n και από μία ηλεκτρική σύνδεση στο κάθε τμήμα της ονομάζεται δίοδος (Hummel, 2001) (Blythe, 1979).

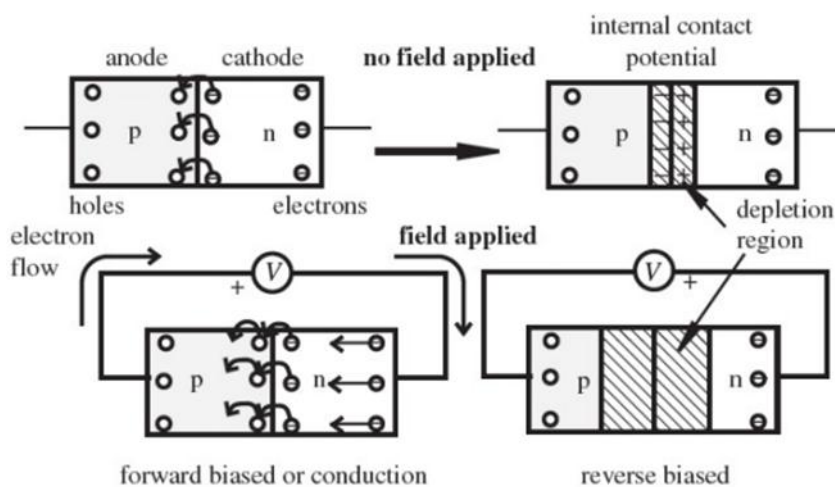


Σχήμα 4. Επαφή p-n (ιδία επεξεργασία).

### 1.3.5 Ορθή και ανάστροφη πόλωση διόδου

Στην ορθή πόλωση, δηλαδή όταν ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδεθεί με το τμήμα τύπου n της διόδου και ο θετικός με το τύπου p, τα ηλεκτρόνια ρέουν χωρίς δυσκολία από την πηγή, μέσω του τμήματος τύπου n, προς την περιοχή της ένωσης όπου επανασυνδέονται με τις οπές που σχηματίζονται με την απομάκρυνση ηλεκτρονίων προς το θετικό πόλο της πηγής, μέσω του τμήματος τύπου p.

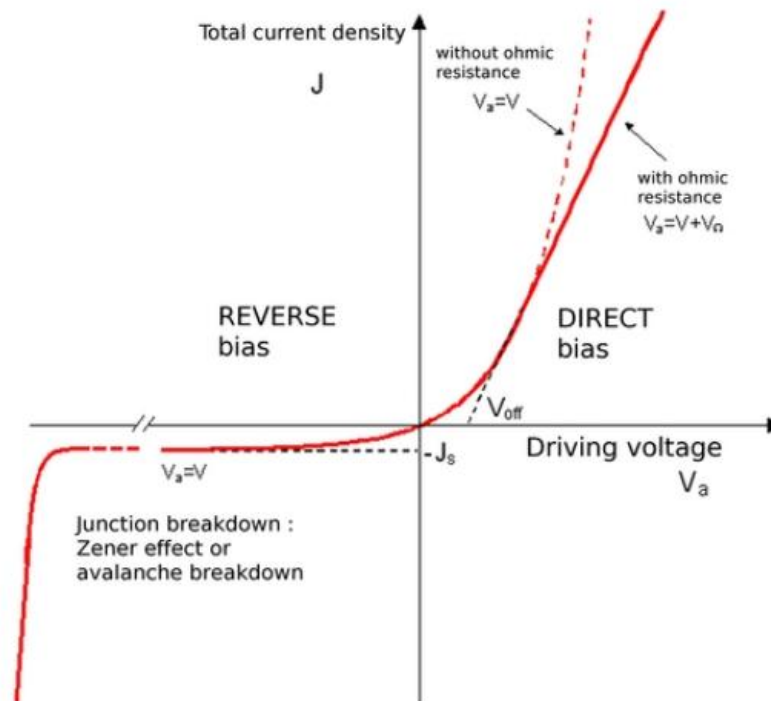
Στην ανάστροφη πόλωση γίνεται επανασύνδεση των οπών του τμήματος τύπου p με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από την πηγή, και απομάκρυνση των ελεύθερων ηλεκτρονίων του τμήματος τύπου n, προς το θετικό πόλο της πηγής.



Σχήμα 5. Συνδεσμολογία ορθής και ανάστροφης πόλωσης (ιδία επεξεργασία).

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

Έτσι, οι συγκεντρώσεις των φορέων μειώνονται πάρα πολύ, το πάχος της ζώνης εξάντλησης αυξάνει, και τα φορτισμένα άτομα των προσμίξεων δημιουργούν ισχυρό εσωτερικό ηλεκτροστατικό πεδίο που είναι αντίθετο προς το πεδίο που επιβάλλει η πηγή. Το αποτέλεσμα είναι ότι τώρα η διόδος προβάλλει μεγάλη αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα.



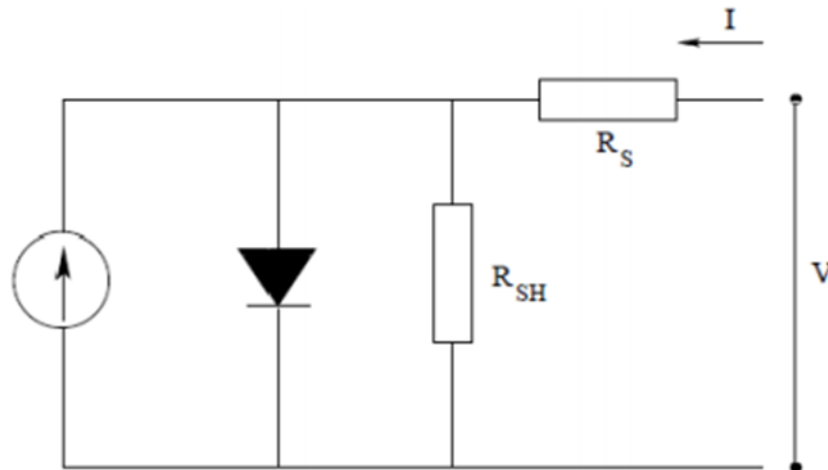
Σχήμα 6. Χαρακτηριστική I-V διόδου p-n (ιδία επεξεργασία).

Δηλαδή μια διόδος που έχει σε ορθή πόλωση αντίσταση  $10 \Omega$ , να την αυξήσει στην αντίστροφη πόλωση σε  $100 \text{ M}\Omega$ , δηλαδή να γίνεται δέκα εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη. Η παραπάνω εικόνα δείχνει ακριβώς την μεταβολή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει μια διόδο ένωσης p-n, συναρτήσει της τάσης και του είδους πόλωσης που εφαρμόζεται (Allcock, Lampe, & Mark, 2003).

### 1.4 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων

#### 1.4.1 Χαρακτηριστική I-V φωτοβολταϊκού στοιχείου

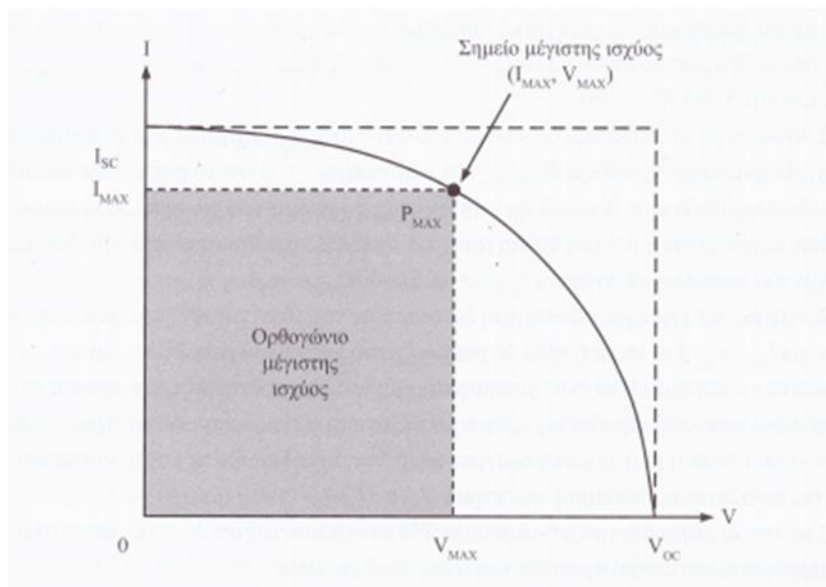
Για να προχωρήσουμε σε μία εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορούμε να το αναπαραστήσουμε με ένα ισοδύναμο κύκλωμα που περιγράφει τη λειτουργία του. Το ισοδύναμο κύκλωμα που φαίνεται στη παρακάτω εικόνα, καλείται πλήρες μοντέλο διόδου και είναι αυτό που χρησιμοποιείται τυπικά για τη μελέτη των φωτοβολταϊκών.



Σχήμα 7. Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου (Δέρβος, 2013).

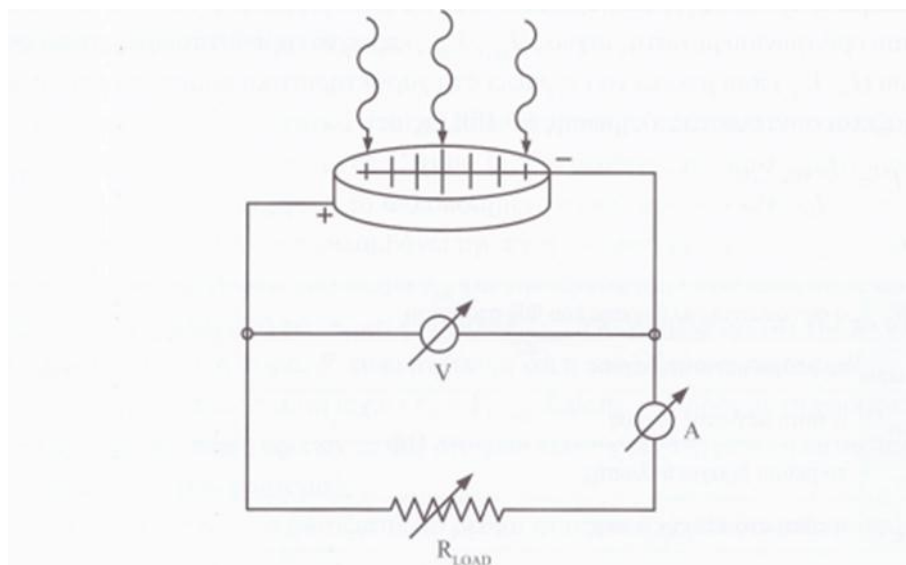
Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ηλιακού κυττάρου που περιλαμβάνει μία γεννήτρια ρεύματος στα αριστερά η οποία συνδέεται παράλληλα με μία δίοδο και την αντίσταση  $R_{SH}$ . Η συνολική αντίσταση του κυττάρου, συνδέεται σε σειρά και παρίσταται από την ποσότητα  $R_S$  (Δέρβος, 2013).

Κατά τη μετακίνηση των φορέων αγωγιμότητας, παρατηρείται μία πτώση τάσης από τον ημιαγωγό προς τις ηλεκτρικές επαφές. Η αντίσταση  $R_S$ , αντιπροσωπεύει την αντίσταση που οφείλεται στην κίνηση αυτή. Επίσης, η αντίσταση διαμέσου της διόδου δεν είναι άπειρη, αφού λόγω αναπόφευκτων κατασκευαστικών ελαττωμάτων γίνονται διαρροές ρεύματος. Για το λόγο αυτό, το ισοδύναμο κύκλωμα περιέχει και την παράλληλη αντίσταση  $R_{SH}$ . Συνήθως, στα εμπορικά φωτοβολταϊκά στοιχεία, η αντίσταση  $R_S$  είναι μικρότερη από  $5 \Omega$  και η αντίσταση  $R_{SH}$  είναι μεγαλύτερη από  $500 \Omega$ . Με τη βοήθεια αυτού του κυκλώματος, είναι δυνατός ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών καμπυλών  $I-V$  για διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας. Μια χαρακτηριστική  $I-V$  ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου παράγεται από τα σημεία λειτουργίας του 4ου τεταρτημορίου της γενικευμένης καμπύλης  $I-V$ . Στο 4ο τεταρτημόριο παράγεται ηλεκτρική ισχύς η οποία μαζί με την καμπύλη  $I-V$  του στοιχείου παρουσιάζονται με τη μορφή που έχουν στο παρακάτω σχήμα (Δέρβος, 2013).



Σχήμα 8. Χαρακτηριστική I-V φωτοβολταϊκού στοιχείου (Δέρβος, 2013).

Για την υλοποίηση της γραφικής παράστασης ρεύματος-τάσης απαιτούνται τα εξής, ένα αμπερόμετρο με χαμηλή εσωτερική αντίσταση, ώστε το  $I_{SC}$  να αποδίδεται χωρίς σφάλμα, ένα βολτόμετρο με μεγάλη εσωτερική αντίσταση, μια μεταβλητή αντίσταση φορτίου και σταθερές διασυνδέσεις καλωδιώσεων. Ένα τέτοιο ηλεκτρικό κύκλωμα μπορεί να θεωρηθεί το παρακάτω:



Σχήμα 9. Κύκλωμα καταγραφής χαρακτηριστικής I-V (Δέρβος, 2013).

Σε μία δίοδο, μπορεί να παραχθεί ρεύμα στο σκοτάδι, χωρίς να παράγεται κανένας φορέας υπό το φως του ήλιου. Το ρεύμα αυτό δίνεται από την παρακάτω εξίσωση

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

$$I = I_0 * e^{\frac{q*V}{(A*K_B*T)}}^{-1} \quad (3)$$

όπου το  $I_0$  είναι το ρεύμα κόρου και δίνεται από τη σχέση:

$$I = A * T^3 e^{\frac{-E_g}{(K_B*T)}} \quad (4),$$

όπου  $E_g$  το ενεργειακό διάκενο,

$q=(1.6*10^{-19}C)$  το φορτίο του ηλεκτρονίου,  $V$  η τάση στην έξοδο του κυττάρου,  $K_B$  η σταθερά BOLTZMANN ( $=1.38*10^{-23} J/ o K$ ),  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία και  $A$  είναι μία σταθερά (σταθερά ιδανικότητας της διόδου) και παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 2 που οφείλεται σε φαινόμενα επανασύνδεσης που συμβαίνουν στην περιοχή της επαφής.

Όταν ο φωτισμός λαμβάνεται υπόψιν τότε η (1), διαμορφώνεται ως εξής:

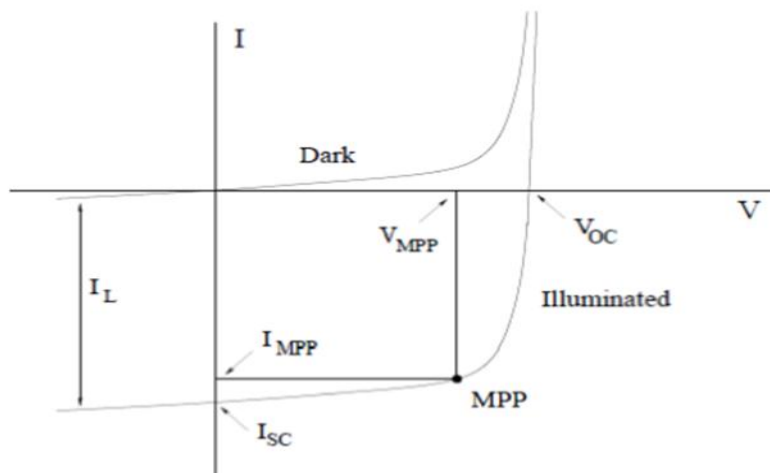
$$I = I_L - I_0 * e^{\frac{q*V}{(A*K_B*T)}}^{-1} \quad (5)$$

όπου το  $I_L$  καλείται φωτορεύμα και είναι ανάλογο της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$I_L = K * G \quad (6)$$

Με  $K$  να εννοείται ένας συντελεστής αναλογίας και  $G$  η ηλιακή ακτινοβολία[2,3]

Η σχέση (5), καθορίζει τη σχέση ρεύματος-τάσης ενός ιδανικού ηλιακού κυττάρου με  $R_S=0$  και  $R_{SH} \rightarrow \infty$ . Η χαρακτηριστική  $I-V$  και η αντιστοιχία των δύο πιο πάνω εξισώσεων είναι αυτή που ακολουθεί.



Σχήμα 10. Χαρακτηριστική  $I-V$  φωτοβολταϊκού στοιχείου στο σκοτάδι και στο φως (ιδία επεξεργασία).

Στην εικόνα 9, φαίνονται τέσσερις σημαντικές παράμετροι των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Το ρεύμα σε μηδενική τάση καλείται ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{SC}$ , ενώ η τάση σε μηδενικό ρεύμα καλείται τάση ανοιχτοκυκλώματος  $V_{OC}$ . Το σημείο όπου η παραγωγή ισχύος βρίσκεται στο μέγιστο, είναι γνωστό ως το γόνατο της I-V χαρακτηριστικής καμπύλης, MPP (maximum power point). Οι αντίστοιχες τιμές του ρεύματος και της τάσης φαίνονται στην εικόνα 9 και είναι οι ποσότητες  $I_{MPP}$  και  $V_{MPP}$  (Green, 1981).

### 1.4.2 Ρεύμα Βραχυκύκλωσης $I_{sc}$

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου, για μηδενική τάση ( $V=0$ ) αναλογεί η μέγιστη τιμή ρεύματος, που ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{SC}$ ). Το ρεύμα βραχυκύκλωσης αναλογεί στην τιμή του ρεύματος που προβλέπεται από το ηλεκτρικό κύκλωμα στην περίπτωση κατά την οποία βραχυκυκλωθούν μεταξύ τους οι ακροδέκτες φορτίου του φωτοβολταϊκού στοιχείου, δηλαδή εάν τεθεί  $R_{Load}=0$ . Επίσης, το ρεύμα του χωρητικού κλάδου  $I_c=0$ , αφού εξετάζεται η μόνιμη κατάσταση, με σταθερές συνθήκες φωτισμού. Συνεπώς στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου προκύπτει  $I_{sc}=I_{opt}$  (Καγκαράκης, 1992).

### 1.4.3 Τάση Ανοιχτοκυκλώσεως $V_{oc}$

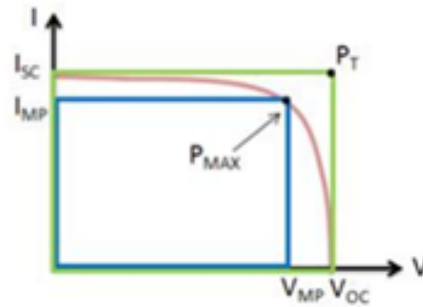
Όταν οι ακροδέκτες εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου ανοιχτοκυκλωθούν τότε η τάση εξόδου ( $V_{OC}$ ) μεγιστοποιείται. Πρακτικά, η τάση  $V_{OC}$  ενός φωτιζόμενου φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορεί να μετρηθεί εάν συνδεθεί ένα βολτόμετρο με άπειρη εσωτερική αντίσταση απευθείας στους ακροδέκτες εξόδου του χωρίς να συνυπάρχει ο κλάδος με την αντίσταση φορτίου (Δέρβος, 2013).

### 1.4.4 Μέγιστη παροχή ισχύος

Όταν η αντίσταση φορτίου  $R_{LOAD}$  λάβει τιμές που μεταβάλλονται μεταξύ 0 και  $+\infty$ , τότε οι τιμές λειτουργίας για την τιμή του ρεύματος θα κυμαίνονται μεταξύ  $I_{SC}$  και 0, ενώ οι τιμές για την τάση λειτουργίας θα μεταβάλλονται από 0 έως  $V_{OC}$  αντίστοιχα. Από όλα τα δυνατά ζεύγη τιμών ρεύματος – τάσεως λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου θα υπάρχει ένα σημείο λειτουργίας  $I_{MAX}$ ,  $V_{MAX}$ , για το οποίο η λαμβανόμενη ισχύς μεγιστοποιείται ( $P_{MAX}$ ). Σε σταθερές συνθήκες φωτισμού του φωτοβολταϊκού στοιχείου ο συντελεστής πλήρωσης δίνεται από τον τύπο,

$$FF = \frac{I_{max} * V_{max}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (7)$$





Σχήμα 11. Συντελεστής πλήρωσης (Krašovec, Bergins, M., & Topič, 2009).

Όπου  $V_{MP}, I_{MP}$  είναι  $V_{max}, I_{max}$  αντίστοιχα.

Για το ιδανικό φωτοβολταϊκό στοιχείο ο συντελεστής πλήρωσης προσεγγίζει τη μονάδα. Οι ηλεκτρικές παράμετροι  $FF, I_{SC}, V_{OC}$ , καθορίζουν το συντελεστή απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου και συνιστούν τα κύρια ηλεκτρικά μεγέθη για την αξιολόγηση της λειτουργικής ικανότητας του. Για δεδομένη ένταση ακτινοβολίας στην επιφάνεια ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ( $W/cm^2$ ), η απόδοση ( $\eta$ ) για τη μετατροπή της ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{P_{\text{ηλεκτρική}}}{P_{\text{οπτική}}} = \frac{P_{max}}{H \cdot A} = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{H \cdot A} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{H \cdot A} \quad (8)$$

Όπου  $H$  η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και  $A$  το εμβαδόν του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Συνεπώς σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση αναμένεται αυξημένη απόδοση φωτοβολταϊκής μετατροπής με την μεγιστοποίηση των  $FF, I_{SC}, V_{OC}$ . Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη φασματική απόκριση της ακτινοβολίας, δηλαδή τη πυκνότητα ισχύος στο κάθε μήκος κύματος. Κατά τη λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος, αποκαθίσταται μία ισορροπία όταν η τάση που αναπτύσσεται ανάμεσα στις δύο όψεις του, προκαλεί ένα αντίθετο ρεύμα που αντισταθμίζει το φωτορεύμα (Καγκαράκης, 1992).

### 1.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η θεωρητική εκτίμηση της αναμενόμενης ενεργειακής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ή ενός φωτοβολταϊκού σταθμού, δεν λαμβάνει υπόψιν μία σειρά από παράγοντες οι οποίοι συχνά συνεπάγονται το σημαντικό περιορισμό της. Η ισχύς που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων που πρέπει κατά κύριο λόγο να εξετάζονται κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός συστήματος. Η ετήσια ενεργειακή απόδοση, αποτελεί την πιο κατάλληλη παράμετρο στο σχεδιασμό φωτοβολταϊκών συστημάτων καθώς επίσης και το καλύτερο μέτρο για την παρακολούθηση της μακροχρόνιας συμπεριφοράς τους. Οι παράγοντες επίδρασης αυτοί, μπορεί να σχετίζονται με το ίδιο το

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

πλαίσιο ή από τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της θέσης εγκατάστασης. Οι σημαντικότεροι από αυτούς αναλύονται στη συνέχεια. Πριν αναφέρουμε τους κυριότερους παράγοντες μείωσης της απόδοσης των ηλιακών πλαισίων, να σημειώσουμε πως για λόγους σύγκρισης των χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν έχουν καθοριστεί κάποιες συνθήκες αναφοράς (Standard Test Conditions, STC), κάτω από τις οποίες δίνονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι τους. Αυτές είναι οι εξής:

- Θερμοκρασία Στοιχείου : 25°C
- Ηλιακή Ακτινοβολία : 1000 W/m<sup>2</sup>
- A.M (Air Mass): 1.5 (Καγκαράκης, 1992).

Οι κυριότεροι παράγοντες μείωσης της ενεργειακής απόδοσης που πρέπει να λαμβάνουμε υπόψιν μας κατά το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, αναφέρονται πιο κάτω. Επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας: Η ενέργεια που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε ετήσια βάση, είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία και ως εκ τούτου, εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση εγκατάστασης του συστήματος. Η ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια ενός συλλέκτη είναι με τη σειρά της άμεσα εξαρτώμενη από τον προσανατολισμό του πλαισίου ως προς τον ήλιο. Για τη μεγαλύτερα λαμβανόμενα ποσά της ηλιακής ενέργειας, τα πλαίσια πρέπει να προσανατολίζονται κατάλληλα και να είναι τοποθετημένα στη βέλτιστη γωνία κλίσης. Η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και άρα, μεγαλύτερη παραγόμενη ισχύ.

### 1.5.1 Θερμοκρασία κυττάρου

Η απόδοση των φωτοβολταϊκών, επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Ο βαθμός απόδοσης που δίνεται για τα ηλιακά στοιχεία, αναφέρονται σε δοκιμές που έγιναν σε θερμοκρασίες κυττάρου 25°C. Τις περισσότερες φορές, η θερμοκρασία του στοιχείου υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας διαφέρουν σημαντικά κυρίως τους θερινούς μήνες. Οι μεγάλες θερμοκρασίες κυττάρου έχουν αρνητική επίδραση στη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαφοράς δυναμικού του φωτοβολταϊκού στοιχείου με αποτέλεσμα, όταν ένα φορτίο συνδεθεί στα άκρα του, η διαφορά δυναμικού να είναι αισθητά μειωμένη (Δέρβος, 2013).

### 1.5.2 Ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της θερμοκρασίας του στοιχείου καθότι μεγάλες ταχύτητες, έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Όταν οι άνεμοι είναι βόρειοι είναι συνήθως κρύοι, με αποτέλεσμα τα φωτοβολταϊκά να λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές που θα λειτουργούσαν εάν υπήρχε άπνοια, υπό τα ίδια ποσοστά της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αντίθετα συμβαίνει για θερμούς ανέμους (Δέρβος, 2013).

### 1.5.3 Ρύπανση

Η ηλεκτροπαραγωγή των φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορεί να μειωθεί από ρύπανση της επιφάνειάς τους, από την επικάλυψη σκόνης, φύλλων, χιονιού, αλατιού από τη θάλασσα, εντόμων και άλλων ακαθαρσιών. Η μείωση είναι σημαντικότερη σε αστικές και βιομηχανικές περιοχές λόγω της αιθάλης που αιωρείται στην ατμόσφαιρα και προσκολλάται ισχυρά στη γυάλινη ή πλαστική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων, χωρίς να μπορεί η βροχή να την ξεπλύνει αρκετά. Στις περιπτώσεις αυτές χρειάζεται να γίνεται περιοδικός καθαρισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων με απορρυπαντικό. Πάντως, σε περιοχές με συχνές χιονοπτώσεις ή ανεμοθύελλες, οι ηλιακοί συλλέκτες τοποθετούνται συνήθως με κλίση  $90^\circ$  (κάθετοι) για την αποφυγή συσσώρευσης χιονιού, ή τουλάχιστον  $45^\circ$  για να μην συγκρατείται η σκόνη. Όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια βρίσκεται σε μία περιοχή που εκτιμάμε ότι ο βαθμός ρύπανσης είναι σημαντικός, είναι σκόπιμο να προβλέπεται στους υπολογισμούς μας η αντίστοιχη μείωση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (Δέρβος, 2013).

### 1.5.4 Σκίαση

Ένας άλλος παράγοντας επίδρασης της DC ενεργειακής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι η σκίαση. Το φαινόμενο της σκίασης εμφανίζεται είτε σε περιπτώσεις που συναντώνται εμπόδια στον ορίζοντα των πλαισίων όπως παρακείμενα κτήρια, βλάστηση κλπ, είτε σε περιπτώσεις με περιορισμένη έκταση εγκατάστασης όπως για παράδειγμα στις στέγες κτηρίων όπου προκαλείται σκίαση από τη μία σειρά στην επόμενη. Ιδιαίτερα στη δεύτερη περίπτωση, οι επιπτώσεις της σκίασης μπορεί να είναι σημαντικές και για το λόγο αυτό είναι αναγκαίος ο λεπτομερής προσδιορισμός των απωλειών που προκαλούν. Ένα τυπικό φωτοβολταϊκό πλαίσιο, αποτελείται από φωτοβολταϊκά στοιχεία ίδιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών συνδεδεμένων σε σειρά. Συνεπώς, η σκίαση ή η βλάβη ενός και μόνο φωτοβολταϊκού στοιχείου, θα μπορούσε να επιφέρει ολική αχρήστευση του πλαισίου. Ένα σκιασμένο κύτταρο, συμπεριφέρεται κατά βάση όπως η απλή δίοδος p-n, η οποία, όταν το κύκλωμα είναι κλειστό, δέχεται από τα υπόλοιπα υγιή κύτταρα μία υψηλή ανάστροφη τάση. Αν τα υπόλοιπα φωτιζόμενα ηλιακά στοιχεία του πλαισίου είναι μεγάλου πλήθους, αυτή η τάση μπορεί να φτάσει την τάση διάσπασης της σκιασμένης διόδου, προκαλώντας την καταστροφή της. Στην πράξη, για τα τυπικά φωτοβολταϊκά πλαίσια, το σκιασμένο κύτταρο λειτουργεί ως μία μεγάλη αντίσταση, όπου αποδίδεται η ενέργεια που προσφέρουν τα υπόλοιπα. Παρατεταμένος σκιασμός ενός στοιχείου σε συνδυασμό με έντονο φωτισμό των υπολοίπων μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του στοιχείου αυτού και κατά συνέπεια στην αχρήστευση όλου του πλαισίου, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα αντικατάστασης ενός κατεστραμμένου στοιχείου. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται ως φαινόμενο Hot Spot (κατάσταση “θερμής κηλίδας”). Για να αποτραπεί μία τέτοια εξέλιξη, το φωτοβολταϊκό πλαίσιο εφοδιάζεται με διόδους, οι οποίες συνδέονται παράλληλα σε τμήματα των κυττάρων που είναι συνδεδεμένα σε σειρά, επιτρέποντας έτσι την χρησιμοποίηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, ακόμα και αν κάποιο φωτοβολταϊκό στοιχείο του υστερεί ή καταστραφεί (Green, 1981) (Πάσχος, 2012).

### 1.5.5 Γήρανση

Λόγω της φθοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων (και των υπολοίπων μερών ενός φωτοβολταϊκού συστήματος), αναμένεται ότι με την πάροδο του χρόνου θα παρουσιάζεται μία μικρή βαθμιαία πτώση στην ποσότητα παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος, που συνήθως υπολογίζεται από 1% ως 2% για κάθε έτος (Καγκαράκης, 1992).

### 1.5.6 Απώλειες του φωτοβολταϊκού συστήματος

Πέρα από τους διάφορους παράγοντες που αναφέραμε πιο πάνω, πρέπει κατά το σχεδιασμό ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, να προνοήσουμε για τις ηλεκτρικές απώλειες στους αγωγούς που συνδέουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στις συστοιχίες, καθώς και τις συνδέσεις τους με άλλα μέρη του συστήματος, όπως διατάξεις ρύθμισης, προστασίας και ελέγχου, συσσωρευτές, μετατροπείς κλπ. Άρα, κατά τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας των φωτοβολταϊκών ενός συστήματος, πρέπει να γίνεται πρόβλεψη, ανάλογα με την περίπτωση και για την κάλυψη όλων αυτών των απωλειών, που μπορεί να είναι της τάξης περίπου του 30% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ή και περισσότερο (Green, 1981).

### 1.5.7 Οπτικές απώλειες

Με τον όρο οπτικές απώλειες εννοούμε τη διαφοροποίηση της ανακλαστικότητας του φωτοβολταϊκού πλαισίου (υαλοπίνακας, αντανακλαστικό επίστρωμα, υλικό φωτοβολταϊκών κυττάρων) σε σχέση με την αντίστοιχη σε STC. Η ανακλαστικότητα του οπτικού συστήματος όψεως του φωτοβολταϊκού πλαισίου, σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή σε Πρότυπες Συνθήκες Αναφοράς, αυξάνει καθώς αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών στην επιφάνειά του, ιδιαίτερα σε γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των  $60^\circ$ . Επίσης, οπτικές απώλειες έχουμε και με τη διαφοροποίηση του φάσματος της ακτινοβολίας. Καθώς το  $A.M=1.5$  ηλιακό φάσμα που καθορίζεται από τις STC, χρησιμοποιείται ως αναφορά για τις προδιαγραφές απόδοσης των πλαισίων, η ετήσια παραγωγή του πλαισίου θεωρείται σχετικά ανεξάρτητη από τις μεταβολές του ηλιακού φάσματος γιατί οι διακυμάνσεις που παρατηρούνται στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων κατά τη διάρκεια της ημέρας, εξαλείφονται κατά μέσο όρο σε ετήσια βάση (Καγκαράκης, 1992).

Αυτά όσον αφορά φωτοβολταϊκά ευρείας φασματικής περιοχής. Για φωτοβολταϊκά στενής φασματικής περιοχής οι ετήσιες απώλειες είναι σημαντικότερες. Επιπλέον, υπάρχουν απώλειες λόγω διαφοροποίησης της πόλωσης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η μέση ετήσια επίδραση του παράγοντα αυτού προσδιορίζεται γύρω στο 2%. Τέλος, οπτικές απώλειες παρατηρούνται και λόγω χαμηλών τιμών της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του ηλιακού κυττάρου μειώνεται στις χαμηλές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, ιδιαίτερα κάτω από την τιμή των  $200 \text{ W/m}^2$ . Οι οπτικές απώλειες, αποδεικνύονται μικρής σημασίας για εμπορικά πλαίσια καλής ποιότητας. Σε άλλες περιπτώσεις οι ενεργειακές αυτές απώλειες αποδεικνύονται αρκετά σημαντικές και γενικά υπολογίζονται σε 3% κατά μέσο όρο στο έτος (Ρούση, 2014).

## 1.6 Είδη φωτοβολταϊκών – διάφορες τεχνολογίες

### 1.6.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια μονοκρυσταλλικού πυριτίου

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο είναι ένα υλικό με εύρος ζώνης 1.12eV. Τα κύτταρα μονοκρυσταλλικού πυριτίου, έχουν πάχος γύρω στα 0.3 χιλιοστά και η απόδοση τους στη βιομηχανία κυμαίνεται από 13 έως 16% για το πλαίσιο [16]. Σε εργαστηριακές δοκιμές έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις της τάξεως του 24.7%. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημα της καλύτερης σχέσης απόδοσης-επιφάνειας ή “ενεργειακής πυκνότητας”. Ένα άλλο χαρακτηριστικό, είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος Czochralski (CZ) και η float zone (FZ). Και οι δύο μέθοδοι, βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Η μεγαλύτερη απόδοση μονοκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού πλαισίου που έχει μετρηθεί είναι 18.5% (Kapur, Bansal, Le, & Asensio). Το συγκεκριμένο πλαίσιο έχει μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πάνελ εξασφαλίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία.



Εικόνα 1. Μονοκρυσταλλικό κύτταρο πυριτίου (ιδία επεξεργασία).

### 1.6.2 Φωτοβολταϊκά πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0.3 χιλιοστά. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό η τιμή τους είναι συνήθως λίγο χαμηλότερη. Οπτικά, μπορεί κανείς να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές, δηλαδή το μέγεθος των κρυσταλλικών κόκκων. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κύτταρα. Σε εργαστηριακές εφαρμογές, έχουν μετρηθεί αποδόσεις έως και 20%, ενώ για εμπορικές εφαρμογές τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 11 έως 14% για τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι η μέθοδος απευθείας στερεοποίησης, directional solidification (DS), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου («χύτευση») και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC (Armin, 2009).

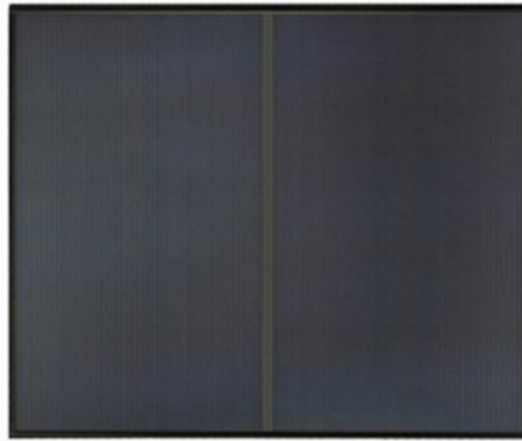


Εικόνα 2. Πολυκρυσταλλικό κύτταρο πυριτίου (ιδία επεξεργασία).

### 1.6.3 Φωτοβολταϊκά πλαίσια Άμορφου πυριτίου

Το άμορφο πυρίτιο, έχει εύρος ζώνης που κυμένεται μεταξύ 1.7-1.8 eV . Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία άμορφου πυριτίου, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναποθέτηση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο), πάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης χαμηλού κόστους όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Έτσι και λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται, η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη. Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό, προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά αυτού του τύπου, κυμαίνονται για το πλαίσιο από 5% έως 7% , ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%.

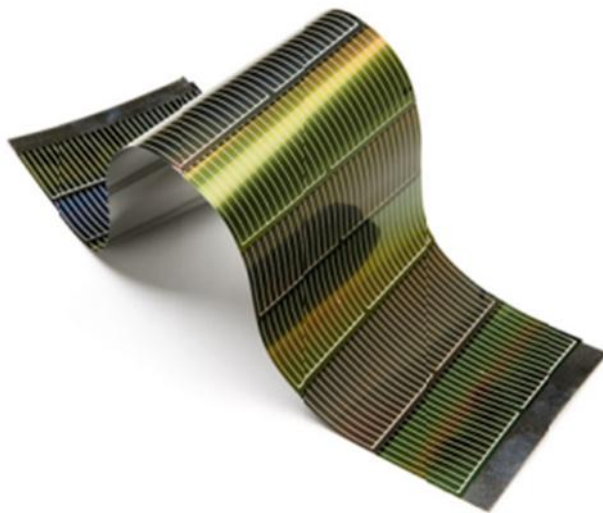
Το σημαντικότερο πλεονέκτημα για το άμορφο πυρίτιο είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται πολύ από τις υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά). Το μειονέκτημα των πλαισίων άμορφου πυριτίου, είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα, κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης, υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά τη διάρκεια ζωής των πλαισίων άμορφου πυριτίου αφού δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις. Παρ' όλα αυτά, οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι 0.0001 χιλιοστά, ενώ το υπόστρωμα μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά (Wada, Kohara, Nishiwaki, & Negami, 2001).



Εικόνα 3. Κύτταρο άμορφου πυριτίου (ιδία επεξεργασία).

### 1.6.4 Φωτοβολταϊκά πλαίσια δισεληνοϊνδούχου χαλκού

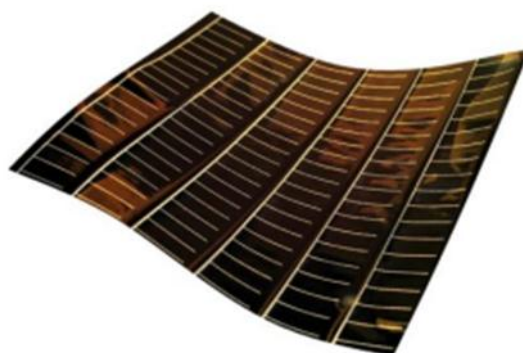
Ο δισεληνοϊνδούχος χαλκός έχει κατά προσέγγιση ενεργειακό διάκενο 1eV. Έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρ' όλα αυτά, η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 10% για το πλαίσιο. Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18.8%, η οποία είναι η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των τεχνολογιών λεπτής επίστρωσης. Με την πρόσμιξη γαλλίου (CIGS), η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Το πρόβλημα που υπάρχει, είναι ότι το ίνδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στη φύση (Wada, Kohara, Nishiwaki, & Negami, 2001).



Εικόνα 4. Κύτταρο δισεληνοϊνδούχου χαλκού (ιδία επεξεργασία).

### 1.6.5 Φωτοβολταϊκά πλαίσια τελουριούχου καδμίου (CdTe)

Το τελουριούχο κάδμιο, έχει ενεργειακό διάκενο στο 1.44 eV, και έχει τη δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως, μας προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου τελουριούχου καδμίου γύρω στο 8-10%. Στο εργαστήριο, η απόδοση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει φτάσει το 16% . Μελλοντικά, αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Τροχοπέδη για τη χρήση του, αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο σύμφωνα με έρευνες είναι καρκινογόνο με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Σημαντική εφαρμογή του είναι η ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό του σε κτήρια (Orgassa, Schock, & Werner, 2003).

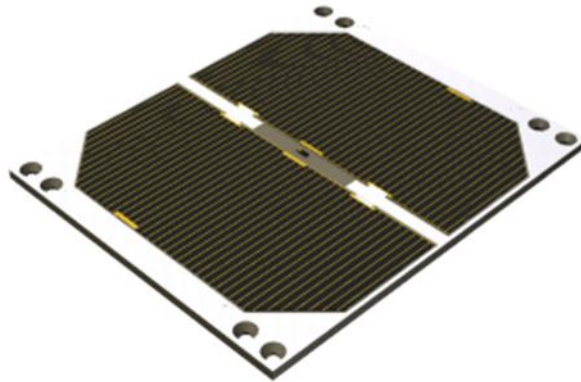


Εικόνα 5. Φωτοβολταϊκό πλαίσιο CdTe (ιδία επεξεργασία).

### 1.6.5 Φωτοβολταϊκά πλαίσια αρσενιούχου Γαλλίου (GaAs)

Το αρσενιούχο γάλλιο, είναι ένα κράμα μετάλλων που περιέχει εκτός από γάλλιο, μέταλλα όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος. Το αρσενικό δεν είναι σπάνιο άλλα έχει το μειονέκτημα ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενιούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1.42 eV και είναι ιδανικό για την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του στη μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multi-junction) είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες γεγονός που επιβάλλει σχεδόν τη χρήση τους σε εφαρμογές συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημα ότι αντέχουν τις υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας και γι' αυτό αλλά και λόγω της πολύ υψηλής απόδοσης του ενδείκνυνται για διαστημικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού υποστρώματος GaAs .





Εικόνα 6. Κύτταρο GaAs (ιδία επεξεργασία).

### 1.6.7 Φωτοβολταϊκά στοιχεία ετεροεπαφής HIT

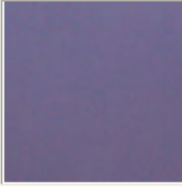
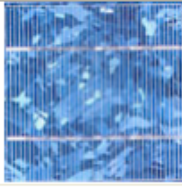
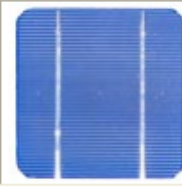
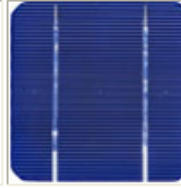
Τα πιο γνωστά εμπορικά φωτοβολταϊκά στοιχεία ετεροεπαφής, αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου (πάνω και κάτω), ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μία στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17.2% (Καγκαράκης, 1992) και το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Άλλα πλεονεκτήματα για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ετεροεπαφής είναι η υψηλή τους απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στη διάχυτη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού προσφέρει τόσα πολλά, το φωτοβολταϊκό στοιχείο ετεροεπαφής είναι και κάπως ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια (Bhubaneswari Parida, 2011).

### 1.6.8 Οργανικά / πολυμερή φωτοβολταϊκά

Αποτελούν μία σχετικά νέα τεχνολογία. Τα οργανικά στοιχεία λειτουργούν με έναν λίγο διαφορετικό τρόπο σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες: αντί για ημιαγώγιμες p-n επαφές, τα οργανικά στοιχεία χρησιμοποιούν οργανικά υλικά που λειτουργούν ως δότες και δέκτες ηλεκτρονίων. Το μεγάλο πλεονέκτημα χρήσης οργανικών υλικών είναι ότι επιτρέπουν την μεγάλης-κλίμακας, χαμηλής-θερμοκρασίας κατασκευή εύκαμπτων ηλιακών στοιχείων σε υποστρώματα πλαστικών. Η απόδοσή τους κυμαίνεται από 6-7% (Orgassa, Schock, & Werner, 2003).

# Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

Πίνακας 1. Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών

ΤΥΠΟΣ	'Λεπού υμενίου' ή 'Thin Film'	Πολυκρυσταλλικά	Μονοκρυσταλλικά	'Υβριδικά'
Εμφάνιση				
Απόδοση	Άμορφα: 5-7% CIS: 7-10% CdTe: 8-10%	11-14%	13-16%	16-18%
Απαιτούμενη επιφάνεια ανά kWp	10-20 m <sup>2</sup>	8-10 m <sup>2</sup>	7-8 m <sup>2</sup>	6-7 m <sup>2</sup>
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά kWp) <small>(μέση τιμή για Ελλάδα και για ένα τυπικό σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση)</small>	1.300-1.400	1.300	1.300	1.350
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά m <sup>2</sup> ) <small>(μέση τιμή για Ελλάδα και για ένα τυπικό σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση)</small>	65-140	130-160	160-185	190-225
Ετήσια μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (kg CO <sub>2</sub> ανά kWp)	1.380-1.485	1.380	1.380	1.435

Στον παραπάνω πίνακα φωτοβολταϊκών τεχνολογιών αναγράφονται οι αποδόσεις των διάφορων τεχνολογιών καθώς και απαιτούμενη επιφάνεια ανά kWp (kWp: kilowatt-peak, μονάδα ονομαστικής ισχύος του φωτοβολταϊκού). Επίσης αναγράφονται οι μέσες ετήσιες παραγωγές ενέργειας σε kWh/kWhp και kWh/m<sup>2</sup> (Σ.Ε.Φ, 2007).

## 1.7 Φωτοβολταϊκά κύτταρα TiO<sub>2</sub> (TiO<sub>2</sub> Photovoltaic Cells)

### 1.7.1 TiO<sub>2</sub>: μορφή – ιδιότητες – εφαρμογή

Το διοξείδιο του τιτανίου κρυσταλλογραφικά απαντάται στη φύση σε τρεις κύριες δομές πολυμορφισμού με διαφορετική διεύθυνση των ατόμων στο χώρο. Ρουτήλιο (τετραγωνική), ανατάσης (τετραγωνική) και μπρουκίτης (ορθορομβική) είναι οι τρεις αυτές μορφές, με την πρώτη να είναι η πιο θερμοδυναμικά σταθερή φάση, αλλά και αυτή που έχει μελετηθεί διεξοδικότερα. Ανάλογα με τις εναλλαγές της θερμοκρασίας (πολύ υψηλές περίπου 700-1000°C είτε πολύ χαμηλές) μπορούμε να έχουμε μετατροπή από τη μία κρυσταλλική δομή σε μία άλλη (Janusz & Nowotny, 2012) (Cutillo, 2007).

Το ρουτήλιο χαρακτηρίζεται ως ημιαγωγός άμεσου χάσματος (direct band gap) με ενεργειακό χάσμα 3 eV, ενώ ο ανατάσης ως μη άμεσου χάσματος (indirect band gap) με ενεργειακό χάσμα 3,2 eV (Janusz & Nowotny, 2012).

Ανάμεσα στους ημιαγωγούς οξειδίων, το διοξείδιο του τιτανίου κατέχει ξεχωριστή θέση και χρησιμοποιείται εκτενώς στην παρασκευή ηλιακών κυψελίδων. Οι υψηλότερες αποδόσεις που έχουν επιτευχθεί μέχρι σήμερα σε αυτή την κατηγορία των φωτοβολταϊκών στοιχείων

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

είναι της τάξεως του 11%, χρησιμοποιώντας το  $\text{TiO}_2$  με τη μορφή λεπτών υμενίων (Cutillo, 2007).

Λόγω του μεγάλου ενεργειακού του χάσματος, το  $\text{TiO}_2$  παρουσιάζει μέγιστο απορρόφησης στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος. Για το λόγο αυτό, το υμένιο ευαισθητοποιείται με κατάλληλη χρωστική με σκοπό τη διεύρυνση του φάσματος απορρόφησης του προς την ορατή περιοχή (Renault, Balland, Martinez - Ferrero, Nicole, Sanchez, & Limoges, 2009).

Πέραν των χρήσεών του σε εφαρμογές σε φωτοβολταϊκές κυψέλες όπως αυτές που έχουν αναφερθεί στη παρούσα εργασία, το  $\text{TiO}_2$  βρίσκει εφαρμογές και σε άλλες επιστήμες όπως

- Ιατρική: το  $\text{TiO}_2$  εισέβαλλε στο τομέα της φαρμακολογίας χάρη στο πολύ μικρό μέγεθος των κόκκων του. Σε συνδυασμό με τη μη τοξικότητά του καθίσταται ιδανικός μεταφορέας ουσιών στον ανθρώπινο οργανισμό. Μέχρι σήμερα γίνονται έρευνες για τη χρήση του στην καταπολέμηση του καρκίνου (Janusz & Nowotny, 2012).
- Καθαρισμός αέρα και νερού : Η φωτοκαταλυτική ιδιότητα του  $\text{TiO}_2$  χρησιμοποιείται επίσης για την αφαίρεση από την ατμόσφαιρα παθογόνων ουσιών, όπως το αιθυλένιο, καθώς και αλλεργιογόνων μικροοργανισμών, όπως μύκητες και βακτήρια. Το  $\text{TiO}_2$  που χρησιμοποιείται είναι σε μορφή λεπτού υμενίου. Παρόμοια είναι και η χρήση του υλικού για τον καθαρισμό του νερού. Εδώ η ακτινοβολία λαμβάνεται απευθείας από τον ήλιο και δεσμεύεται με τη χρήση ζεόλιθου (zeolite). Το  $\text{TiO}_2$  αντιδρά και παράγει οξειδωτικούς παράγοντες, οι οποίοι σε συνδυασμό με την ακτινοβολία καταστρέφουν τις ανεπιθύμητες ουσίες που περιέχονται στο νερό (Janusz & Nowotny, 2012).
- Ολοκληρωμένα κυκλώματα –MTOS : Έχουν γίνει πολλές έρευνες για την ανάπτυξη εναλλακτικών υλικών με υψηλή διηλεκτρική σταθερά, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στα MOSFET σαν μονωτές πύλης (gate insulator) και σε πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας. Από τα υλικά αυτά, το  $\text{TiO}_2$  κέρδισε την προσοχή λόγω της υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς (>10) και του κατάλληλου ύψους φράγματος δυναμικού (barrier height). Τα τρανζίστορ που αναπτύχθηκαν με χρήση  $\text{TiO}_2$  ονομάζονται MTOS (Metal– $\text{TiO}_2$ – $\text{SiO}_2$ –Si). Τα MTOS εμφανίζουν μικρότερη τάση κατάρρευσης (breakdown voltage), μικρότερο ρεύμα διαρροής και συνεπώς μεγαλύτερη αξιοπιστία από τα MOS (Janusz & Nowotny, 2012).

### 1.7.2 Τεχνικές απόθεσης σε φωτοβολταϊκά κύτταρα λεπτού υμενίου

Για την απόθεση υλικού πάνω στο υπόστρωμα, το  $\text{TiO}_2$  ή οποιοδήποτε άλλο οξείδιο χρησιμοποιηθεί, υφίσταται επεξεργασία έτσι ώστε να μετατραπεί σε κolloειδές διάλυμα. Αυτό γίνεται με τη χρήση διάφορων χρωστικών-ευαισθητοποιητών[10]. Με αυτό τον τρόπο

αποκτά το διάλυμα αυξημένες ιδιότητες (Kay & Gritzel, 2008). Στην παρούσα εργασία το TiO<sub>2</sub> που χρησιμοποιήσαμε δεν υπέστη επεξεργασία

Η απόθεση του υλικού πραγματοποιείται με διάφορες μεθόδους. Μερικές από αυτές είναι οι παρακάτω.

1) spray deposition: η μέθοδος αυτή βασίζεται στον ψεκασμό του διαλύματος πάνω στο αγώγιμο υπόστρωμα. Είναι αρκετά απλή μέθοδος και προσφέρει τη δυνατότητα ελέγχου των διαφόρων παραμέτρων, όπως της συγκέντρωσης του διαλύματος, της θερμοκρασίας στην οποία πραγματοποιείται η απόθεση κ.α (Rao & Dutta, 2008).

2) screen – printing: η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αρχή λειτουργίας των εκτυπωτών, αφού η εναπόθεση του διαλύματος πραγματοποιείται με εκτύπωση σε διάτρητες μήτρες. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι προσφέρει τη δυνατότητα ελέγχου του πάχους του υμενίου, το οποίο και αποτελεί βασικό παράγοντα για την καλή απόδοση της κυψελίδας (Krašovec, Bergins, M., & Torič, 2009).

3) spray pyrolysis: η μέθοδος βασίζεται στον ψεκασμό του διαλύματος πάνω στο αγώγιμο υπόστρωμα. Επίσης περιλαμβάνει ένα πρόσθετο στάδιο ανόπτησης με σκοπό τη βελτίωση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υμενίου. Το υμένιο που προκύπτει από τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι αρκετά ομοιόμορφο (Peng, Jungmann, Jager, Haarer, Schmidt, & Thelakkat, 2004).

4) reactive pulsed – laser ablation: η μέθοδος βασίζεται στην εφαρμογή δέσμης laser έχοντας σαν στόχο το υπόστρωμα, διατηρώντας την πίεση του θαλάμου, στον οποίο πραγματοποιείται η διαδικασία, σταθερή (Kay & Gritzel, 2008).

5) spin – coating: στη μέθοδο αυτή το διάλυμα τοποθετείται πάνω στο υπόστρωμα, το οποίο στην συνέχεια περιστρέφεται με πολύ μεγάλη ταχύτητα, με αποτέλεσμα να απλώνεται ομοιόμορφα σε όλη την έκτασή του λόγω της φυγόκεντρου δύναμης (Συρροκόστας, 2007).

6) sputtering: η μέθοδος αυτή βασίζεται στο βομβαρδισμό ενός στόχου από σωματίδια (ιόντα). Το υπόστρωμα τοποθετείται σε θάλαμο κενού μαζί με το υλικό-στόχος το οποίο θα αποσπαστεί, ενώ ένα ευγενές αέριο όπως αργό εισάγεται σε χαμηλή πίεση. Το πάχος του υμενίου που προκύπτει από αυτή τη μέθοδο είναι αρκετά μεγάλο, περίπου 150 nm (Συρροκόστας, 2007).

7) electrodeposition: στη μέθοδο αυτή, αφού το υπόστρωμα τοποθετείται σε ένα δοχείο με ηλεκτρολύτη, εφαρμόζεται μια διαφορά δυναμικού ή συνεχούς ρεύματος μεταξύ του υποστρώματος (κάθοδος) και του ηλεκτροδίου (άνοδος), με σκοπό το σχηματισμό του υμενίου πάνω στο αγώγιμο υπόστρωμα. Περισσότερα για αυτή τη μέθοδο αναφέρονται στο κεφάλαιο 2.

### 1.7.3 Το διοξείδιο του τιτανίου στην κατασκευή φωτοβολταϊκών κυψελών

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το  $\text{TiO}_2$  ανήκει στη κατηγορία των ημιαγωγών οξειδίου και συγκεκριμένα στη κατηγορία των εξωγενών ημιαγωγών. Οι βασικές διαφορές μεταξύ ενδογενών και εξωγενών ημιαγωγών, εντοπίζονται στο ενεργειακό τους χάσμα και στο μηχανισμό παραγωγής ευκίνητων φορέων φορτίου. Η αγωγιμότητα των ενδογενών ημιαγωγών, λόγω του μικρού ενεργειακού τους χάσματος ( $E_g \leq 1,2 \text{ eV}$ ), οφείλεται μόνο στη θερμική τους διέγερση και εξαρτάται σημαντικά από τη θερμοκρασία. Το μικρό ενεργειακό χάσμα ευνοεί τη ταχύτερη επανασύνδεση ηλεκτρονίου-οπής με αποτέλεσμα τη θερμική αποδιέγερση του ημιαγωγού. Αντίθετα στους εξωγενείς ημιαγωγούς με σημαντικά μεγαλύτερο ενεργειακό χάσμα η αγωγιμότητα τους οφείλεται σε απορρόφηση φωτός (φωτοαγωγιμότητα) ενέργειας μεγαλύτερης του ενεργειακού του χάσματος. Ταυτόχρονα η περίσσεια φορέων φορτίου, κυρίως ηλεκτρονίων στους n-τύπου ημιαγωγούς, και το μεγάλο ενεργειακό τους χάσμα μειώνει την πιθανότητα επανασύνδεσης ηλεκτρονίου-οπής. Εξάλλου λόγω του μεγάλου ενεργειακού χάσματος, με τη φωτοδιέγερση, δημιουργούνται ηλεκτρόνια με υψηλό δυναμικό που τελικά οδηγούν σε φωτοχημικές αντιδράσεις. Για το λόγο αυτό οι εξωγενείς ημιαγωγοί n-τύπου είναι ιδανικοί για τη κατασκευή φωτοβολταϊκών (Τσιριγωτάκη)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1 Απόθεση διάσπασης διακένου (electrospark deposition)

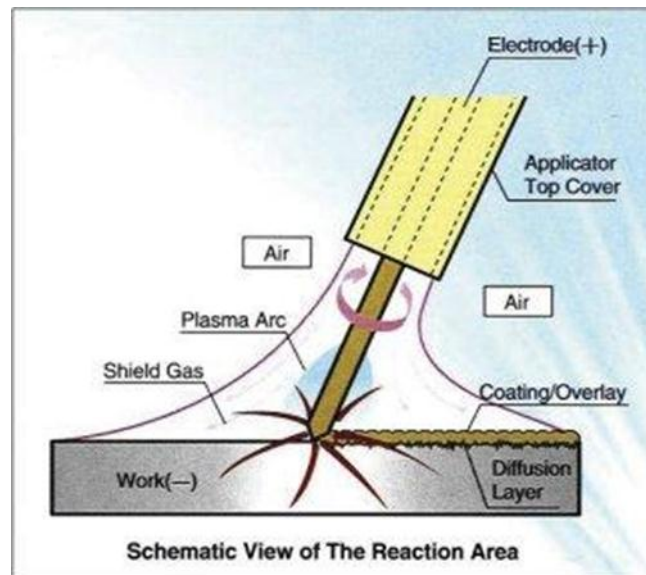
Η ηλεκτροαπόθεση είναι μια τεχνική συγκόλλησης με τη χρήση ηλεκτρικού τόξου, που χρησιμοποιεί μικρής διάρκειας και μεγάλης ενέργειας ηλεκτρικούς παλμούς για να εναποθέσει το υλικό του ηλεκτροδίου σε ένα αγωγίμο υπόστρωμα. Η συγκεκριμένη διαδικασία έχει πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες συμβατικές διαδικασίες εναπόθεσης υλικού όπως το magnetron sputtering και το pulsed laser deposition. Πιο συγκεκριμένα, το ESD είναι μια απλή διαδικασία με χαμηλό κόστος λειτουργίας, ικανή να κάνει απόθεση υλικού σε συγκεκριμένη επιφάνεια (αποφεύγεται το surface masking), έχει σημαντικές βελτιώσεις στα ποσοστά πάχυνσης (thickening rate) και είναι αποτελεσματικό στην απόθεση υλικού παχέων υμενίων. Το ESD χρησιμοποιεί ένα περιστρεφόμενο ηλεκτρόδιο συνδεδεμένο σε τροφοδοσία μεγάλης συχνότητας. Καθώς το ηλεκτρόδιο περνάει πάνω από το υλικό, αυτό βραχυκυκλώνεται, εκφορτίζονται οι πυκνωτές και έτσι γίνεται η απόθεση. Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του ESD, είναι ότι μπορούν να δημιουργηθούν μεταλλουργικοί δεσμοί (metallurgical bonds-fused surfaces), μειώνοντας τη θερμοκρασία τήξης του υλικού. Τυπικά αυτό σημαίνει ότι στο τέλος της διαδικασίας τα δείγματα θα είναι κοντά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η μείωση της θερμοκρασίας μειώνει σημαντικά τις περιοχές που μπορεί να έχουν επηρεαστεί από τις θερμοκρασίες (heat affected zones) και με αυτό τον τρόπο διατηρούνται οι μικροδομές κοντά στη συγκόλληση.

Λόγω της μικρής διάρκειας των παλμών (4-60  $\mu\text{S}$ ) η θερμότητα διασκορπίζεται το 99% του κύκλου λειτουργίας ενώ θερμαίνει μόνο στο 1%. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα ποσοστά ψύξης να φτάνουν τα  $10^5$ - $10^6$   $^\circ\text{C}/\text{S}$ . Τα γρήγορα ποσοστά ψύξης σε συνδυασμό με το μικρό

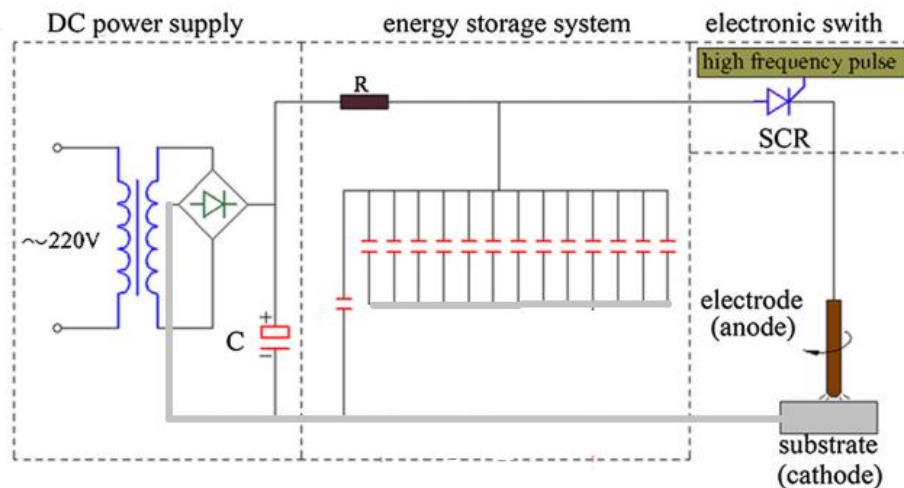
## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

όγκο συγκόλλησης, μπορεί να δημιουργήσουν νανοδομές ανάλογα με τη σύνθεση των κραμάτων (S.Cadney & M.Brochu, 2010)

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η λειτουργία του electrospray deposition, και το κυκλωματικό διάγραμμα



Εικόνα 7. Λειτουργία ESD (S.Cadney & M.Brochu, 2010).



Εικόνα 8.Κύκλωμα ESD (S.Cadney & M.Brochu, 2010).

### 2.1.1 Πειραματική διάταξη

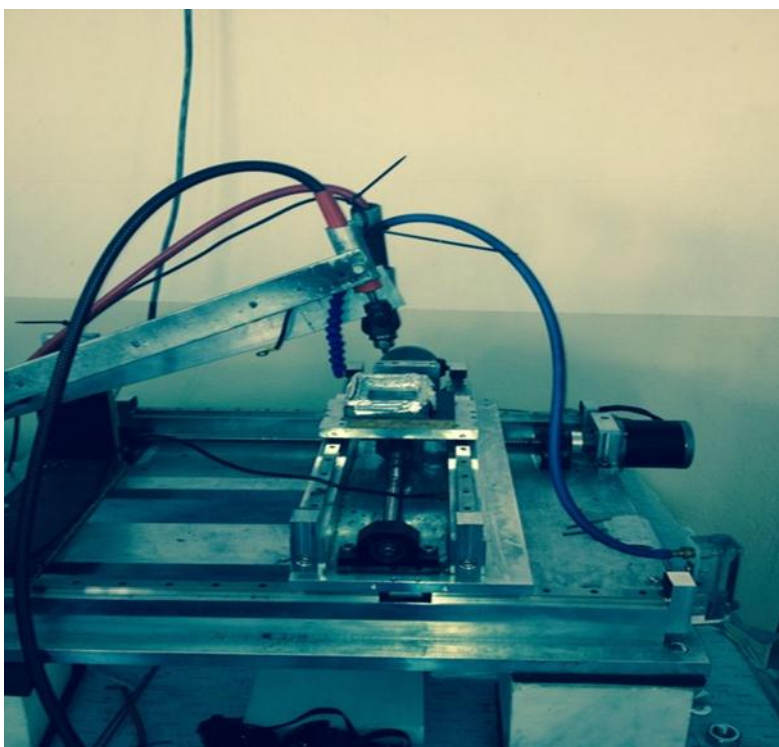
Για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών κυψελών, ως υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκε λαμαρίνα και αλουμίνιο . Το υλικό το οποίο εναποτέθηκε πάνω στα υποστρώματα ήταν διοξείδιο του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ) σε μορφή σκόνης, καθαρότητας 99%, χωρίς τη προσθήκη άλλων χημικών.

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

Το πείραμα διενεργήθηκε ως εξής: στο μηχάνημα της εικόνας 9 τοποθετήθηκαν η λαμαρίνα και το αλουμίνιο. Το μηχάνημα αυτό είναι ένας παντογράφος ο οποίος έχει τη δυνατότητα να κινεί το τετραγωνικό δοχείο που φαίνεται στην εικόνα κατά τους άξονες XY. Η κίνηση των αξόνων γίνεται από τη συσκευή που φαίνεται στην εικόνα 9 (γ), η οποία ελέγχει μέσω κυκλώματος PLC τη κίνηση δύο βηματικών κινητήρων, και επιτρέπει στο χρήστη να κατευθύνει το δοχείο χειροκίνητα. Στο παντογράφο τοποθετήθηκαν οι δύο βάσεις των περιστρεφόμενων ηλεκτροδίων για το ESD, με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι κάθετα στους άξονες XY.

Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά τέσσερα μέταλλα ως υποστρώματα για τις κυψέλες, δύο εκ των οποίων ήταν λαμαρίνα DKP (γυαλισμένη) και τα άλλα δύο αλουμίνιο 1050. Τα μέταλλα αυτά, πριν προσαρμοστούν κατάλληλα στο παντογράφο, λειάνθηκαν με σμυριδόπανο ώστε να αφαιρεθεί τυχόν σκουριά.

Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κύλινδροι τιτανίου, διαμέτρου 2,5 mm. Πριν τοποθετηθούν στο παντογράφο μετρήθηκε το βάρος της βάσης. Το βάρος δεν επιτρεπόταν να είναι μεγάλο, διότι σε αυτή τη περίπτωση δεν θα δημιουργούνταν ο απαραίτητος σπινθήρας για τη σωστή συγκόλληση. Και τα δύο ηλεκτρόδια περιστρέφονταν κατά τη διάρκεια του πειράματος. Μόλις το υπόστρωμα και το ηλεκτρόδιο έρχονταν σε επαφή οι πυκνωτές του κυκλώματος εκφορτίζαν και με αυτό τον τρόπο απελευθερώνονταν η απαραίτητη ενέργεια (σπινθήρας) για την απόθεση του  $TiO_2$ . Η γεννήτρια των παλμών για το ESD παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 9α. Ο παντογράφος με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η επικάλυψη του  $TiO_2$  (ιδία επεξεργασία).



Εικόνα 9β. Το χειριστήριο παντογράφου (ιδία επεξεργασία).



Εικόνα 9γ. Κύκλωμα ESD (ιδία επεξεργασία).



## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

---

Αφού προσαρμόστηκαν κατάλληλα τα μέταλλα, εγχαράκτηκε πορεία με τον παντογράφο (εισαγωγή συντεταγμένων στο σύστημα) και τοποθετήθηκε πάνω στα μέταλλα η σκόνη  $TiO_2$ . Το πείραμα επαναλήφθηκε τέσσερις φορές συνολικά και κάθε τελικό δείγμα αποτελούνταν από πέντε στρώσεις (layers) επικάλυψης διοξειδίου του τιτανίου. Ο παντογράφος κινούνταν με ταχύτητα 400  $\mu m / sec$ . Το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιήθηκε η συγκόλληση ήταν αδρανής ατμόσφαιρα αργού και αέρας. Το αργό μεταφέρθηκε μέσω του μπλε σωλήνα που φαίνεται στην εικόνα 2.

Συνολικά προέκυψαν τέσσερα δείγματα (1-4) τα οποία φαίνονται στην εικόνα 9 για διαφορετικό υπόστρωμα και διαφορετικό περιβάλλον.

### ➤ Δείγμα 1

- Υπόστρωμα: Λαμαρίνα DKP
- Σκόνη:  $TiO_2$
- Ηλεκτρόδια: Τιτανίου
- Περιβάλλον: Αργό

### ➤ Δείγμα 2

- Υπόστρωμα: Λαμαρίνα DKP
- Σκόνη:  $TiO_2$
- Ηλεκτρόδια: Τιτανίου
- Περιβάλλον: Ατμοσφαιρικός αέρας

### ➤ Δείγμα 3

- Υπόστρωμα: Αλουμίνιο 1050
- Σκόνη:  $TiO_2$
- Ηλεκτρόδια: Τιτανίου
- Περιβάλλον: Αργό

### ➤ Δείγμα 4

- Υπόστρωμα: Αλουμίνιο 1050
- Σκόνη:  $TiO_2$
- Ηλεκτρόδια: Τιτανίου
- Περιβάλλον: Ατμοσφαιρικός αέρας

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD



Εικόνα 10. α) δείγμα 1, β) δείγμα 2, γ) δείγμα 3, δ) δείγμα 4 (ίδια επεξεργασία).

Λόγω της ύπαρξης απόστασης ανάμεσα στις βάσεις των δυο ηλεκτροδίων με αποτέλεσμα η επιφάνεια αριστερά και δεξιά του μπλε περιγράμματος να έχει επικαλυφθεί μόνο με το ένα ηλεκτρόδιο. Το μπλε περίγραμμα (πλαίσιο μετρήσεων) δείχνει την ταυτόχρονη επιφάνεια επικάλυψης και από τα δύο ηλεκτρόδια μετά από συνολικά πέντε διαδρομές του παντογράφου (πέντε στρώματα).

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τάσης ανοιχτοκύκλωσης και τάσης υπό φορτίο καθώς και ελήφθησαν εικόνες με τη βοήθεια ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

### 2.2 Πειραματικές μετρήσεις

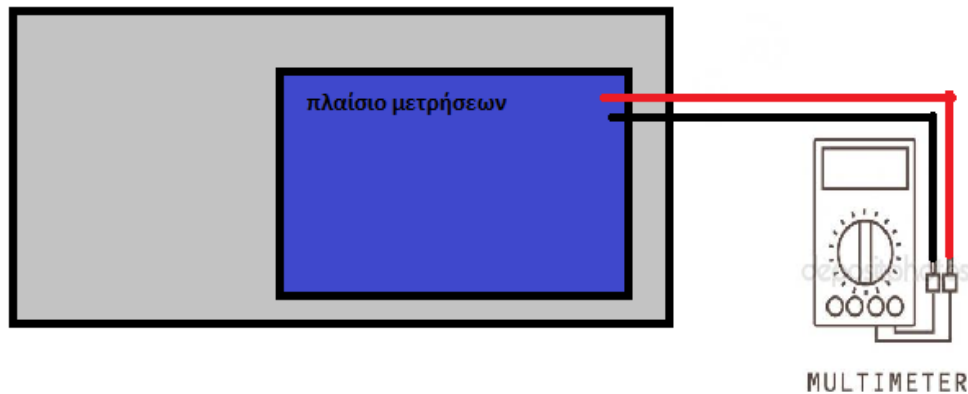
#### 2.2.1 Τάση ανοιχτοκύκλωσης

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του Ε. Μ. Πολυτεχνείου, το μήνα Αύγουστο, με πλήρη ηλιοφάνεια και χωρίς αέρα. Σε κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρόδια πολύμετρου σε τυχαίες θέσεις και ελήφθησαν πέντε μετρήσεις από το καθένα.

Πίνακας 2: Πειραματικές μετρήσεις τάσης ανοιχτοκύκλωσης

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ V (mV)				
A/A	ΔΕΙΓΜΑ 1	ΔΕΙΓΜΑ 2	ΔΕΙΓΜΑ 3	ΔΕΙΓΜΑ 4
1	1.5	0.5	0.4	0.2
2	1.2	4.1	1.4	0.4
3	0.8	1.2	2.2	1.1
4	2.7	2.4	0.6	0.8
5	1.1	1.1	0.2	0.8

$V_{OCm}$	1,46	1,86	0,96	0,66
-----------	------	------	------	------



Σχήμα 11. Διάταξη για μέτρηση τάσης ανοιχτοκύκλωσης (ιδία επεξεργασία).

### 2.2.2 Τάση υπό φορτίο

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του Ε. Μ. Πολυτεχνείου, τον μήνα Αύγουστο, με πλήρη ηλιοφάνεια και χωρίς αέρα. Σε αυτή τη μέτρηση, μετρήθηκε με το ίδιο πολύμετρο ρεύμα και τάση. Το φορτίο το οποίο χρησιμοποιήθηκε ήταν μια αντίσταση η οποία υπολογίστηκε μέσω φασματογράφου ίση με  $0.9735 \Omega$ .

Για αυτή τη μέτρηση το πλαίσιο μετρήσεων των δειγμάτων χωρίστηκε σε δέκα ίσα μέρη. Επίσης χρησιμοποιήθηκε ένα μαύρο πανί το οποίο μας βοήθησε στο να αποκαλύπτεται κάθε φορά το 10% του εμβαδού των δειγμάτων. Για κάθε 10% του εμβαδού, πραγματοποιήθηκε μία μέτρηση για τάση και για ρεύμα στο φορτίο.

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

Πίνακας 3. Πειραματικές μετρήσεις τάσης-ρευματος υπό φορτίο

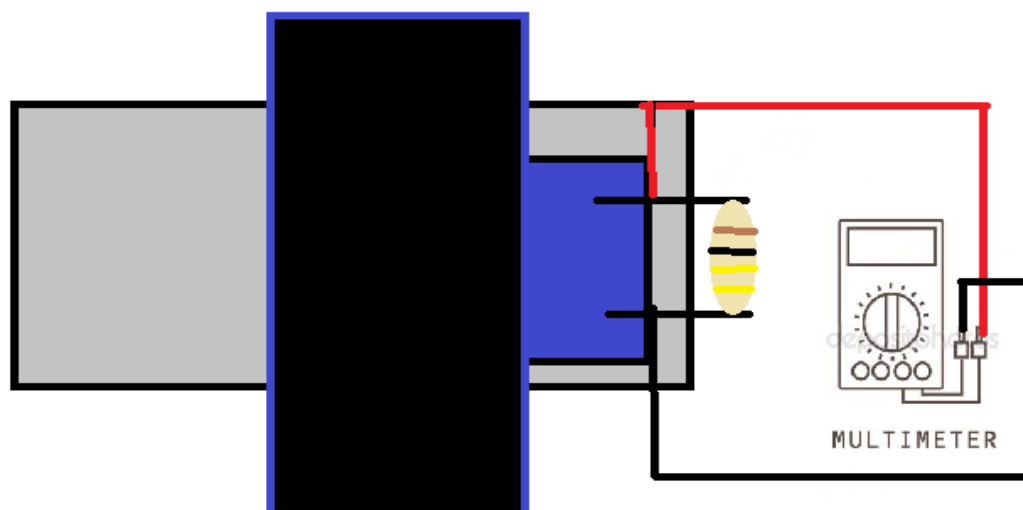
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ%	I (mA)		V (mV)	
	ΔΕΙΓΜΑ 1	ΔΕΙΓΜΑ 2	ΔΕΙΓΜΑ 1	ΔΕΙΓΜΑ 2
10	0	0	0.2	0.2
20	0	4.1	0.2	0.4
30	0.41	5.1	0.4	0.5
40	0.51	5.1	0.5	0.5
50	0.82	9.2	0.8	0.9
60	0.82	8.2	0.8	0.8
70	0.92	11.3	0.9	1.1
80	1.23	10.3	1.2	1
90	1.35	12.3	1.3	1.2
100	1.54	12.3	1.5	1.2

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ%	I (mA)		V (mV)	
	ΔΕΙΓΜΑ 3	ΔΕΙΓΜΑ 4	ΔΕΙΓΜΑ 3	ΔΕΙΓΜΑ 4
10	0	0	0,2	-0.1
20	0	0	0,2	-0.1

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

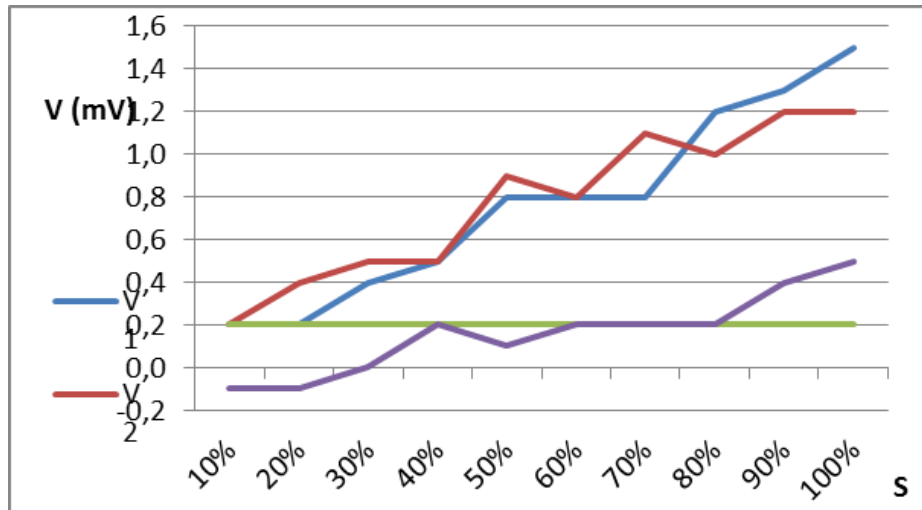
30	0	0	0,2	0
40	0	0	0,2	0,2
50	0	0	0,2	0,1
60	0	0	0,2	0,2
70	0	0	0,2	0,2
80	0	0	0,2	0,2
90	0	0,41	0,2	0,4
100	0	0,51	0,2	0,5



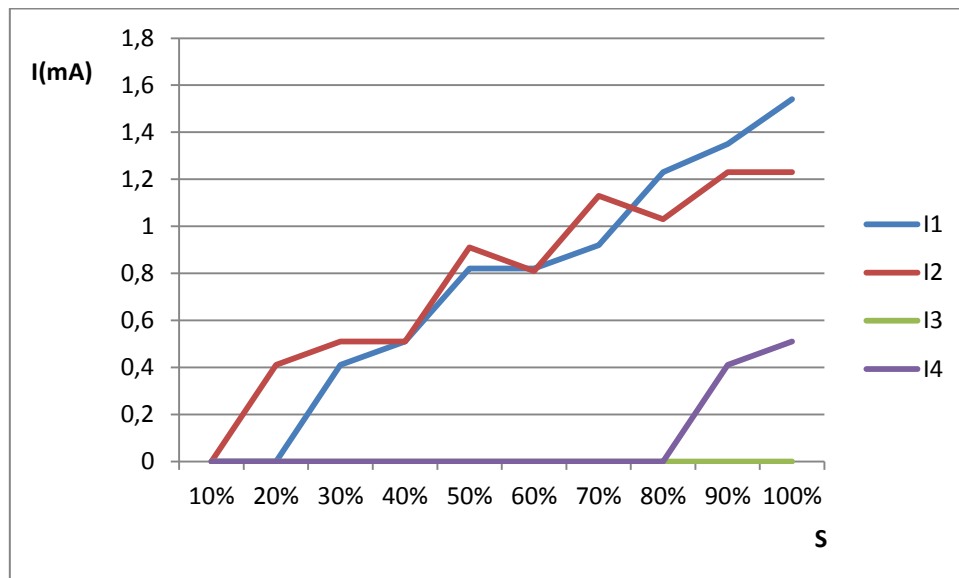
Σχήμα 12. Διάταξη για μέτρηση τάσης-ρεύματος υπό φορτίο (ίδια επεξεργασία).

Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις επιφάνειας – τάσης υπό φορτίο και επιφάνειας – ρεύματος.

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

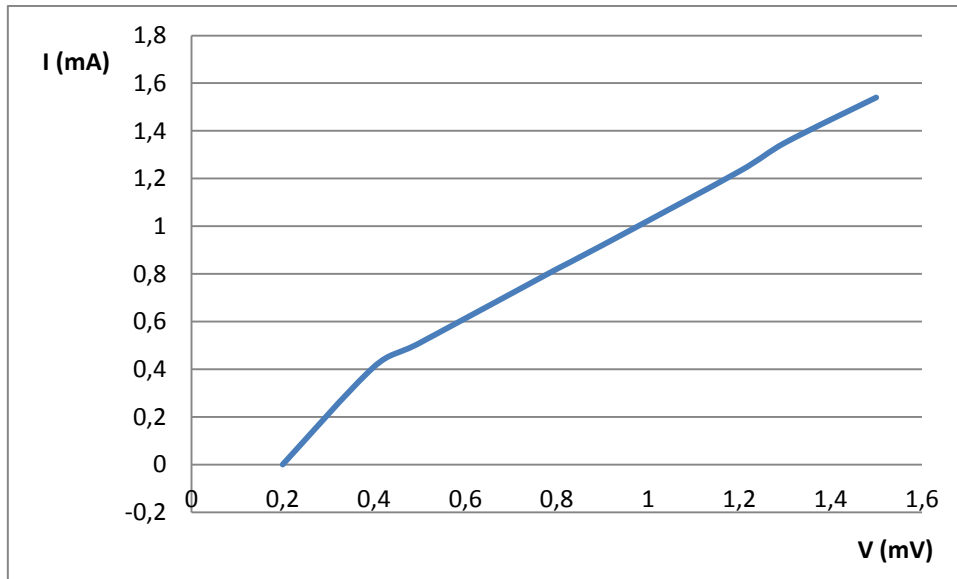


Διάγραμμα 1. Διαγραμματική απεικόνιση επιφάνειας – τάσης για τα δείγματα 1 (κυανή γραμμή), 2 (κόκκινη), 3 (πράσινη), 4 (μωβ) (ίδια επεξεργασία).

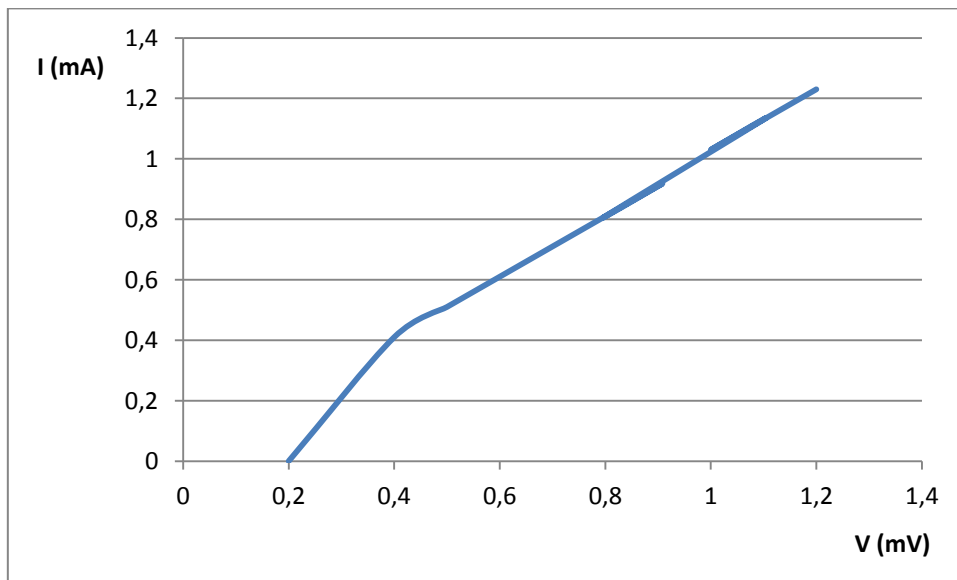


Διάγραμμα 2. Διαγραμματική απεικόνιση επιφάνειας – ρεύματος για τα δείγματα 1,2,3,4 (ίδια επεξεργασία).

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

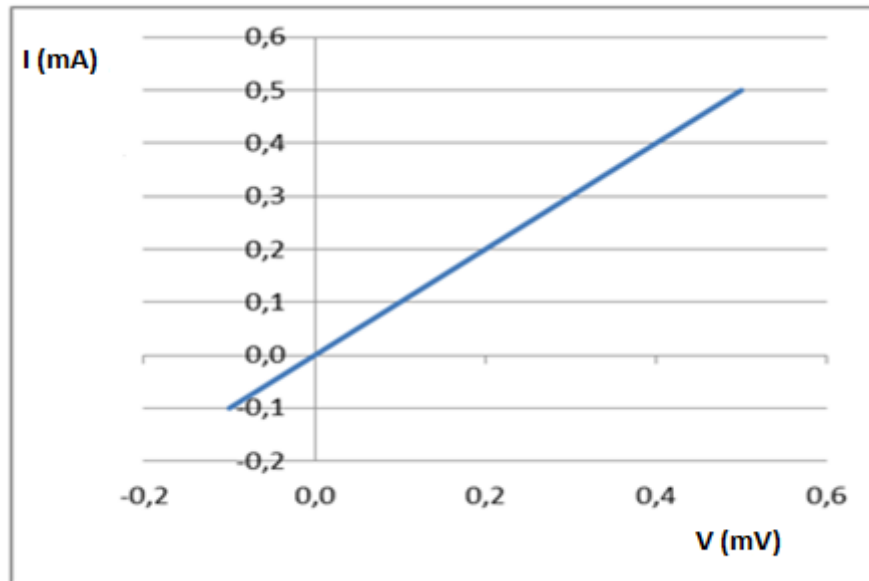


Διάγραμμα 3. Χαρακτηριστική καμπύλη I – V. Δείγμα 1 (ιδία επεξεργασία).



Διάγραμμα 4. Χαρακτηριστική καμπύλη I – V. Δείγμα 2 (ιδία επεξεργασία).

Λόγω των μηδενικών τιμών δεν κρίνεται απαραίτητο να σχεδιαστεί το αντίστοιχο διάγραμμα για το δείγμα 3.



Διάγραμμα 5. Χαρακτηριστική καμπύλη I – V. Δείγμα 4 (ιδία επεξεργασία).

### 2.3 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning electron microscopy)

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (ΗΜΣ) είναι ένα από τα όργανα της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας, με το οποίο μπορούμε να εξετάζουμε την επιφάνεια αντικειμένων με την χρήση ηλεκτρονικής δέσμης. Σε αντιστοιχία με τα μικροσκόπια που χρησιμοποιούν φως και κοινούς φακούς για την δημιουργία ειδώλου ενός αντικειμένου, στο ΗΜΣ χρησιμοποιούνται ηλεκτρόνια και ηλεκτρομαγνητικοί φακοί για την δημιουργία ειδώλου της επιφανείας ενός αντικειμένου στην οθόνη ηλεκτρονικού υπολογιστή ή μιας τηλεόρασης. Για τη λειτουργία αυτού του οργάνου είναι απαραίτητη συνθήκη να δημιουργείται ικανοποιητικό "κενό" με διαρκή άντληση του αέρα μετά την εισαγωγή του προς εξέταση αντικειμένου (δοκιμίου) στο μικροσκόπιο (Reimer, 1985).

Οι εικόνες ελήφθησαν από το μικροσκόπιο για την επιφάνεια των δοκιμίων 1-4 (Εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων) και μπορούμε να δούμε τη μορφολογία των δειγμάτων αυτών ,και εξετάζοντας το τοπογραφικό ανάγλυφο να εξάγουμε σημαντικά συμπεράσματα για την ομότροπη ή ετερότροπη μορφολογία της επικάλυψης. Οι εικόνες ελήφθησαν σε απόσταση 1,40,100,500 μm από τα δοκίμια και σε μεγέθυνση x30,x100,x500,x1000.

Στο τρίτο κεφάλαιο και για κάθε δοκίμιο παρατίθενται ενδεικτικά φωτογραφίες για κάθε σχολιασμό. Πλήρης κατάλογος εικόνων μπορεί να βρεθεί στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

### 3.1 Ανάλυση εικόνων SEM

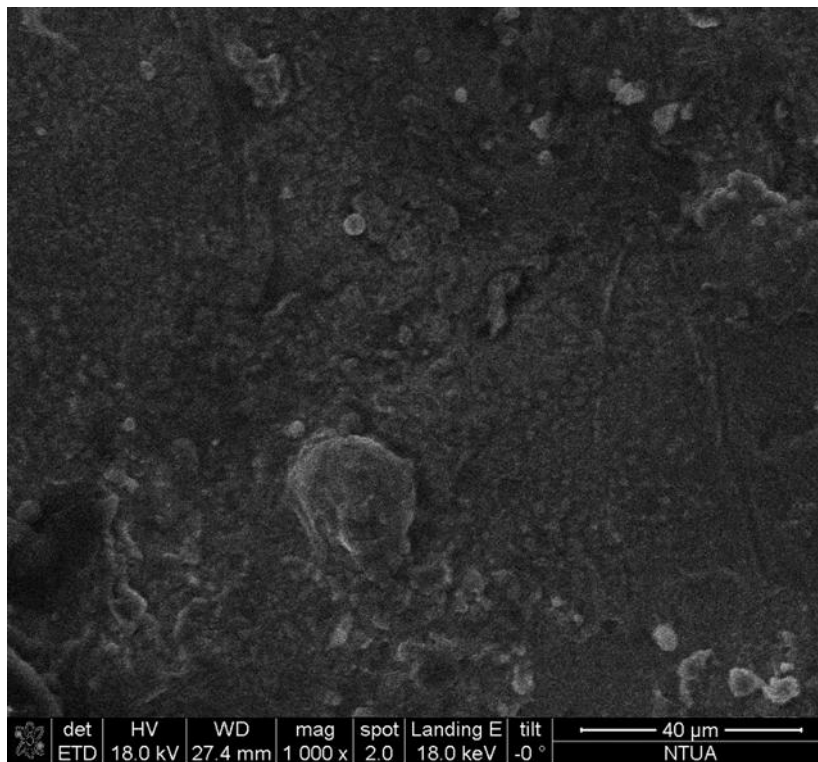
Οι παρακάτω εικόνες ελήφθησαν από το μικροσκόπιο για την επιφάνεια των δοκιμίων 1-4 (Εικόνες δευτερογενών ηλεκτρονίων) και μπορούμε να δούμε τη μορφολογία των δειγμάτων



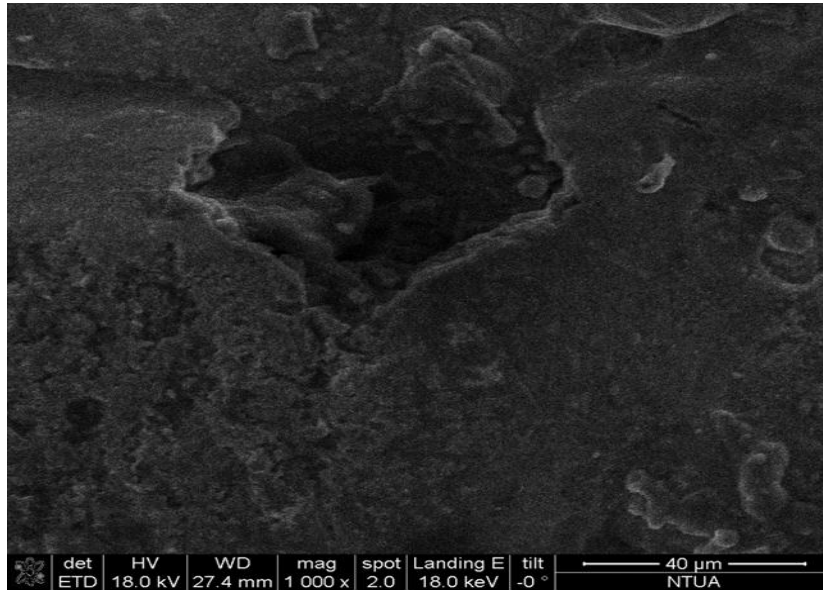
## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

αυτών ,και εξετάζοντας το τοπογραφικό ανάγλυφο να εξάγουμε σημαντικά συμπεράσματα για την ομότροπη ή ετερότροπη μορφολογία της επικάλυψης. Οι εικόνες ελήφθησαν σε απόσταση 1,40,100,500  $\mu\text{m}$  από τα δοκίμια και σε μεγέθυνση x30,x100,x500,x1000.

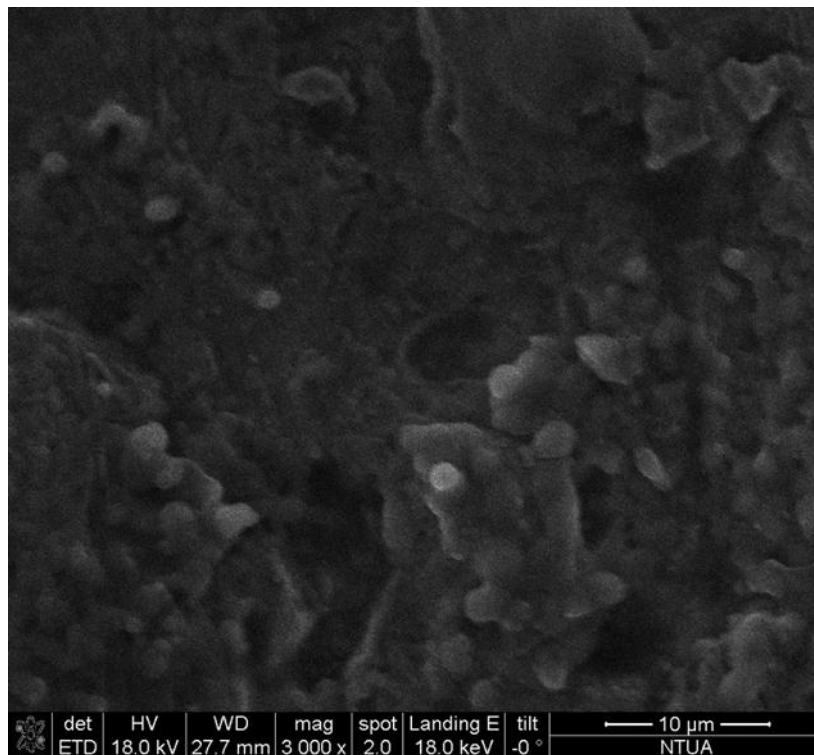
Στο πρώτο δείγμα μπορεί κανείς να δει τη παρουσία κρατήρων κυμαινόμενης μορφολογίας και σχήματος με συνδυαστική την εμφάνιση πορώδους που οδηγούν σε ένα έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο στις περιοχές εναπόθεσης  $\text{TiO}_2$ . Είναι εμφανής η επιφανειακή ανάπτυξη μικρορωγμών από τα όρια του κρατήρα. Έντονη είναι η παρουσία σφαιρικών σχηματισμών ετερότροπα αναπτυσσόμενων στην επιφάνεια του υποστρώματος. Οι σχηματισμοί αποτελούνται από ελαφριά χημικά στοιχεία, ωστόσο η ταυτοποίησή τους απαιτεί τη διεξαγωγή χημικής μικροανάλυσης.



Εικόνα 11. Εμφάνιση πορώδους σε όλη την επιφάνεια και σφαιρικοί σχηματισμοί.Μεγέθυνση x1000 (ιδία επεξεργασία).



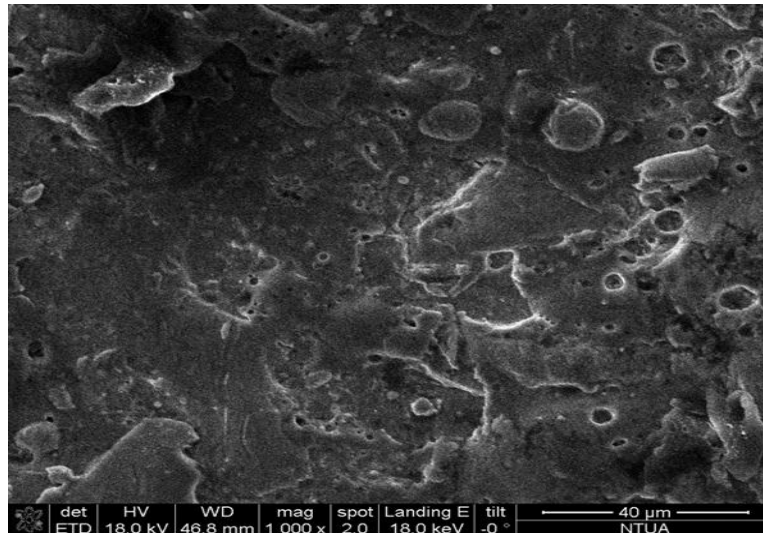
Εικόνα 12. Εμφάνιση πορώδους και παρουσία κρατήρων.Μεγέθυνση x1000 (ιδία επεξεργασία).



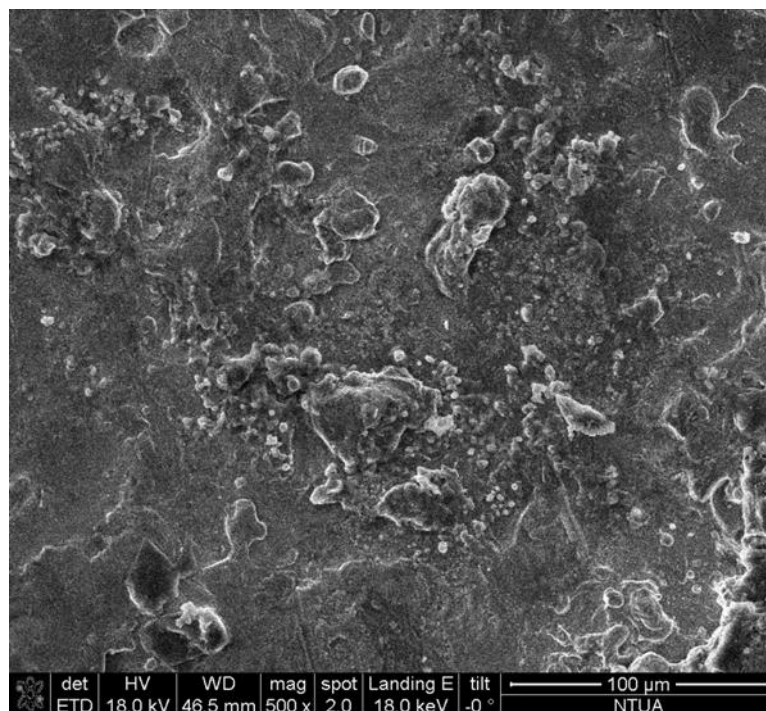
Εικόνα 13. Σφαιρικοί σχηματισμοί ετερότροπα σχηματισμένοι.Μεγέθυνση x3000 (ιδία επεξεργασία).

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

Στο δεύτερο δείγμα παρατηρείται η έντονη παρουσία κρατήρων κυμαινόμενης διαμέτρου, ανομοιόμορφα κατανεμημένοι, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από την ταυτόχρονη ανάπτυξη σπηλαιώσεων. Σφαιρικής μορφολογίας μικροσχηματισμοί αναπτύσσονται σε όλη την επιφάνεια. Παρατηρούνται αποσχίσεις κυμαινόμενου μήκους, ωστόσο, είναι της τάξης των μικρομέτρων.



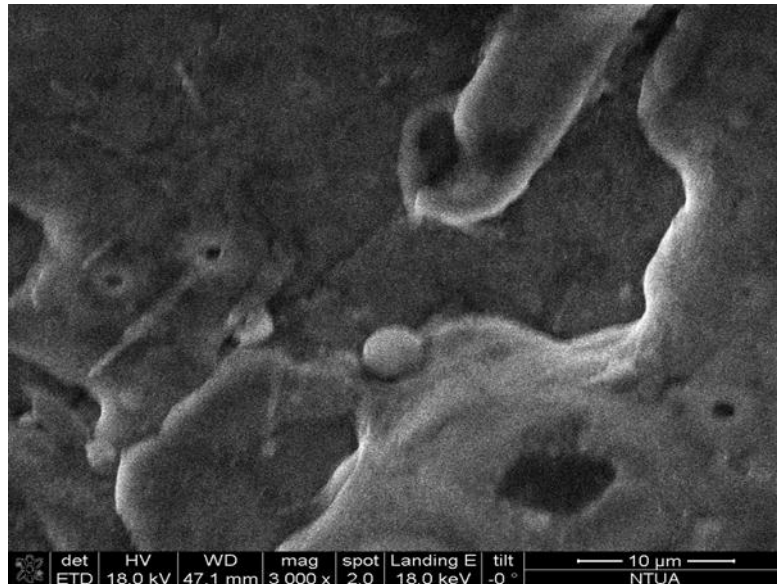
Εικόνα 14. Ανάπτυξη σπηλαιώσεων. Μεγέθυνση x1000 (ιδία επεξεργασία).



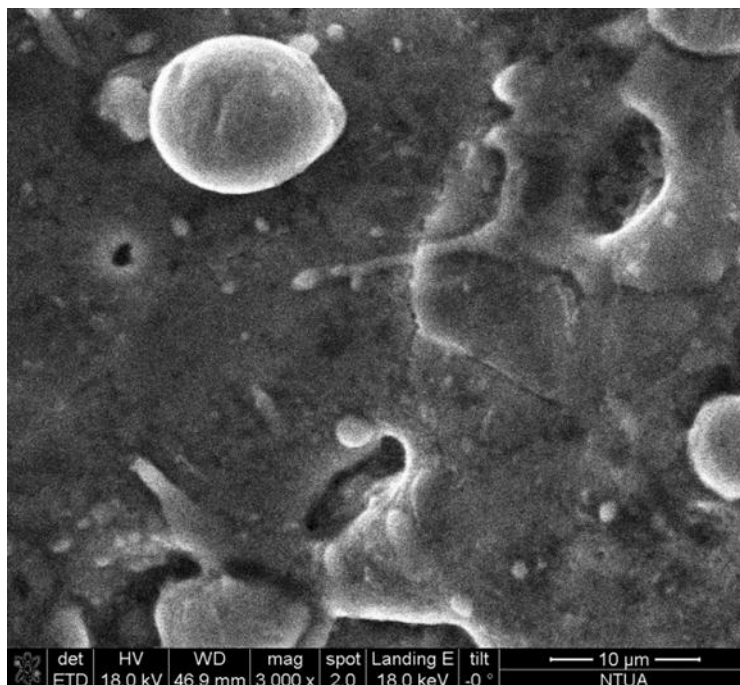
Εικόνα 15. Ανομοιομορφία επιφάνειας. Μεγέθυνση x500 (ιδία επεξεργασία).

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

Στο τρίτο δείγμα είναι έντονη η ανομοιομορφία της επιφάνειας, με την παρουσία κρατήρων μεγάλου βάθους όπου στα όριά τους ήταν εμφανής η παρουσία επάλληλων στρωμάτων επανατηκόμενου υποστρώματος και οξειδίου. Δεν παρατηρείται συνοχή της επικάλυψης, ωστόσο συγκριτικά με τα δείγματα 1 και 2 καλύπτει ποσοστιαία μεγαλύτερη επιφάνεια υποστρώματος.



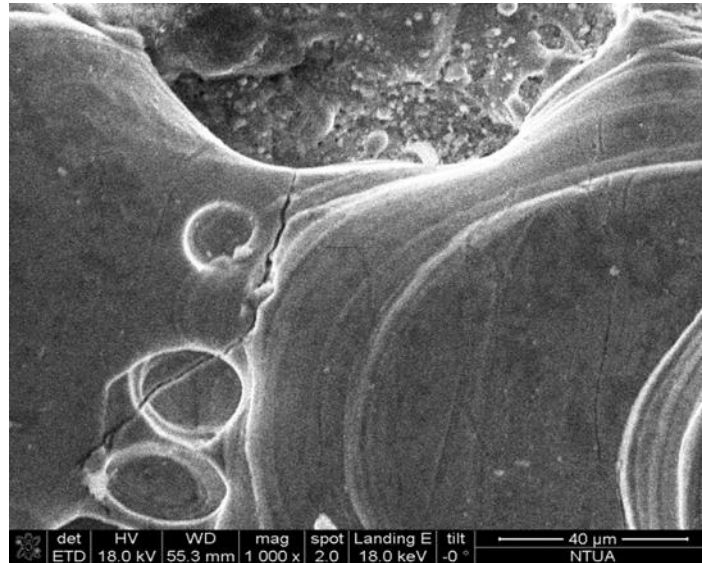
*Εικόνα 16.* Παρουσία επάλληλων στρωμάτων επανατηκόμενου υποστρώματος και οξειδίου. Μεγέθυνση x3000 (ιδία επεξεργασία).



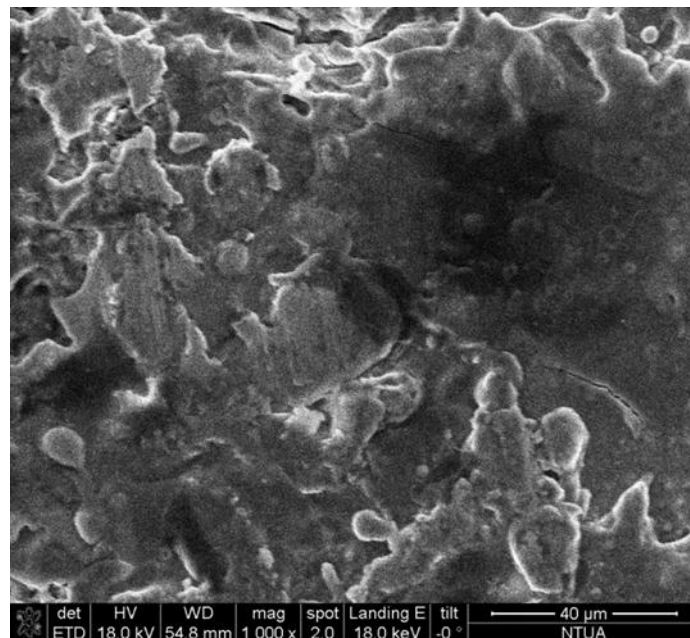
*Εικόνα 17.* Ανάπτυξη σφαιρικών σχηματισμών και ανομοιομορφία επιφάνειας. Μεγέθυνση x3000 (ιδία επεξεργασία).

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

Στο τέταρτο δείγμα παρατηρούνται σχηματικές αναδιπλώσεις υπό του υποστρώματος αλουμινίου στην επιφάνεια του δείγματος που περιορίζουν σημαντικά το χώρο ανάπτυξης του επιφανειακού οξειδίου. Οι αναπτυσσόμενοι κρατήρες μικρού βάθους και διαμέτρου σχεδόν σε όλη την επιφάνεια του δείγματος σε συνδυασμό με την ανάπτυξη ετερόμορφων σχηματισμών μειώνουν σημαντικά την ποσοστιαία εμφάνιση των επιθυμητών οξειδίων του τιτανίου. Το εντονότατο τοπογραφικό ανάγλυφο σχετίζεται με την παρουσία ορέων και κοιλάδων που σχετίζονται με τις πολλαπλές ανακλάσεις στην περίπτωση της έκθεσης της επιφάνειας στον ήλιο.



Εικόνα 18. Αναπτυσσόμενοι κρατήρες. Μεγέθυνση x1000 (ιδία επεξεργασία).



Εικόνα 19. Αναδιπλώσεις του υποστρώματος αλουμινίου. Μεγέθυνση x 1000 (ιδία επεξεργασία).

### 3.2 Αποτελέσματα – παρατηρήσεις δειγμάτων

Στη παρούσα εργασία για την επικάλυψη των μετάλλων και τη δημιουργία φωτοβολταϊκών πάνελ χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ηλεκτραπόθεσης (ESD). Χρησιμοποιήθηκε αυτή η μέθοδος γιατί παράγει ανώτερης ποιότητας επικαλύψεις, εξαιτίας της χρήσης ηλεκτροδίων υψηλής ποιότητας κράματος και ηλεκτρικών παλμών υψηλής έντασης και χαμηλής διάρκειας. Η μέθοδος αυτή έχει μεγάλα συγκριτικά πλεονεκτήματα στους κρίσιμους τομείς της ποιότητας και του κόστους παραγωγής.

Όσον αφορά στις μετρήσεις για τάση υπό φορτίο, πρέπει να τονιστεί ότι οι τιμές της τάσης για το 100% της ελεύθερης επιφάνειας δεν είναι οι μέγιστες των δοκιμίων. Αυτό οφείλεται στο τρόπο που έγιναν οι μετρήσεις. Το φορτίο τοποθετήθηκε στη μία άκρη του μπλε περιγράμματος (start point), και μετρούσαμε μία τιμή για τάση και ρεύμα χωρίς να τοποθετήσουμε το ύφασμα. Αυτές οι τιμές θεωρήθηκαν μέγιστες και όπως ήταν αναμενόμενο, αυτές ήταν και οι ενδείξεις των πολυμέτρων όταν αποκαλύφθηκε το 100% της επιφάνειας. Όπως φαίνεται και από τη μέτρηση για τάση ανοιχτοκύκλωσης μετρήθηκαν τάσεις οι οποίες ήταν ως και διπλάσιες από αυτές της τάσης υπό φορτίο χωρίς βέβαια αυτές να ξεπερνάνε τα 4-6 mV. Οι τάσεις αυτές μετρήθηκαν σε κεντρικά σημεία των δοκιμίων, άρα με διαφορετικό start point είναι πολύ πιθανό τα αποτελέσματα να ήταν διαφορετικά. Αυτό βέβαια θα καθιστούσε τη μέτρηση υπερβολικά δύσκολη αφού δεν θα ήταν εύκολο να καλυφτεί επιφάνεια με το πανί λόγω του μικρού εμβαδού των δοκιμίων (3x2.5 cm για τα δοκίμια 1,2 και 2x2 cm για τα 3,4) και ταυτόχρονα να παρέμεναν σταθερά τα probes των πολυμέτρων.

Σημαντικό ρόλο στις μετρήσεις έπαιξε το γεγονός ότι δεν υπήρχε άνεμος, αφού ο θόρυβος του πολυμέτρου τις μέρες αυτές (αρχές Σεπτεμβρίου), θα ξεπερνούσε τα 50 mV και άρα οι μετρήσεις που θα γίνονταν δεν θα ήταν αξιόπιστες. Παρ' όλα αυτά οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν και στο εργαστήριο με λάμπα LED, με παρόμοια αποτελέσματα. Το ύφασμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε ήταν αρκετά χοντρό και τοποθετούνταν κάθε φορά με τέτοιο τρόπο ώστε να μην επιτρέπεται στα φωτόνια να περάσουν στην καλυπτόμενη επιφάνεια.

Στο δοκίμιο 3, ενώ παρατηρήθηκε τάση στις μετρήσεις για τάση ανοιχτοκύκλωσης, δεν είχαμε αντίστοιχα αποτελέσματα στη μέτρηση τάσης υπό φορτίο αφού η ένδειξη του πολυμέτρου δεν έδειξε κάτι διαφορετικό από 0.2 mV (πρακτικά μηδενική τάση). Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε την πρώτη μέρα κατασκευής των δοκιμίων και η μέτρηση για τάση υπό φορτίο μια εβδομάδα μετά.

Αξιοσημείωτο ήταν το γεγονός ότι οι μέγιστες τάσεις που μετρήθηκαν στα δοκίμια (4-6 mV), παρατηρήθηκαν όταν η θερμοκρασία ήταν υπερβολικά αυξημένη στα δοκίμια. Σε μεγάλες θερμοκρασίες παρατηρήθηκε γενικά αυξημένη τάση στα δοκίμια και όχι μόνο στα κεντρικά σημεία. Με βάση τη πηγή (Janusz & Nowotny, 2012) αυτό οφείλεται στη παρουσία θερμοηλεκτρικής δύναμης (Thermopower - Seebeck coefficient). Σύμφωνα με τον (Janusz & Nowotny, 2012) η αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα δείγμα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διαφοράς δυναμικού (θερμοηλεκτρική τάση).

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

Οι τάσεις που μετρήθηκαν είναι πολύ μικρές σε σχέση με τάσεις που έχουν μετρηθεί σε άλλες τεχνολογίες οργανικών φωτοβολταϊκών. Πιο συγκεκριμένα έχει μετρηθεί σε οργανικά φωτοβολταϊκά με επικάλυψη PEDOT-PSS (εναλλακτικό του διοξειδίου του τιτανίου) ή P<sub>3</sub>HT τάση 0.6V (Atar, Kayali, & Cimenoglu, 2008), μέχρι και 3.9V με διοξείδιο του τιτανίου (Μέλλος, 2013). Πρόκειται βέβαια όπως αναφέρθηκε σε τελείως διαφορετικές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών με την έννοια ότι έχουν χρησιμοποιηθεί εντελώς διαφορετικές τεχνικές κατασκευής τόσο των υποστρωμάτων (πχ γυαλί αντί για μέταλλο) αλλά και διαφορετικές τεχνικές επικάλυψης (sol-gel, sputtering κλπ). Επίσης το οξείδιο του τιτανίου, ή το υλικό της επικάλυψης γενικά, τις περισσότερες φορές έχει υποστεί επεξεργασία με αποτέλεσμα να παρουσιάζει αυξημένες ιδιότητες. Για παράδειγμα, υμένιο TiO<sub>2</sub> το οποίο είχε εμποτιστεί με 4-tert-butylpyridine αύξησε τη τάση ανοιχτοκυκλώματος από 0.38V σε 0,72V (Korkmaz, 2010). Επίσης οι μετρήσεις στις παραπάνω εργασίες πραγματοποιήθηκαν σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες (>150° C).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ανάλυση των εικόνων SEM έδειξε την ύπαρξη έντονου τοπογραφικού ανάγλυφου καθώς και την ύπαρξη σπηλαιώσεων. Επιπλέον η ανάλυση SEM, έδειξε την ύπαρξη μικρορωγμών σε όλη την επιφάνεια της επικάλυψης που οφείλονται στη φύση της επεξεργασίας του ESD. Αυτές οι μικρορωγμές δημιουργούνται λόγω της ταχύτητας ψύξης και της θερμικής διαστολής. Σε αυτό οφείλεται εν μέρη η χαμηλή τάση των μετρήσεων αφού λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων του φωτός οδηγούμαστε σε τεράστιες απώλειες ενέργειας (Atar, Kayali, & Cimenoglu, 2008). Από τις εικόνες που ελήφθησαν παρατηρήθηκε ότι καλύτερη συγκόλληση έχει γίνει στα δοκίμια τα οποία είχαν περιβάλλον αέρα. Αυτό συνέβη διότι το οξυγόνο του αέρα διατηρούσε τη καύση με αποτέλεσμα να γίνει καλύτερη συγκόλληση (Yilmaz, E., Sahin, & Kayali, 2013) κάτι το οποίο δεν γίνεται στο περιβάλλον αργού αφού αδρανοποιείται η ατμόσφαιρα. Όσον αφορά στο δείγμα 3 η μη απόδοσή του σχετίζεται με τη δομή του αποτιθέμενου οξειδίου. Σε όλα τα δείγματα οι μικρογραφίες αποκαλύπτουν το μέγεθος της απόδοσης. Πιο συγκεκριμένα από τις μικρογραφίες, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι οι ρωγμές δεν επιτρέπουν αγωγιμότητα, ότι τα μη ηλεκτρικά συνδεδεμένα σωματίδια μειώνουν την ενεργό επιφάνεια και ότι η τραχύτητα μεγαλώνει την ενεργό επιφάνεια και ενδεχομένως να αυξάνει την απόδοση (Atar, Kayali, & Cimenoglu, 2008).

Επιπλέον, με βάση τα αποτελέσματα του πειράματος, μπορεί κανείς να δει ότι υπάρχει διαφορά στις μετρήσεις με βάση το υπόστρωμα, και ότι η λαμαρίνα υπερέχει σε σχέση με το αλουμίνιο. Η σκόνη που χρησιμοποιήθηκε δεν υπέστη καμία επεξεργασία και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των 40°C. Τέλος, θα μπορούσε να επιτευχθεί μεγαλύτερη τάση, αν είχαν πραγματοποιηθεί περισσότερα στρώματα επικάλυψης TiO<sub>2</sub> (Atar, Kayali, & Cimenoglu, 2008).

Τέλος, οι χαρακτηριστικές καμπύλες I-V των δειγμάτων είναι ευθείες γραμμές και δεν πρόκειται για συνήθεις χαρακτηριστικές καμπύλες I-V φωτοβολταϊκών κυττάρων. Αυτό οφείλεται στο χαμηλό συντελεστή πλήρωσης των δειγμάτων (τρόπος υπολογισμού και αποτελέσματα βρίσκονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β), ο οποίος είναι πολύ μικρότερος του 80% που θεωρείται κανονικός για φωτοβολταϊκά κύτταρα. Ο χαμηλός συντελεστής πλήρωσης

## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

---

είναι ένδειξη μη ιδανικής μορφολογίας στο φωτοενεργό στρώμα (active layer) των δειγμάτων. Η παρούσα εργασία αποτελεί τη πρώτη προσπάθεια για τη δημιουργία active layer με electrospark deposition.





## 4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Agrafiotis, C. e. (2005). "Solar water splitting for hydrogen production with monolithic reactors". 409-421.
- Allcock, H. R., Lampe, F. W., & Mark, J. E. (2003). *"Contemporary polymer chemistry"*. USA: Pearson Education, Inc.
- Armin, G. A. (2009). *Thin Solid films*.
- Atar, E., Kayali, E., & Cimenoglu, H. (2008). *Surf. Coat. Technol.* 202.
- Bhubaneswari Parida, S. (2011). *«A Review of Solar Photovoltaic Technologies»*. Elsevier.
- Blythe, A. R. (1979). *Electrical Properties of Polymers*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cutillo, M. (2007). *Photoelectrochemical Cells: The Energy Source of the Future*. Philadelphia: University of Pennsylvania.
- Duxbury, P. (n.d.). *Theoretical and Practical limits on solar energy conversion: Why use nanostructured materials?* . Michigan: Michigan State University.
- Green, M. (1981). *Solar cells: Opening principles, technology and system application*. NJ: Prentice-Hall.
- Hummel, R. E. (2001). *"Electronic Properties of Materials"*. New York: 3rd., Springer.
- Janusz, & Nowotny. (2012). *Oxide semiconductors for solar energy conversion: titanium dioxide*. CRC Press.
- Kapur, V. K., Bansal, A., Le, P., & Asensio, O. I. (n.d.). *Thin Solid Films*.
- Kay, A., & Grätzel, M. (2008). *Low cost photovoltaic modules based on dye sensitized nanocrystalline titanium dioxide and carbon powder*. Elsevier.
- Korkmaz, K. (2010). *Metall. Mater.* 48,153.
- Krašovec, U., Bergins, M., M., H., & Topič, M. (2009). *Solar Energy Material and Solar Cells*.
- Nowotny, J. (2012). *Oxide semiconductors for solar energy conversion: titanium dioxide*. CRC Press.
- Ohanian, H. C. (1987). *"Modern Physics"*. London: Prentice Hall International Edition.

- Orgassa, K., Schock, H. W., & Werner, J. H. (2003). *Thin Solid Films*, (σ. 387).
- Oswald, T. A., & Menges, G. (n.d.). *Materials Science of Polymers for Engineers*. 1995: Hanser.
- Peng, B., Jungmann, G., Jager, C., Haarer, D., Schmidt, H., & Thelakkat, M. (2004). *Coordination Chemistry Reviews*.
- Rao, R., & Dutta, V. (2008). *Nanotechnology*.
- Reimer, L. (1985). *Scanning Electron Microscopy, Physics of Image Formation and Microanalysis*. Springer - Verlag, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo.
- Renault, C., Baland, V., Martinez - Ferrero, E., Nicole, L., Sanchez, C., & Limoges, B. (2009). "Highly ordered transparent mesoporous TiO<sub>2</sub> thin films: an attractive matrix for efficient immobilization and Spectroelectrochemical characterization of cytochrome c". *Chem. Commun.*
- S.Cadney, & M.Brochu. (2010). Formation of Amorphous Zr,Ti,Ni,Cu,Be coatings via the electrospark deposition.
- Wada, T., Kohara, N., Nishiwaki, S., & Negami, T. (2001). *Thin Solid Films*, (σ. 387).
- Yilmaz, M., E., A., Sahin, O., & Kayali, E. (2013). Improving the Surface Properties of Cp - Ti by Pulsed Electro - Spark Deposition. *3rd International Congress APMAS*.
- Δέρβος, Κ. Θ. (2013). *Φωτοβολταϊκά συστήματα: από τη θεωρία στη πράξη*. Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ.
- Καγκαράκης, Κ. (1992). *Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία*. ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ.
- Μέλλος, Α. (2013). «Παλμική εναπόθεση laser για την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών στοιχείων λεπτών υμενίων υδρογονωμένου πυριτίου». Αθήνα: ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ.
- Πάσχος, Κ. Π. (2012). «Φωτοβολτική Τεχνολογία Λεπτών Υμενίων: Εγκατάσταση και Έλεγχος της Λειτουργίας Θερμαντικού Στοιχείου σε Σύστημα Εξάχνωσης με Ηλεκτρονιοβολή (EBE)». Αθήνα: ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ.
- Ρούση, Κ. (2014). «Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία Οργανικών Ημιαγωγών: Μελέτη Καινοτόμων Οργανικών Ηλιακών Κυψελών Φθαλοκυανίνης Μολύβδου (PbPc) σε υποστρώματα GaAs με επιφανειακές αναδομήσεις β<sub>2</sub>(2x4) και c(4x4)». Αθήνα: ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ.
- Ρούση, Κ. (2014). «Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία Οργανικών Ημιαγωγών: Μελέτη Καινοτόμων Οργανικών Ηλιακών Κυψελών Φθαλοκυανίνης Μολύβδου (PbPc) σε υπόστρωμα GaAs με επιφανειακές αναδομήσεις β<sub>2</sub> (2x4) και c (4x4). Αθήνα: ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ.
- Σ.Ε.Φ. (2007). *Φωτοβολταϊκά ένας πρακτικός οδηγός*.

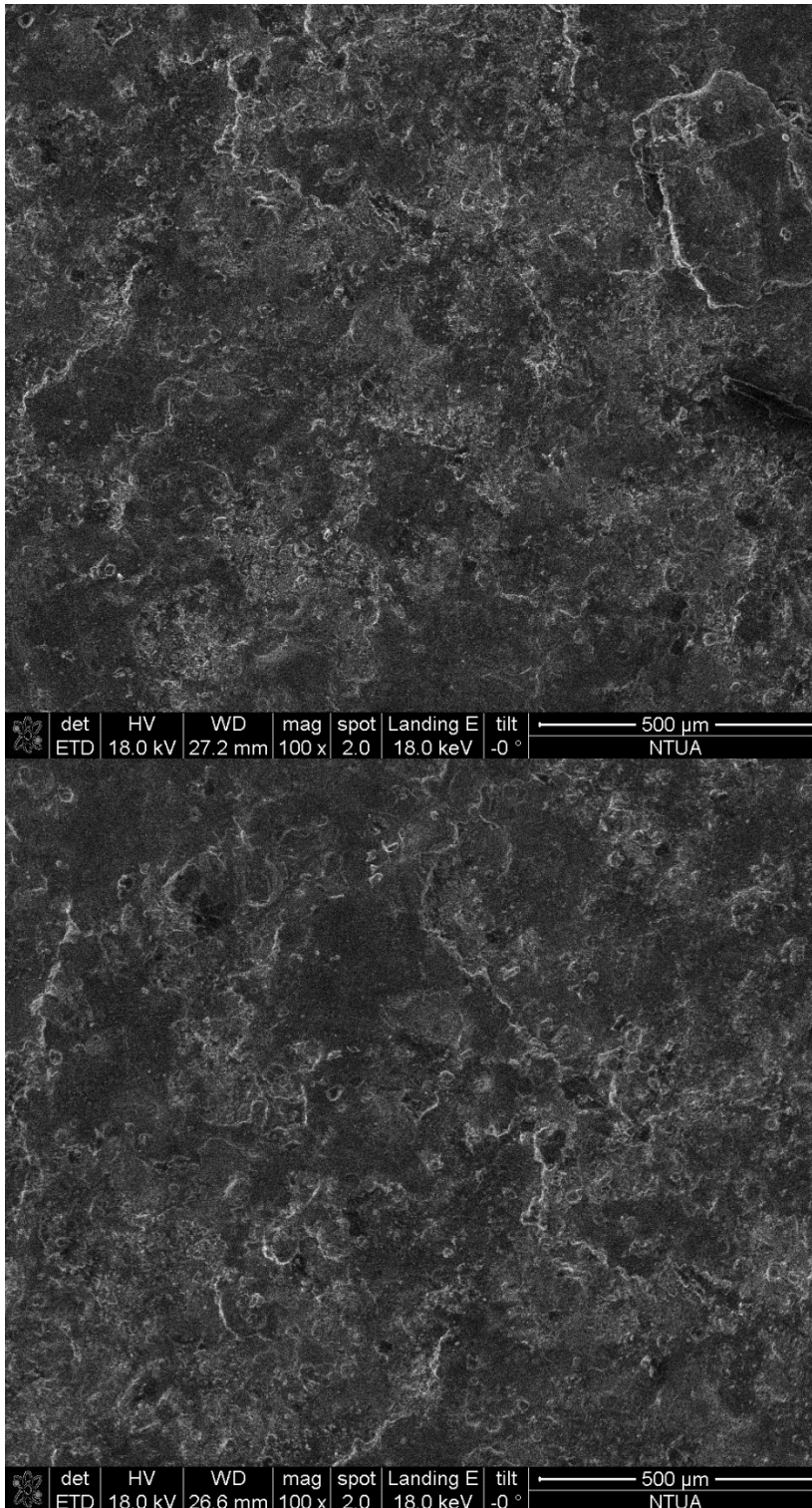
## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD

---

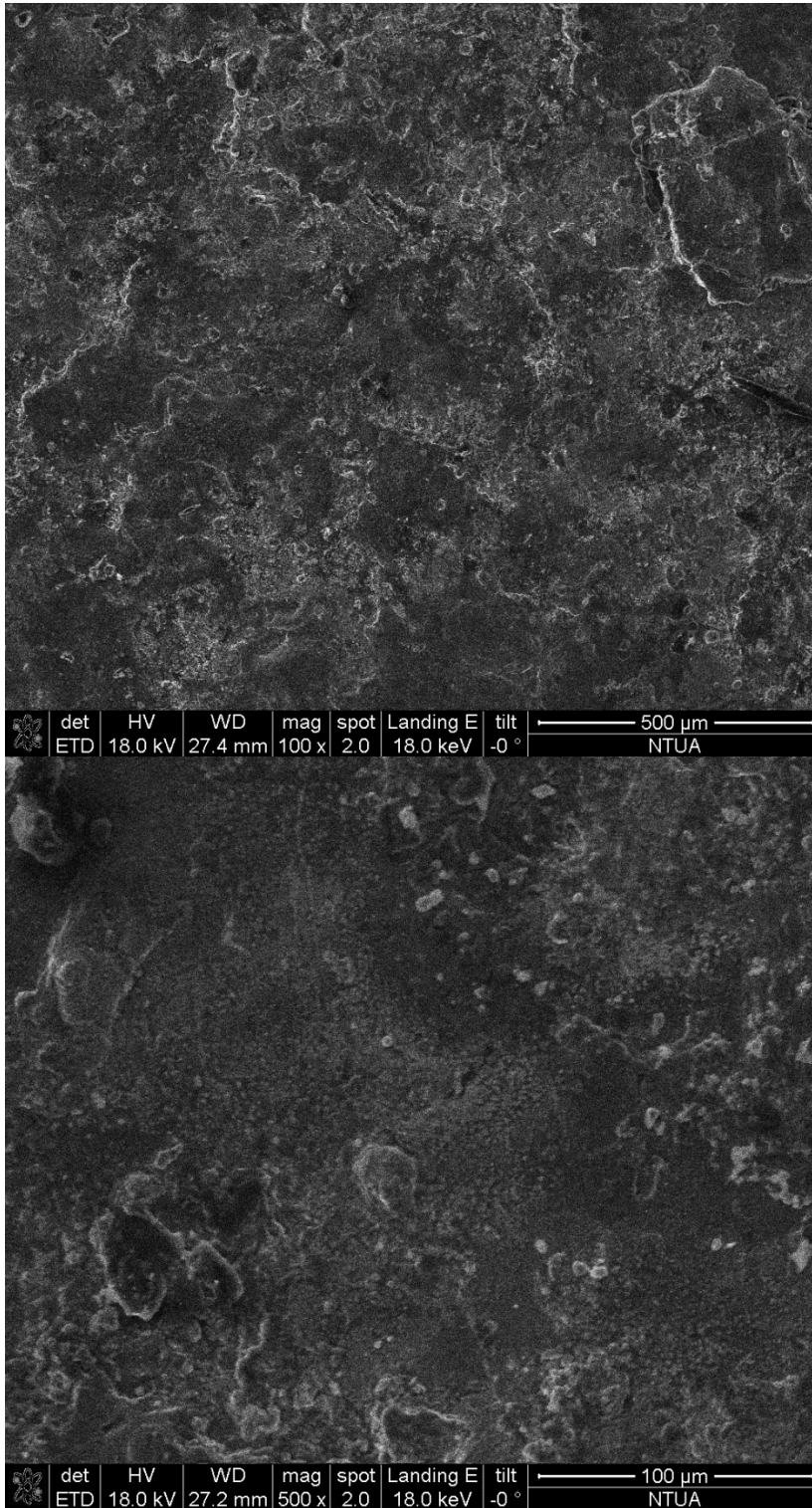
- Συρροκόστας, Γ. (2007). *Μελέτη και παρασκευή ευαισθητοποιημένων ηλεκτρομηχανικών κυψελίδων - Οργανικά Φ / Β*. Πάτρα: Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Τμήμα Φυσικής.
- Τσιριγωτάκη, Ε. (n.d.). *Το διοξείδιο του τιτανίου TiO<sub>2</sub> ως φωτοκαταλύτης και η εφαρμογή του σε κατασκευαστικά υλικά*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Τυφλίδου, Χ. (2013). «*Ακινητοποίηση πρωτεϊνών σε υμένια TiO<sub>2</sub> για την κατασκευή ηλεκτροχημικών βιοαισθητήρων*». Πάτρα: Παν. Πάτρας.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

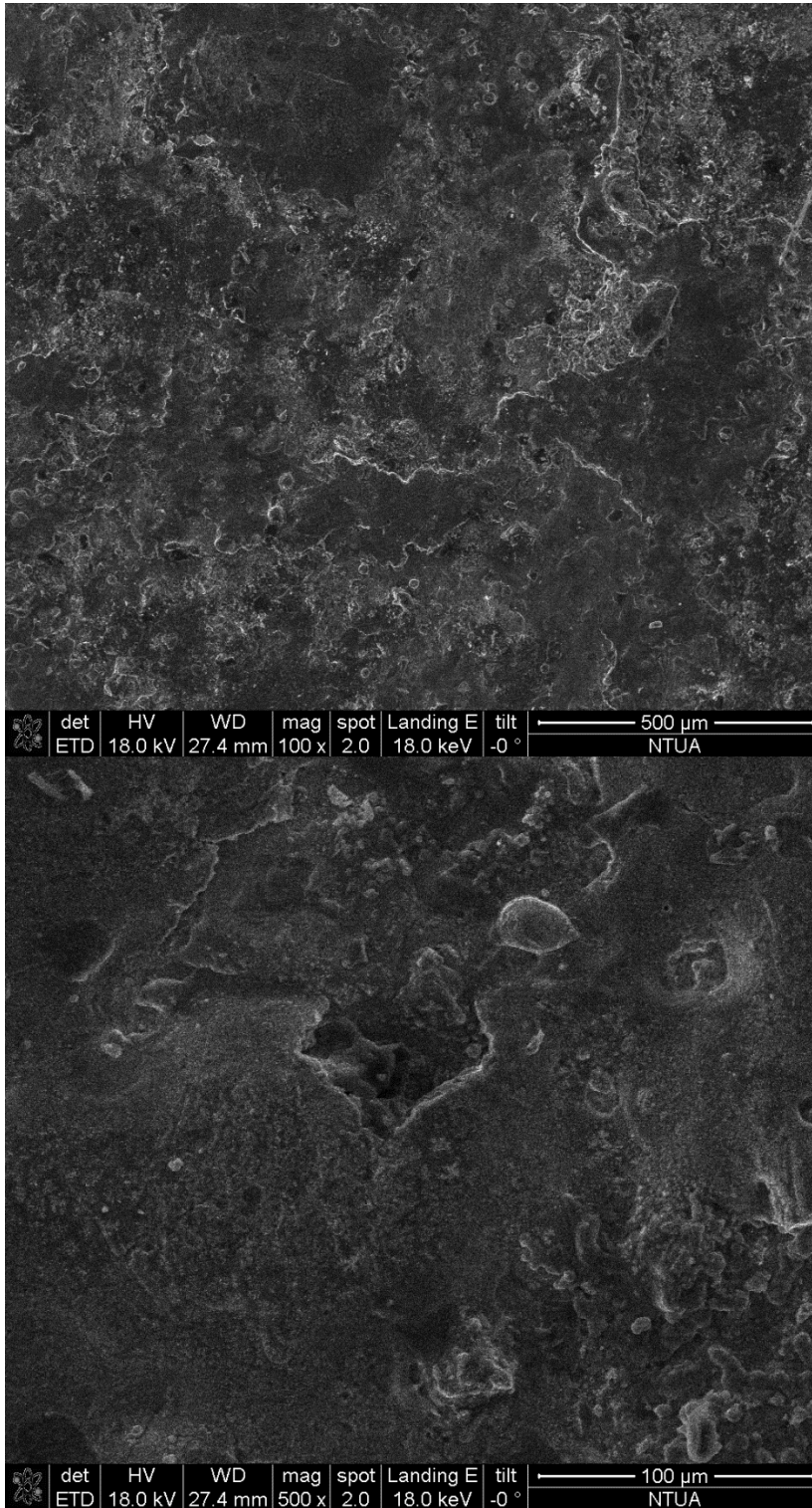
### SEM Εικόνες δείγματος 1

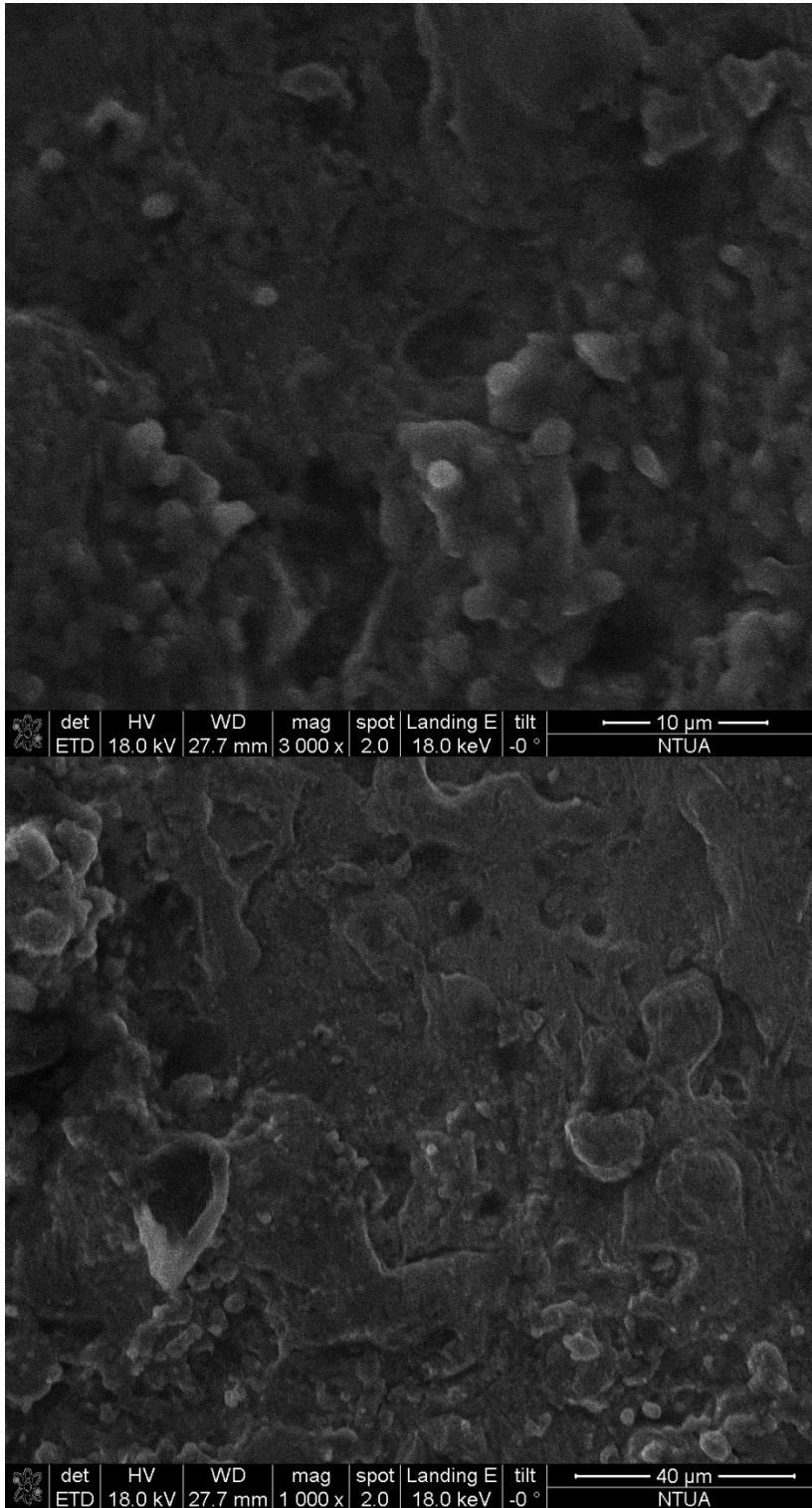


# Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD



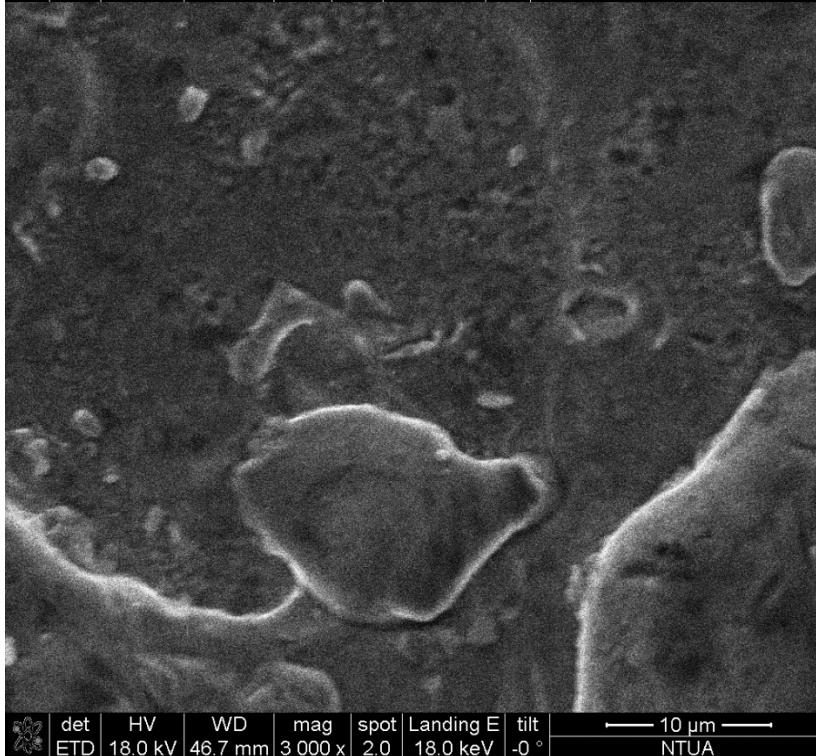
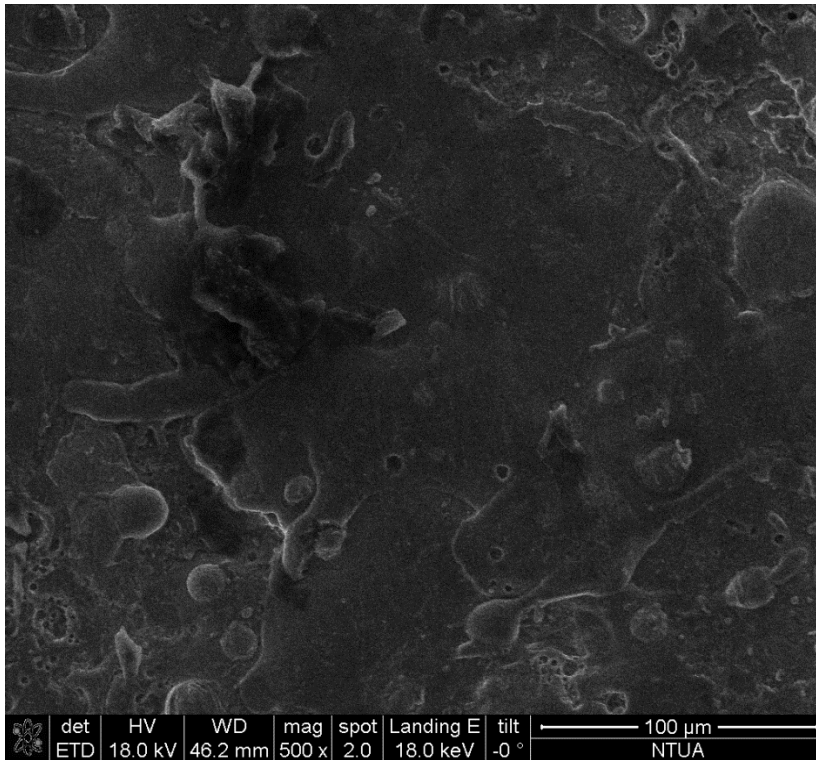
# Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD



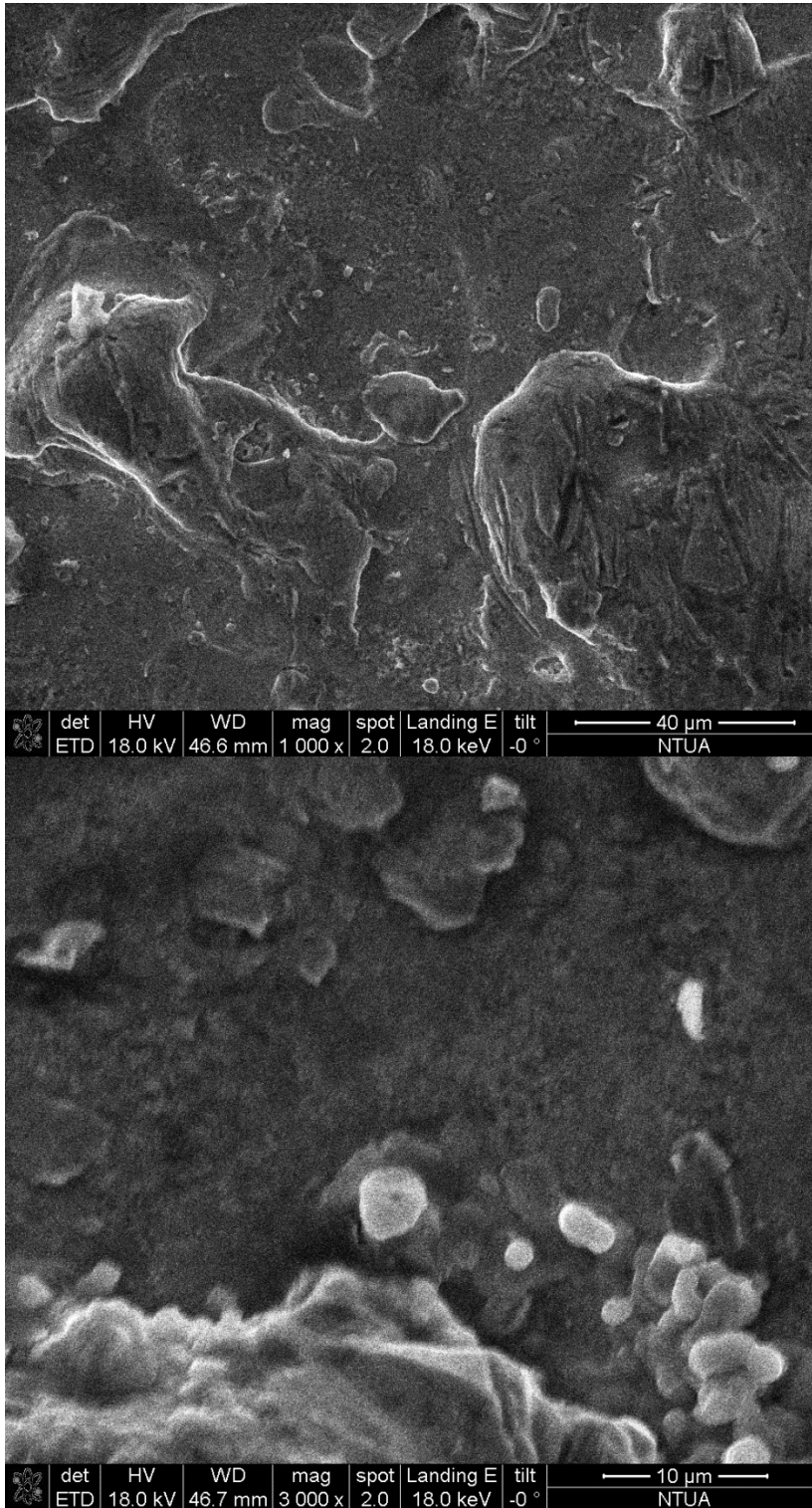




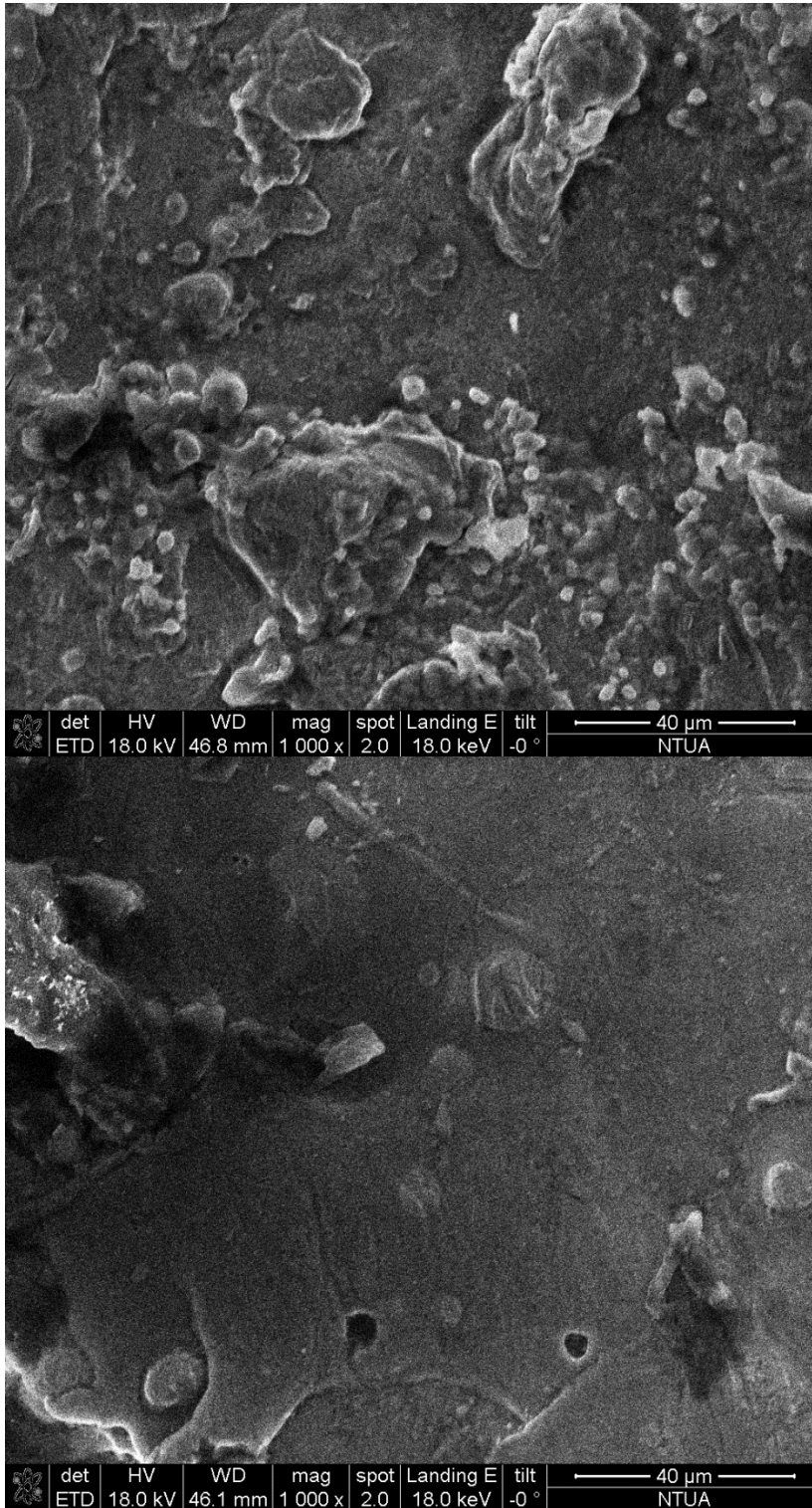
## SEM Εικόνες δείγματος 2



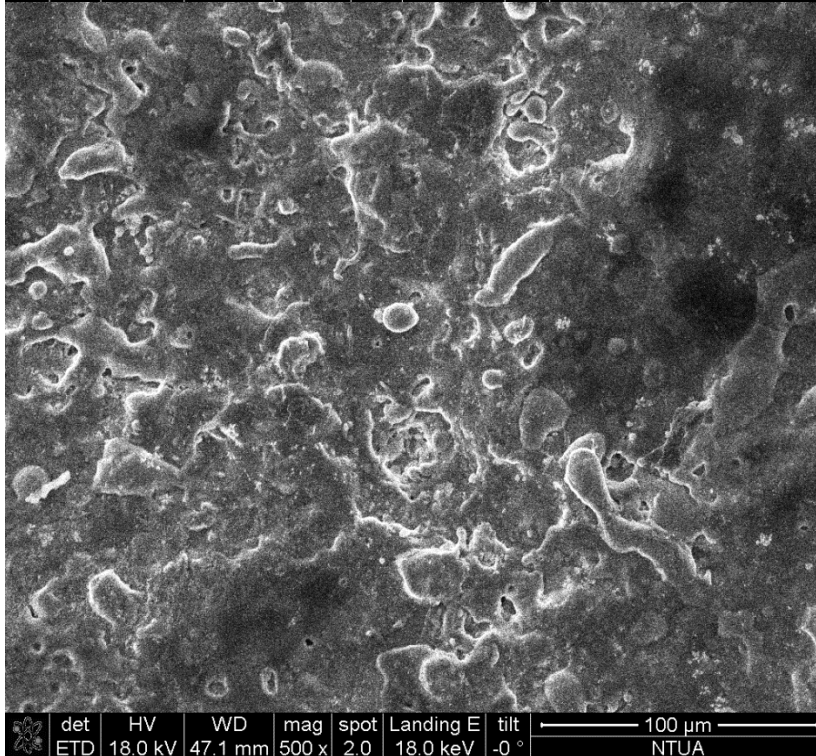
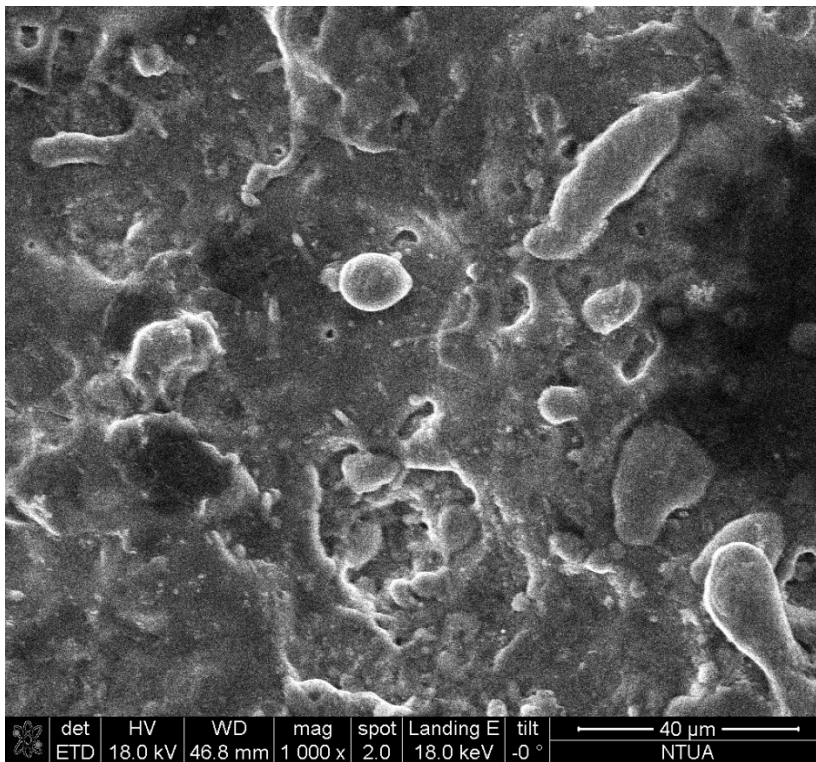
# Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD



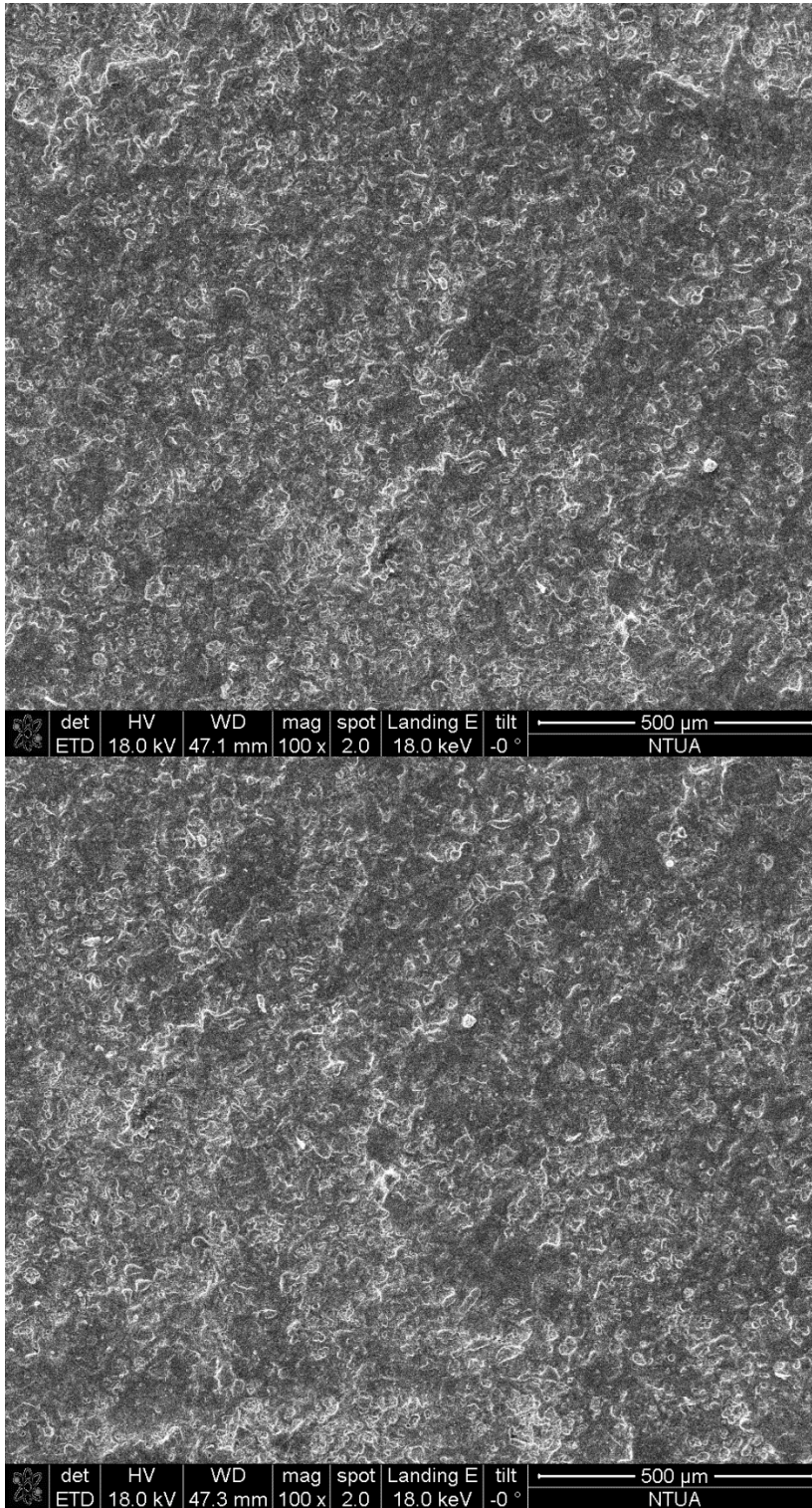
## Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD



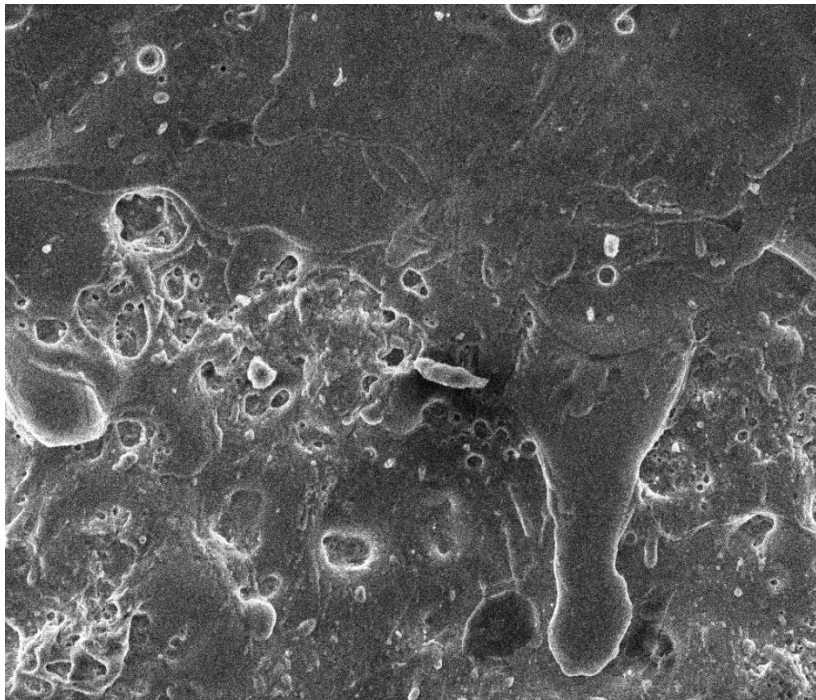
## SEM Εικόνες δείγματος 3



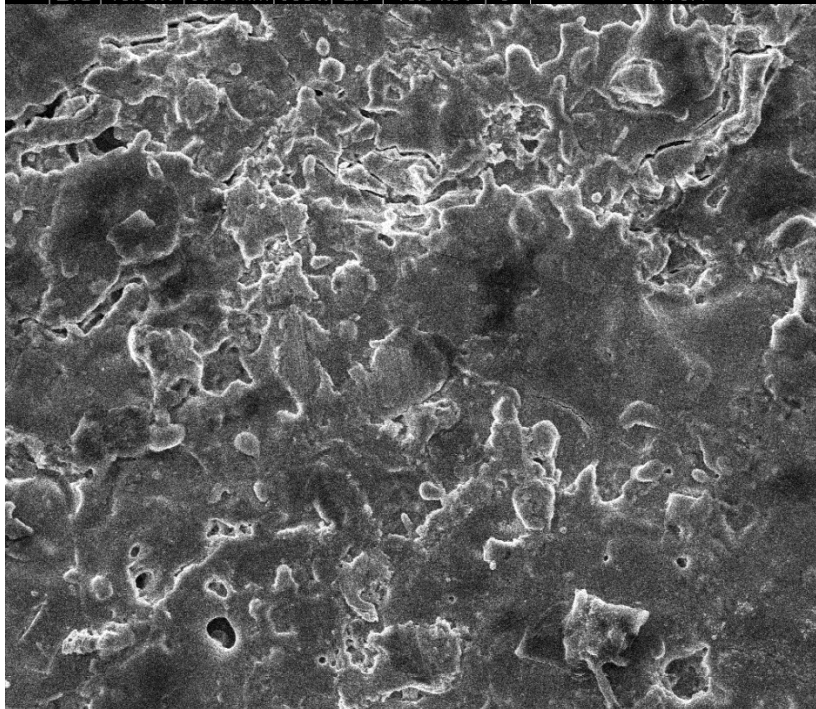
# Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD



## SEM Εικόνες δείγματος 4

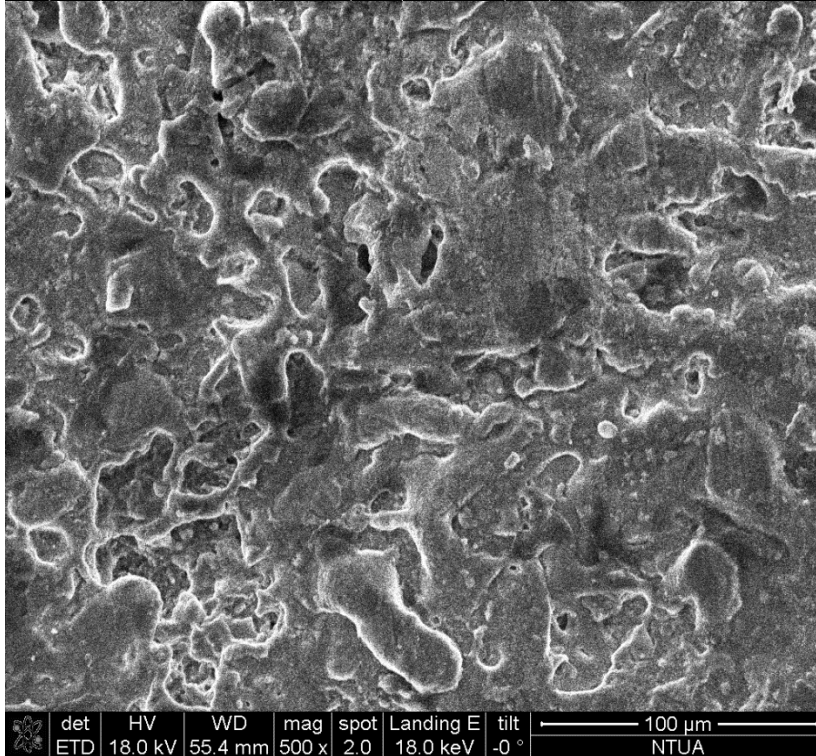
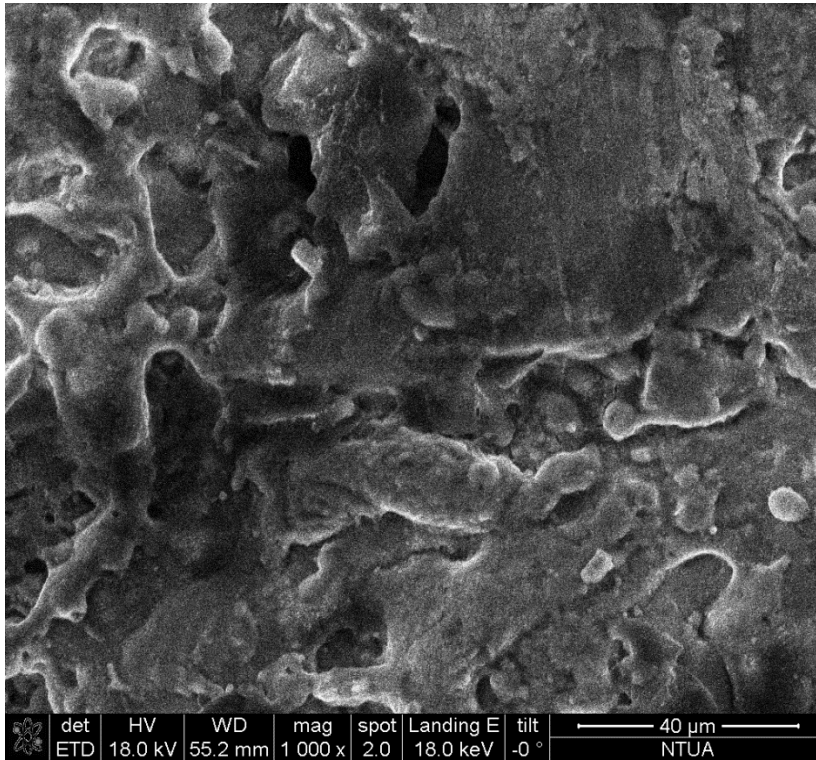


det	HV	WD	mag	spot	Landing E	tilt	100 μm
ETD	18.0 kV	55.3 mm	500 x	2.0	18.0 keV	-0 °	NTUA

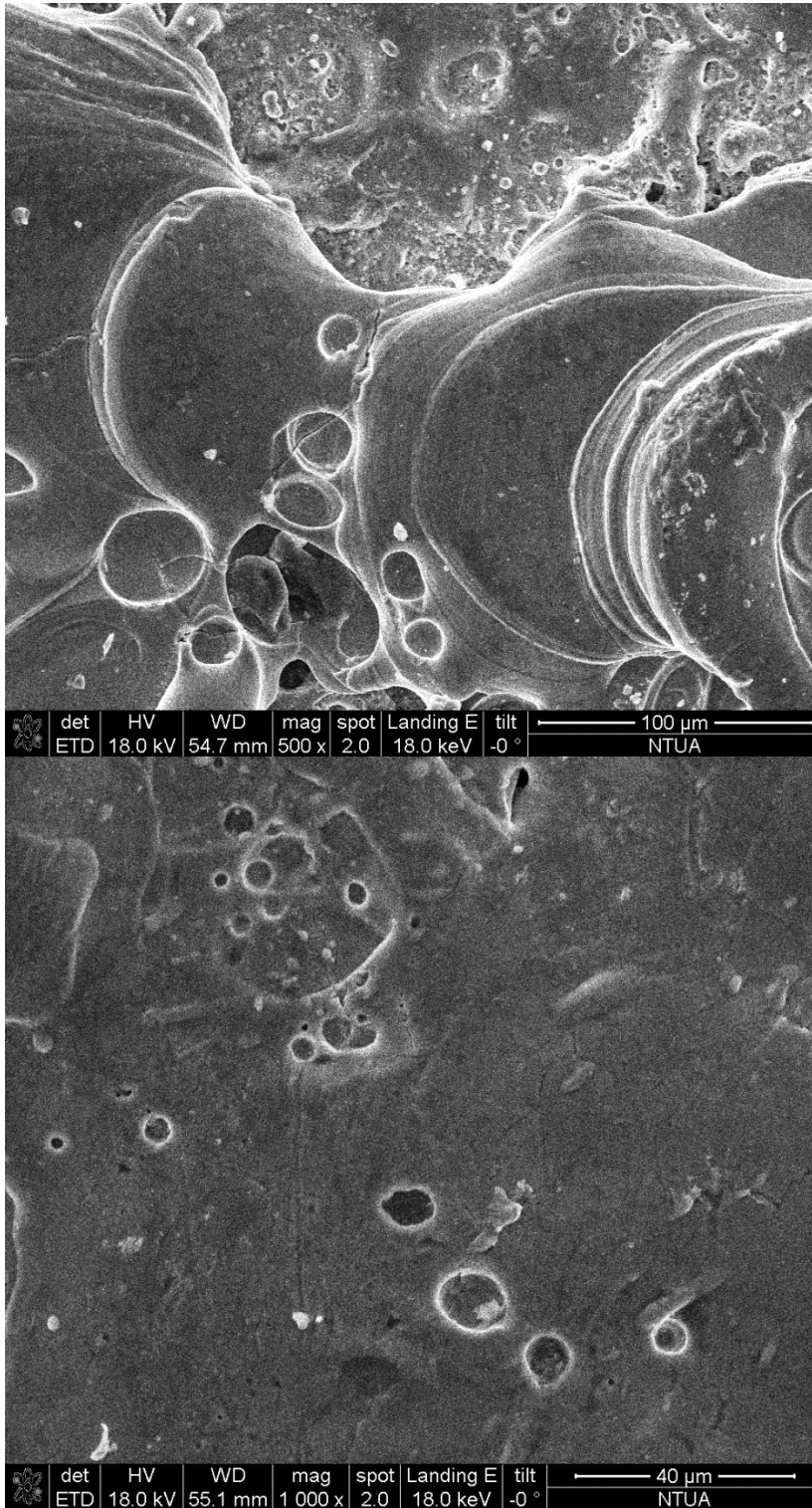


det	HV	WD	mag	spot	Landing E	tilt	100 μm
ETD	18.0 kV	55.1 mm	500 x	2.0	18.0 keV	-0 °	NTUA

# Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD



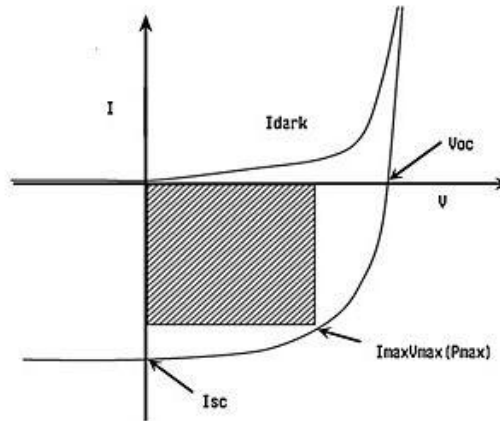
# Ανάπτυξη φωτοβολταϊκών κυψελών με ESD





## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Η παρακάτω εικόνα μας δίνει τη σχέση μεταξύ  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $I_{max}$  και  $V_{max}$  σε φωτισμό. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του  $V_{max}$ ,  $I_{max}$ , δλδ του  $P_{max}$



Με βάση λοιπόν το παραπάνω διάγραμμα, τα αποτελέσματα των μετρήσεών μας και τον τύπο του συντελεστή πλήρωσης

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

Προκύπτουν οι συντελεστές πλήρωσης για κάθε δείγμα

$$FF_1 = 26,2\%$$

$$FF_2 = 25,4\%$$

$$FF_3 = 0$$

$$FF_4 = 19,2\%$$