



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

**ΑΝΟΙΚΤΑ** ακαδημαϊκά  
μαθήματα **ΠΠ**

**ΤΙΤΛΟΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ & ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

**ΕΝΟΤΗΤΑ: 4β. Φωτοβολταϊκά**

**ΟΝΟΜΑ ΚΑΘΗΓΗΤΗ: Δ. ΚΑΡΑΜΑΝΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ: Τμήμα Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών  
Πόρων**

**ΑΓΡΙΝΙΟ**



# Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «**Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση**» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ & ΕΝΕΡΓΕΙΑ

**ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΚΑΡΑΜΑΝΗΣ**

Αναπληρωτής Καθηγητής Εναλλακτικών Πηγών  
Ενέργειας



Επικοινωνία: +30 264107-4210

Ηλεκτρονικό Ταχυδρομείο: [dkaraman@upatras.gr](mailto:dkaraman@upatras.gr)



## Φωτοβολταϊκά ηλιακά κύτταρα

Τα φωτοβολταϊκά ηλιακά κύτταρα και πλαίσια παράγονται για:

- (i) την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα, ιδιαίτερα όταν τα πλαίσια ενσωματώνονται ως ένα τμήμα του κτηρίου (ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά, BIPV) αλλά και ως σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος,
- (ii) την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στα χωριά και τις πόλεις των αναπτυσσόμενων χωρών που δεν συνδέονται με το δίκτυο ηλεκτροδότησης, π.χ. για φωτισμό και για την άντληση νερού,
- (iii) την παροχή ενέργειας σε μακρινές θέσεις, π.χ. για τον εξοπλισμό των επικοινωνιών ή του καιρικού ελέγχου,
- (iv) την παροχή ενέργειας στους δορυφόρους και τα διαστημικά οχήματα,
- (v) τα καταναλωτικά προϊόντα, π.χ. υπολογιστές, ρολόγια, παιχνίδια και νυχτερινός φωτισμός.

## Παραγωγή Ενέργειας στα Επόμενα Χρόνια από PV

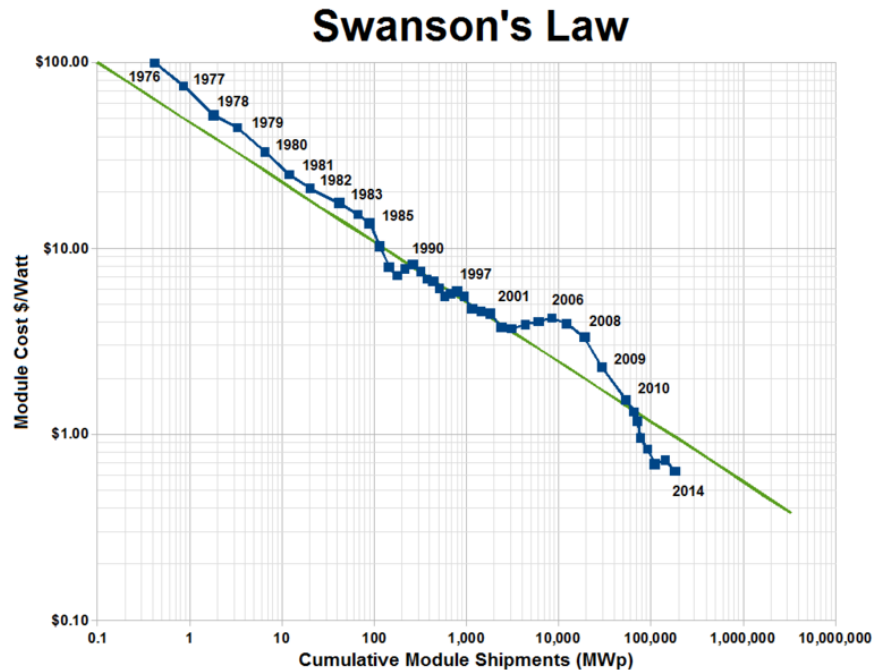
Προβλέψεις			
Εταιρία ή Οργανισμός	Συγκεντρωτική μέχρι 2020	Προστιθέμενη 2015–2020 <sup>7</sup>	∅ Ετήσια Εγκατάσταση
IEA (baseline, 2014)	403 GW	225 GW	38 GW
GlobalData (2014)	414 GW	236 GW	39 GW
SPE/EPIA (low scenario, 2015) <sup>1</sup>	444 GW	266 GW	44 GW
Frost & Sullivan (2015)	446 GW	268 GW	45 GW
IEA (enhanced case, 2014) <sup>2</sup>	490 GW	312 GW	52 GW
Grand View Research (2015)	490 GW	312 GW	52 GW
Citigroup (CitiResearch, 2013)	500 GW	322 GW	54 GW
PVMA (medium scenario, 2015) <sup>3</sup>	536 GW	358 GW	60 GW
IHS (10.5% CAGR, 2015) <sup>4</sup>	566 GW	388 GW	65 GW
BNEF (New Energy Outlook 2015) <sup>5</sup>	589 GW	411 GW	69 GW
SPE/EPIA (high scenario, 2015) <sup>1</sup>	630 GW	452 GW	75 GW
Fraunhofer (17% CAGR, 2015) <sup>6</sup>	668 GW	490 GW	82 GW
GTM Research (June, 2015)	696 GW	518 GW	86 G

## Ιστορία Φωτοβολταϊκών Κυττάρων (ΦΒ)

<b>1839</b>	Ανακάλυψη φαινομένου από Alexandre Edmond Becquerel (Γαλλία)
<b>1873</b>	Πρώτη αναφορά στο σελήνιο (Willoughby Smith, UK)
<b>1877</b>	Πρώτο ΦΒ κύτταρο (σελήνιο, απόδοση μετατροπής 1%)
<b>1918</b>	Κατασκευή μονο-κρύσταλλο πυρίτιο (Czochralski, Πολωνία)
<b>1932</b>	Ανακάλυψη φαινομένου στο υλικό Cadmium Telluride (CdTe)
<b>1941</b>	Πρώτο ΦΒ κύτταρο πυριτίου
<b>1951</b>	Πρώτο ΦΒ κύτταρο γερμανίου
<b>1954</b>	Απόδοση μετατροπής 6%
<b>1955</b>	Πρώτη βιομηχανική παραγωγή
<b>1958</b>	Πρώτος δορυφόρος με ΦΒ κύτταρα
<b>1963</b>	Πρώτη ΦΒ μονάδα
<b>1970</b>	Έναρξη εποχής ΦΒ
<b>1981</b>	Πρώτο αεροπλάνο με ΦΒ
<b>1982</b>	Έναρξη χρήσης ΦΒ ενέργειας στα αυτοκίνητα PV
<b>1984</b>	Πρώτο ΦΒ λεπτού υμενίου
<b>1985</b>	Απόδοση μετατροπής 20%
<b>1986</b>	Πρώτη βιομηχανική παραγωγή ΦΒ λεπτού υμενίου
<b>1990s</b>	Μεγάλη αύξηση βιομηχανικής παραγωγής
<b>2001</b>	Πειραματικό αεροπλάνο HELIOS που κινείται όλο με ΦΒ ενέργεια , φτάνει σε ύψος 30 km

# Κόστος Φωτοβολταϊκών (τιμές 2010)

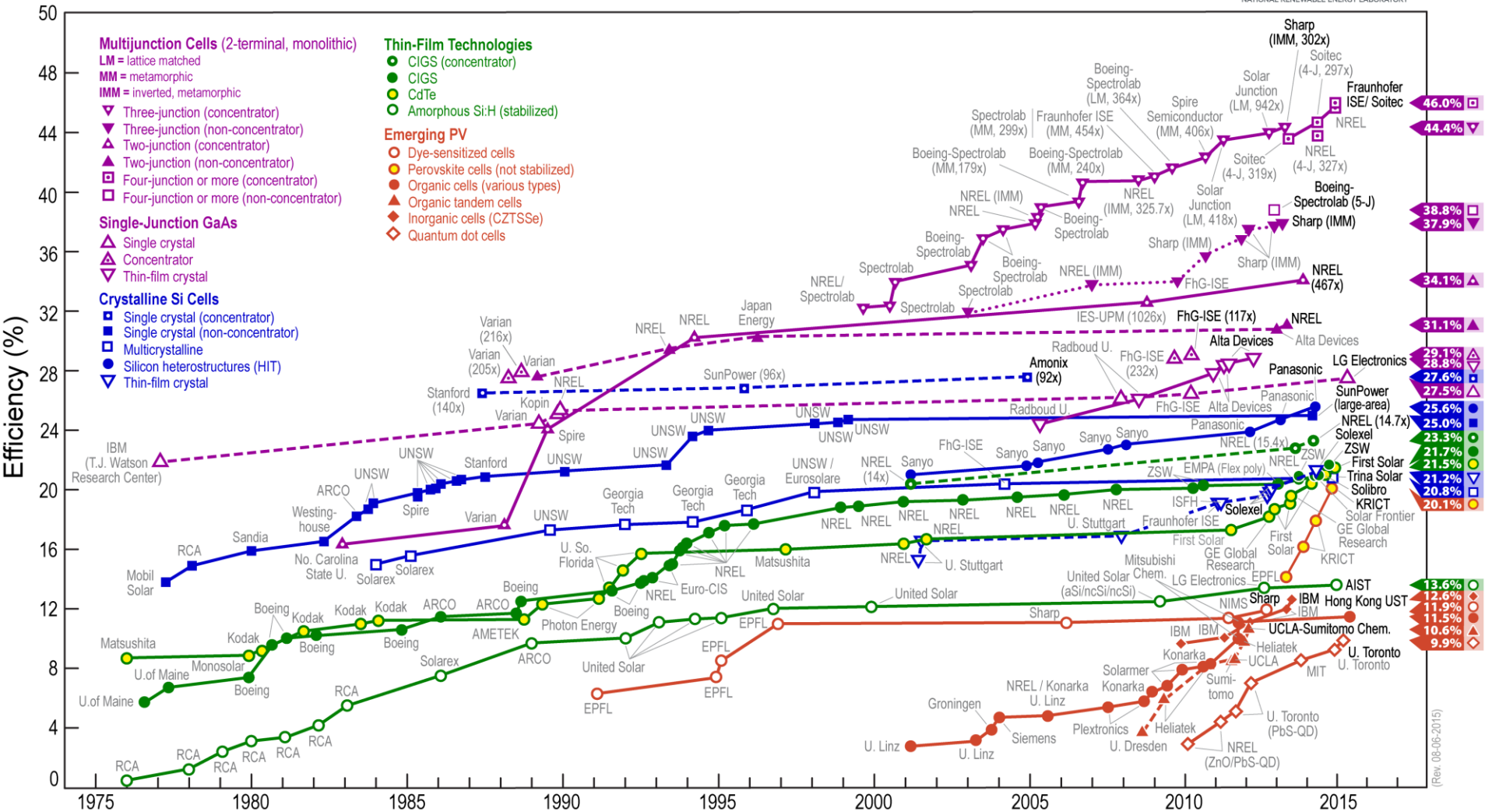
Εκτός Δικτύου	100 - 500 Wp 1 - 4 kWp	10 - 15 €/Wp 8 - 12 €/Wp σε ανεπτυγμένες χώρες 15 - 30 €/Wp παγκοσμίως
Εντός Δικτύου	1 - 4 kWp 10 - 50 kWp > 50 kWp	3.5 - 5 €/Wp 3.5 - 5 €/Wp 1.5 - 3 €/Wp



"Swansons-law" by Delphi234 - Licensed under CC0 via Commons - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Swansons-law.png#/media/File:Swansons-law.png>

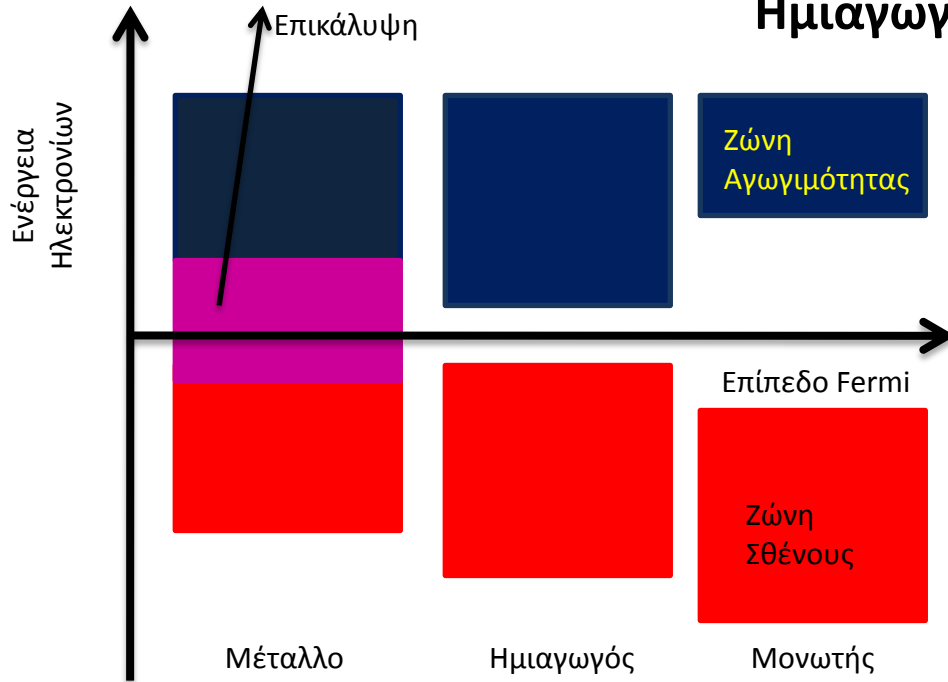


# Best Research-Cell Efficiencies

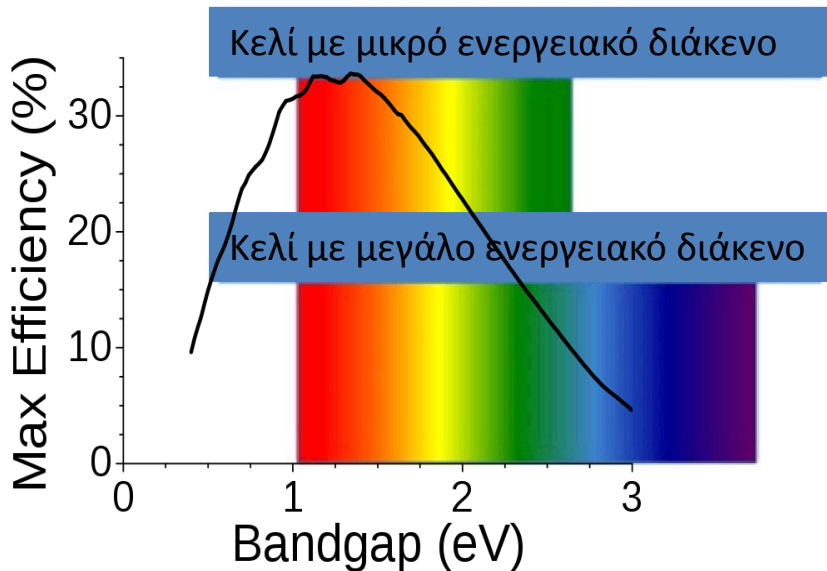
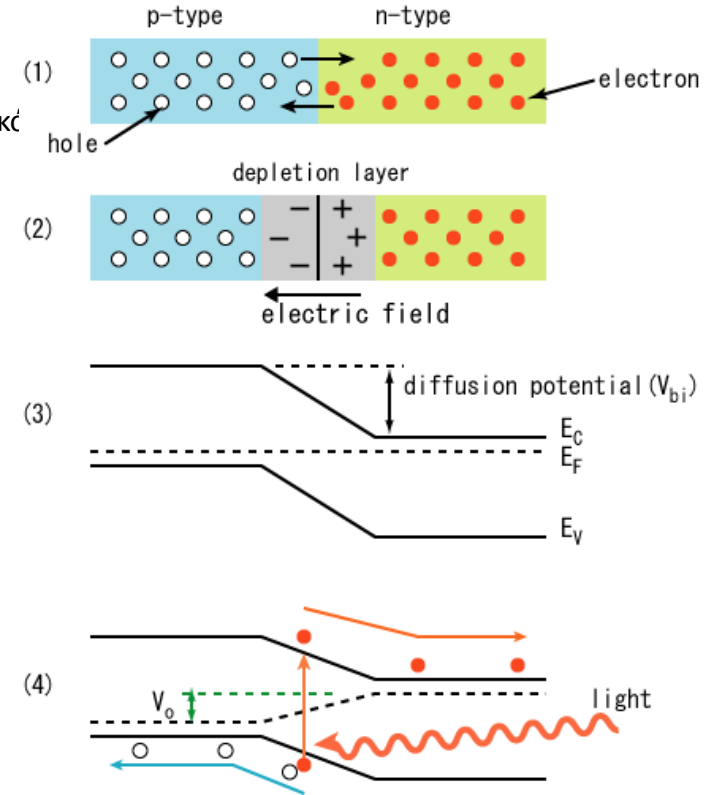


PVeff(rev150806)" by Sarah Kurtz and Keith Emery - National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO. Licensed under Public Domain via Commons - [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PVeff\(rev150806\).jpg#/media/File:PVeff\(rev150806\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PVeff(rev150806).jpg#/media/File:PVeff(rev150806).jpg)

# Ημιαγωγοί

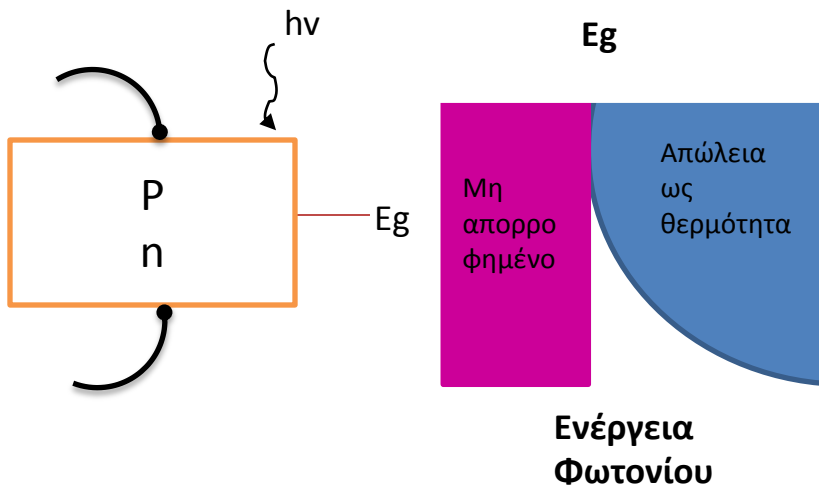


## Η επαφή p-n

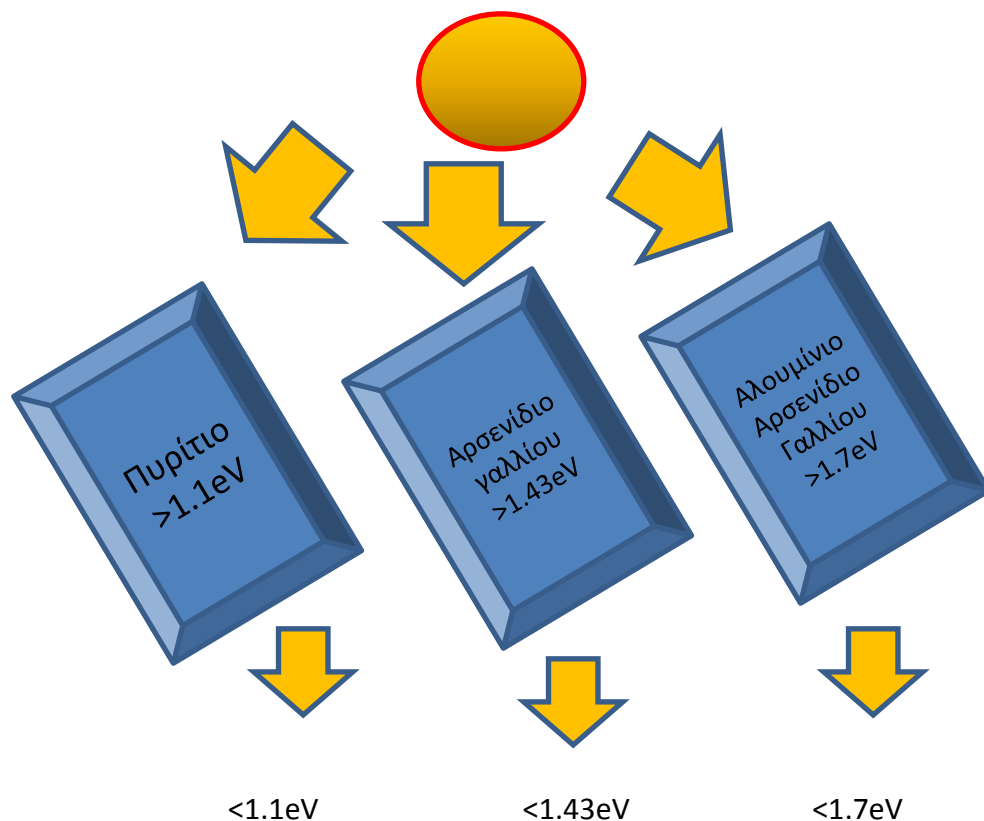


"PnJunction-PV-E". Licensed under Public Domain via Wikimedia Commons - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PnJunction-PV-E.PNG#/media/File:PnJunction-PV-E.PNG>

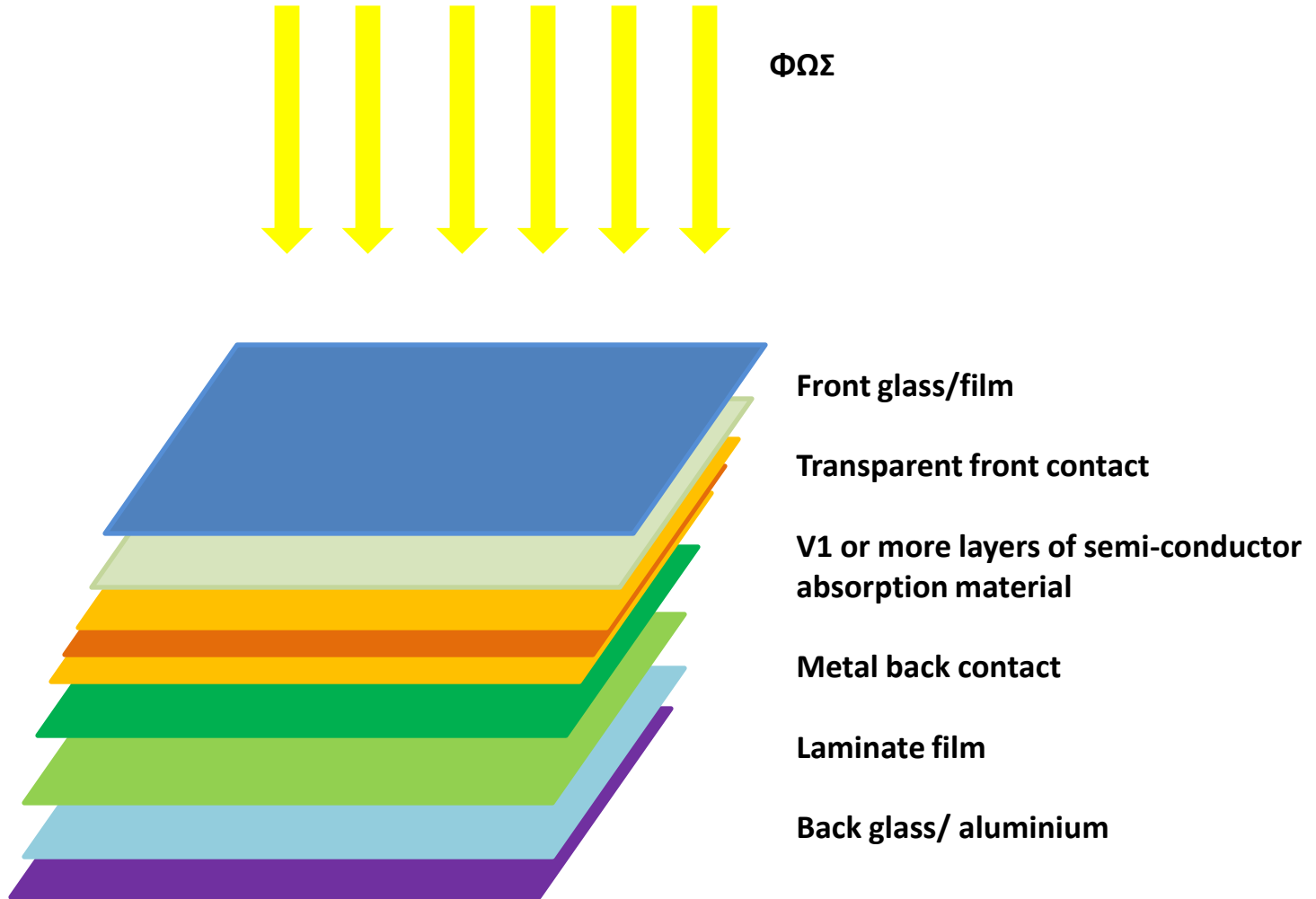
# Απόδοση φωτομετατροπής



Ιδεατή απόδοση  $\Phi/B$  για φωτόνια ενέργειας ( $h\nu$ ) ίσης με της διαφορά ενεργειών μεταξύ μη-αγώγιμων και αγώγιμων καταστάσεων ( $E_g = E_{\text{ζώνη αγωγιμότητας}} - E_{\text{ζώνη σθένους}}$ )



# Φωτοβολταϊκό



## Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από διάφορα υλικά ημιαγωγού. Οι ημιαγωγοί είναι ηλεκτρικά αγώγιμοι όταν τροφοδοτούνται με φως ή θερμότητα, αλλά λειτουργούν ως μονωτές σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ημιαγωγοί είναι τα στοιχεία Si και Ge της ομάδα IV του περιοδικού συστήματος, ενώσεις των στοιχείων των ομάδων III και V (GaAs, InP) και ενώσεις στοιχείων των ομάδων II και VI (ZnS).

Πάνω από το 95% του συνόλου των ηλιακών κυψελών παγκοσμίως αποτελούνται από το ημιαγώγιμο υλικό του πυριτίου (Si) (ενεργειακό διάκενο 1.1 eV). Το πυρίτιο είναι διαθέσιμο σε μεγάλες ποσότητες και η επιπλέον επεξεργασία του υλικού δεν επιβαρύνει το περιβάλλον.

Για την παραγωγή των ηλιακών κυττάρων, τρισθενή χημικά στοιχεία όπως βόριο, ίνδιο, γάλιο, αλουμίνιο ή πεντασθενή όπως φώσφορος, αρσενικό, αντιμόνιο κλπ, εισάγονται στον ημιαγωγό ως προσμίξεις και δημιουργείται είτε πλεόνασμα θετικά φορτισμένων φορέων (ημιαγωγός τύπου-p) ή αρνητικά φορτισμένων φορέων (ημιαγωγός τύπου-n). Ο εμπλουτισμός αυτός επιδρά σημαντικά στις ηλεκτρικές ιδιότητες ενός ημιαγωγού αφού για παράδειγμα, η προσθήκη βορίου στο πυρίτιο σε αναλογία ένα άτομο βορίου σε  $10^5$  άτομα πυριτίου αυξάνει την αγωγιμότητα του καθαρού πυριτίου κατά παράγοντα 1000 σε θερμοκρασία δωματίου

Αν συνδυαστούν δύο διαφορετικά εμπλουτισμένα επίπεδα ημιαγωγών δημιουργείται η επαφή p-n. Στην πλευρά p της επαφής υπάρχουν ελεύθερες οπές και μια ίση συγκέντρωση των αρνητικά ιονισμένων δεκτών των ατόμων προσμίξεως που διατηρούν την ουδετερότητα του φορτίου.

Στην πλευρά n της επαφής βρίσκονται ελεύθερα ηλεκτρόνια και ίσος αριθμός ιονισμένων δοτών των ατόμων προσμίξεως. Έτσι η πλειονότητα των φορέων είναι οπές στην πλευρά p και ηλεκτρόνια στην πλευρά n. Οι οπές της πλευράς p φαίνονται να διαχέονται για να συμπληρώσουν τον κρύσταλλο ομοιόμορφα ενώ τα ηλεκτρόνια φαίνονται να διαχέονται από την πλευρά n αντίστοιχα.

Καθώς όμως διαταράσσεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα με την έναρξη της διάχυσης, δημιουργείται πλεόνασμα αρνητικά ιονισμένων ατόμων δεκτών στην πλευρά p και θετικά ιονισμένων δοτών στην πλευρά n.

Το διπλό στρώμα φορτίου δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή p-n με διεύθυνση αντίθετη της διάχυσης των φορέων έτσι ώστε να σταματά η περαιτέρω διάχυση των φορέων. Στην περίπτωση πρόσπτωσης φωτός στην επαφή p-n, τα φωτόνια που θα απορροφηθούν θα δημιουργήσουν ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών.

Ο ρυθμός δημιουργίας ζευγών ηλεκτρονίων-οπών, εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας και τον συντελεστή απορρόφησης του ημιαγωγού. Οι δημιουργημένοι φορείς, εφόσον δεν επανασυνδεθούν, θα δεχτούν την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου και θα κινηθούν προς την αντίθετη κατεύθυνση δημιουργώντας διαφορά δυναμικού στις δύο άλλες άκρες της επαφής p-n.

Η εμφάνιση της τάσης κατά μήκος της ακτινοβολούμενης επαφής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει ισχύ σε ένα εξωτερικό κύκλωμα, μετατρέποντας τελικά την ενέργεια των ηλιακών φωτονίων σε ηλεκτρική ενέργεια.

Με τον τρόπο αυτό μειώνεται το εσωτερικό δυναμικό της επαφής  $V_{bi}$  σε  $V_{bi}-V_{oc}$  όπου  $V_{oc}$  (open circuit) είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος.

## Φωτορεύμα

Εάν βραχυκυκλωθούν οι επαφές  $p$  και  $n$  του φωτοβολταϊκού στοιχείου τη στιγμή που δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, η εξωτερική αντίσταση είναι μηδέν και το κύκλωμα διαρρέεται από το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  (short circuit), το οποίο μπορεί να μετρηθεί με ένα αμπερόμετρο. Εάν φωτιστεί εντονότερα το φωτοβολταϊκό στοιχείο, το ρεύμα βραχυκύκλωσης θα αυξηθεί. Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ( $I$ - $V$ ) ενός  $\Phi/B$  ως ιδεατή δίοδος στο σκοτάδι δίνεται ως:

$$I = I_0 [\exp(qV/KT) - 1]$$

όπου  $I$  είναι η εξωτερική ροή ρεύματος,  $I_0$  είναι το ανάστροφο ρεύμα κόρου,  $q$  το ηλεκτρονιακό φορτίο των  $1.602 \times 10^{-19}$  Cb,  $V$  είναι η τάση στα άκρα της διόδου,  $K$  η σταθερά του Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K) και  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία. Για μη-ιδεατή δίοδος μπορούμε να εισάγουμε τον συντελεστή ιδεατότητας  $m$  στον παρανομαστή του εκθετικού με τιμές μεγαλύτερες της μονάδος.

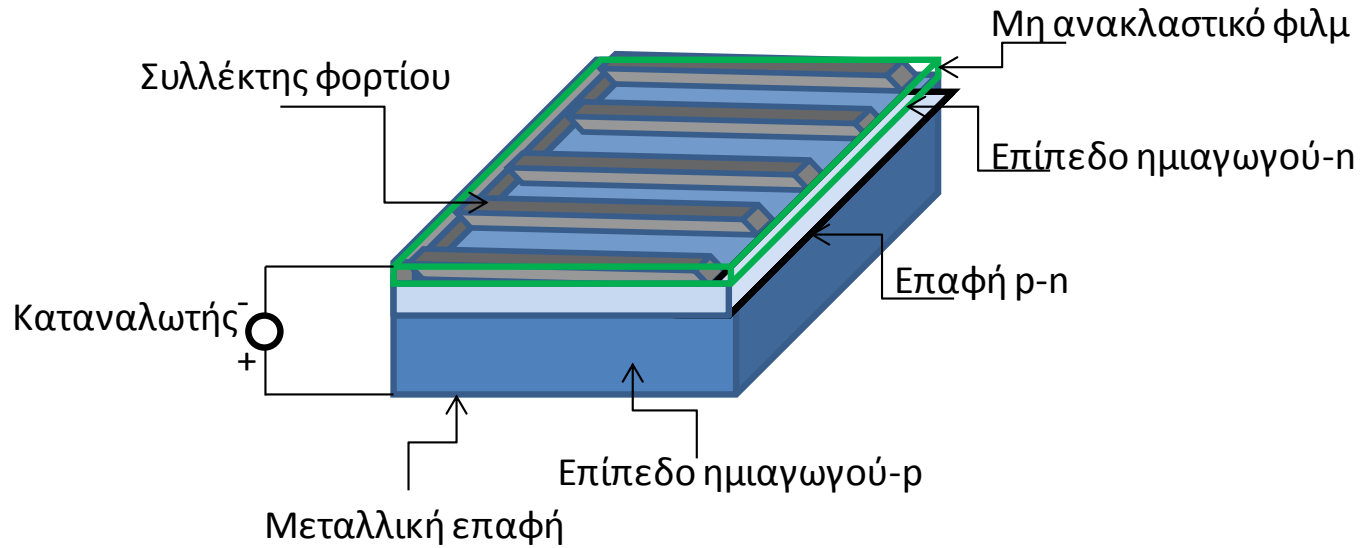


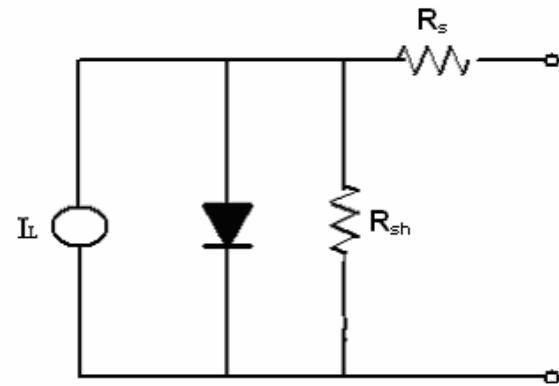
Ένα μη-ιδεατό ηλιακό κύτταρο μπορεί να περιγραφεί από το μοντέλο ισοδύναμου κυκλώματος αποτελούμενο από μια μη-ιδεατή δίοδος που αντιπροσωπεύει την επαφή p-n συνεζευγμένη με πηγή φωτορεύματος  $I_L$  που αντιπροσωπεύει τη συλλογή των φορέων ρεύματος που δημιουργεί το φως και την παράλληλη αντίσταση  $R_{sh}$  και τη σειριακή  $R_s$ . Για πολυχρωματική ακτινοβολία, το συνολικό φωτορεύμα  $I_L$  ενός στοιχείου δίνεται από τη σχέση:

$$I_L = q \int_0^{\lambda_n} S(\lambda) \Phi(\lambda) d\lambda$$

όπου  $S(\lambda)$  είναι η φασματική απόκριση (ή κβαντική απόδοση όταν η σχέση ολοκληρωθεί ως προς την ενέργεια των φωτονίων αντί των μηκών κύματος) ή το πλήθος των φορέων που συλλέγονται στα ηλεκτρόδια του φωτοβολταϊκού στοιχείου σε σχέση με τη ροή φωτονίων  $\Phi$  για ακτινοβολία μήκους κύματος  $\lambda$ . Η φασματική απόκριση εξαρτάται από το συντελεστή απορρόφησης του φωτοβολταϊκού υλικού, την απόδοση του διαχωρισμού του φορτίου και την απόδοση της συλλογής του φορτίου αλλά όχι από την εισερχόμενη ακτινοβολία.

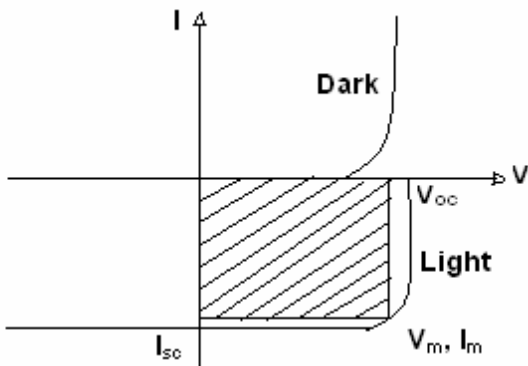
# Φωτοβολταϊκό κύτταρο ένωσης ημιαγωγών p-n





Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου

Η σειριακή αντίσταση εμποδίζει την κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό (χαμηλή αγωγιμότητα παραθύρου ή απορροφητή, μη-ωμικές επαφές, επανασύνδεση φορέων) ενώ η παράλληλη εμφανίζεται λόγω διαρροών ρεύματος προς την αντίθετη κατεύθυνση της διόδου.



Το φωτορεύμα ως συνάρτησης της τάσης διόδου

Με την πρόσπτωση του φωτός η χαρακτηριστική καμπύλη I-V μετατοπίζεται προς τα κάτω λόγω του ρεύματος  $I_L$  που δημιουργεί το φως.

Η θεωρητική συμπεριφορά του ρεύματος αποδίδεται από την εξίσωση:

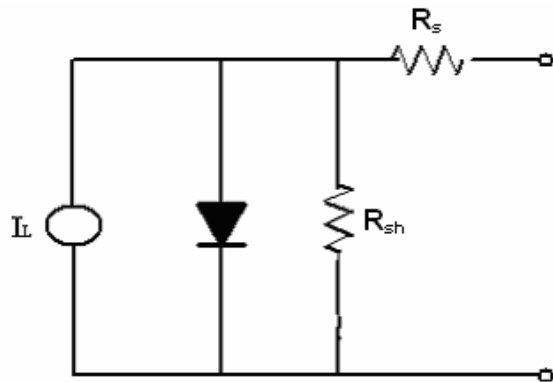
$$I = I_0 [\exp(qV/KT) - 1] - I_L$$

Εάν εφαρμοστεί η παραπάνω εξίσωση για ανοικτό κύκλωμα άπειρου εξωτερικού καταναλωτή ( $I_L = 0$ ), μπορεί να προσδιοριστεί η τάση ανοικτού κυκλώματος ως

$$V_{oc} = KT/q \ln (I/I_0 + 1)$$

Ο λόγος  $KT/q$  σε θερμοκρασία δωματίου 300 K παίρνει τη τιμή 0.026 V. Στη πραγματικότητα, το ρεύμα  $I$  είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από το ανάστροφο ρεύμα κόρου  $I_0$ . Για το λόγο αυτό, η τάση ανοικτού κυκλώματος είναι πολλαπλάσιο της ποσότητας  $KT/q$ .

Στην περίπτωση που θεωρήσουμε τις εσωτερικές αντιστάσεις  $R_s$  και  $R_{sh}$ , το ρεύμα που θα είναι διαθέσιμο σε κάποιον καταναλωτή  $R$ , υπό τάση εξόδου  $V$ , θα δίνεται από τη σχέση:



$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V + IR_s)}{mKT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

Η αντίσταση  $R_s$  του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι πολύ μικρή (0.2 mΩ/cm<sup>2</sup>).

## Ροή Ακτινοβολίας

**Ροή ακτινοβολίας** είναι ρυθμός  $\Phi = dq/dt$  με τον οποίο μεταφέρεται η ενέργεια και μετριέται σε  $W$

**Πυκνότητα ροής** είναι η ροή της ακτινοβολίας ανά μονάδα διατομής  $D = d\phi/dA$  και μετριέται σε  $W/m^2$

**Ένταση ακτινοβολίας** είναι η ροή της ακτινοβολίας  $E = d\phi/ds$  που δέχεται η μονάδα του εμβαδού της επιφάνειας

Για κάθετη πρόσπτωση η  $E$  έχει την ίδια τιμή με τη  $D$  που αναφέρεται στο ίδιο σημείο του χώρου

Στην περίπτωση πλάγιας πρόσπτωσης  $E = D \cos\theta$ , όπου  $\theta$  η γωνία που σχηματίζει η προσπίπτουσα δέσμη με την κάθετη στην επιφάνεια

**Ένταση της ακτινοβολίας** είναι η ροή  $I = d\phi/d\omega$  που αντιστοιχεί στη μονάδα στερεάς γωνίας  $\omega$  και μετριέται σε  $W/Sr$

## Πυκνότητα ροής ακτινοβολίας (ή ένταση ακτινοβολίας για κάθετη πρόσπτωση ή φωτισμός)

Η εξάρτηση του φωτισμού  $E$  ή της πυκνότητας ροής  $D$  από την απόσταση  $r$  από μία σημειακή φωτεινή πηγή έντασης  $I$  διέπεται από το **νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου** ή **νόμο της απόστασης**.

$$E=I/r^2$$

λογαριθμίζοντας και τα δύο μέλη, προκύπτει η γραμμική σχέση:

$$\text{Log}(E)=-2\text{Log}(r) + \text{Log}(I)$$

Για μη σημειακή πηγή, ο εκθέτης του 2 μειώνεται και παίρνει την τιμή μηδέν για κατευθυντική δέσμη Laser.

Η πυκνότητα της ροής ακτινοβολίας μπορεί να μετρηθεί στο εργαστήριο με τον μετρητή ισχύος ακτινοβολίας Rotronics Roline TES-1333.

## Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και P-V

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορούν να αναπαρασταθούν από την καμπύλη I-V.

Οι συνθήκες λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι η έξοδος τάσης από την τιμή 0 έως την τιμή  $V_{oc}$ . Η ισχύς του δίνεται από τη σχέση

$$P = I V$$

Η ισχύς παίρνει τη μέγιστη τιμή στο σημείο μέγιστης λειτουργίας M. Στο σημείο αυτό M, η ένταση παίρνει την τιμή  $I_m$  και η τάση την τιμή  $V_m$ . Ο συντελεστής πλήρωσης (fill factor) ορίζεται ως ο λόγος

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$$

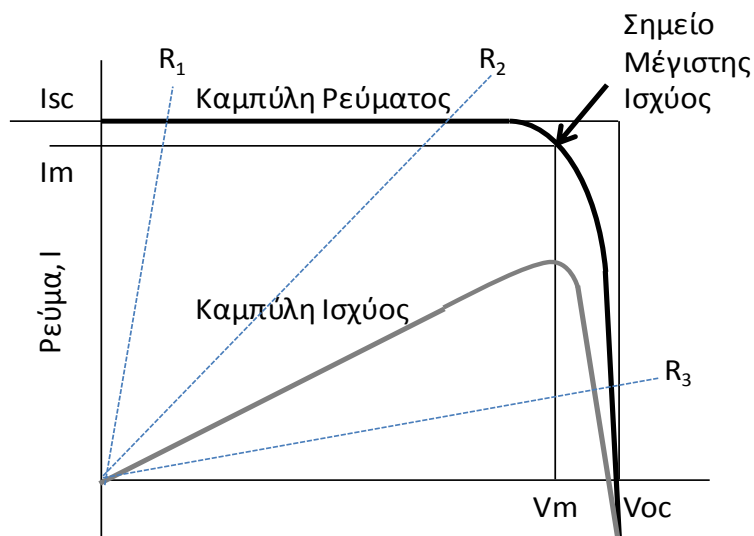
Χαρακτηριστικές καμπύλες Φ/B στοιχείου για  
διαφορετική ακτινοβολία

Η απόδοση  $\eta$  μιας ηλιακής κυψέλης για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου ως προς την προσπίπτουσα φωτεινή ισχύ στο ΦΒ

$$\eta = \frac{P_m}{H \cdot A} = \frac{I_m \cdot V_m}{H \cdot A}$$

όπου  $H$  είναι η πυκνότητα ροής της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του Φ/Β στοιχείου ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) και  $A$  το εμβαδόν της επιφάνειας του ΦΒ. Αύξηση της απόδοσης οδηγεί σε μεγαλύτερη ισχύ εξόδου για σταθερή ακτινοβολία.

Οι ποσότητες  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $FF$  και  $\eta$  είναι χαρακτηριστικές για κάθε ηλιακή κυψέλη και προσδιορίζονται συνήθως σε συνθήκες ηλιακού φάσματος AM 1.5, εισερχόμενη πυκνότητα ισχύος  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$  και θερμοκρασία  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Χαρακτηριστικές παράμετροι  
Φ/Β στοιχείου στις καμπύλες  
I-V και P-V



Χαρακτηριστικές τιμές λειτουργίας μερικών ηλιακών κυψελών (M.A. Green, Photovoltaics: Coming of age, Conf. Record 21<sup>st</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 1-7 (1990)).

Είδος Κυψέλης	Επιφάνεια (cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	Efficiency (%)
Κρυσταλλικό Si	4.0	0.706	42.2	82.8	24.7
Κρυσταλλικό GaAs	3.9	1.022	28.2	87.1	25.1
πολύ-Si	1.1	0.654	38.1	79.5	19.8
α-Si	1.0	0.887	19.4	74.1	12.7
CuInGaSe <sub>2</sub>	1.0	0.669	35.7	77.0	18.4
CdTe	1.1	0.848	25.9	74.5	16.4

Υλικά ηλιακών κυψελών με υψηλότερες πυκνότητες ρεύματος παρουσιάζουν χαμηλότερες τάσεις Voc

Το μήκος διάχυσης των φορέων είναι της τάξης των 150  $\mu\text{m}$  με μέσο χρόνο ζωής πριν από επανασύνδεσης στα 20  $\mu\text{s}$

Το πάχος των ηλιακών κυψελών mSi είναι κοντά στα 0.3 mm με καλύτερη σχέση απόδοσης/επιφάνειας

Οι κυψέλες mcSi έχουν επίσης το ίδιο πάχος αλλά μικρότερο κόστος λόγω της απλούστερης παραγωγής τους

Η μέγιστη απόδοση των ηλιακών στοιχείων Si μπορεί να φθάσει κοντά στο 25%.

Στις πρακτικές εφαρμογές τα ηλιακά στοιχεία mSi ή mcSi μεγάλης επιφάνειας έχουν απόδοση περίπου 10-12% ή λίγο μεγαλύτερη.

Table I. Confirmed terrestrial cell and submodule efficiencies measured under the global AM1.5 spectrum (1000 W/m<sup>2</sup>) at 25°C (IEC 60904-3: 2008, ASTM G-173-03 global)

Classification <sup>a</sup>	Effic. <sup>b</sup> (%)	Area <sup>c</sup> (cm <sup>2</sup> )	V <sub>oc</sub> (V)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF <sup>d</sup> (%)	Test centre <sup>e</sup> (and date)	Description
<b>Silicon</b>							
Si (crystalline)	<b>25.0 ± 0.5</b>	4.00 (da)	0.705	<b>42.7</b>	82.8	Sandia (3/99) <sup>f</sup>	UNSW PERL <sup>12</sup>
Si (multicrystalline)	<b>20.4 ± 0.5</b>	1.002 (ap)	0.664	<b>38.0</b>	80.9	NREL (5/04) <sup>f</sup>	FhG-ISE <sup>13</sup>
Si (thin film transfer)	<b>16.7 ± 0.4</b>	4.017 (ap)	0.645	<b>33.0</b>	78.2	FhG-ISE (7/01) <sup>f</sup>	U. Stuttgart (45 μm thick) <sup>14</sup>
Si (thin film submodule)	<b>10.5 ± 0.3</b>	94.0 (ap)	0.492 <sup>g</sup>	<b>29.7<sup>g</sup></b>	72.1	FhG-ISE (8/07) <sup>f</sup>	CSG Solar (1-2 μm on glass; 20 cells) <sup>15</sup>
<b>III-V cells</b>							
GaAs (crystalline)	<b>26.1 ± 0.8</b>	0.998 (ap)	1.038	<b>29.7</b>	84.7	FhG-ISE (12/07) <sup>f</sup>	Radboud U. Nijmegen <sup>6</sup>
<b>GaAs (thin film)</b>	<b>26.1 ± 0.8</b>	<b>1.001 (ap)</b>	<b>1.045</b>	<b>29.5</b>	<b>84.6</b>	<b>FhG-ISE (07/08)<sup>f</sup></b>	<b>Radboud U. Nijmegen<sup>6</sup></b>
GaAs (multicrystalline)	<b>18.4 ± 0.5</b>	4.011 (t)	0.994	<b>23.2</b>	79.7	NREL (11/95) <sup>f</sup>	RTI, Ge substrate <sup>16</sup>
InP (crystalline)	<b>22.1 ± 0.7</b>	4.02 (t)	0.878	<b>29.5</b>	85.4	NREL (4/90) <sup>f</sup>	Spire, epitaxial <sup>17</sup>
<b>Thin film chalcogenide</b>							
CIGS (cell)	<b>19.4 ± 0.6<sup>h</sup></b>	0.994 (ap)	0.716	<b>33.7</b>	80.3	NREL (1/08) <sup>f</sup>	NREL, CIGS on glass <sup>18</sup>
CIGS (submodule)	<b>16.7 ± 0.4</b>	16.0 (ap)	0.661 <sup>g</sup>	<b>33.6<sup>g</sup></b>	75.1	FhG-ISE (3/00) <sup>f</sup>	U. Uppsala, 4 serial cells <sup>19</sup>
CdTe (cell)	<b>16.7 ± 0.5<sup>h</sup></b>	1.032 (ap)	0.845	<b>26.1</b>	75.5	NREL (9/01) <sup>f</sup>	NREL, mesa on glass <sup>20</sup>
<b>Amorphous/nanocrystalline Si</b>							
Si (amorphous)	9.5 ± 0.3 <sup>i</sup>	1.070 (ap)	0.859	17.5	63.0	NREL (4/03) <sup>f</sup>	U. Neuchatel <sup>21</sup>
Si (nanocrystalline)	10.1 ± 0.2 <sup>j</sup>	1.199 (ap)	0.539	24.4	76.6	JQA (12/97)	Kaneka (2 μm on glass) <sup>22</sup>
<b>Photochemical</b>							
Dye sensitised	10.4 ± 0.3 <sup>k</sup>	1.004 (ap)	0.729	<b>22.0</b>	65.2	AIST (8/05) <sup>f</sup>	Sharp <sup>23</sup>
Dye sensitised (submodule)	8.2 ± 0.3 <sup>k</sup>	25.45 (ap)	<b>0.705<sup>g</sup></b>	<b>19.1<sup>g</sup></b>	61.1	AIST (12/07) <sup>f</sup>	Sharp, 9 serial cells <sup>24</sup>
Dye sensitised (submodule)	8.2 ± 0.3 <sup>k</sup>	18.50	0.659 <sup>g</sup>	<b>19.9<sup>g</sup></b>	62.9	AIST (6/08) <sup>f</sup>	Sony, 8 serial cells <sup>25</sup>
<b>Organic</b>							
Organic polymer	5.15 ± 0.3 <sup>k</sup>	1.021 (ap)	0.876	<b>9.39</b>	62.5	NREL (12/06) <sup>f</sup>	Konarka <sup>26</sup>
Organic (submodule)	1.1 ± 0.3 <sup>k</sup>	232.8 (ap)	29.3	0.072	51.2	NREL (3/08) <sup>f</sup>	Plextronics (P3HT/PCBM) <sup>27</sup>
<b>Multijunction devices</b>							
GaInP/GaAs/Ge	32.0 ± 1.5 <sup>j</sup>	3.989 (t)	2.622	14.37	85.0	NREL (1/03)	Spectrolab (monolithic)
GaInP/GaAs	30.3 <sup>j</sup>	4.0 (t)	2.488	14.22	85.6	JQA (4/96)	Japan Energy (monolithic) <sup>28</sup>
GaAs/CIS (thin film)	25.8 ± 1.3 <sup>j</sup>	4.00 (t)	—	—	—	NREL (11/89)	Kopin/Boeing (4 terminal) <sup>29</sup>
a-Si/μc-Si (thin submodule) <sup>j,l</sup>	11.7 ± 0.4 <sup>il</sup>	14.23 (ap)	5.462	2.99	71.3	AIST (9/04)	Kaneka (thin film) <sup>30</sup>

## Κύριες τεχνολογίες κατασκευής Φ/Β:

- Τεχνολογία παραγωγής ημιαγωγών
- Τεχνολογία λεπτών υμενίων (thin film)
- Η ανάπτυξη λιγότερο ενεργοβόρων τεχνολογιών (μέθοδος EFG και μέθοδος String) στην παραγωγή του καθαρού πυριτίου για τη μείωση των απωλειών οδηγεί σε αύξηση του κόστους

Οι κρύσταλλοι και τα λεπτά φιλμ διαφέρουν στην απόδοση απορρόφησης του φωτός, στην απόδοση μετατροπής, στην τεχνολογία κατασκευής και τελικά, στο κόστος κατασκευής.

## Κρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα πυριτίου

Το Si είναι ημιαγωγός με ενεργειακό χάσμα 1.1 eV

Έχει επικρατήσει ως υλικό κατασκευής λόγω της αφθονίας του και των οπτικών ημιαγωγίμων του ιδιοτήτων

Παρασκευάζεται με σημαντική καθαρότητα, ελεύθερο από ανεπιθύμητες προσμίξεις και με καλό κρυσταλλικό πλέγμα

Η λειτουργία του είναι αξιόπιστη σε πλήθος εφαρμογών (και έντονων συνθηκών όπως το διάστημα) και με μεγάλη διάρκεια

Ως το πιο άφθονο στοιχείο στην επιφάνεια του εδάφους, μπορεί να απομονωθεί σε αποκεντρωμένες περιοχές και να επεξεργαστεί για την τροποποίησή του σε ημιαγωγίμο υλικό ΦΒ

## Μονοκρυσταλλικό Πυρίτιο (mSi)

Το mSi έχει βαθμό απόδοσης που σε πραγματικές μπορούν να φτάσουν τιμές ως και 18%

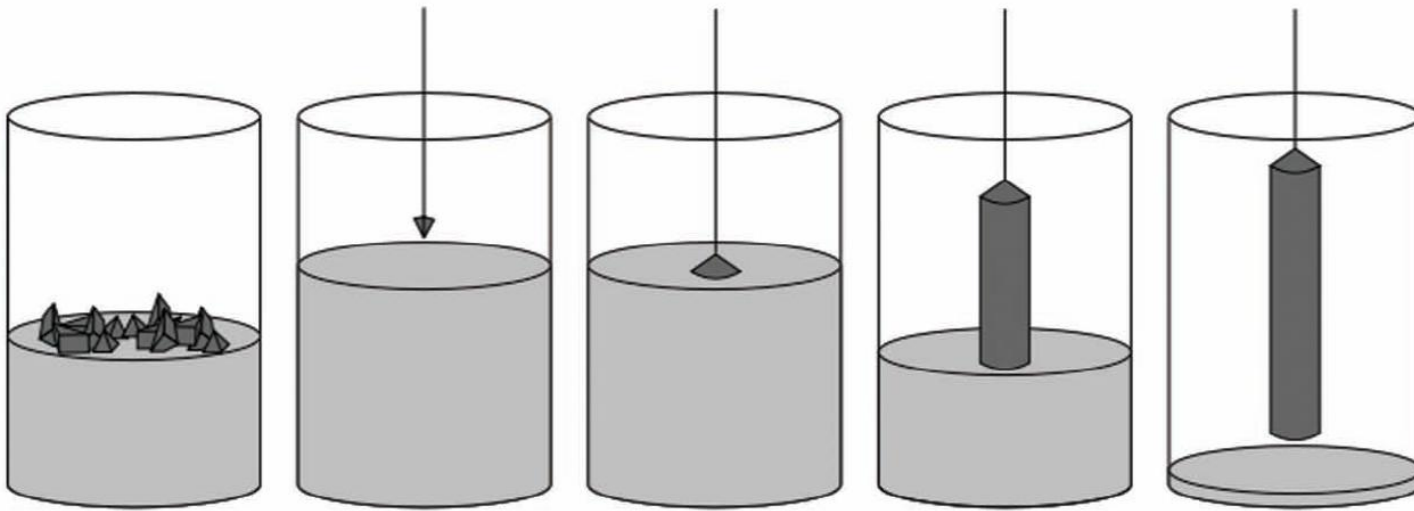
Για την παρασκευή του, το διοξείδιο του πυριτίου θερμαίνεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες για την αφαίρεση των προσμίξεων

Με περαιτέρω επεξεργασία επιτυγχάνεται υψηλή καθαρότητα με σχεδόν τα΄΄ελλια κρυσταλλική δομή

Η παρασκευή των πεπερασμένων κυψελών γίνεται με την μέθοδο Czochranski στην οποία το υλικό τήκεται σε υψηλές θερμοκρασίες και κατόπιν ψύχεται με αργή απομάκρυνση

# Ανάπτυξη κρυστάλλου με τη μέθοδο Czochralski

1916, Polish physicist Jan Czochralski



[https://en.wikipedia.org/wiki/Czochralski\\_process](https://en.wikipedia.org/wiki/Czochralski_process)

Σημείο τήξης πυριτίου  $1414^{\circ}\text{C}$

Ρυθμός: 5 cm/ώρα

Τυπικές διαστάσεις:

10-30 cm διάμετρο

1-2 m μήκος

## **Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο (mcSi)**

Το mcSi έχει ανομοιόμορφη κρυσταλλική δομή που οδηγεί σε χαμηλότερο βαθμό απόδοσης από το mSi (<15 %)

Δεν παράγεται με την ενεργοβόρα μέθοδο του Czochranski αλλά με απλή τήξη και τοποθέτηση για στερεόποιηση.

Κατά συνέπεια, η διαδικασία είναι πολύ φθηνότερη του mSi

## **Κρυσταλλικό πυρίτιο λεπτού φιλμ (c-SiTFE)**

Η τεχνολογία του λεπτού φιλμ επιτυγχάνεται με την εναπόθεση πυριτίου κατευθείαν σε γυαλί, κεραμικό ή οποιοδήποτε άλλο κατάλληλο υπόστρωμα. Το πάχος του c-SiTFE είναι από 5 μέχρι 50 μm με σημαντικά μειωμένο κόστος



## **Άμορφο πυρίτιο (a-Si)**

Το a-Si παρουσιάζει ενεργειακό χάσμα μεταξύ 1.12-1.7 eV και έχει υψηλό συντελεστή απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας

Το άμορφο πυρίτιο μπορεί να εναποτεθεί σε διάφορα υποστρώματα με χαμηλότερες θερμοκρασίες και επομένως λιγότερη κατανάλωση ενέργειας

Ο βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος από 10% ενώ μπορεί να μειωθεί περαιτέρω στη λειτουργία του. Λόγω του μη κρυσταλλικού του πλέγματος, η απόδοσή του δεν επηρεάζεται σημαντικά από την αύξηση της θερμοκρασίας.

Η χρήση του συνεχίζει και αυξάνεται λόγω των λεπτών του φιλμ και της ενσωμάτωσής του σε διαφορετικά προϊόντα.

## **Αρσενίδιο Γαλλίου (GaAs)**

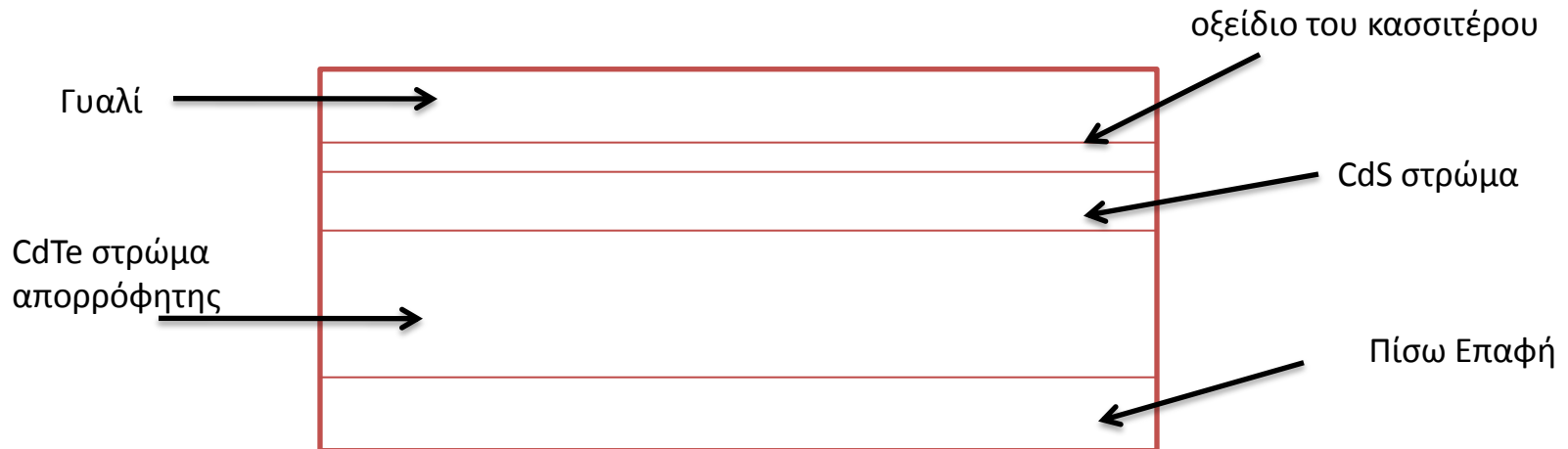
Έχει ενεργειακό χάσμα 1.43 eV και θεωρητική απόδοση μπορεί να φτάσει πολύ υψηλές τιμές και μέχρι 30%. Το GaAs συνδυάζει σημαντικές προϋποθέσεις για να χρησιμοποιηθεί ως υλικό κατασκευής ηλιακών φ/β στοιχείων με βασικό του μειονέκτημα το υψηλό κόστος παραγωγής και τη μικρότερη αφθονία των συστατικών του (με πιθανή περιβαλλοντική επίπτωση) έναντι του Si.

## Δισεληνιούχος Ινδιούχος Χαλκός (CuInSe<sub>2</sub> ή CIS)

Το CIS είναι ημιαγωγικό υλικό, το οποίο μπορεί να είναι τύπου-n ή τύπου-p με τον υψηλότερο συντελεστή απορρόφησης που έχει μετρηθεί μέχρι σήμερα. Έχει ενεργειακό χάσμα 1 eV και παράγεται ως πολυκρυσταλλική μεμβράνη.

## Τελλουριούχο Κάδμιο (CdTe)

Το CdTe παρουσιάζει υψηλό επίπεδο απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας και το ενεργειακό του χάσμα είναι πολύ κοντά στο ιδανικό. Με πάχος ορισμένων μm μπορεί να απορροφήσει μεγάλο τμήμα του ηλιακού φάσματος.



## Κύτταρο του Gratzel - Dye-sensitized solar cell

Το Gratzel Cell είναι σύνθετος ημιαγωγός που αποτελείται από  $\text{TiO}_2$  ή άλλες ενώσεις με παρόμοιες ημιαγωγίμες ιδιότητες ( $\text{ZnO}$ ) και κατάλληλο ηλεκτρολύτη.

Στην επιφάνεια του ημιαγωγού εναποτίθεται στρώμα χρωστικής, τα ηλεκτρόνια της οποίας διεγείρονται στη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού με την πρόσπτωση φωτός.

Η χρωστική επανέρχεται στην βασική κατάσταση με την προσφορά ενός ηλεκτρονίου από τον ηλεκτρολύτη. Ο τελευταίος αποτελείται συνήθως από έναν οργανικό διαλύτη που περιέχει κάποιο οξειδοαναγωγικό σύστημα όπως το ζεύγος  $\text{I}^-/\text{I}_3^-$ .

Η αναγέννηση της χρωστικής γίνεται από το ιωδίδιο το οποίο δρα και ως εμπόδιο νέας σύλληψης του ηλεκτρονίου από τη χρωστική. Επαναδημιουργείται στο αντιηλεκτρόδιο και το κύκλωμα κλείνει με τη μεταφορά του ηλεκτρονίου στο εξωτερικό κύκλωμα.

## Διαφορές DSSC και τυπικών ΦΒ

DSSC: διαχωρισμός της απορρόφησης του φωτός και της μεταφοράς των φορτίων σε διαφορετικά υλικά

Τα μόρια της χρωστικής απορροφούν το φως ενώ η μεταφορά των φορτίων γίνεται μέσα στον ημιαγωγό (ηλεκτρόνια) και στον ηλεκτρολύτη (οπές).

Ο διαχωρισμός των φορτίων δεν οφείλεται στην ύπαρξη του ηλεκτρικού πεδίου όπως συμβαίνει στην επαφή p-n.

Η μεταφορά των ηλεκτρονίων γίνεται μέσω του πορώδους ημιαγωγού ενώ οι οπές μέσω του ηλεκτρολύτη.



"Dye.sensitized.solar.cells" by Ronald vera saavedra colombia (bogota)ISE; - Transferred from de.wikipedia to Commons.. Licensed under Public Domain via Commons - <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dye.sensitized.solar.cells.jpg#/media/File:Dye.sensitized.solar.cells.jpg>

# Διαστασιολόγηση ΦΒ

## Ισχύς των ΦΒ

$$P = \eta_g A_g G_\beta$$

$\eta_g$  είναι η απόδοση του φωτοβολταϊκού,

$A_g$  η συνολική επιφάνειά του και

$G_\beta$  είναι η ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο (W/m<sup>2</sup>)

Ολική ηλιακή ακτινοβολία  $G_\beta$  σε κεκλιμένη επιφάνεια κλίσης  $\beta$

$$G_\beta = G_{b,\beta} + G_{r,\beta} + G_{d,\beta}$$

με τις τρεις ωριαίες συνιστώσες της απευθείας, της ανακλώμενης και της διάχυτης ακτινοβολίας.

# Διαστασιολόγηση ΦΒ

## Απόδοση του ΦΒ

$$n_g = n_r n_{pc} n_T$$

$n_r$  είναι η τιμή αναφοράς του κατασκευαστή για την απόδοση του ΦΒ,  
 $n_{pc}$  είναι η ρυθμιζόμενη απόδοση ισχύος (θεωρούμε ότι λειτουργούν στο σημείο μέγιστης απόδοσης με τιμή του συντελεστή 1),  
 $n_T$  ο συντελεστής μείωσης της απόδοσης λόγω αύξησης της θερμοκρασίας,

$$n_T = [1 - \beta(T_c - T_{cref})]$$

$\beta$  ο συντελεστής εξάρτησης της απόδοσης από τη θερμοκρασία,

$T_{cref}$  είναι η θερμοκρασία αναφοράς του ΦΒ

$T_c$  η πραγματική τιμή της θερμοκρασίας στο ΦΒ  $= T_a + (NOCT - 20) * G_{\beta} / 800$ ,

$T_a$  θερμοκρασίας περιβάλλοντος,

NOCT είναι η κανονική θερμοκρασία λειτουργίας του ΦΒ,  $T_{a,NOCT} = 20$  °C και  $G_{\beta}$ ,

$NOCT = 800$  W/m<sup>2</sup> για ταχύτητα ανέμου 1 m/s.

# Διαστασιολόγηση ΦΒ

Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης επιφάνειας φωτοβολταϊκών για την κάλυψη της κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$A = \frac{E_c}{n_r \cdot F \cdot \sum_i G_{\beta,i} \cdot n_{T,i} \cdot t_i}$$

όπου  $E_c$  είναι η ετήσια (μηνιαία ή ημερήσια) κατανάλωση ηλεκτρισμού (kWh/(m or d)),  $G_{\beta,i}$  η ηλιακή ακτινοβολία που μετράται στην επιφάνεια του ΦΒ,  $n_{T,i}$  ο συντελεστής μείωσης της απόδοσης λόγω της θερμοκρασίας,  $t_i$  το χρονικό διάστημα της κάθε μέτρησης της ακτινοβολίας, και  $F$  η παράμετρος απωλειών του αντιστροφέα, καλωδίων, ενώσεων κλπ. που θεωρήθηκε ίση με 0.8. Το άθροισμα γίνεται σε επίπεδο μετρήσεων χρόνου ή μηνός ή ημέρας, ανάλογα με τη θεώρηση τροφοδοσίας του φορτίου.

Εκτίμηση ηλιακού δυναμικού και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒ

Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)

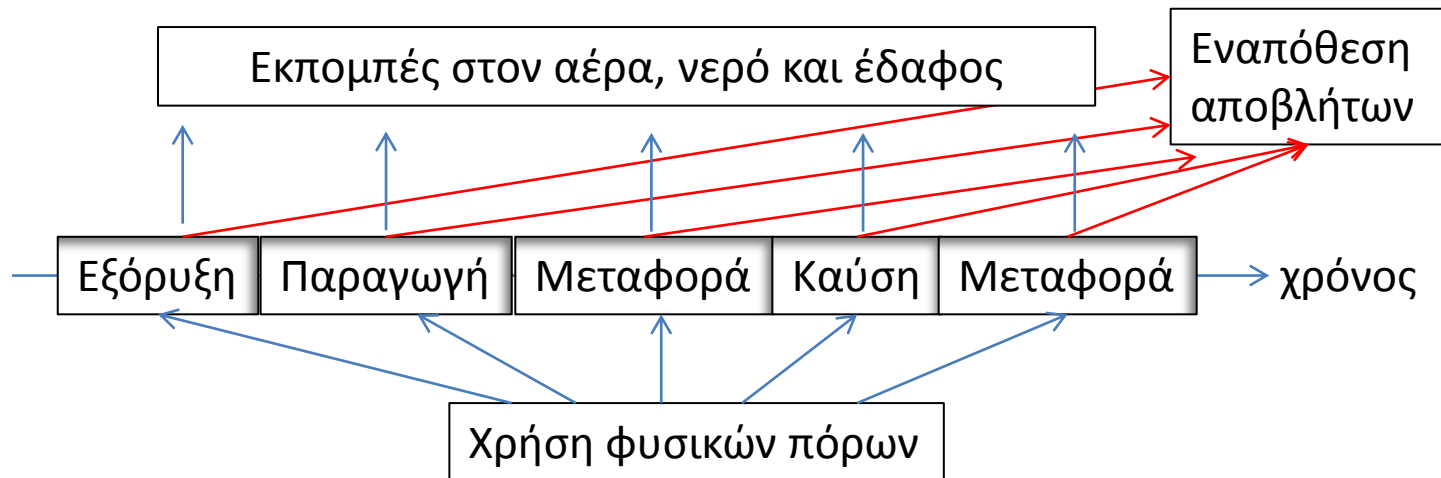
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

The screenshot displays the PVGIS web application interface. At the top, there is a navigation bar with the JRC and CM SAF logos, and the title "Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps". Below this, there is a search bar with a search button and a "Go to lat/lon" button. The main area is a map of Europe with a location marker over the United Kingdom. To the right of the map, there are several configuration options for PV estimation, including "Performance of Grid-connected PV", "Radiation database", "PV technology", "Installed peak PV power", "Estimated system losses", "Fixed mounting position", "Tracking options", and "Output options". The "Calculate" button is visible at the bottom right of the configuration panel.

# Ανάλυση Κύκλου Ζωής ΦΒ

## Τρόποι μελέτης

1. Ενεργειακή ανάλυση χρήσης και απόδοσης σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής του συστήματος
2. Εκπομπές στον αέρα (κυρίως αυτών που συνδέονται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου)
3. Επιπλέον των 2, ανάλυση χρήσης σπάνιων υλικών όπως βαρέα μέταλλα, και δημιουργία επικίνδυνων αποβλήτων



Χρήση ενεργειακών δεδομένων υλικών από βάση: α) Ecoinvent, β) EPLCA



# Ανάλυση Κύκλου Ζωής ΦΒ

## Ενεργειακός χρόνος ανταπόδοσης

περίοδος που απαιτείται το σύστημα να παράγει το ίδιο ποσό ενέργειας (σε όρους πρωτογενούς ισοδύναμης ενέργειας) που απαιτείται για την παραγωγή του ίδιου του συστήματος

$$\text{Energy Payback Time} = (E_{\text{mat}} + E_{\text{manuf}} + E_{\text{trans}} + E_{\text{inst}} + E_{\text{EOL}}) / ((E_{\text{agen}} / n_{\text{G}}) - E_{\text{O\&M}})$$

όπου,

$E_{\text{mat}}$  : Πρωτογενής ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή των υλικών του ΑΠΕ συστήματος

$E_{\text{manuf}}$  : Πρωτογενής ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή του ΑΠΕ συστήματος

$E_{\text{trans}}$  : Πρωτογενής ενέργεια που απαιτείται για τη μεταφορά των υλικών στον κύκλο ζωής

$E_{\text{inst}}$  : Πρωτογενής ενέργεια που απαιτείται για την συναρμολόγηση του ΑΠΕ συστήματος

$E_{\text{EOL}}$  : Πρωτογενής ενέργειας που απαιτείται για τη διαχείριση στο τέλος του κύκλου ζωής

$E_{\text{agen}}$  : Ετήσια παραγωγή ηλεκτρισμού

$E_{\text{O\&M}}$  : Ετήσια πρωτογενής ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία και τη συντήρηση

$n_{\text{G}}$  : Απόδοση δικτύου, η απόδοση μετατροπής της μέσης πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρισμό στην τοποθεσία ενδιαφέροντος

## Αποφυγή έκλυσης CO<sub>2</sub>

$$CO_{2,\text{avoid}} = (CO_{2,\text{conv}} \cdot \frac{E_{\text{del}}}{n_{\text{conv}}} - E_{\text{oper}} \cdot CO_{2,\text{oper}}) \cdot Lifetime_{\text{SYS}} - Embodied CO_{2,\text{SYS}}$$

όπου:

$CO_{2,\text{avoid}}$  = εκπομπές που αποφεύγονται από την αντικατάσταση του συμβατικού συστήματος με το ενεργειακό σύστημα ΑΠΕ (CO<sub>2</sub> ισοδύναμα),

$CO_{2,\text{conv}}$  = ετήσιες εκπομπές του συμβατικού συστήματος ανά kWh που υποκαθιστά το σύστημα ΑΠΕ (CO<sub>2</sub> equivalents/(year, kWh)),

$CO_{2,\text{oper}}$  = ετήσιες εκπομπές της λειτουργίας του ενεργειακού συστήματος ΑΠΕ (CO<sub>2</sub> ισοδύναμα/χρόνο),

Ενσωματωμένη  $CO_{2,\text{SYS}} = CO_2$  εκπομπές στο κύκλο ζωής του συστήματος ΑΠΕ (κατασκευή, συντήρηση, παροπλισμός/ανακύκλωση) (CO<sub>2</sub>-ισοδύναμα)

## Υπολογισμοί εκπομπών CO<sub>2</sub> – NO<sub>x</sub>-SO<sub>x</sub> είτε από Si είτε από CdTe ΦΒ

ΦΒ	mc-Si	m-Si	a-Si	CdTe
Εκπομπές g CO <sub>2</sub> - e/kWh	23-44	29-45	18-50	14-35
Εκπομπές mg NO <sub>x</sub> -e/kWh	58-180	60-185	58-160	40-80
Εκπομπές mg SO <sub>x</sub> -e/kWh	70-350	85-370	70-300	60-150
EPBT (γ)	1.7-6.0	1.7-5.3	1.5-3.5	0.8-2.1

Το ποσοστό εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μειώνεται ανάλογα με το ποσοστό παραγωγής ενέργειας από ΦΒ (από 38 g CO<sub>2</sub>-e/kWh για μικρή συνεισφορά των mc-Si σε 18 g για 100% κάλυψη ηλεκτρισμού από mc-Si)

## Υπολογισμοί εκπομπών Cd από την παραγωγή ενέργειας

	mc-Si	m-Si	a-Si	CdTe	Κάρβουνο	Λιγνίτης	Φυσικό Αέριο	Πετρέλαιο	Πυρηνική	Υδρο
g/GWh	0.8	0.9	0.9	0.3	3.1	6.2	0.2	43.3	0.5	0.03

Δεδομένα από αναφορές των Pengetal./Ren. Sustain. Ener. Rev. 19 (2013) 255–274;

Fthenakis et al., Environ. Sci. Technol. 2008, 42, 2168–2174 , Environment Canada 2009 και άλλων ερευνητών

# Ανακύκλωση ΦΒ

Λόγοι ανακύκλωσης ΦΒ:

- Συσσώρευση παροπλισμένων ΦΒ στο μέλλον
- Επαναχρησιμοποίηση υλικών ημιαγωγών λόγω μείωσης διαθεσιμότητας και υλικών πανέλων
- Απομάκρυνση ειδικών υλικών με περιβαλλοντική επίδραση

Υλικά ανακύκλωσης

Ίνδιο  
Κάδμιο  
Σελήνιο

Αλουμίνιο  
Μολυβδαίνιο

Πάνελ

**Απορρίμματα και υλικά**  
Απορρίμματα από άργυρο  
Ληγμένη πάστα

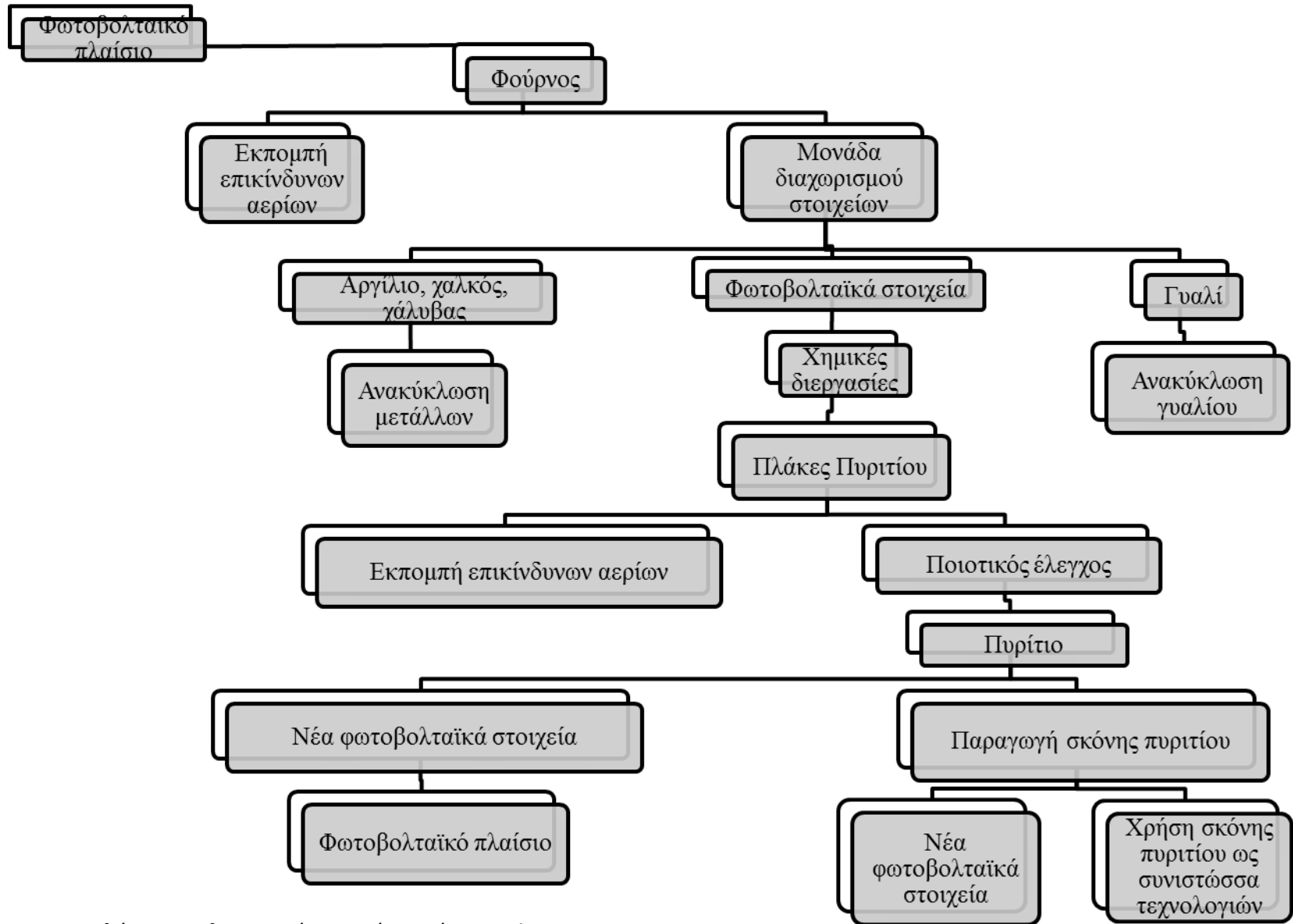
**Πλαστικά**  
EVA

Πλαστικά απορρίμματα

Υλικά των οποίων έχει περάσει ο ωφέλιμος χρόνος ζωής

**Μεταλλικά απορρίμματα**  
Κουφώματα αλουμινίου  
Σύρμα

# Ανακύκλωση ΦΒ Si



# Χρήσεις ανακτημένων υλικών

Γυαλί	Μέταλλα	ΠΛΑΣΤΙΚΟ	ΠΥΡΙΤΙΟ
<p>Το γυαλί χρησιμοποιείται στην κατασκευή : των ηλεκτρικών λαμπτήρων των ποτηριών των οικιακών σκευών των γυάλινων παραθύρων των κεραμικών των τούβλων</p> <p>Ως μέσα φιλτραρίσματος του νερού Ως λειαντικό</p> <p>Σαν αδρανή στο σκυρόδεμα βελτιώνοντας την αισθητική του σκυροδέματος</p>	<p>1.Για την παραγωγή νέων προϊόντων αλουμινίου, χαλκού, ψευδάργυρου και μολύβδου.</p> <p>2. Για την παραγωγή αντικειμένων και δοχείων, κατασκευασμένα από σίδηρο.</p> <p>3. Για την παραγωγή του ατσαλιού</p>	<p>1.Για εσωτερική ή εξωτερική χρήση</p> <p>2.Για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για θέρμανση</p> <p>3.Σε τσιμέντο- βιομηχανία, ασβεστοποιία</p> <p>4.Για την παραγωγή πληθώρας προϊόντων</p>	<p>1. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή τούβλων καθώς επίσης και στο τσιμέντο Πόρτλαντ</p> <p>2. Αγγειοπλαστική</p> <p>3. Στην δημιουργία γυαλιού</p> <p>4. Λειαντικά</p> <p>5. Ημιαγωγός</p> <p>6. Ιατρικά υλικά-Σιλικόνες</p> <p>7. Ηλιακά κύτταρα</p>

<b>Κατασκευαστές Φωτοβολταϊκών</b>	
Λοιποί ΗΠΑ	2.1
Λοιποί Κίνα	4.2
Nanjing PV	8.3
Suntech Power	4.2
Motech (Taiwan)	4.2
Λοιποί Ευρώπη	5.6
Q-Cells	10.4
Isofoton	4.2
RWE Schott Solar	4.2
BP Solar	4.2
Shell Solar	3.1
Λοιποί Ιαπωνία	2.1
Sanyo	8.3
Mitsubishi Electric	4.8
Kyocera	10.0
Sharp	16.7
Brite (Ελλάδα)	

## Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την 1<sup>η</sup> έκδοση.

## Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Δημήτρης Καραμάνης, 2015.

Δημήτρης Καραμάνης, «Περιβάλλον - Ενέργεια». Έκδοση: 1.0. Αγρίνιο 2015.

Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://eclass.upatras.gr/courses/ENV110/index.php>

## Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά Δημιουργού, Απαγόρευση Εμπορικής Χρήσης και Όχι Παράγωγα Έργα. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».

« Το υλικό της παρουσίασης προέρχεται από τις πανεπιστημιακές παραδόσεις του καθηγητή Δ. Καραμάνη».



**Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:**

**Διαφάνεια 6:** [https://en.wikipedia.org/wiki/Growth\\_of\\_photovoltaics#Forecast](https://en.wikipedia.org/wiki/Growth_of_photovoltaics#Forecast)

**Διαφάνεια 8:** <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Swansons-law.png#/media/File:Swansons-law.png>

**Διαφάνεια 9:**

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PVeff\(rev150806\).jpg#/media/File:PVeff\(rev150806\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PVeff(rev150806).jpg#/media/File:PVeff(rev150806).jpg)

**Διαφάνεια 10:** <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PnJunction-PV-E.PNG#/media/File:PnJunction-PV-E.PNG>

**Διαφάνεια 25:** M.A. Green, Photovoltaics: Coming of age, Conf. Record 21<sup>st</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 1-7 (1990)).

**Διαφάνεια 27:** M. A. Green et. al., Solar cell efficiency tables, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2011; 19:84–92

**Διαφάνεια 31:** [https://en.wikipedia.org/wiki/Czochralski\\_process](https://en.wikipedia.org/wiki/Czochralski_process)

**Διαφάνεια 36:**

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dye.sensitized.solar.cells.jpg#/media/File:Dye.sensitized.solar.cells.jpg>

**Διαφάνεια 39:** <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgris>

**Διαφάνεια 42:** των Pengetal./Ren. Sustain. Ener. Rev. 19 (2013) 255–274;

Fthenakis et al., Environ. Sci. Technol. 2008, 42, 2168–2174 , Environment Canada 2009 και άλλων ερευνητών

**Διαφάνεια 44-45:** Μαρία Πιτιλάκος, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα ΔΠΦΠ, 2012

