

# ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

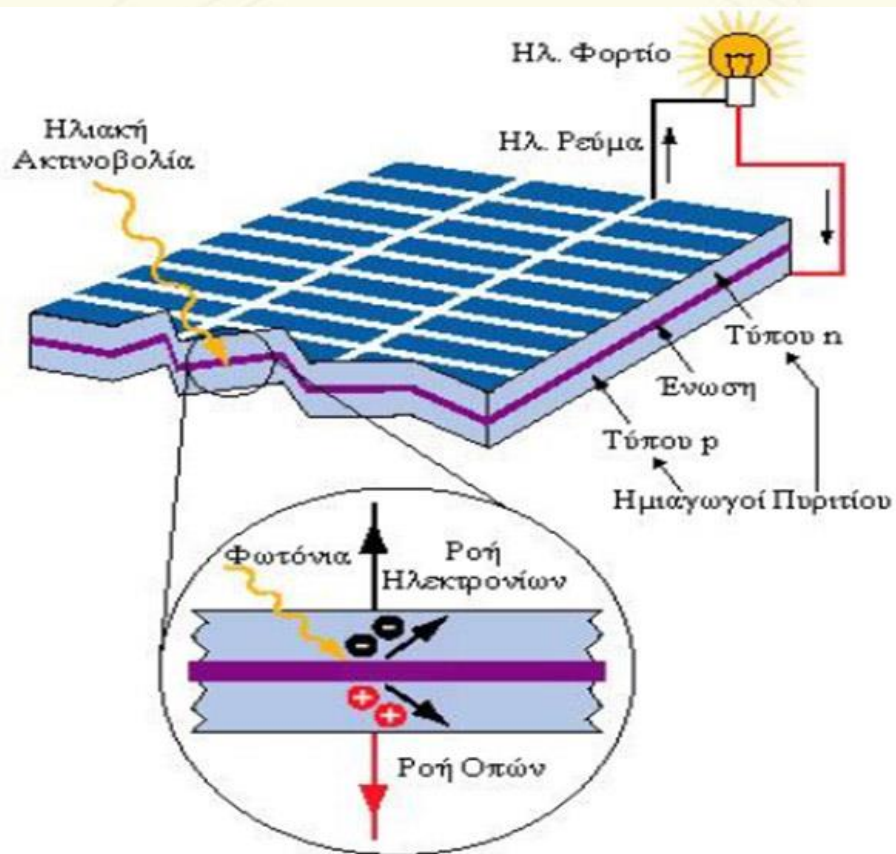
### 3ο Μάθημα

Διδάσκων: Αν. Καθηγητής Ε. Αμανατίδης

**ΤΕΤΑΡΤΗ 23/10/2019**  
**Τμήμα Χημικών Μηχανικών**  
**Πανεπιστήμιο Πατρών**

- Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο
    - Ημιαγωγοί και απορρόφηση φωτονίων
    - Η επαφή p-n
    - Διαχωρισμός φορτίου και παραγωγή ρεύματος
  - Φωτοβολταϊκές κυψέλες και πλαίσια
    - Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά ΦΒ κελιών
    - Ημιαγωγοί και διαφορετικές τεχνολογίες ΦΒ πλαισίων
    - Μέθοδοι παρασκευής φωτοβολταϊκών πλαισίων
  - Παραγωγή Ενέργειας
    - Βασικές Ιδιότητες ΦΒ πλαισίων
    - Σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών
-

# Φωτοβολταϊκό φαινόμενο



• Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο περιγράφεται ως η πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων που συμβαίνει σε συγκεκριμένα υλικά όταν αυτά εκτεθούν σε φωτεινή ακτινοβολία.

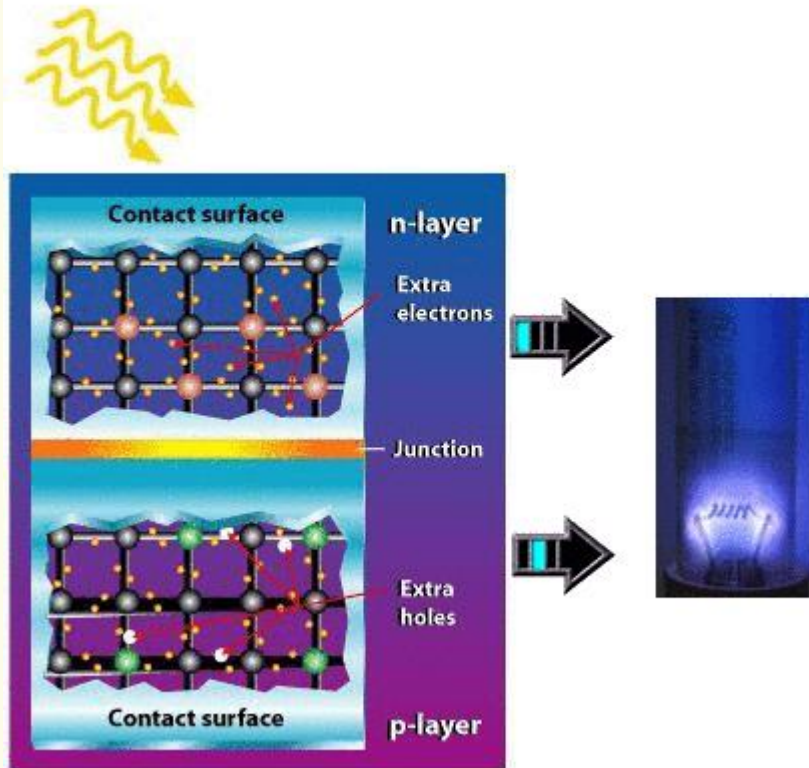
• Κάτι τέτοιο παρατηρείται στα φυσικά στοιχεία που ανήκουν στην ομάδα των **ημιαγωγών** καθώς και στις τεχνητές ημιαγωγικές διατάξεις.

• Η πόλωση των ηλεκτρικών φορτίων μεταφράζεται ως δημιουργία διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δημιουργούμενων πόλων, δηλαδή έχουμε μια υποτυπώδη ηλεκτρική γεννήτρια

Ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Alexander Becquerel

# Ημιαγωγοί

## Photovoltaic Effect



• Ημιαγωγός είναι κάθε υλικό, όπως το γερμάνιο ή το πυρίτιο, που επιτρέπει τη ροή ηλεκτρικού φορτίου υπό κάποιες προϋποθέσεις, όπως είναι αύξηση της θερμοκρασίας ή η πρόσπτωση φωτός.

• Ένας ημιαγωγός, όπως το πυρίτιο, στην καθαρή κρυσταλλική του μορφή, είναι καλός μονωτής. Ωστόσο, όταν έστω και ένα άτομο μέσα σε εκατομμύρια αντικατασταθεί από μία πρόσμιξη που προσθέτει ή αφαιρεί ένα ηλεκτρόνιο τότε η αγωγιμότητά τους αυξάνεται θεαματικά.

• Στην πρώτη περίπτωση, προκύπτει ημιαγωγός τύπου  $n$  (negative) καθώς έχουμε παραπάνω ηλεκτρόνια και στη δεύτερη τύπου  $p$  (positive) καθώς έχουμε επιπλέον οπές που δηλώνουν απουσία ηλεκτρονίων. Αυτός ο τρόπος πρόσμιξης ονομάζεται doping

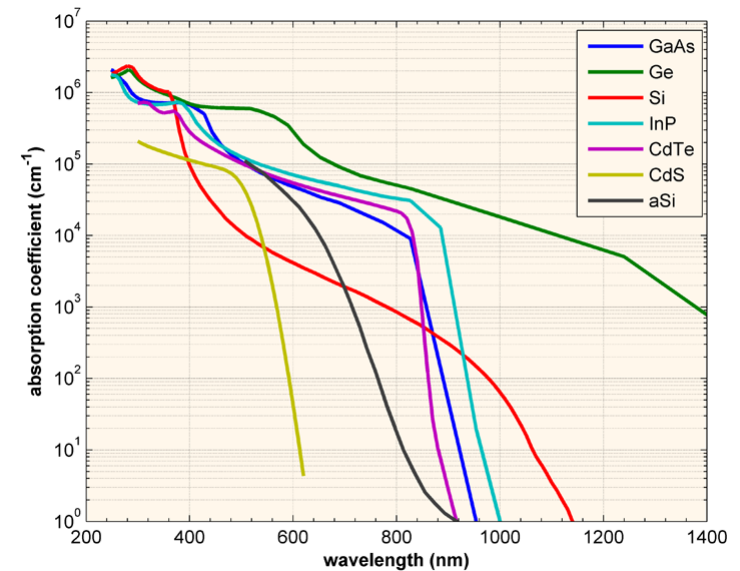
# Κατηγορίες Ημιαγωγών

- Στοιχειακοί: Si, Ge
- Διαδικές ενώσεις: GaAs, InP, AlAs (III-V)
- Τριαδικά κράματα (ternary alloys):  $Al_xGa_{1-x}As$ ,  $Ga_xIn_{1-x}P$  (III-V)
- Τετραδικά κράματα :  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$  (III-V)  
 $CuIn_xGa_{1-x}Se_2$  (I-III-VI)
- Ημιαγωγοί ευρέως χάσματος : ZnSe, CdTe (II-VI), GaN, InN, AlN (III-V) κλπ

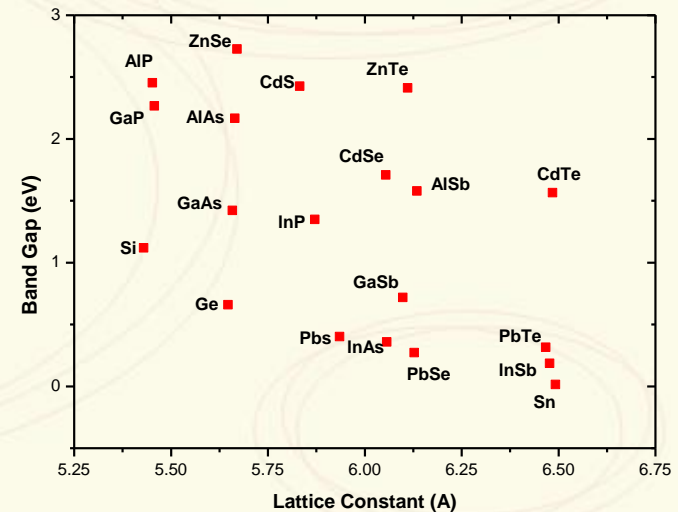
Ενεργειακό χάσμα ενδογενών ημιαγωγών  $E_g$

Ενδεικτικές τιμές  $E_g$  και  $n_i$  στους 300K.

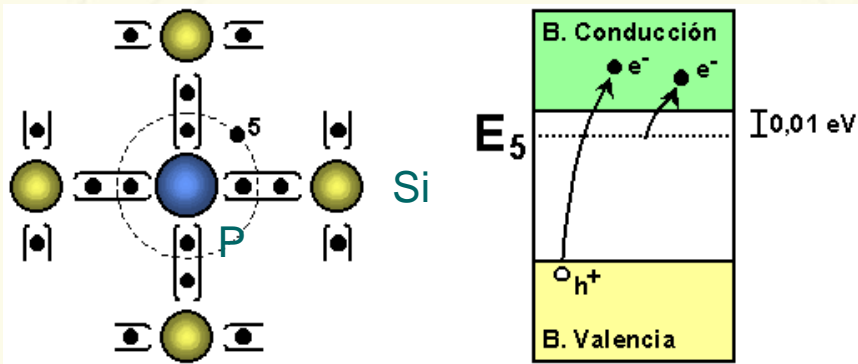
ημιαγωγός	$E_g$ (eV)	$n_i$ (cm <sup>-3</sup> )	T(K)
Ge	0.67	$2.4 \times 10^{13}$	300
Si	1.1	$1.5 \times 10^{10}$	300
GaAs	1.43	$5 \times 10^7$	300



Συντελεστής απορρόφησης σε συνάρτηση του μήκους κύματος ακτινοβολίας

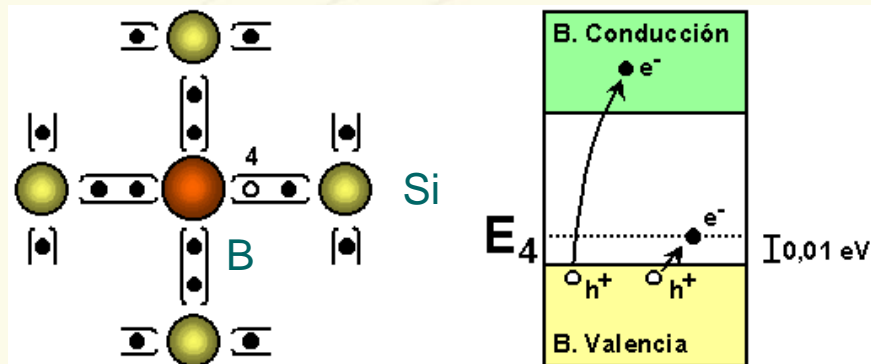


# Ημιαγωγοί n- και p- τύπου



Στο Ge ή Si προσθήκη στοιχείου V ομάδας π.χ αρσενικό (As) ή φώσφορος (P), τα 4 ηλεκτρόνια σθένους του As θα δημιουργήσουν με τα αντίστοιχα 4 των γειτονικών ατόμων του Ge ομοιοπολικούς δεσμούς και θα μείνει αδέσμευτο το 5<sup>ο</sup> ηλεκτρόνιο του ατόμου του As.

Το As ή ο P λέγονται δότες και ο ημιαγωγός n-τύπου

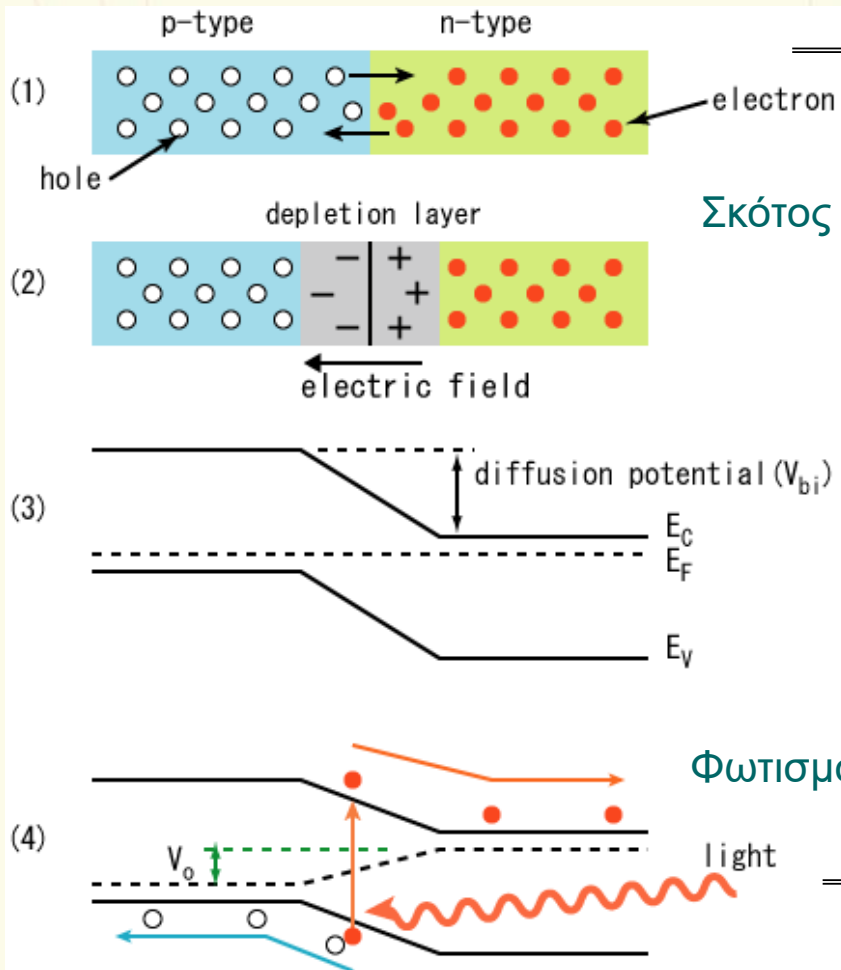


Αντίθετα αν ένα τρισθενές στοιχείο, όπως π.χ το γάλλιο ή βόριο, εισαχθεί στον ημιαγωγό Si τότε τα τρία ηλεκτρόνια σθένους θα σχηματίσουν ομοιοπολικούς δεσμούς με Si και η θέση ηλεκτρονίου που λείπει οδηγεί στο σχηματισμό μιας οπής

Το Ga ή B λέγονται δέκτες και ο ημιαγωγός τύπου p

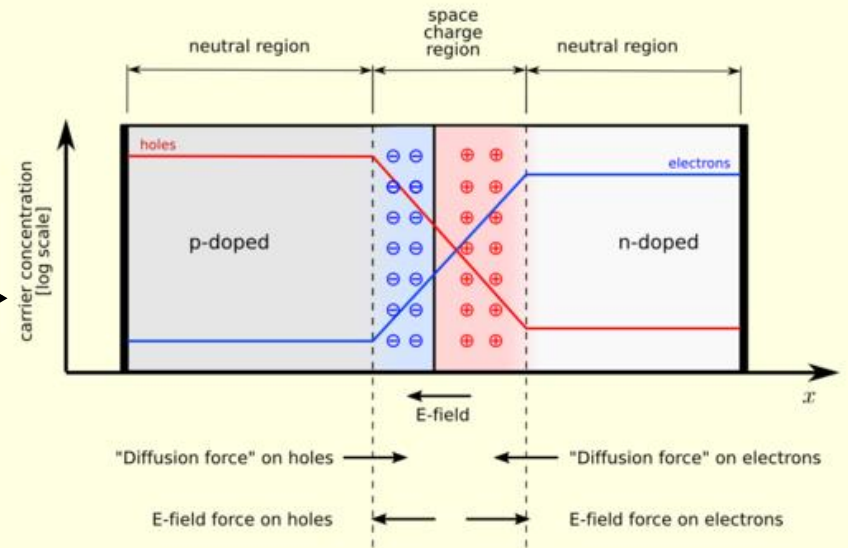
# ρη Επαφή

Αν φέρουμε σε επαφή έναν ημιαγωγό ρ-τύπου με έναν ημιαγωγό n-τύπου

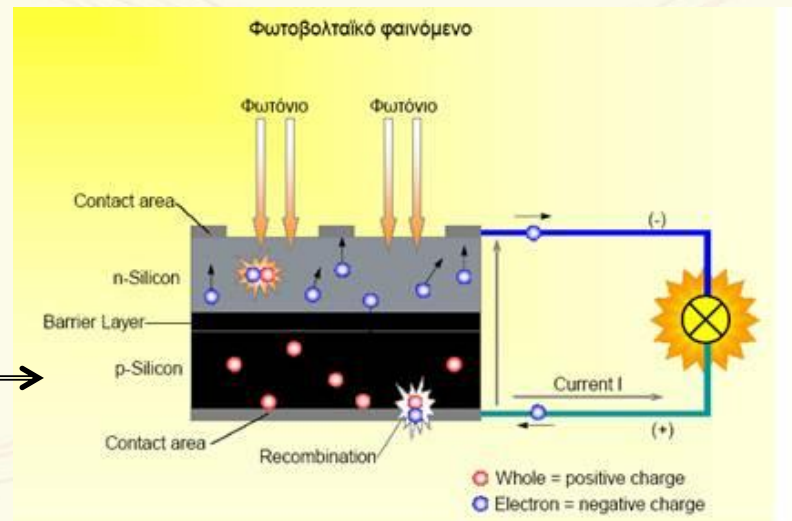


Σκότος

Φωτισμός



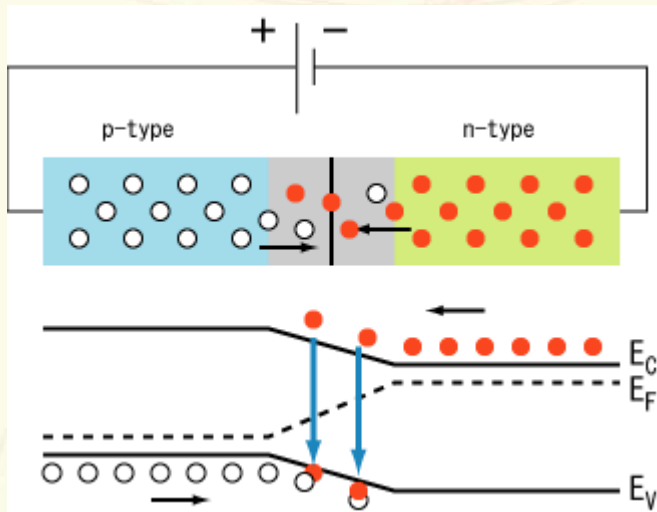
Έχουμε τη δημιουργία 3-περιοχών:  
2 ψευδοουδέτερων και μιας περιοχής με  
διαχωρισμό φορτίων και καθαρό φορτίο χώρου



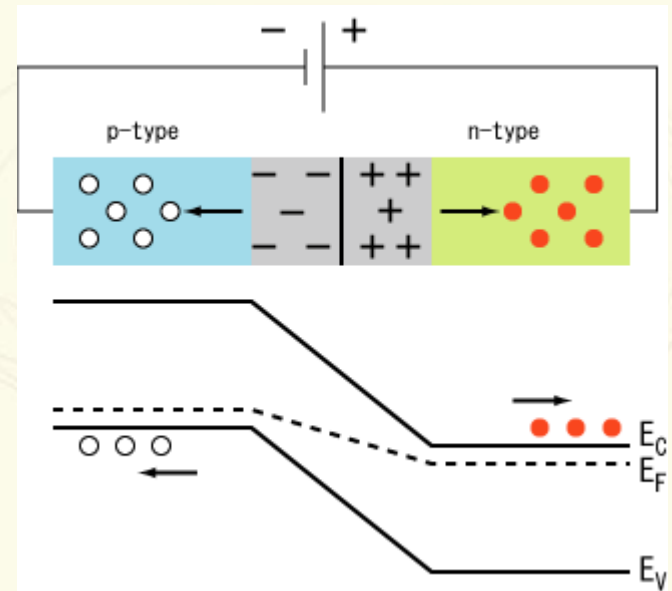
# ρη Επαφή – Χαρακτηριστικές καμπύλες VI

Ορθή πόλωση διόδου  $\rightarrow$  αντίσταση  $10\Omega$

Ανάστροφη πόλωση διόδου  $\rightarrow$  αντίσταση  $10\text{ M}\Omega$



Ορθή πόλωση, + γεννήτριας σε p-type



Ανάστροφη πόλωση, + γεννήτριας σε n-type

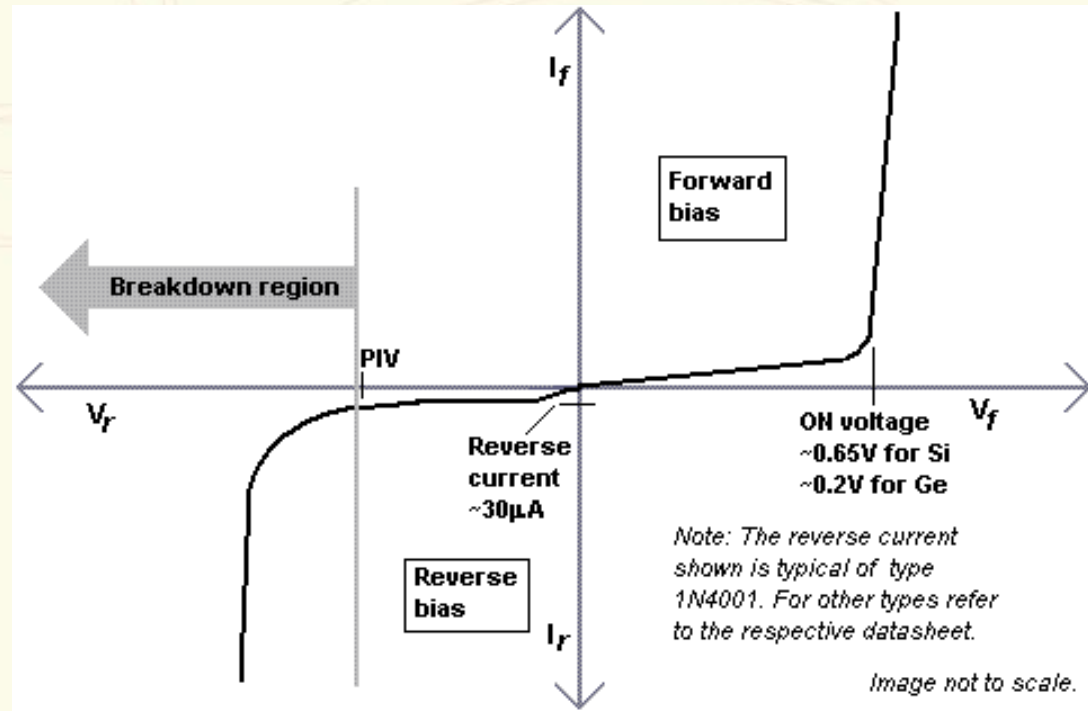


# ρη Επαφή – Χαρακτηριστικές καμπύλες VI

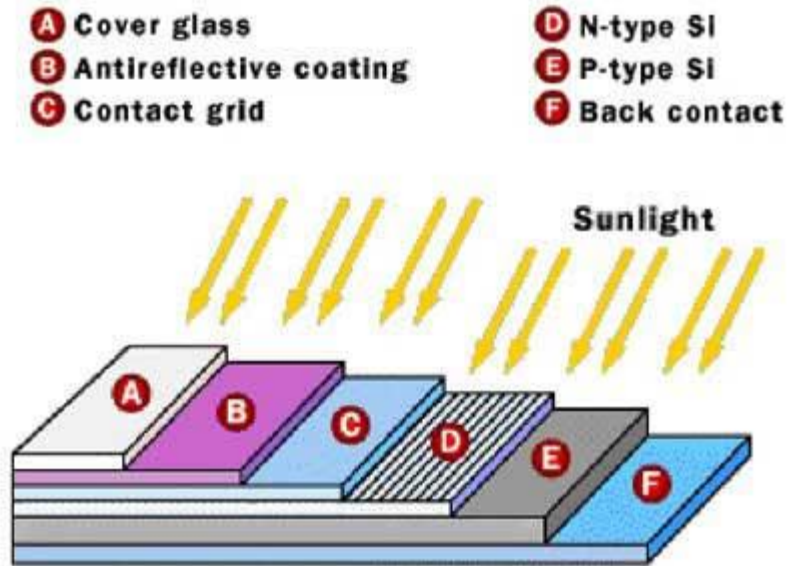
- Ανάστροφο ρεύμα κόρου  $I_o$

$$I = I_o \left[ \exp\left(\frac{eV}{\gamma kT}\right) - 1 \right]$$

- Όπου  $V$  η τάση στα άκρα της διόδου,  $\gamma$  συντελεστής κατασκευής της διόδου (1-2),  $k$  σταθερά Boltzmann και  $T$  η θερμοκρασία



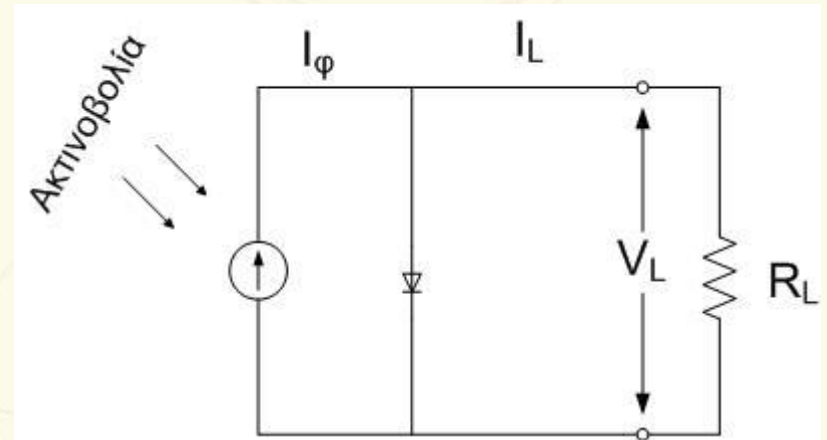
# Φωτοβολταϊκά ως pn επαφές



Απλοποιημένο σχήμα ΦΒ διάταξης

$$I_{\phi} = I_o \left[ \exp\left(\frac{eV}{\gamma kT}\right) - 1 \right]$$

Μέγιστο Ρεύμα Φωτοβολταϊκού  
 $R_L \rightarrow 0$



Απλοποιημένο κύκλωμα ΦΒ διάταξης

$$V_{oc} = \frac{\gamma kT}{e} \ln \frac{I_{\phi}}{I_o}$$

Μέγιστη Τάση - Τάση ανοικτού κυκλώματος  
 $R_L \rightarrow \infty$

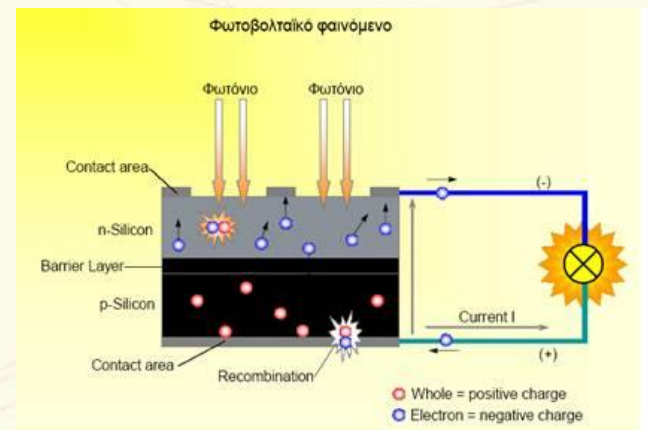
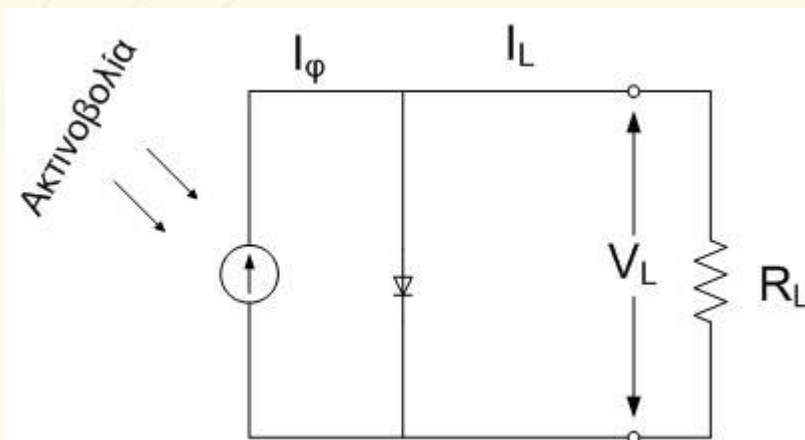
# Φωτοβολταϊκά- Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

- Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι:

$$I_L = I_\varphi = I_{sc} = I_o \left[ \exp\left(\frac{eV}{\gamma kT}\right) - 1 \right]$$

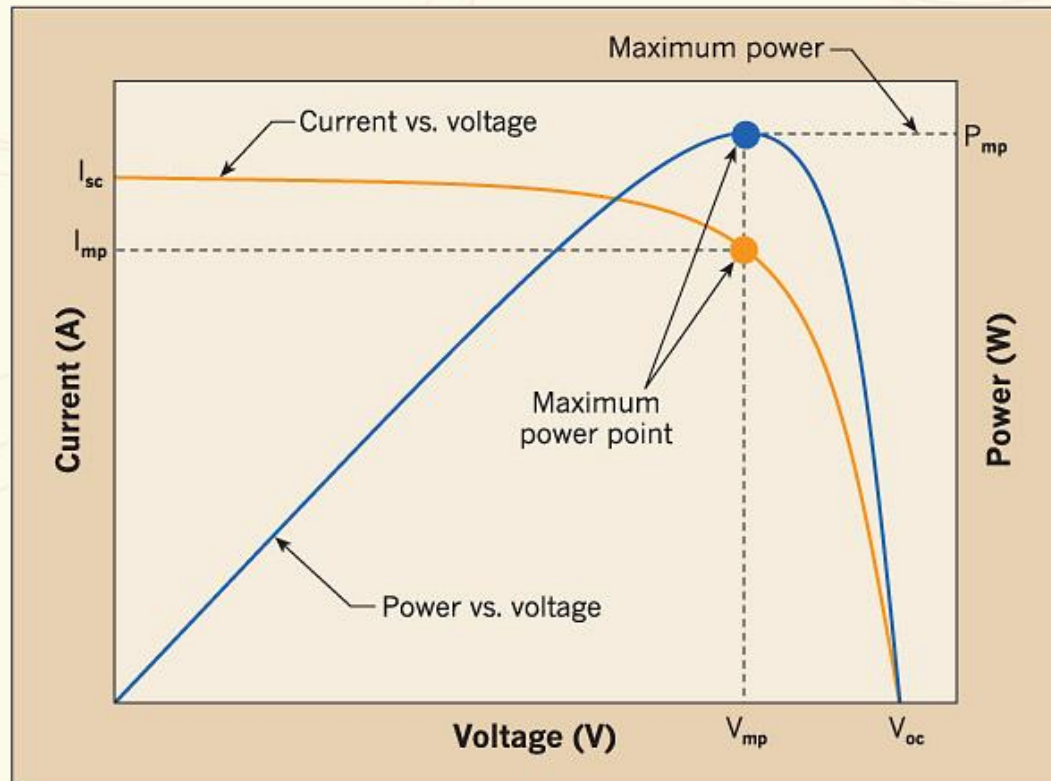
- Σε οποιαδήποτε άλλη κατάσταση το ρεύμα είναι:

$$I_L = I_\varphi - I_o \left[ \exp\left(\frac{eI_L R_L}{\gamma kT}\right) - 1 \right]$$



# Φωτοβολταϊκά- Μέγιστή Ισχύ/Ρεύμα/Τάση

- Η τάση των φ/β μεταβάλλεται μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος.

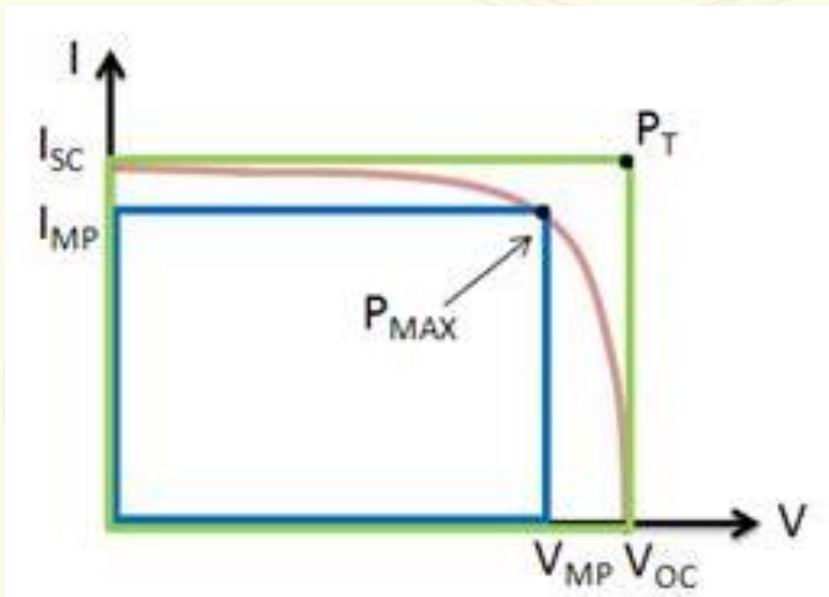


- Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας αλλά μεταβαλλόμενη αντίσταση κυκλώματος η τάση και η ένταση του ρεύματος παίρνουν ενδιάμεσες τιμές μεταξύ 0 -  $V_{oc}$  και 0 -  $I_{sc}$  αντίστοιχα.

## Συντελεστής πλήρωσης FF

- Ο συντελεστής πλήρωσης ορίζεται ως:

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



$V_{mp}$ ,  $I_{mp}$  μετρούμενες τιμές τάσης  
ρεύματος στο σημείο μέγιστης  
ισχύος

$I_{sc}$  ρεύμα βραχυκύκλωσης  
 $V_{oc}$  τάση ανοικτού κυκλώματος

# Φωτοβολταϊκά - Συντελεστής απόδοσης

- Ο συντελεστής απόδοσης ορίζεται ως:

$$n = \frac{P_m}{H \times A} = \frac{I_{mp} V_{mp}}{H \times A} = \frac{FF \times I_{sc} \times V_{oc}}{H \times A}$$

Όπου  $H$  είναι η ένταση (πυκνότητα ισχύος) της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του ΦΒ, εμβαδού  $A$ . Αύξηση της απόδοσης φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορεί να επιτευχθεί **μέσω της αύξησης του  $FF$ ,  $I_{sc}$  ή/και  $V_{oc}$**

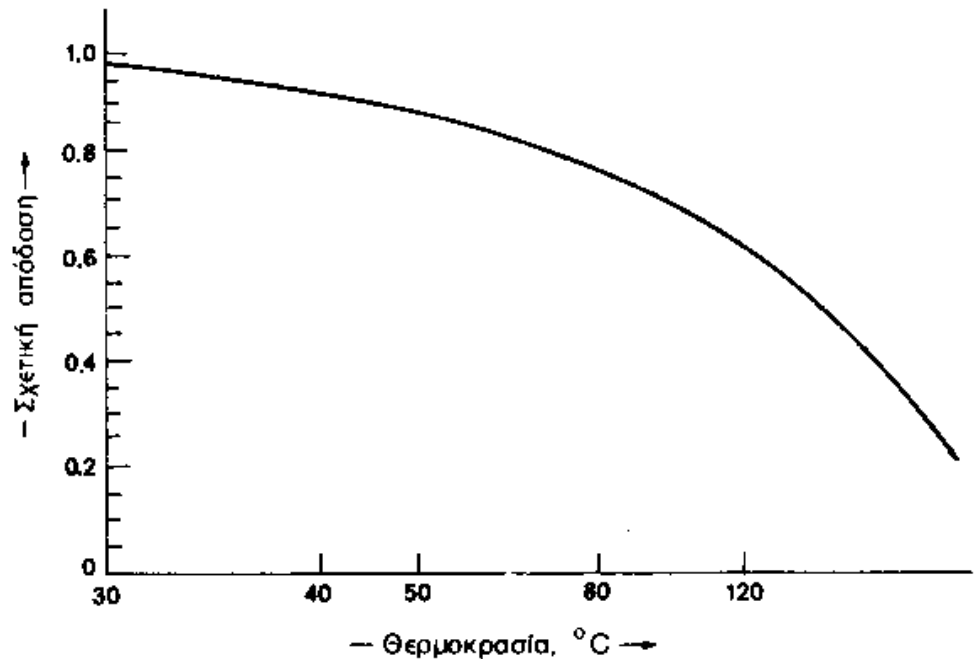
# Φωτοβολταϊκά- Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

## Φωτοβολταϊκά- Συντελεστής απόδοσης Επίδραση θερμοκρασίας

- Η μεταβολή του συντελεστή απόδοσης με τη θερμοκρασία:

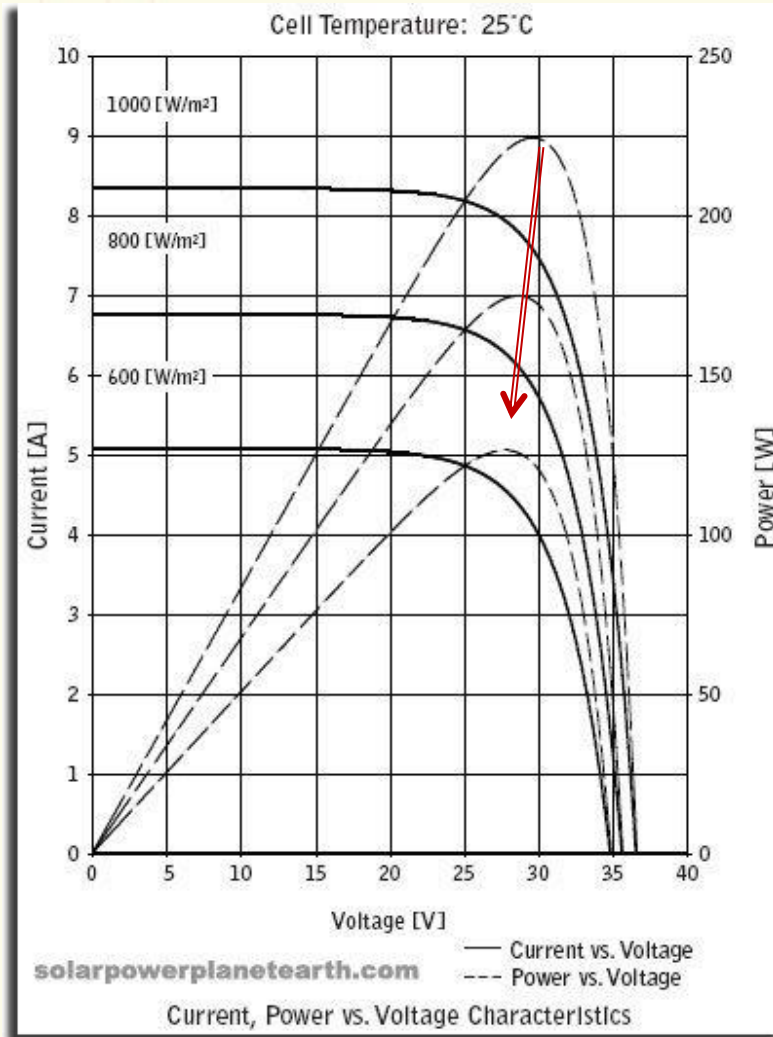
$$n_{\theta} = n \times \sigma_{\theta}$$

$n$  ορίζεται η απόδοση στους 25 °C  
 $\sigma_{\theta}$  ο θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος



# Φωτοβολταϊκά- Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

## Φωτοβολταϊκά- Μεταβαλλόμενες συνθήκες



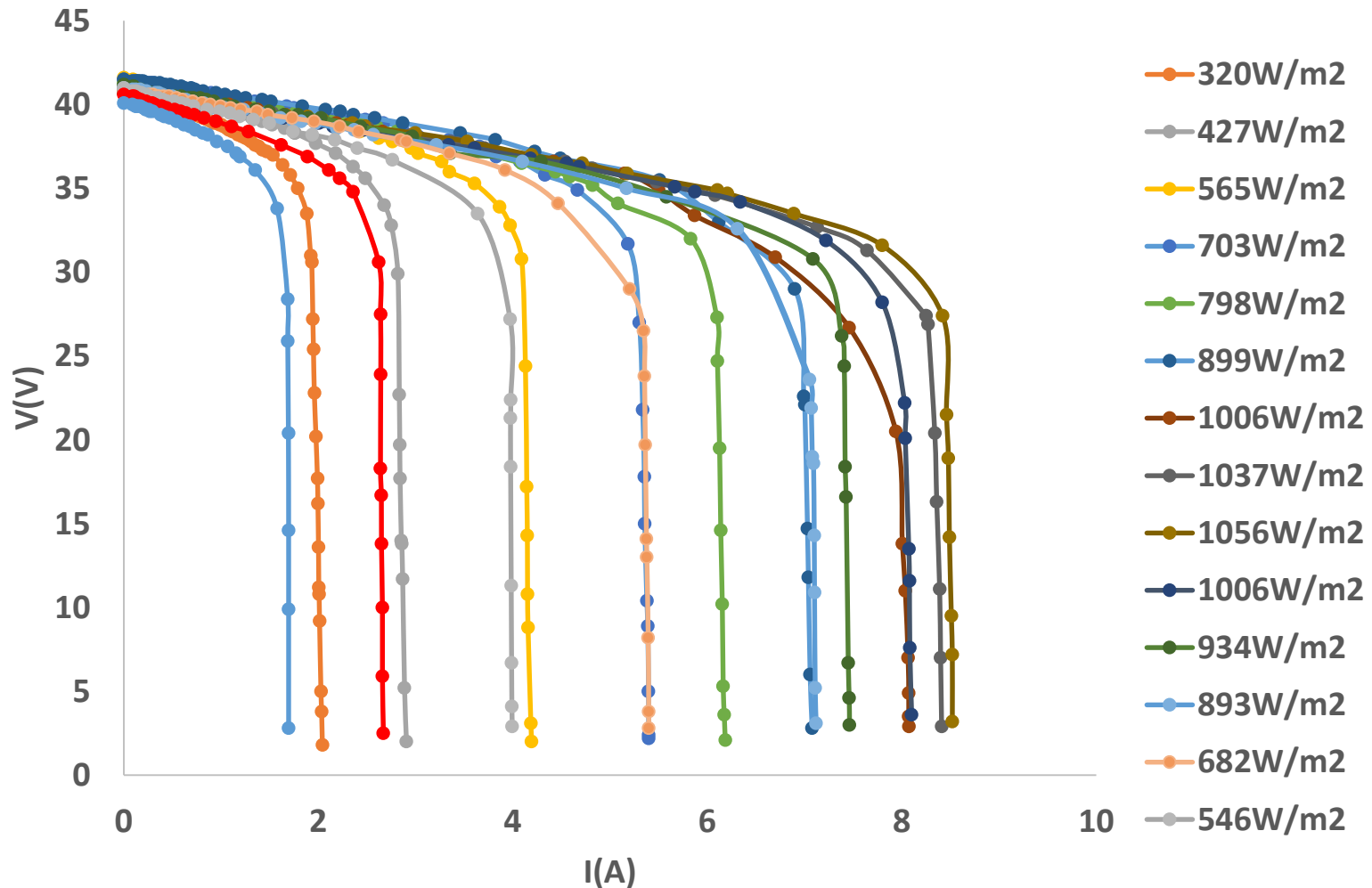
Μετατόπιση σημείων λειτουργίας ΦΒ στοιχείου και απομάκρυνση του σε σχέση με τα σημεία μέγιστης ισχύος της καμπύλης τάσης – ρεύματος για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας



# Φωτοβολταϊκά- Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

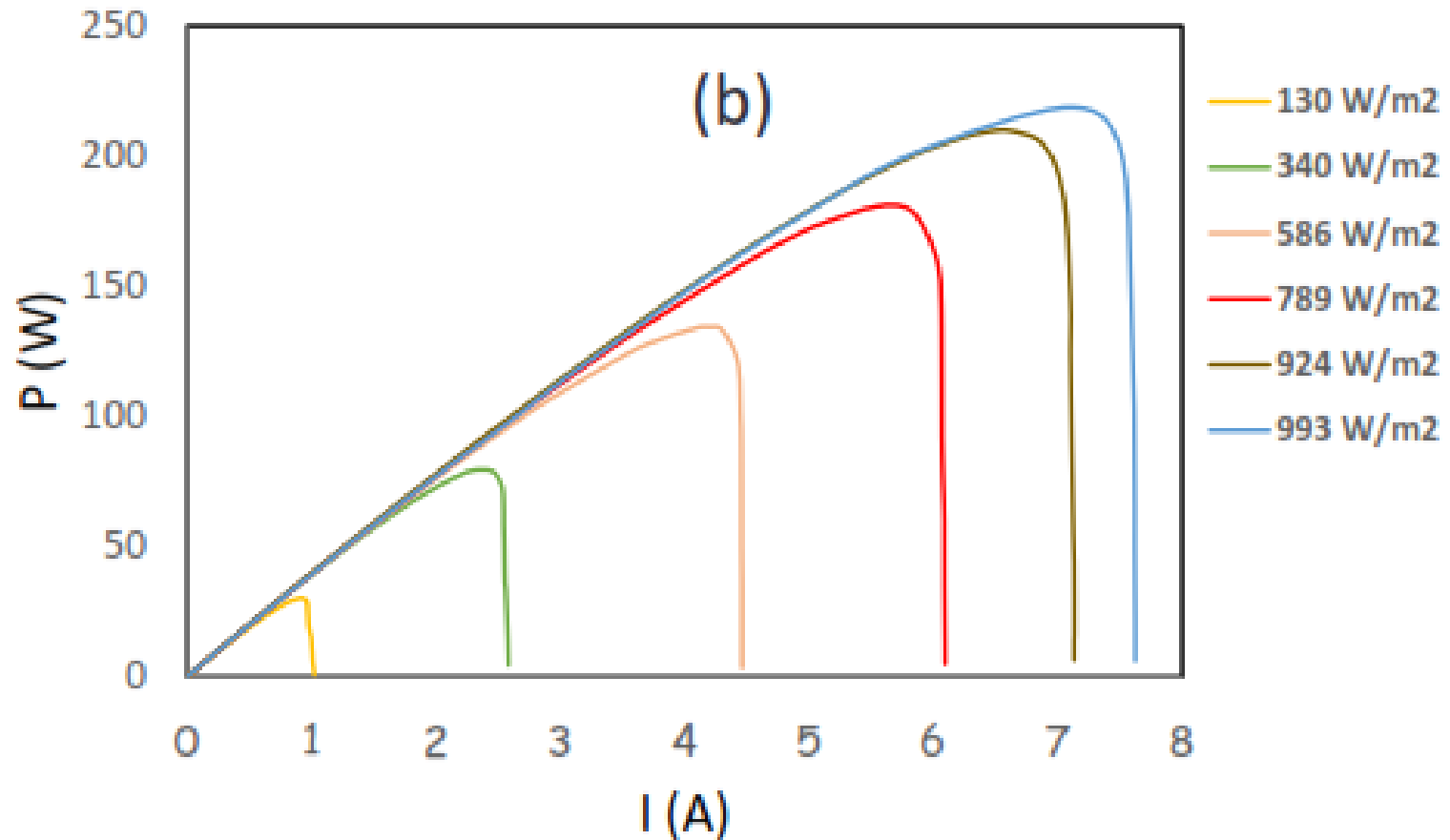
ΦΒ στη ταράτσα κτιρίου ΧΜ, Από προδιαγραφές  $V_{oc}=43\text{ V}$ ,  $I_{sc}=8.8\text{ A}$

I-V curves for p-Si under different irradiation levels



# Φωτοβολταϊκά- Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

ΦΒ στη ταράτσα κτιρίου ΧΜ, Από προδιαγραφές  $P_{nom}=260\text{ W}$



# Φωτοβολταϊκά – Προδιαγραφές

## Electrical data (at STC)

	VBHH250AE01	VBHH245AE01
Maximum Power (Pmax) [W]	250	245
Max. power voltage (Vmp) [V]	34.9	34.4
Max. power current (Imp) [A]	7.18	7.14
Open circuit voltage (Voc) [V]	43.1	42.7
Short circuit current (Isc) [A]	7.74	7.73
Maximum over current rating [A]	15	
Output power tolerance [%]	+10/-5*	
Maximum system voltage [V]	1000	

Note: Standard Test Conditions: Air mass 1.5, Irradiance = 1000W/m<sup>2</sup>, cell temperature = 25°C

## Temperature characteristics

Temperature (NOCT) [°C]	46.0	46.0
Temp. coefficient of Pmax [%/°C]	-0.30	-0.30
Temp. coefficient of Voc [V/°C]	-0.108	-0.107
Temp. coefficient of Isc [mA/°C]	2.32	2.32

## At NOCT

Maximum power (Pmax) [W]	188.9	185.4
Max. power voltage (Vmp) [V]	32.8	32.4
Max. power current (Imp) [A]	5.76	5.73
Open circuit voltage (Voc) [V]	40.5	40.1
Short circuit current (Isc) [A]	6.23	6.23

Note: Nominal Operating Cell Temperature : Air mass 1.5 spectrum, Irradiance = 800W/m<sup>2</sup>, Air temperature = 20°C, wind speed 1 m/s

## At low irradiance

Maximum power (Pmax) [W]	48.8	47.7
Max. power voltage (Vmp) [V]	34.1	33.6
Max. power current (Imp) [A]	1.43	1.43
Open circuit voltage (Voc) [V]	40.1	39.7
Short circuit current (Isc) [A]	1.55	1.55

Note: Low irradiance: Air mass 1.5 spectrum, Irradiance = 200W/m<sup>2</sup>, cell temp. 25°C

## 3 μέθοδοι χαρακτηρισμού

STC (Standard Test Conditions), H=1000 W/m<sup>2</sup>, T=25 °C

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature), H=800 W/m<sup>2</sup>, T = 46 °C

Low irradiance, H=200 W/m<sup>2</sup>, T=25 °C

**Θερμοκρασιακοί συντελεστές δίνονται σε NOCT συνθήκες**

---



# Διαφορετικές Τεχνολογίες ΦΒ

---

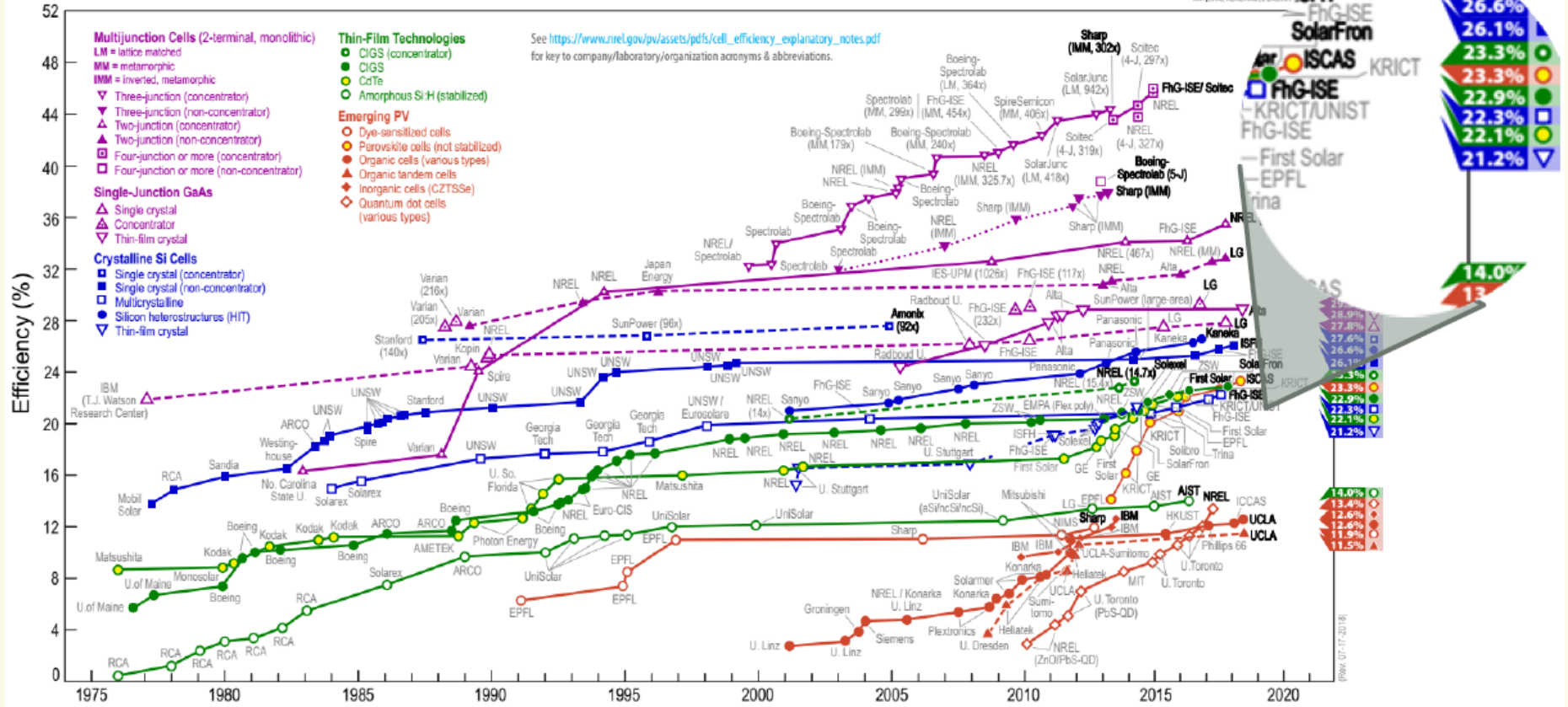
# Τεχνολογίες ΦΒ

---

- Πλαίσια ΦΒ μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου – 1<sup>ης</sup> γενιάς
  - Πλαίσια ΦΒ λεπτών υμενίων – 2<sup>ης</sup> γενιάς
    - ΦΒ αμόρφου πυριτίου
    - ΦΒ πολλαπλών επαφών πυριτίου a-Si:H/a-Si:H, μc-Si:H/a-Si:H
    - ΦΒ λεπτών υμενίων CdTe
    - ΦΒ λεπτών υμενίων CIGS
  - Οργανικά-Ανόργανα φωτοβολταϊκά – 3<sup>ης</sup> γενιάς
    - Φωτοβολταϊκά περοβσκιτών
-

# Αποδόσεις διαφορετικών τεχνολογιών Φωτοβολταϊκών

## Best Research-Cell Efficiencies



# Τεχνολογίες Φωτοβολταϊκών

---

## c-Si



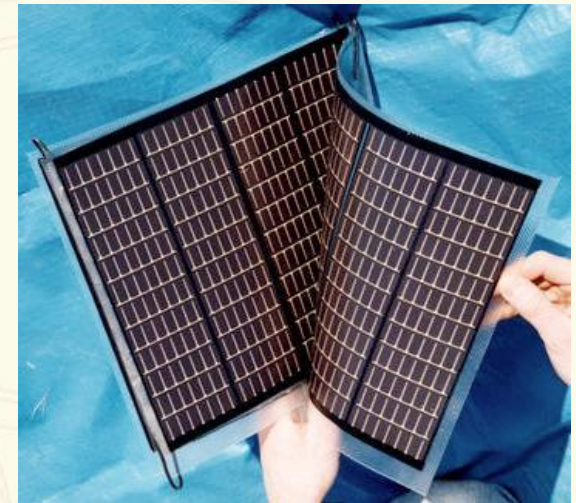
- Αποδόσεις 12 to 17 %
- Τιμές 0.5 to 1.2 €/Wp
- Πλαίσια 100 Wp to 300 Wp

## Thin films



- Αποδόσεις 7 to 15 %
- Τιμές 0,4 to 1.0 €/Wp
- Πλαίσια 40 Wp to 125 Wp

## Organic-Inorganic cells

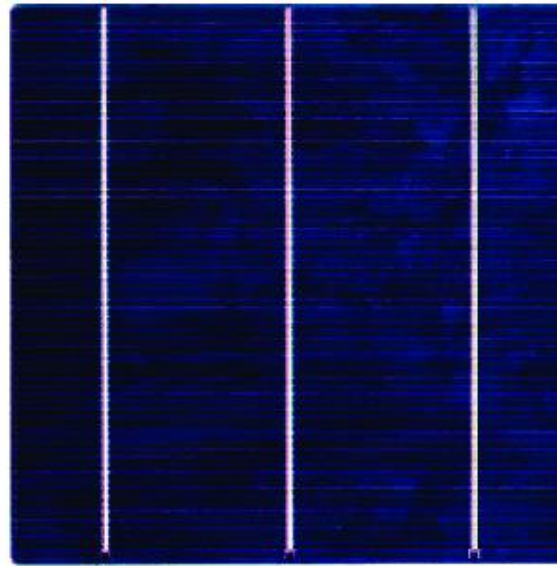


- Αποδόσεις 3 to 23 %
  - Τιμές ~ 1.5 €/Wp
  - Πλαίσια 5 Wp to 40 Wp
  - Μόνο εργαστηριακά
-

# ΦΒ ΜΟΝΟ - ΠΟΛΥΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ



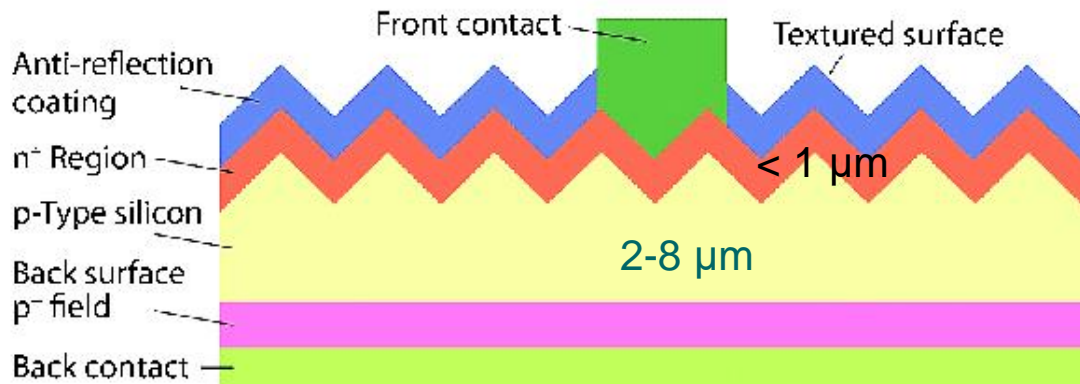
Monocrystalline silicon solar cell



Polycrystalline silicon solar cell

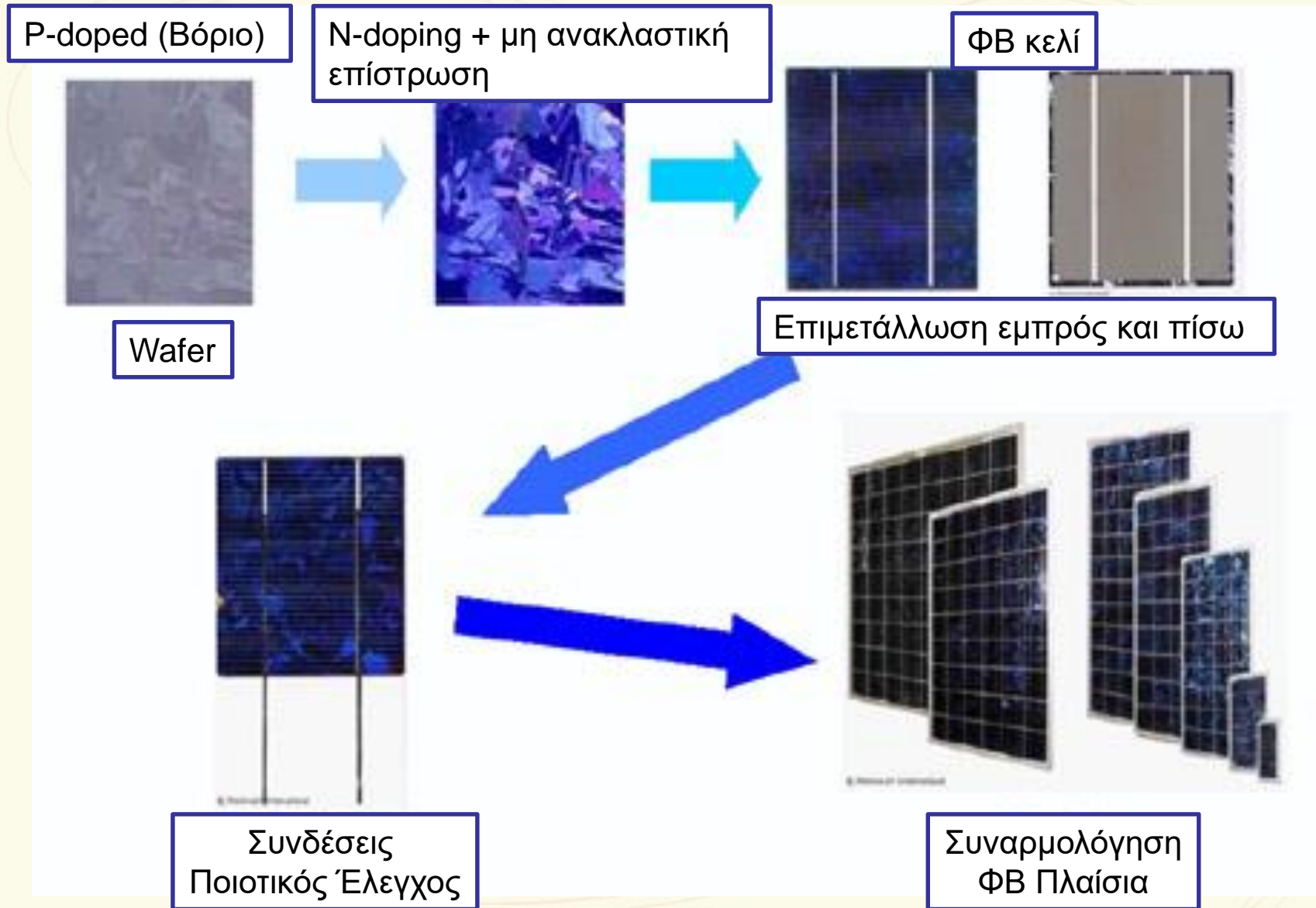
• Αποδόσεις κελιών  
23 – 24 %

Αποδόσεις πλαισίων  
16 – 18 %





# Κατασκευή φωτοβολταϊκού κελιού



---



# **ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΒ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ**

---

# Τεχνολογίες ΦΒ λεπτών υμενίων

## Thin Film Technologies

TF-Si



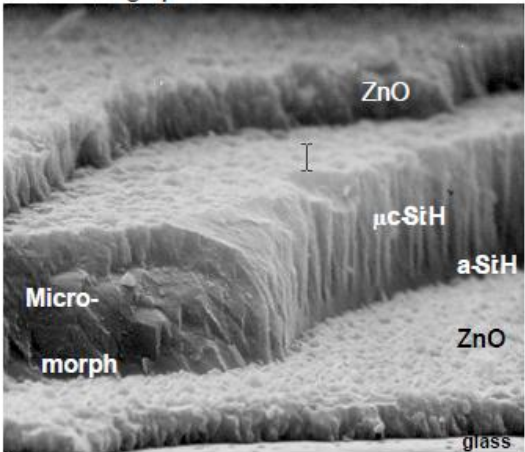
CdTe



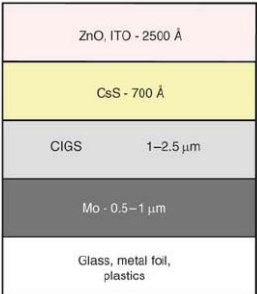
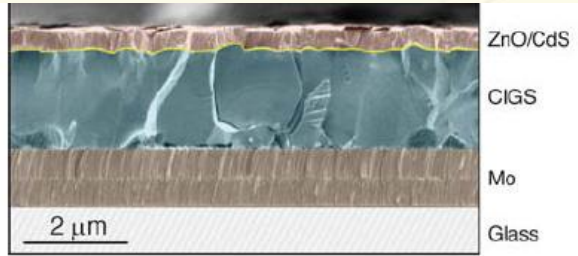
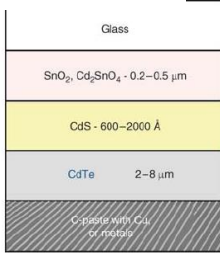
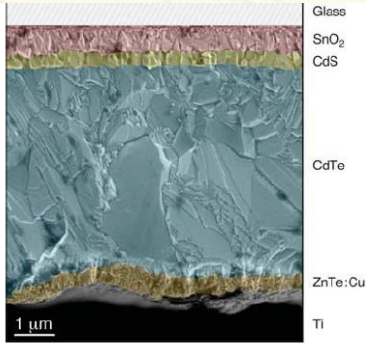
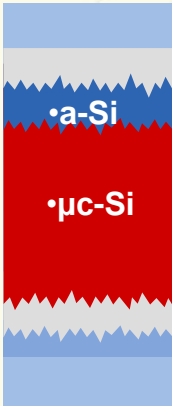
CIGS



SEM micrograph



Courtesy of IMT



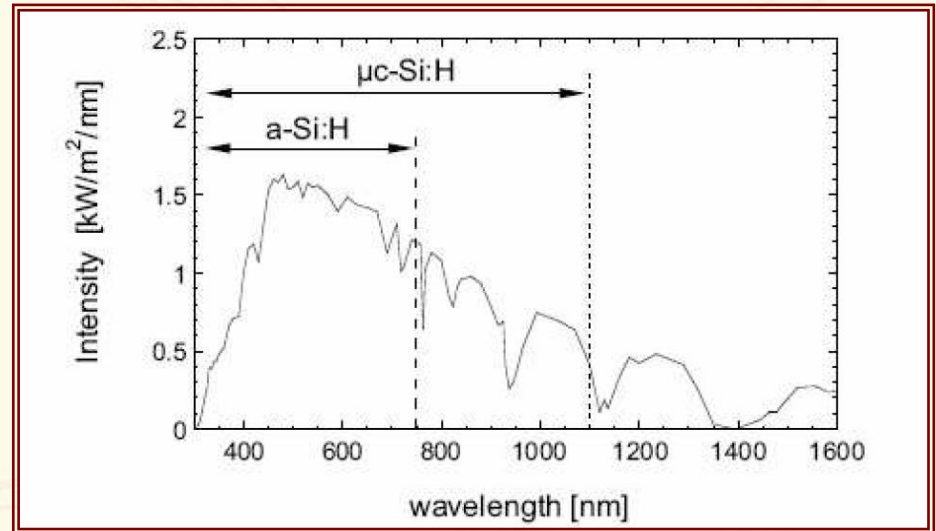
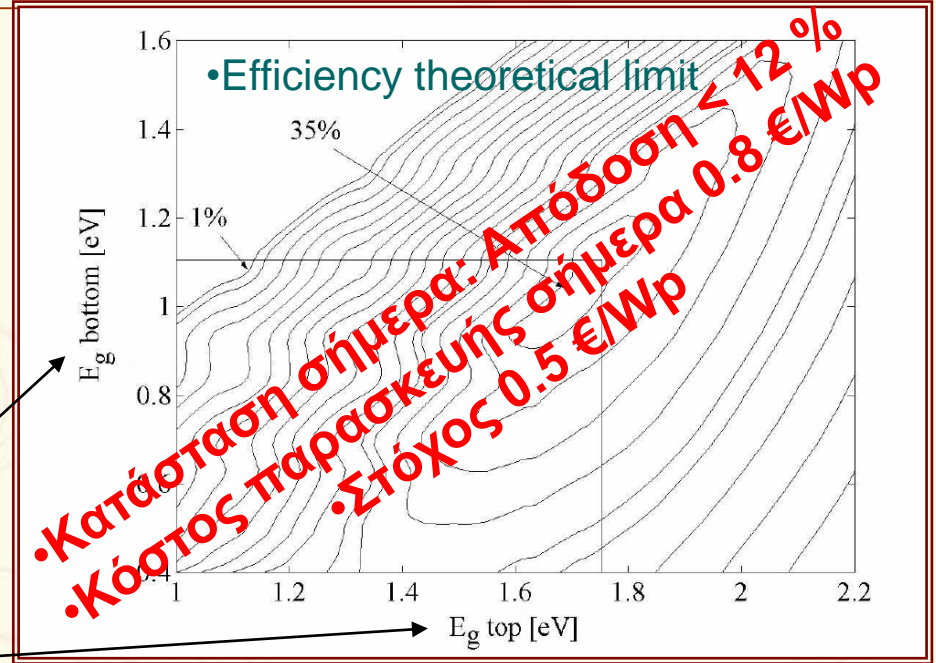
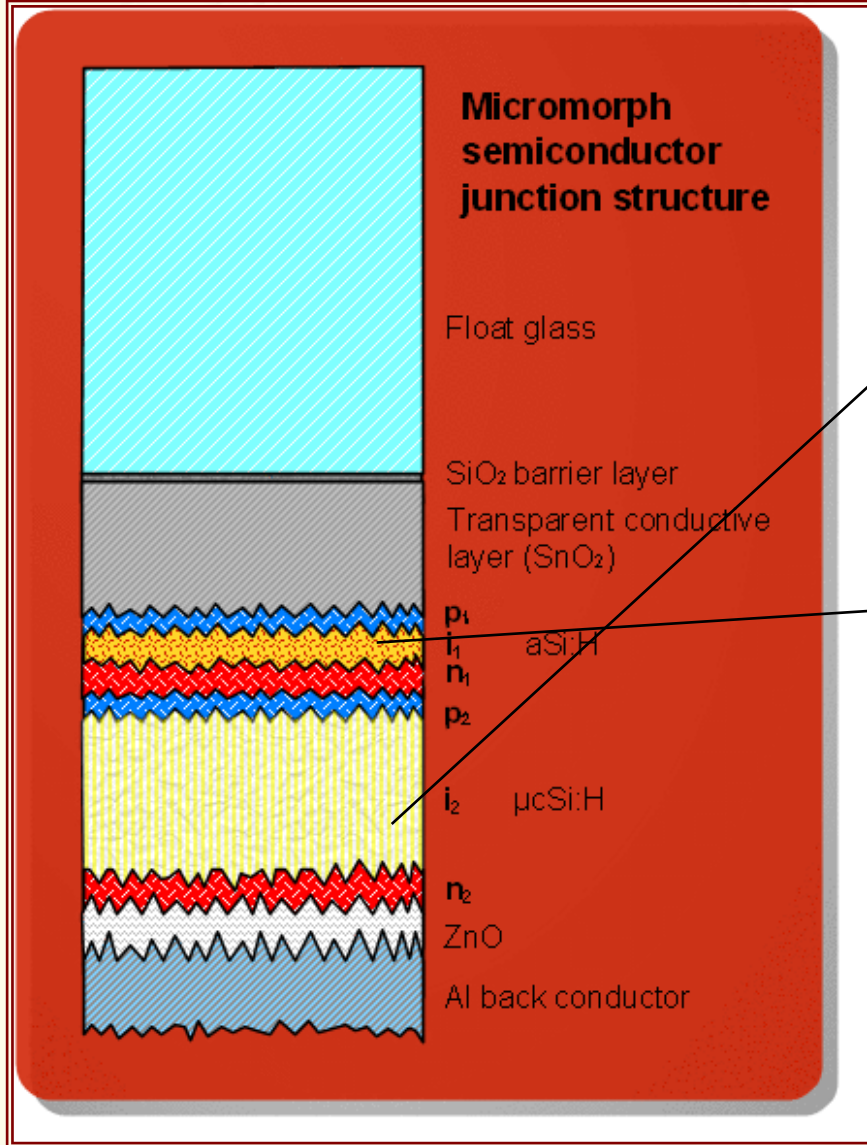
---



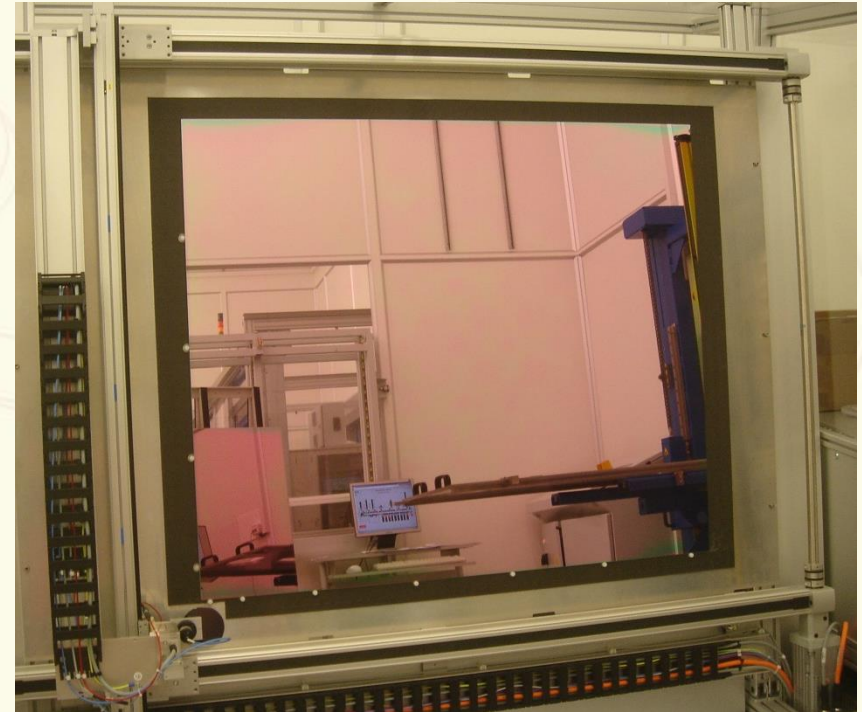
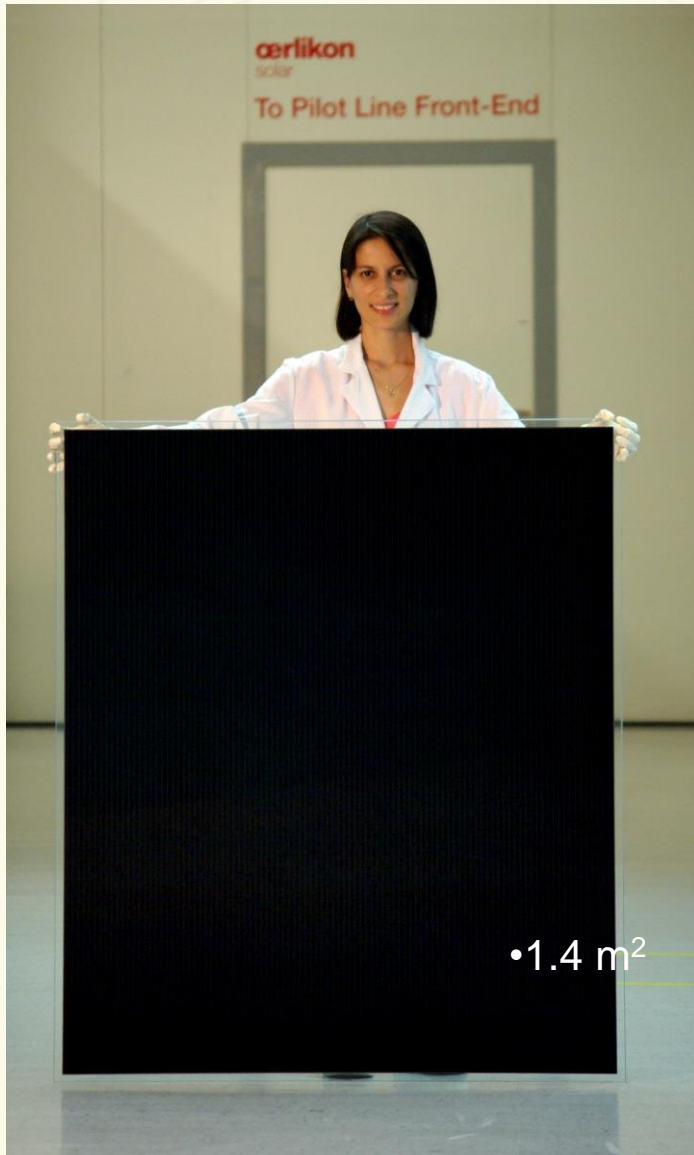
# **ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΦΒ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ**

---

# ΦΒ λεπτών υμενίων πυριτίου



# Τελική Μορφή



Αποδόσεις κελιών 12 – 15 %  
Αποδόσεις πλαισίων 8 – 11 %

---



# **ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΦΒ ΛΕΠΤΩΝ ΥΜΕΝΙΩΝ CIGS και CdTe**

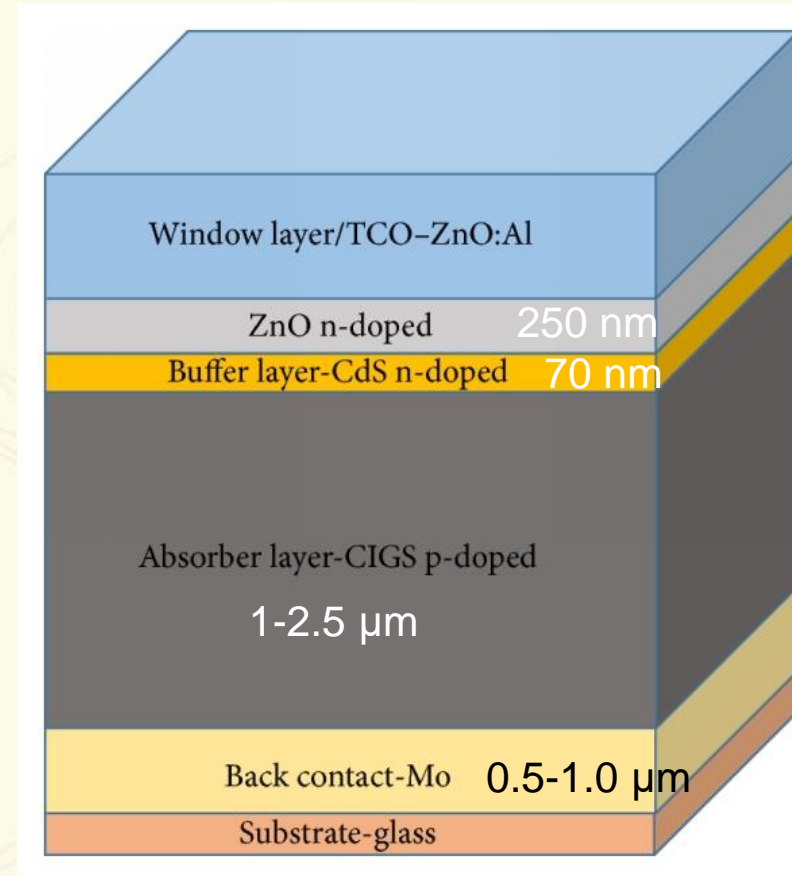
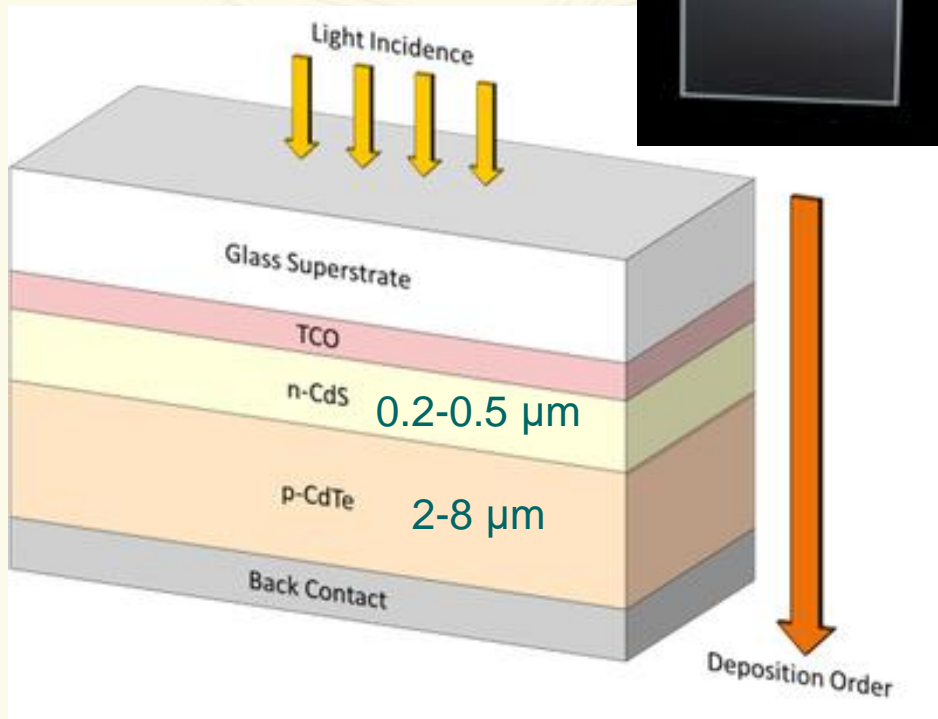
---

# Δομή ΦΒ λεπτών υμενίων CdTe και CIGS

CdTe module



CIS module



CdTe

Αποδόσεις κελιών 20 – 22 %

CIGS

Αποδόσεις πλαισίων 14 – 16 %



---



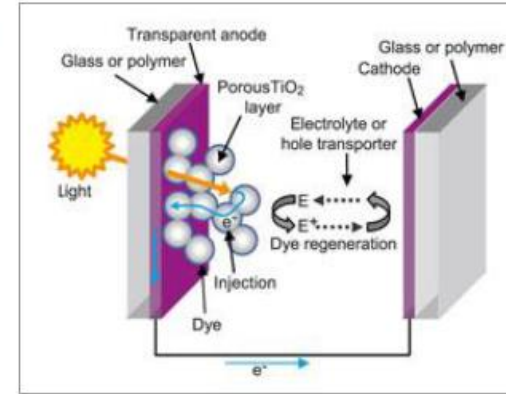
**ΦΒ 3<sup>ης</sup> γενιάς**

---

# Κύριες κατηγορίες

## Dye Sensitized Solar Cells (DSSC)

$TiO_2$ /Organometallic Dye/Liquid Electrolyte/Pt



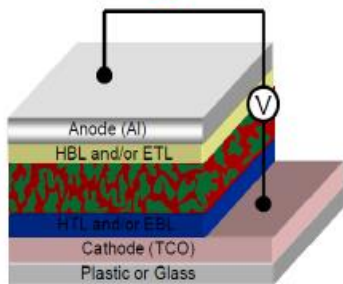
Hole Transport Material → Solid State Solar Cell

Quantum Dots → Quantum Dot Solar Cell (QDSC)

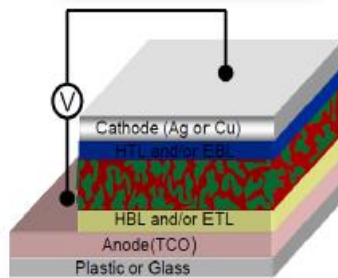
Perovskite

Perovskite Solar Cells

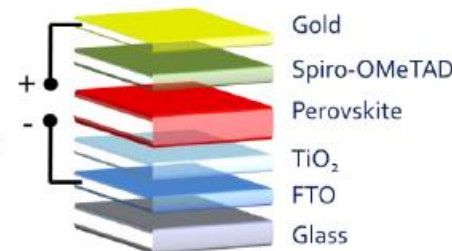
## Organic Solar Cells



Normal stack



Inverted stack

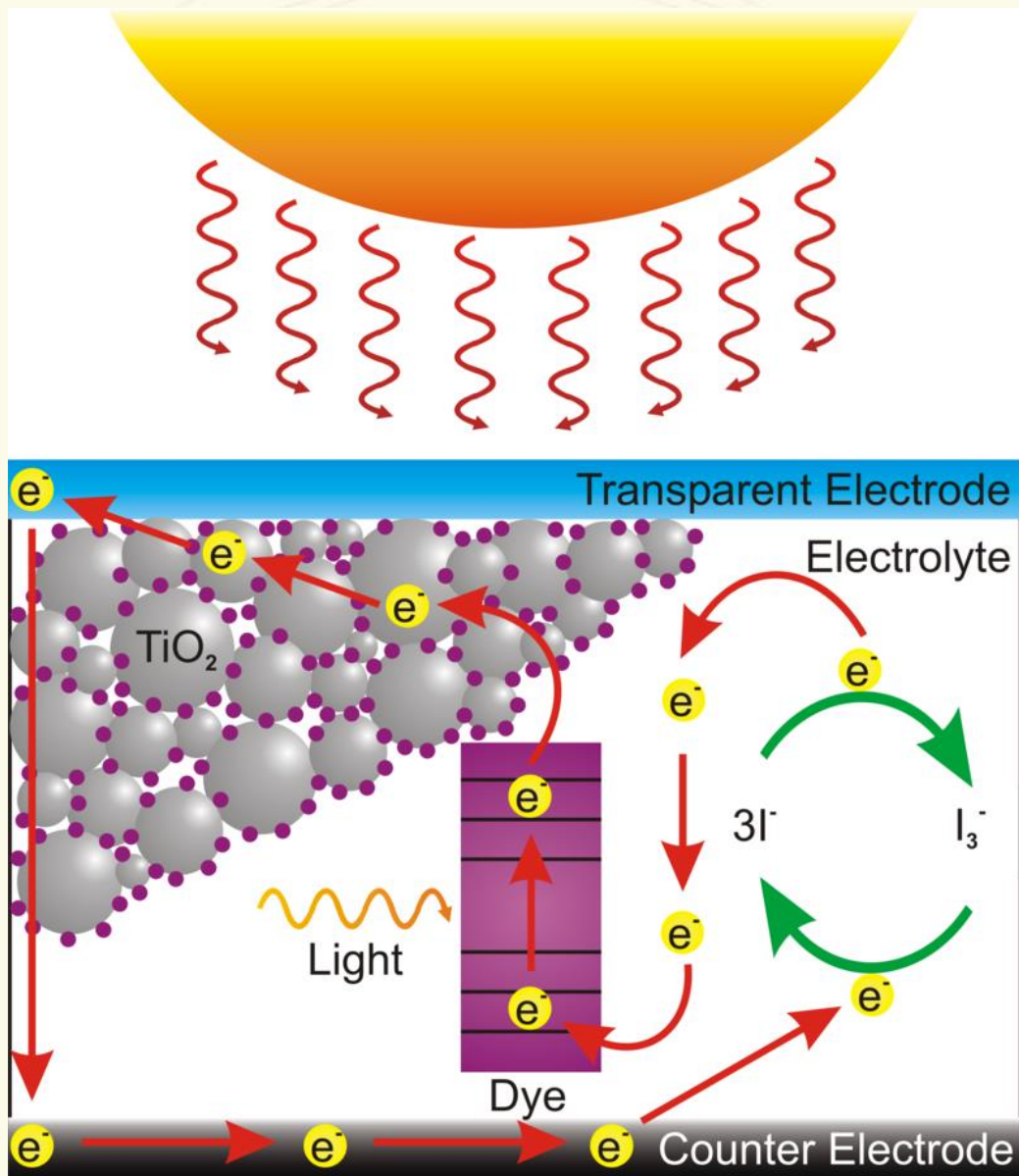


Normal stack



Inverted stack

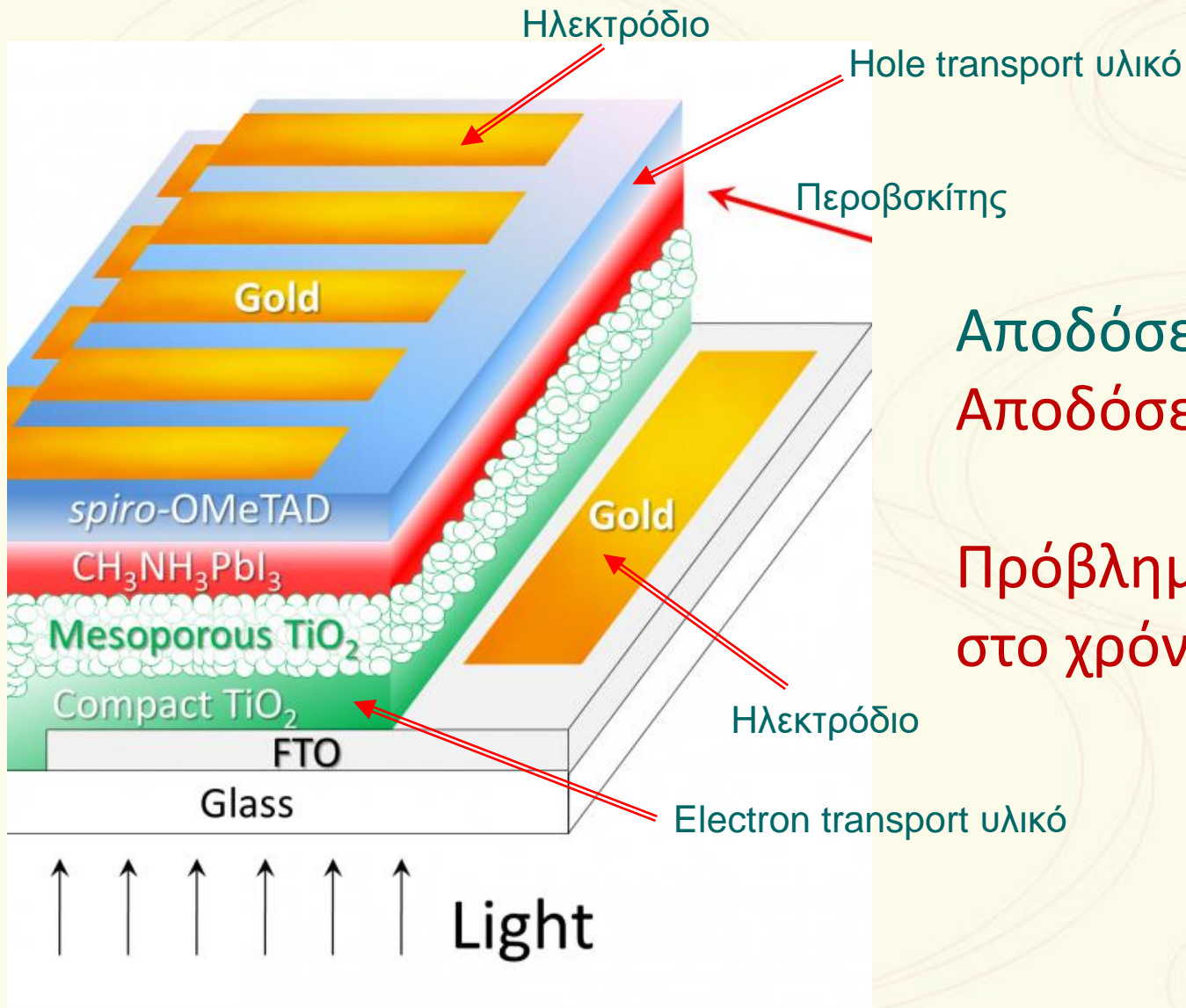
# Dye Sensitized Solar Cells



Αποδόσεις κελιών 10 %  
Αποδόσεις πλαισίων < 5 %

Πρόβλημα η σταθερότητα  
στο χρόνο

# Perovskite Solar Cells



Αποδόσεις κελιών 23 %  
Αποδόσεις πλαισίων ??

Πρόβλημα η σταθερότητα  
στο χρόνο

# Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Τεχνολογιών

---

- **Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο**

## Πλεονεκτήματα

- Υψηλές αποδόσεις
- Ώριμη Τεχνολογία – Ευκολία Παρασκευής

## Μειονεκτήματα

- Υψηλό Κόστος παρασκευής – Υψηλή Κατανάλωση Ενέργειας
- Υψηλή κατανάλωση πρώτων υλών

- **Λεπτών υμενίων Πυριτίου**

## Πλεονεκτήματα

- Χαμηλό Κόστος
- Μικρή κατανάλωση πρώτων υλών - ενέργειας

## Μειονεκτήματα

- Χαμηλές αποδόσεις – ΦΒ πλαίσια μικρής ισχύος
- Πτώση απόδοσης κατά τον κύκλο ζωής του
- Υψηλό κόστος απόκτησης εξοπλισμού

- **Λεπτών υμενίων CdTe και CIGS**

## Πλεονεκτήματα

- Μικρή κατανάλωση πρώτων υλών
- Υψηλές αποδόσεις - σταθερότητα

## Μειονεκτήματα

- Χρήση τοξικών υλικών
  - Υψηλή κατανάλωση ενέργειας
-