



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ενότητα 3: Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Γεώργιος Λευθεριώτης, Επίκουρος Καθηγητής
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Φυσικής



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

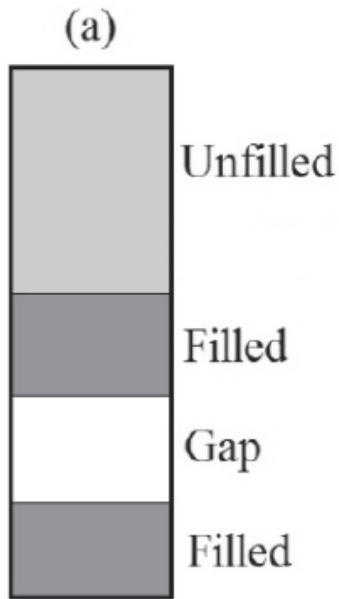
Σκοποί ενότητας

- Εισαγωγή στη φυσική των ημιαγωγών και της επαφής p-n, ως θεμελιώδη στοιχεία της θεωρίας των ΦΒ
- Ενεργειακοί υπολογισμοί και στοιχεία απόδοσης ΦΒ στοιχείων/πάνελ με τη βοήθεια του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος
- Παρακολούθηση της εξέλιξης τεχνολογιών ΦΒ μέχρι και τα ΦΒ 3^{ης} γενιάς
- Στοιχεία αγοράς τεχνολογίας ΦΒ

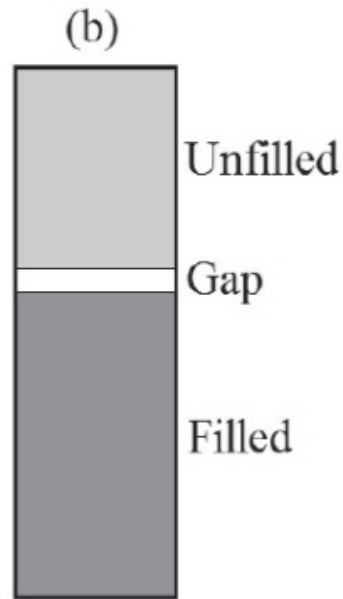
Περιεχόμενα ενότητας

- Γενικά στοιχεία ημιαγωγών
- Η επαφή p-n
- Ισοδύναμο κύκλωμα ΦΒ – (καμπύλη IV)
- Τεχνολογίες ΦΒ
- Στοιχεία αγοράς ΦΒ

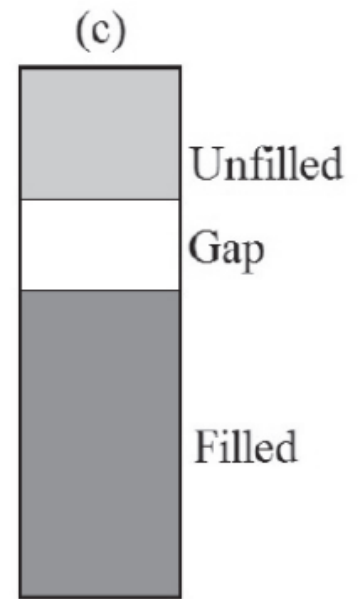
Αγωγοί-Μονωτές-Ημιαγωγοί



[7]
αγωγός

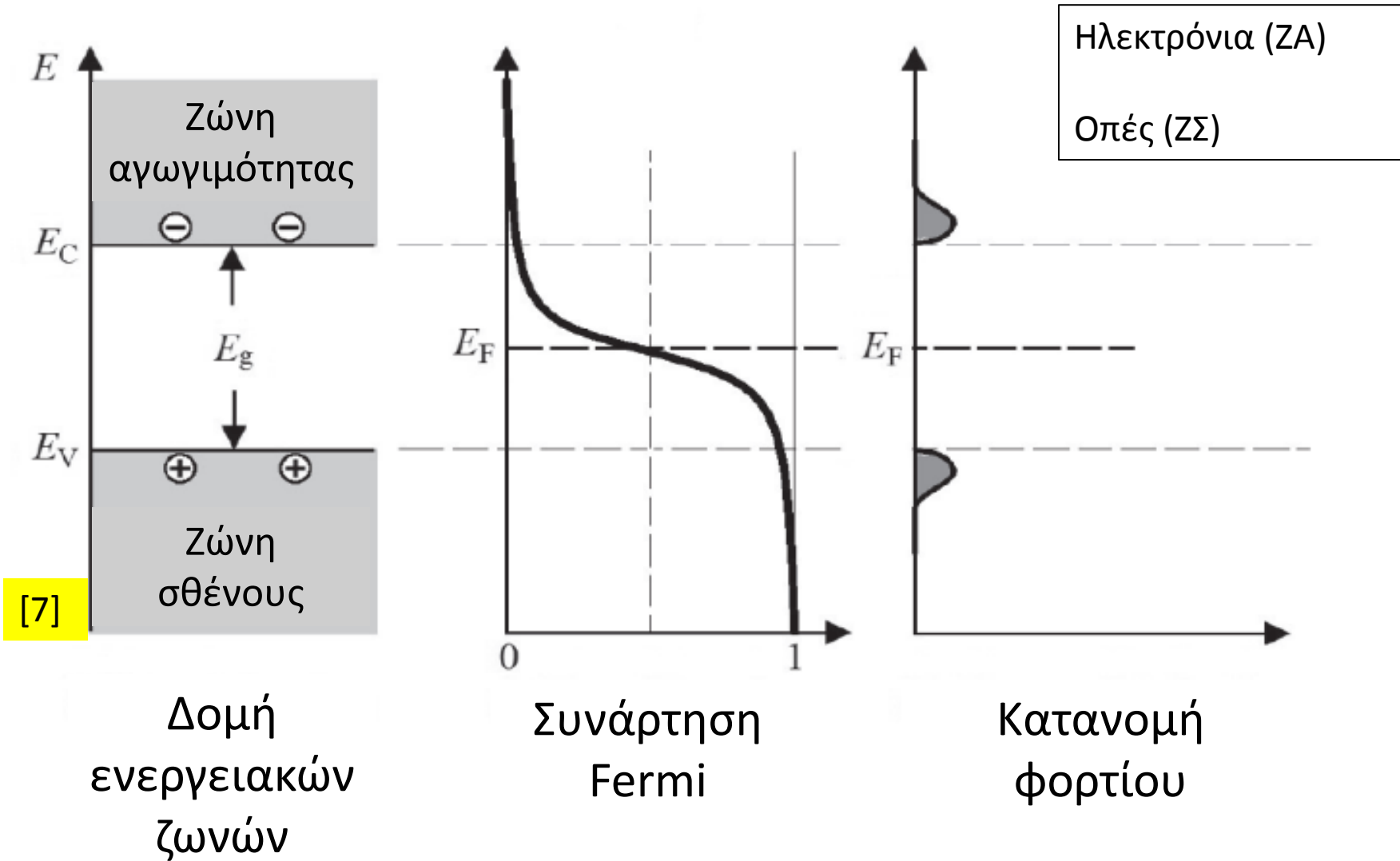


ημιαγωγός



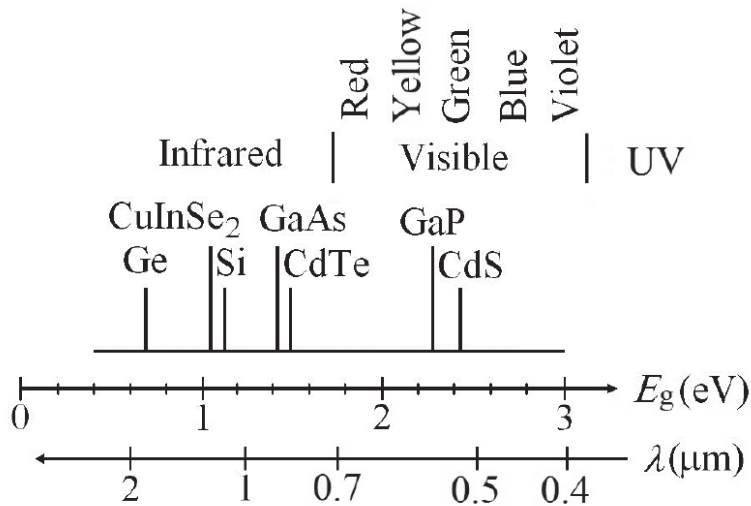
μονωτής

Ενεργειακά διαγράμματα ημιαγωγού



Ενεργειακό χάσμα και απορρόφηση

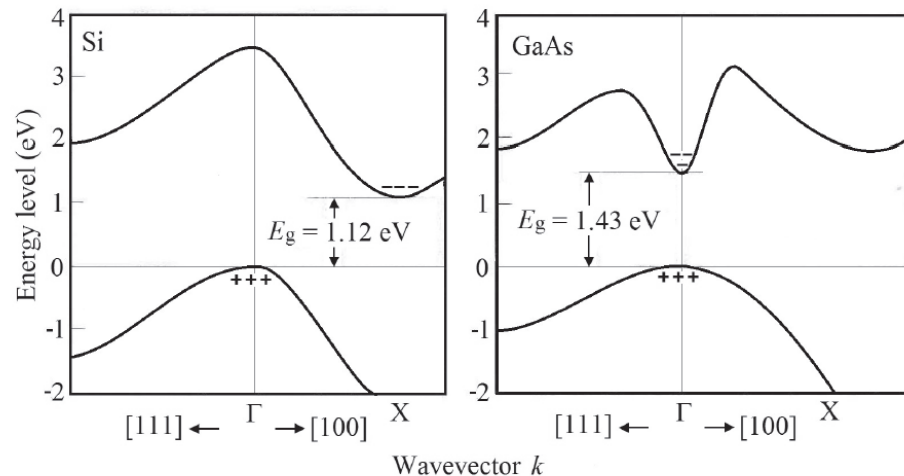
$$E_g = h\nu = \frac{hc}{\lambda_{\max}} \Rightarrow E_g [eV] = \frac{1,24}{\lambda_{\max} [\mu m]}$$



Χρειάζονται ημιαγωγοί μικρού
Ενεργειακού χάσματος ($\sim 1,5$ eV)

Οι ευρέως χάσματος (>3 eV) είναι
διαφανείς στο ορατό- υπέρυθρο.

Άμεσο- έμμεσο ενεργειακό χάσμα



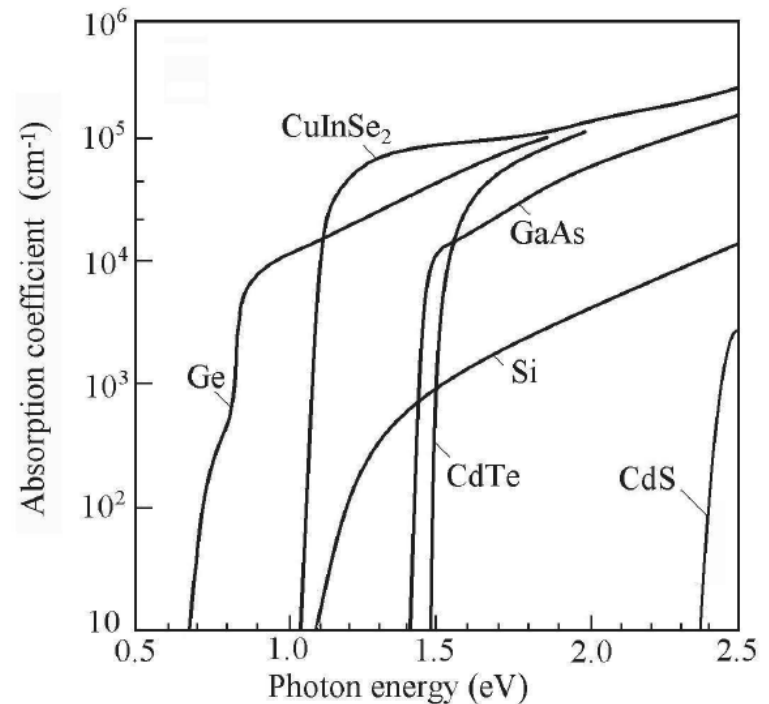
Νόμος του Beer για την απορρόφηση

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$$

➤ Άμεσο E_g Απότομη αύξηση της α , μεγάλες τιμές

➤ Έμμεσο E_g Σταδιακή αύξηση της α , μικρότερες τιμές

Συντελεστής απόσβεσης

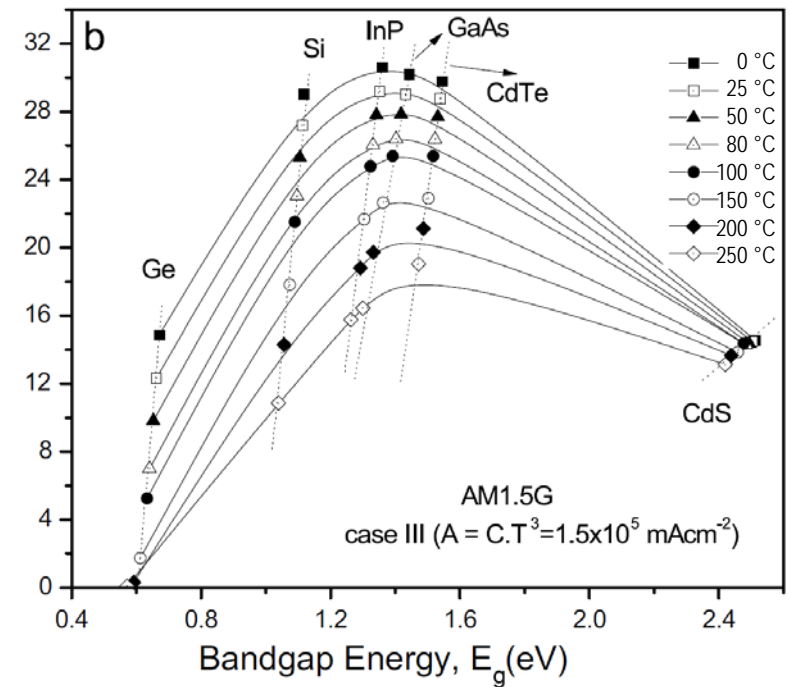


Μέγιστες αποδόσεις ημιαγωγών για χρήση σε ΦΒ

Όριο Shockley–Queisser
~31%

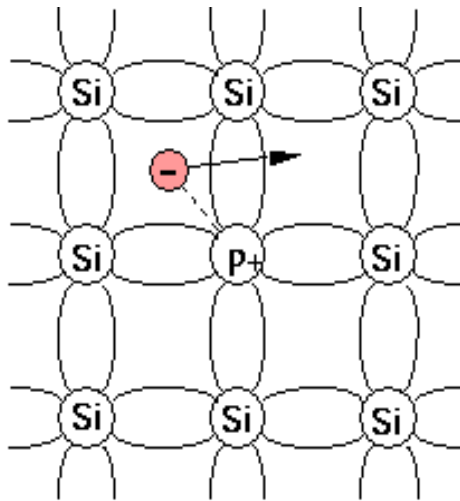
- Εξάρτηση από E_g
- Μείωση της απόδοσης με τη θερμοκρασία
- Μείωση του E_g με τη θερμοκρασία
- Επιλέγεται το πυρίτιο για οικονομικούς και περιβαλλοντικούς λόγους

Αποδόσεις τεχνολογιών PV

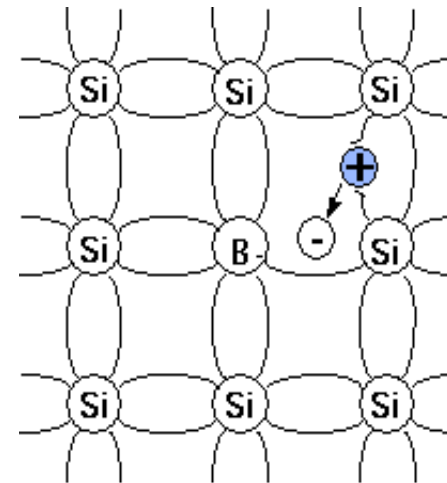


Ημιαγωγοί με προσμίξεις τύπου n / τύπου p (1)

Τύπου-n



Τύπου-p

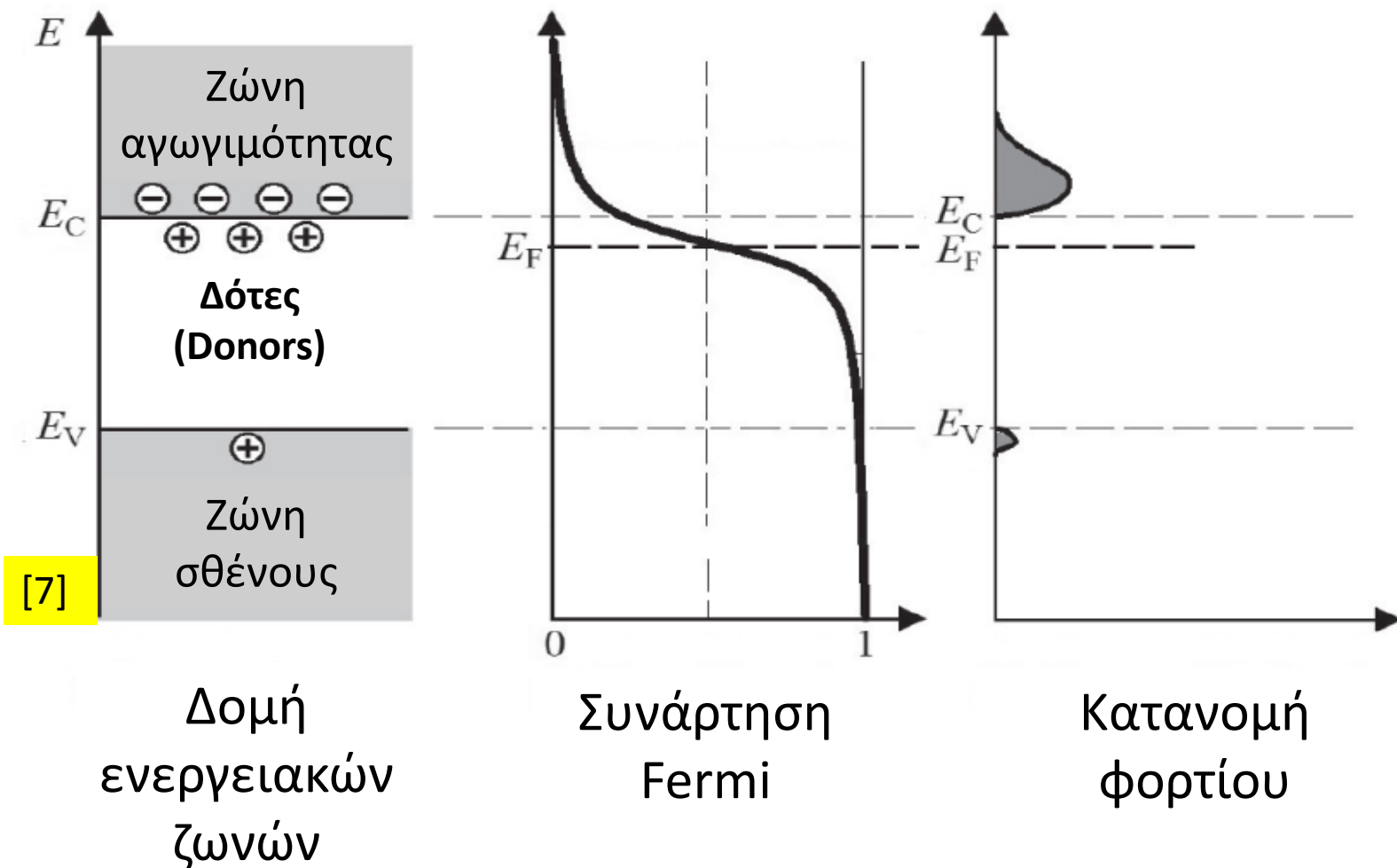


<http://commons.wikimedia.org>

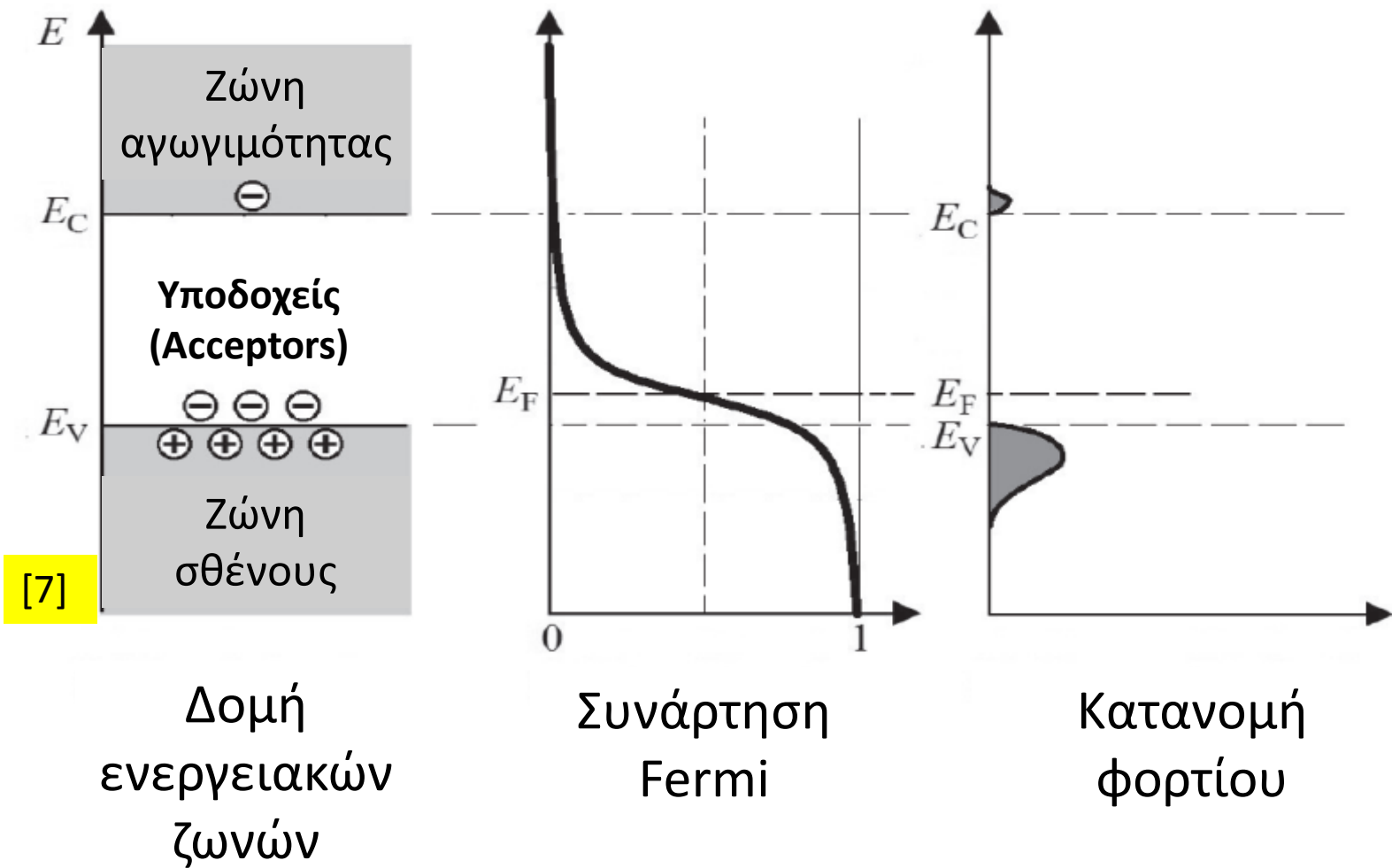
$$N_{A,D} = 10^{16} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_{Si} = 5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

Ημιαγωγοί με προσμίξεις τύπου n / τύπου p (2)

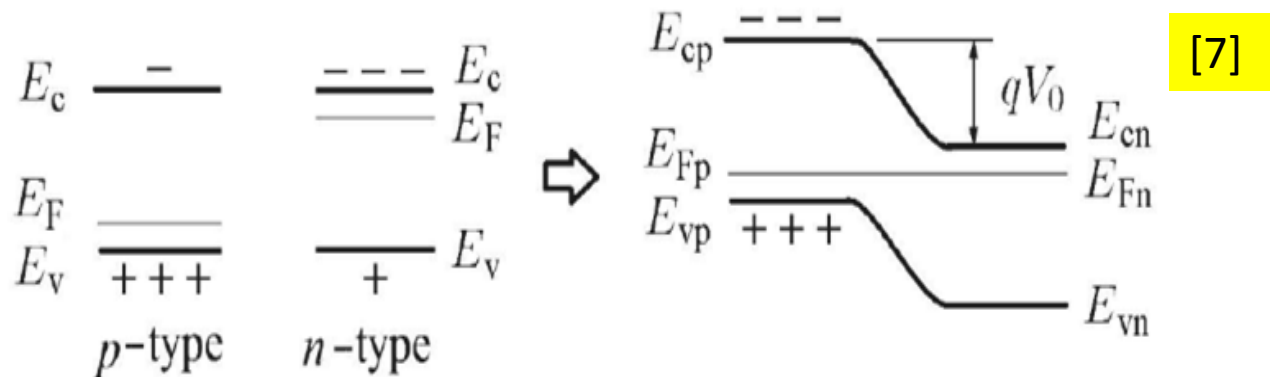


Ημιαγωγοί με προσμίξεις τύπου n / τύπου p (3)

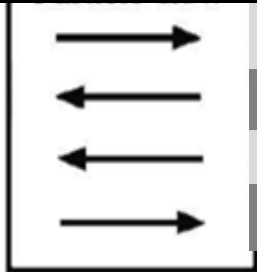


Η επαφή pn – εισαγωγικά (1)

- Διάχυση φορέων πλειοψηφίας εκατέρωθεν της επαφής
- Δημιουργία περιοχής έλλειψης φορέων (ή απογύμνωσης)

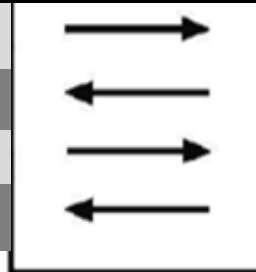


Ροή Σωματιδίων



Διάχυση οπών (hole diffusion)
Ολίσθηση οπών (hole drift)
Διάχυση ηλεκτρονίων (electron diffusion)
Ολίσθηση ηλεκτρονίων (electron drift)

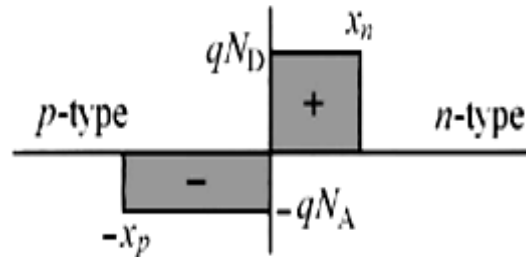
Ρεύμα



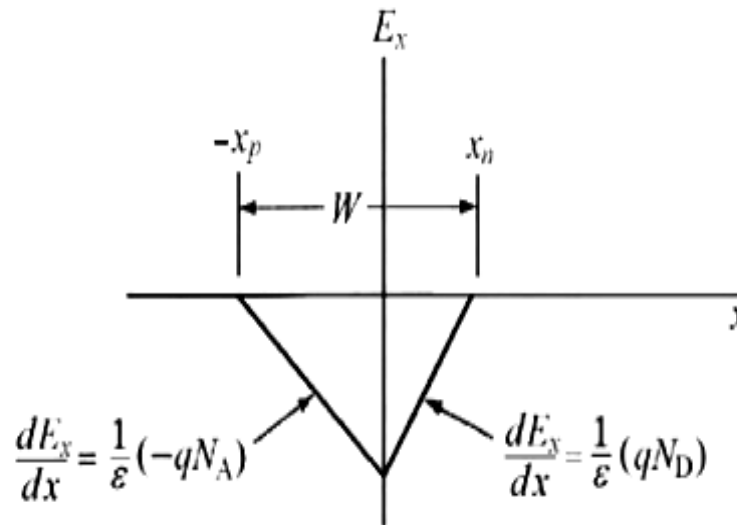
Η επαφή pn – εισαγωγικά (2)

- Φορτίο χώρου- δυναμικό επαφής
- Διέλευση φορέων με «ολίσθηση» (ευνοείται η διέλευση φορέων μειοψηφίας)

Κατανομή φορτίου



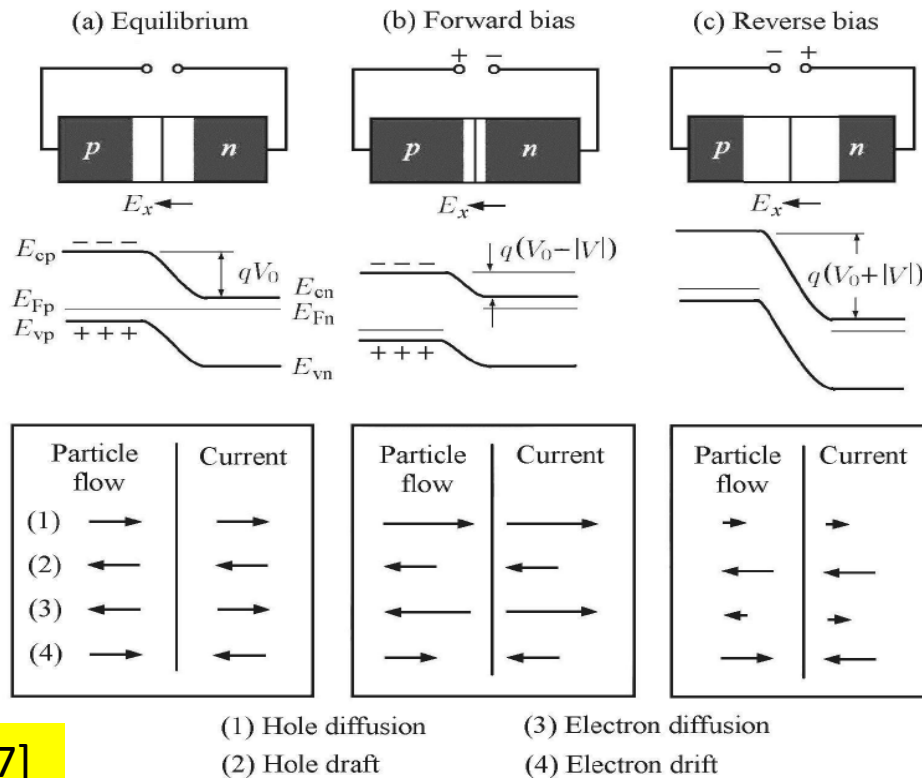
Ηλεκτρικό πεδίο



Λειτουργία επαφής ως διόδου

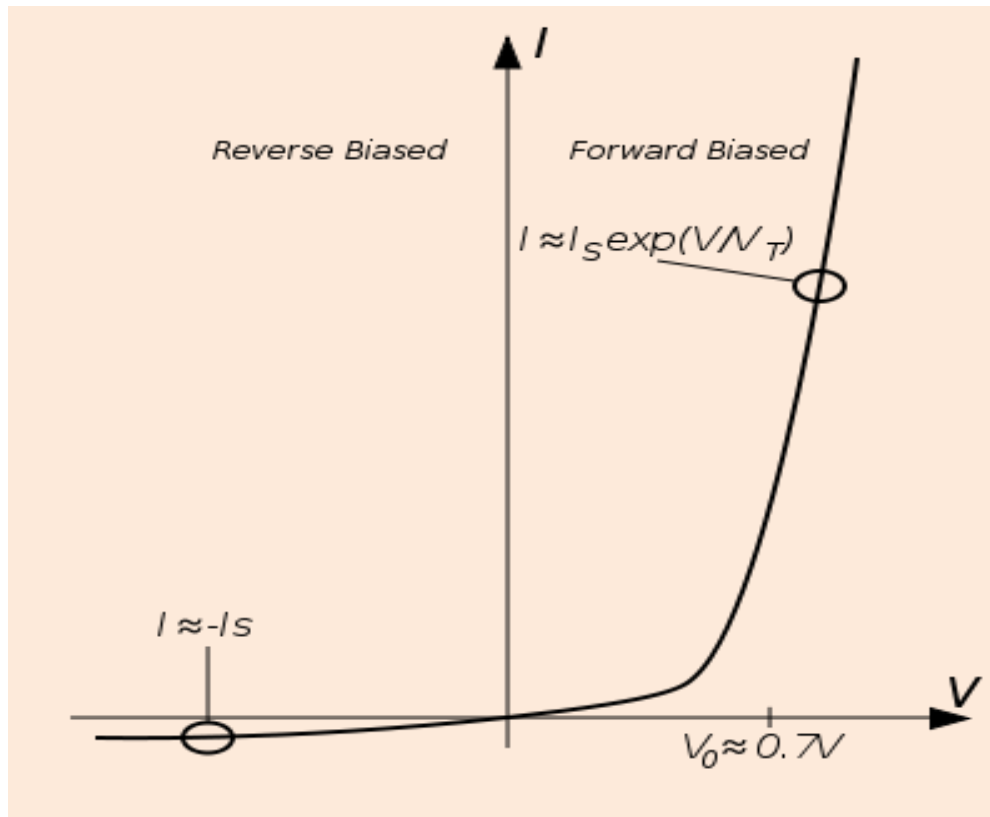
ορθή και ανάστροφη πόλωση (1)

- Ορθή πόλωση: Μειώνεται το δυναμικό επαφής, διευκολύνεται η διάχυση φορέων πλειοψηφίας. Η διόδος «άγει»
- Ανάστροφη πόλωση: Αυξάνεται το δυναμικό επαφής, εμποδίζεται η διέλευση φορέων πλειοψηφίας. Η διόδος δεν «άγει», παρατηρείται μόνο διαρροή, «ρεύμα κόρου» I_0



Λειτουργία επαφής ως διόδου ορθή και ανάστροφη πόλωση (2)

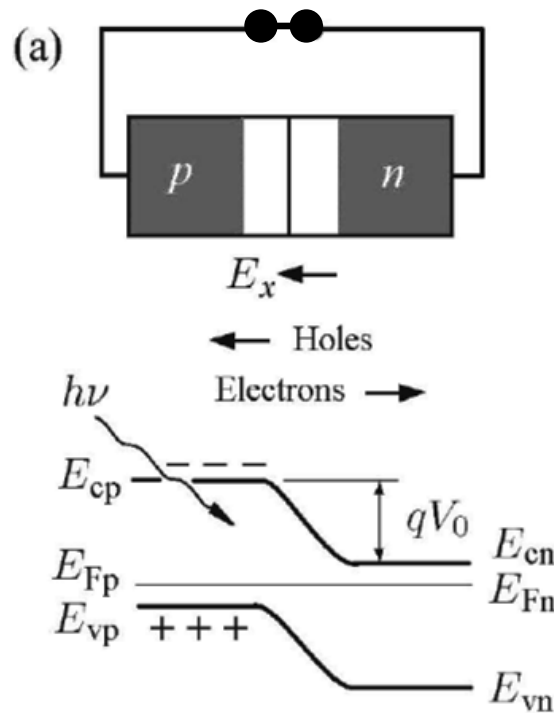
- Ορθή πόλωση: Μειώνεται το δυναμικό επαφής, διευκολύνεται η διάχυση φορέων πλειοψηφίας. Η δίοδος «άγει»
- Ανάστροφη πόλωση: Αυξάνεται το δυναμικό επαφής, εμποδίζεται η διέλευση φορέων πλειοψηφίας. Η δίοδος δεν «άγει», παρατηρείται μόνο διαρροή, «ρεύμα κόρου» I_0



Λειτουργία της επαφής ως ΦΒ (1)

Ανοικτό και κλειστό κύκλωμα

- Όταν η επαφή φωτίζεται, δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίου-οπής.
- Οι φορείς μειοψηφίας διέρχονται από την επαφή και «διαχωρίζονται»
- Βραχυκύκλωμα: Φωτόρρευμα αρνητικής φοράς, ανάλογο της έντασης ακτινοβολίας
- Ανοικτό κύκλωμα: Ισορροπία φωτορρεύματος και ρεύματος διόδου. Τάση ανοικτού κυκλώματος (ορθή πόλωση)

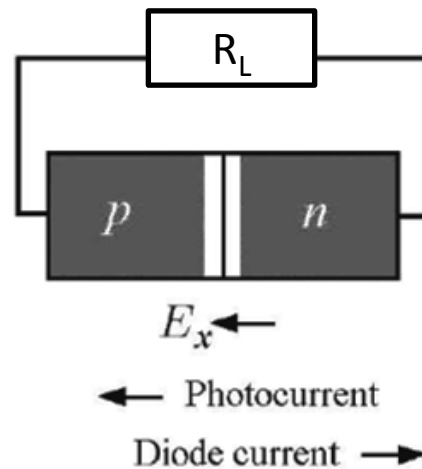


[7]

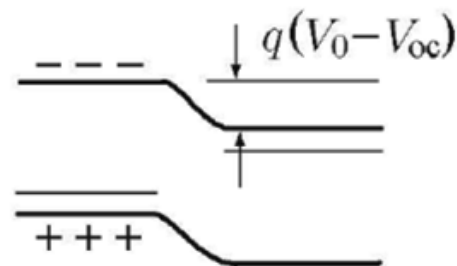
Λειτουργία της επαφής ως ΦΒ (2)

Ανοικτό και κλειστό κύκλωμα

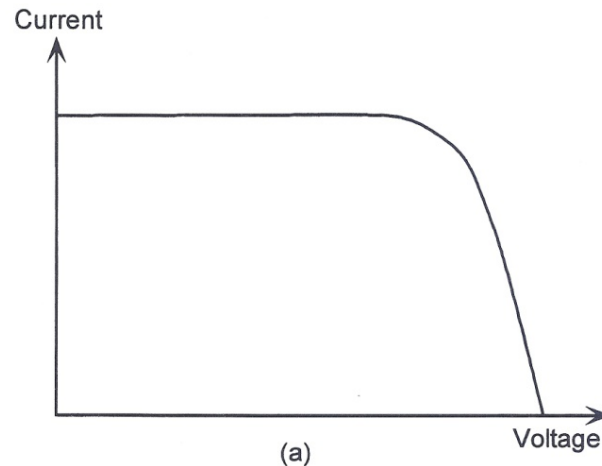
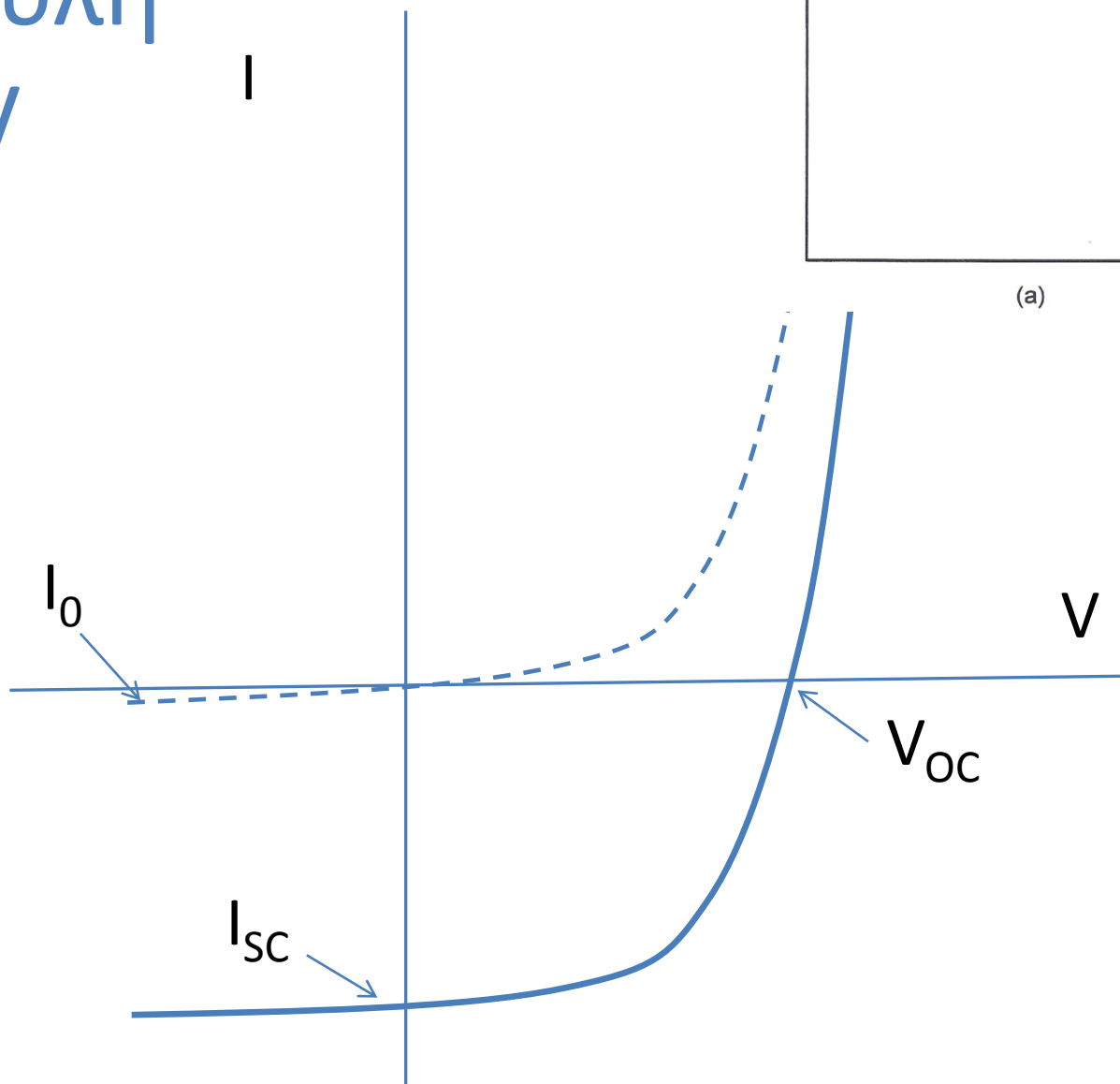
Σύνδεση καταναλωτή (R_L): Ρεύμα αρνητικής φοράς, τάση θετικής φοράς



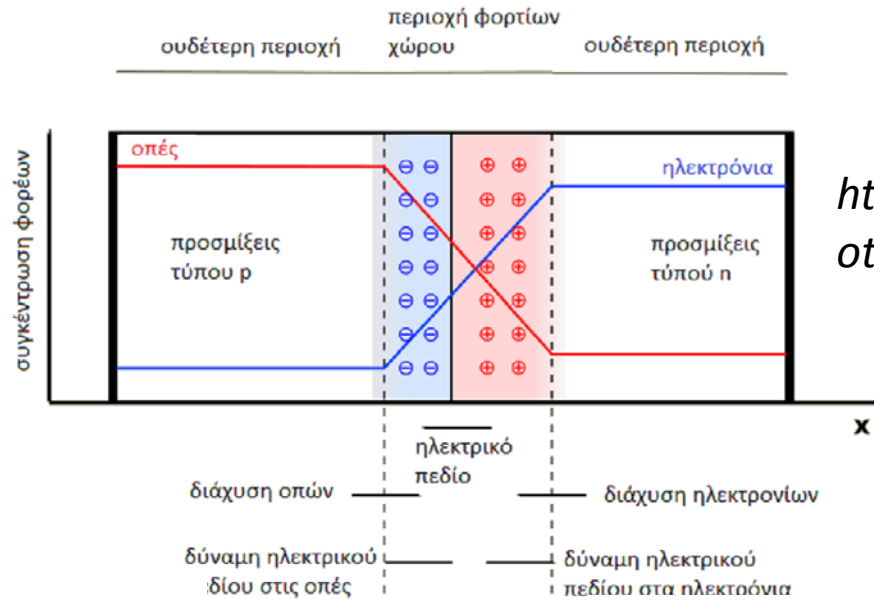
[7]



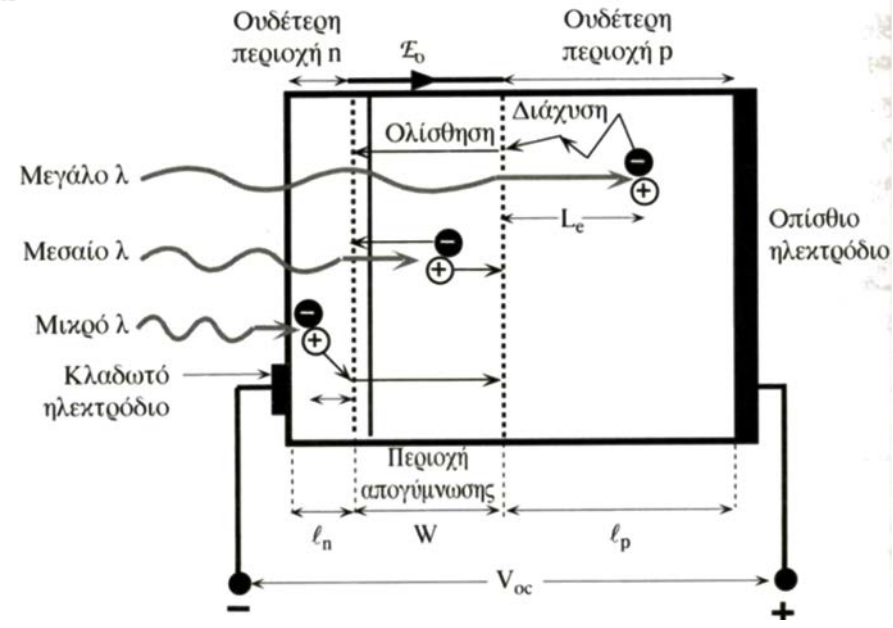
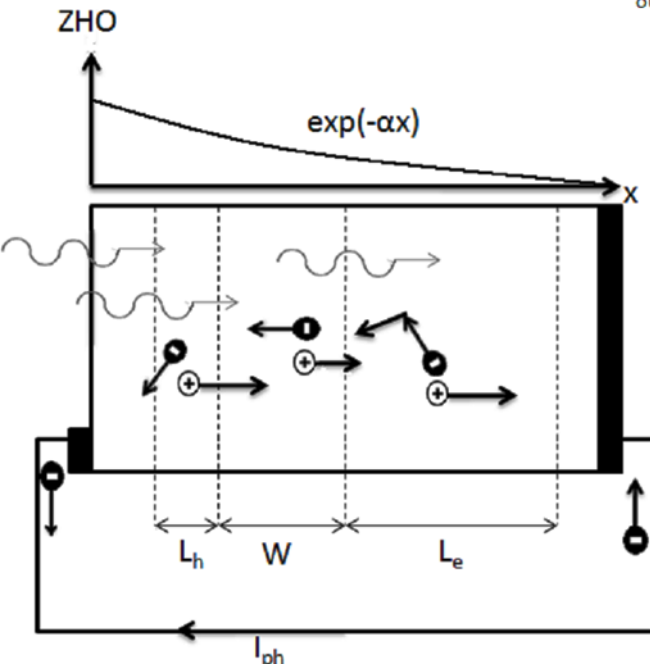
Καμπύλη I-V



Συγκέντρωση – Κίνηση Φορέων

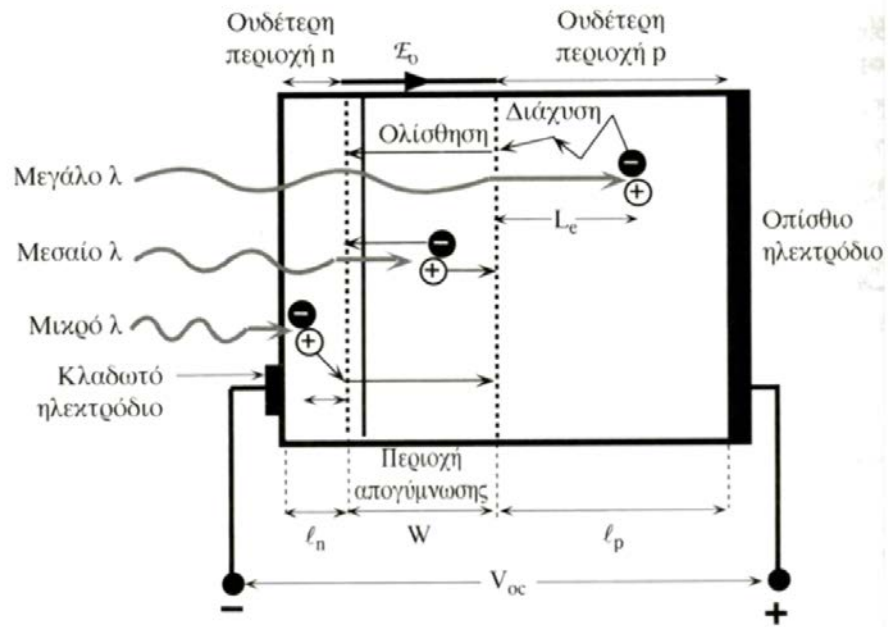
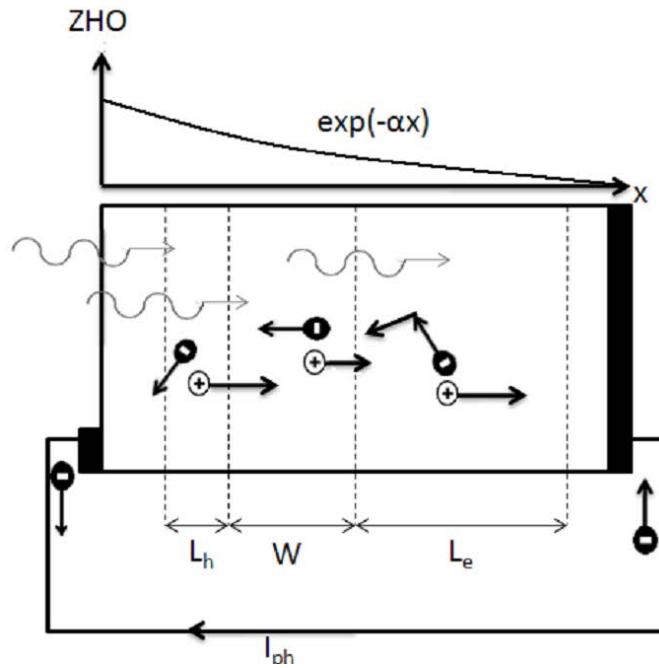


<http://me3007.wikidot.com/photovoltaic-energetics>



[7]

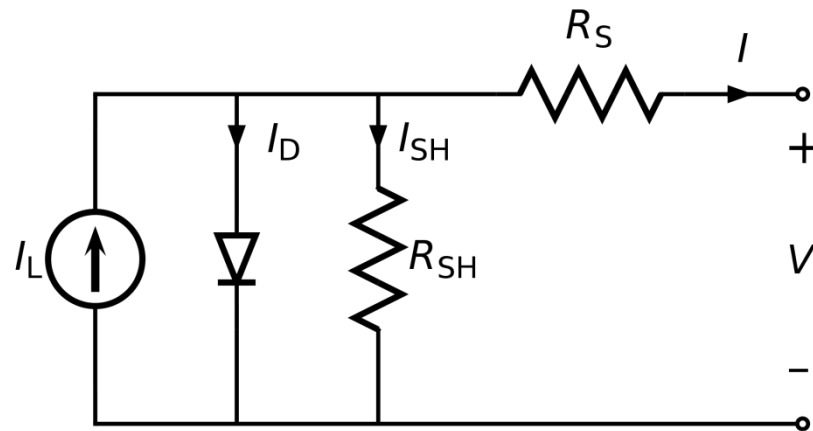
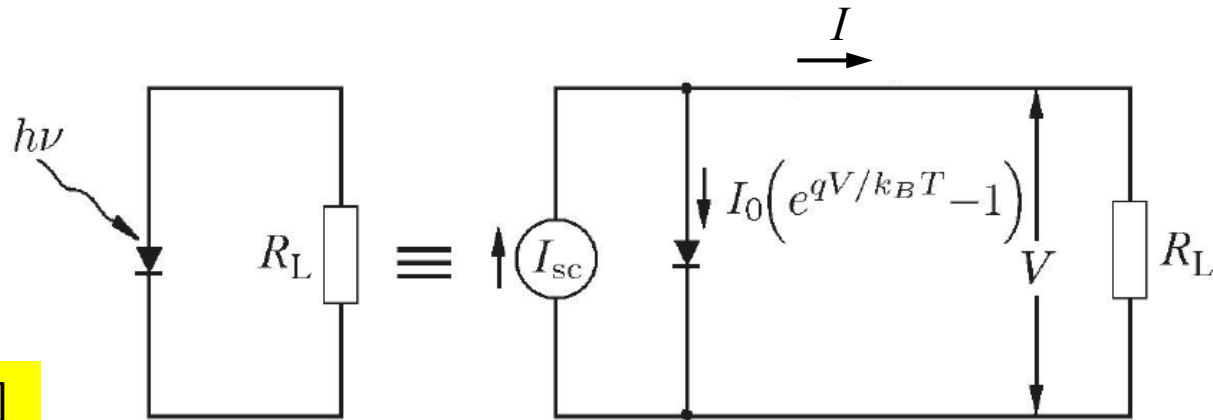
Γιατί η περιοχή p έχει πολύ μεγαλύτερο πάχος από την περιοχή n ;



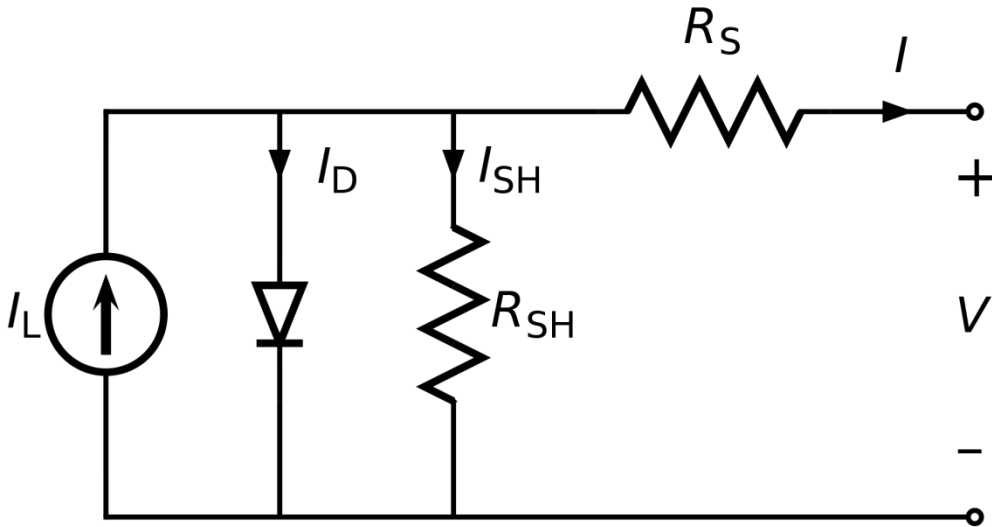
Διότι το μήκος διάχυσης των ηλεκτρονίων είναι πολύ μεγαλύτερο εκείνου των οπών. Επομένως η απορρόφηση των φωτονίων μεγάλου μήκους πρέπει να γίνεται στην περιοχή p ώστε να «φτάνουν» στην επαφή p - n χωρίς επανασύνδεση.

Ισοδύναμο κύκλωμα ΦΒ (1)

[7]



Ισοδύναμο κύκλωμα ΦΒ (2)



Χαρακτηριστική της διόδου

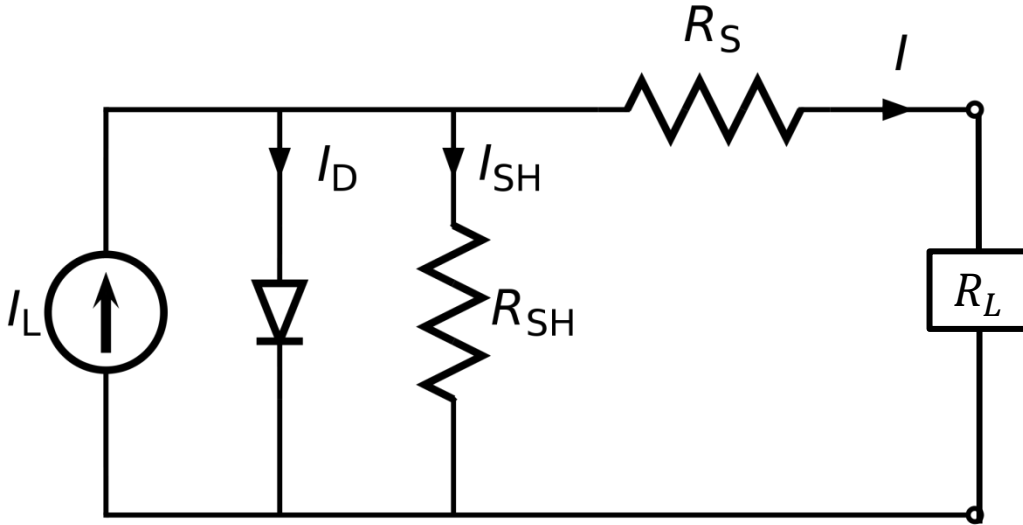
$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

Φωτόρευμα

$$I_{ph} = q\xi N_{ph} \sim G_T$$

N_{ph} : αριθμός των φωτονίων, ξ : σταθερά, G_T : ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας

Ισοδύναμο κύκλωμα ΦΒ (3)



Χαρακτηριστική της διόδου

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

Φωτόρευμα

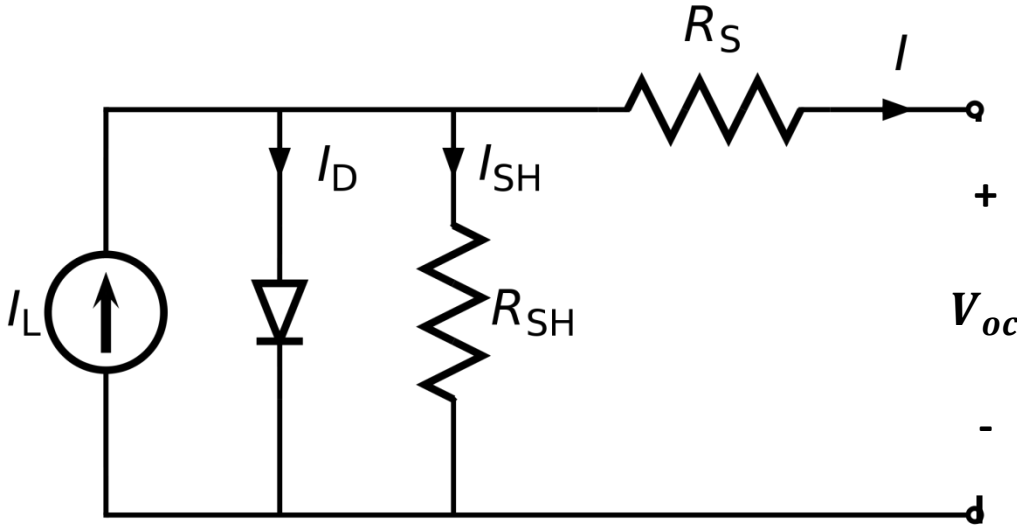
$$I_{ph} = q\xi N_{ph} \sim G_T$$

N_{ph} : αριθμός των φωτονίων, ξ : σταθερά, G_T : ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

$$V = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_{ph} - I}{I_0} + 1 \right]$$

Ισοδύναμο κύκλωμα ΦΒ (2)



Χαρακτηριστική της διόδου

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

Φωτόρευμα

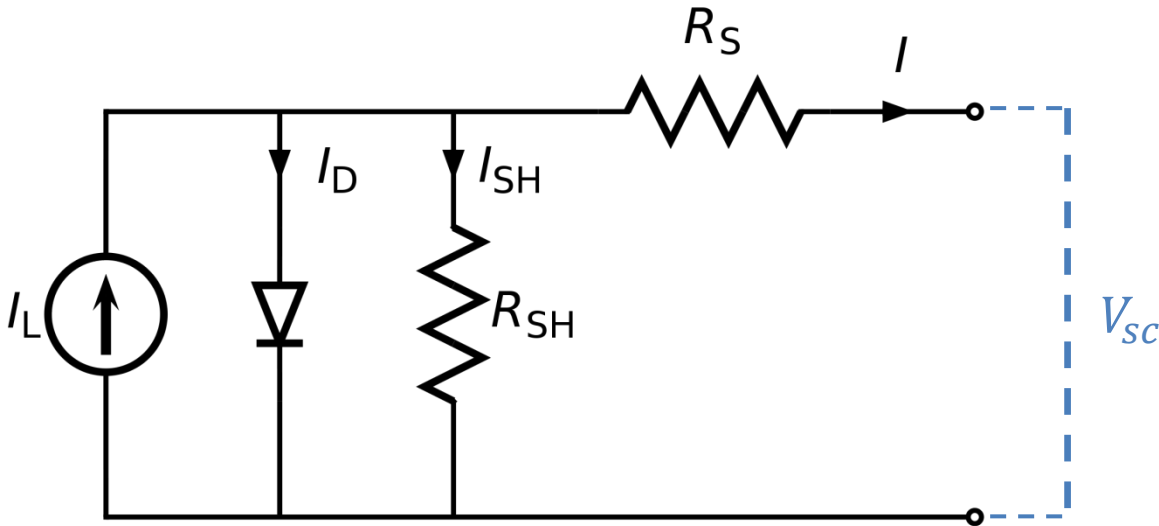
$$I_{ph} = q\xi N_{ph} \sim G_T$$

N_{ph} : αριθμός των φωτονίων, ξ : σταθερά, G_T : ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας

Συνθήκες ανοικτού κυκλώματος, $I=0$

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right] \approx \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_0} \right] \quad \text{διότι } I_{ph} \gg I_0.$$

Ισοδύναμο κύκλωμα ΦΒ (2)



Χαρακτηριστική της διόδου

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

Φωτόρευμα

$$I_{ph} = q\xi N_{ph} \sim G_T$$

N_{ph} : αριθμός των φωτονίων, ξ : σταθερά, G_T : ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας

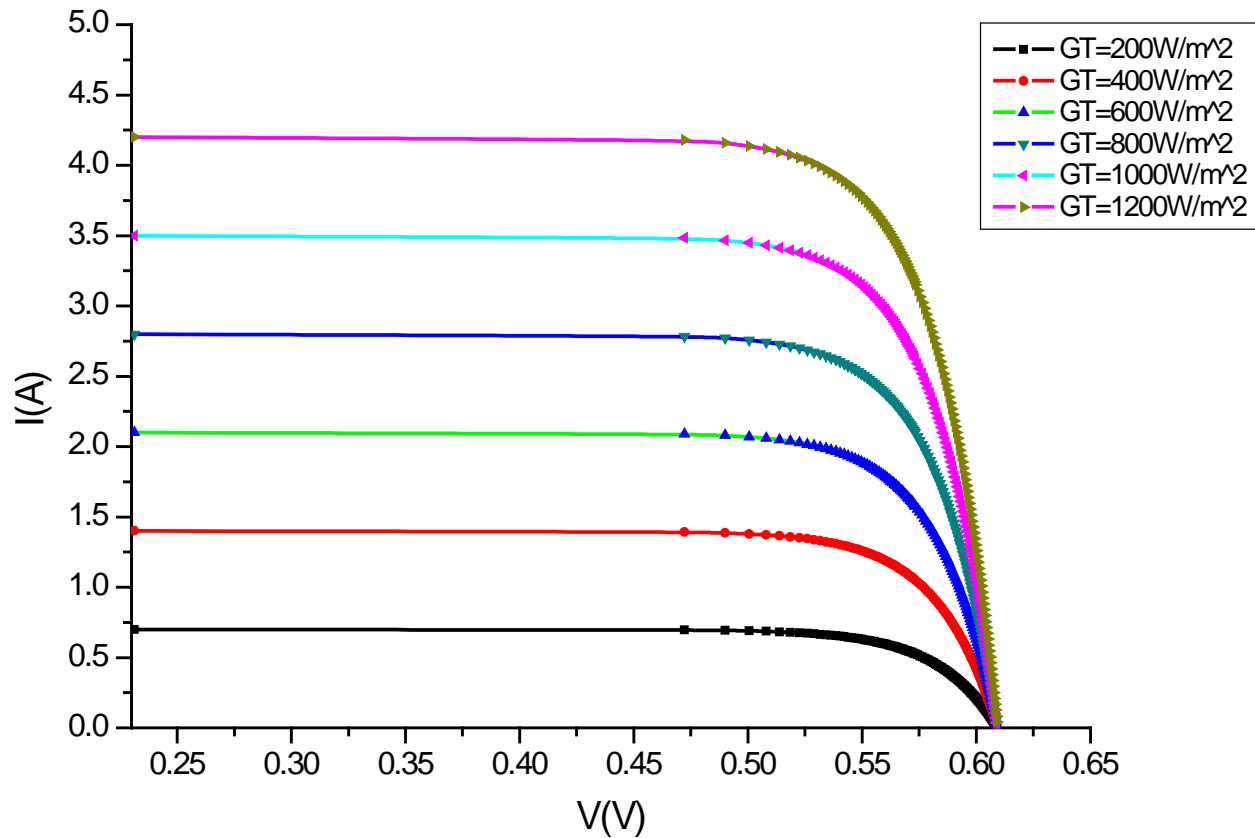
Συνθήκες κλειστού κυκλώματος,

$$V=0, I_d=0,$$

$$I_{SC} = I_{ph}$$

Επίδραση έντασης ακτινοβολίας στην I-V

$$I_{SC} \sim G_T \quad V_{OC} \sim \ln G_T$$



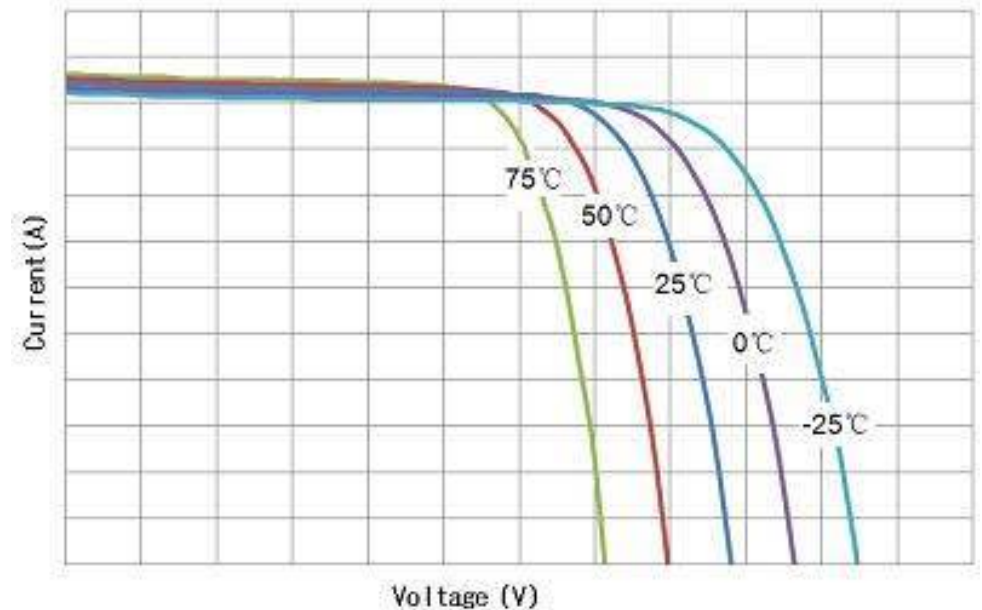
Επίδραση της θερμοκρασίας στην V_{oc}

$$V_{oc} \approx \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_0} \right] \quad I_0 = qC e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

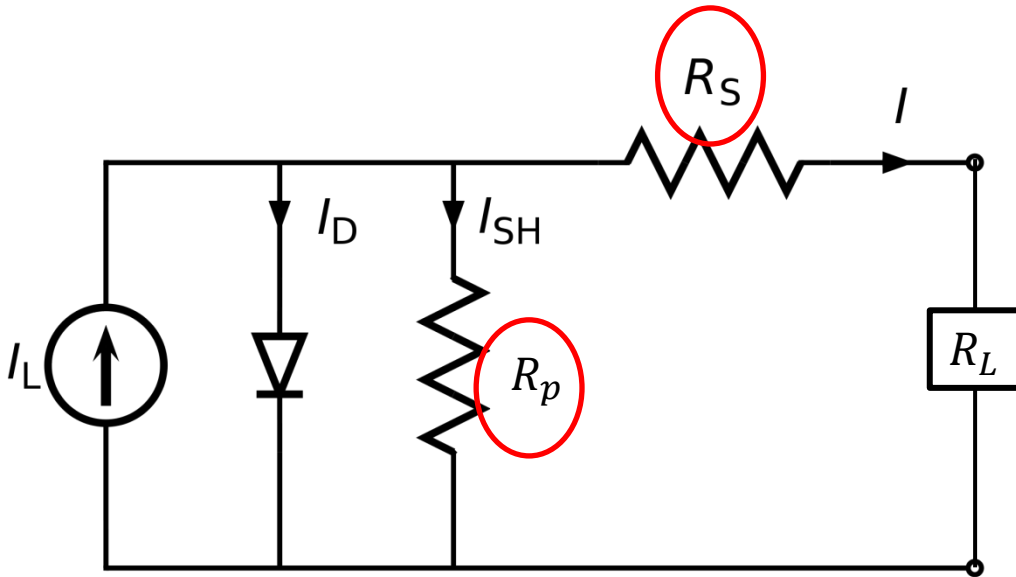
όπου E_g το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού

$$V_{oc} \approx \frac{E_g}{q} - \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{C}{\xi N_{ph}} \right]$$

- V_{oc} μειώνεται γραμμικά με τη T
- V_{oc} ανάλογη με E_g



Πραγματικό (μη ιδανικό) Φ/Β

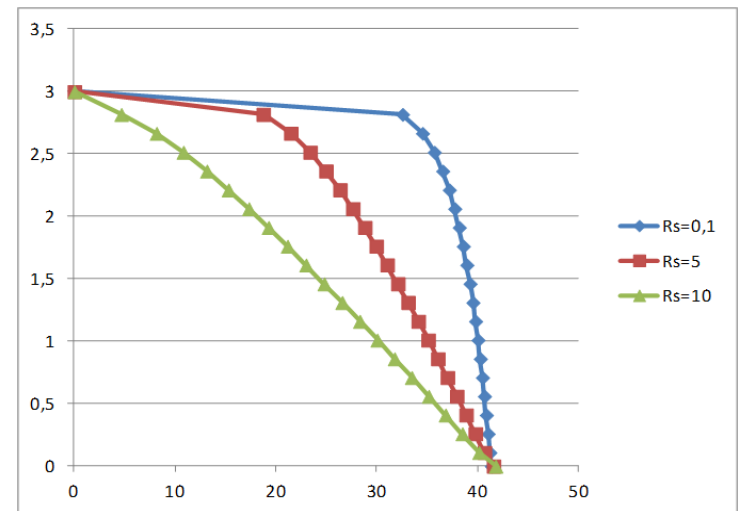
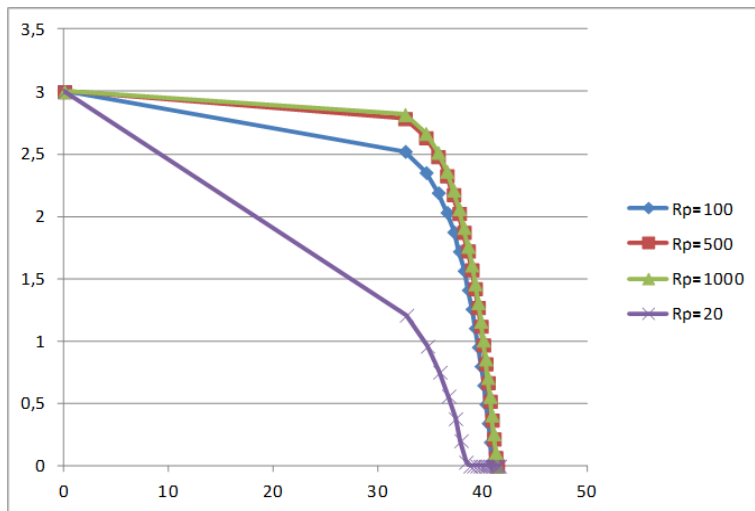


R_s : Αντιστάσεις επαφών

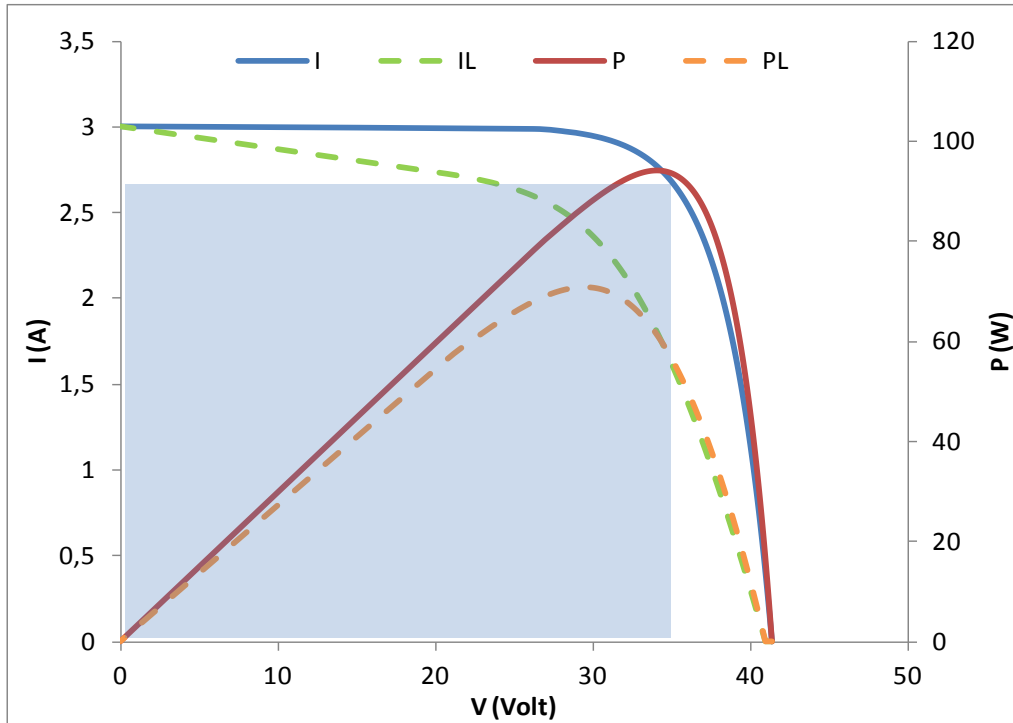
R_p : Αντιστάσεις επανασύνδεσης

$$I_L = I - \frac{V}{R_p} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - \frac{V}{R_p}$$

$$V_L = V - I_L R_s = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_{ph} - I}{I_0} + 1 \right] - I_L R_s$$



Απόδοση φωτοβολταϊκού



Ηλεκτρική Ισχύς (Μέγιστη)

$$P_m = I_m V_m$$

Απόδοση

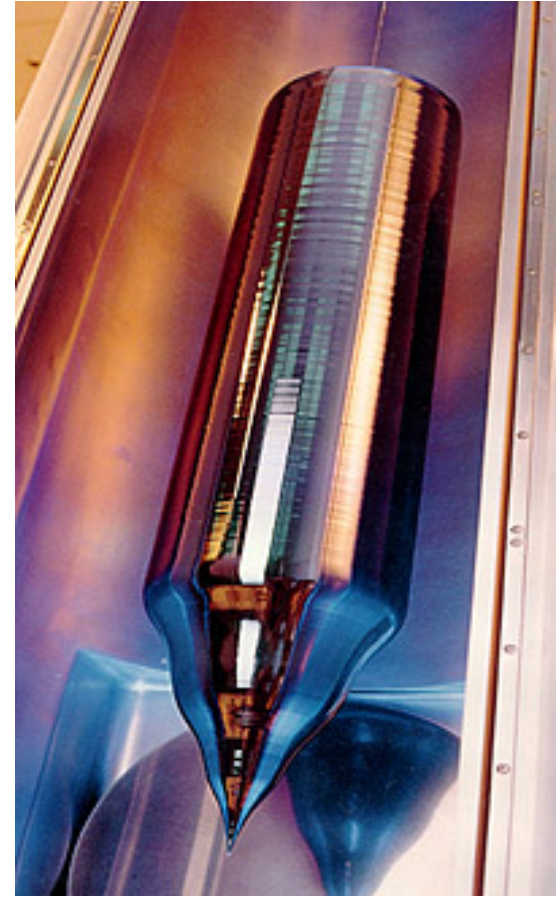
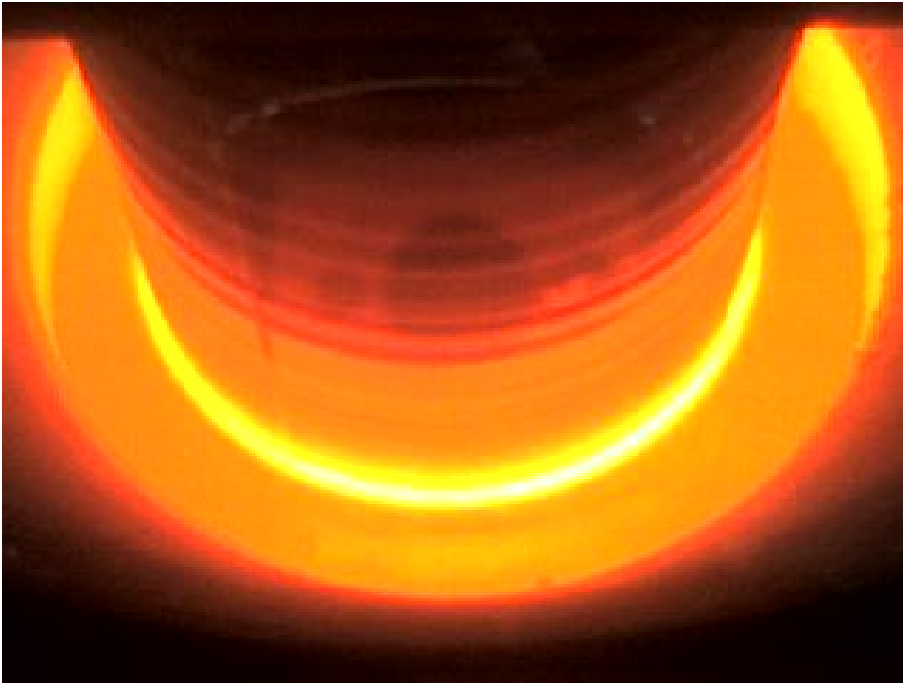
$$\eta = \frac{P_m}{AG_T} = \frac{I_m V_m}{AG_T}$$

Παράγοντας Κάλυψης (Fill Factor)

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

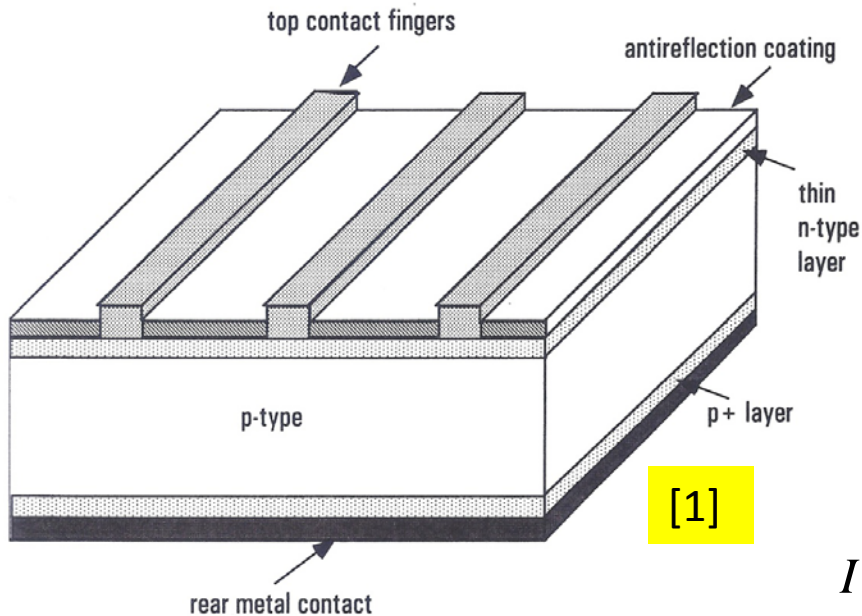
$$\eta = \frac{FF I_{sc} V_{oc}}{AG_T} \quad \text{ή} \quad \eta = \frac{FF J_{sc} V_{oc}}{G_T} \quad \text{όπου } J \text{ η πυκνότητα ρεύματος}$$

Παρασκευή κρυσταλλικού πυριτίου Μέθοδος Czochralski



<http://commons.wikimedia.org>

Πρώιμο ΦΒ κρυσταλλικού πυριτίου για διαστημικές εφαρμογές



Βάθος επαφής pn: $\sim 1\mu\text{m}$.
Προκύπτει από το **νόμο BEER** για απορρόφηση του 50% της ακτινοβολίας με $\lambda = 0,55\mu\text{m}$

$$I(x) = I_0 e^{-ax} \Rightarrow \frac{I(x)}{I_0} = 0,5 = e^{-ax} \Rightarrow x = \frac{-\ln(0,5)}{a}$$

για $\lambda = 0,55\mu\text{m}$, $a = 7000\text{ cm}^{-1}$ και $x = 0,99\mu\text{m}$

Πάχος κυψελίδας: για απορρόφηση 99% σε $\lambda = 1,0\mu\text{m}$, $a = 100\text{ cm}^{-1}$ προκύπτει $x = 460\mu\text{m}$. Συνήθως 200-300 μm για οικονομικούς-κατασκευαστικούς λόγους

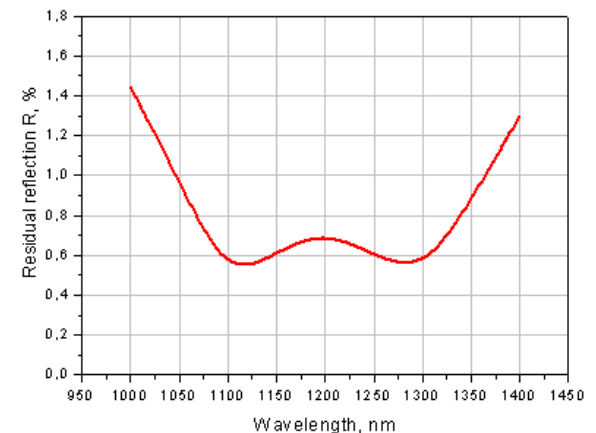
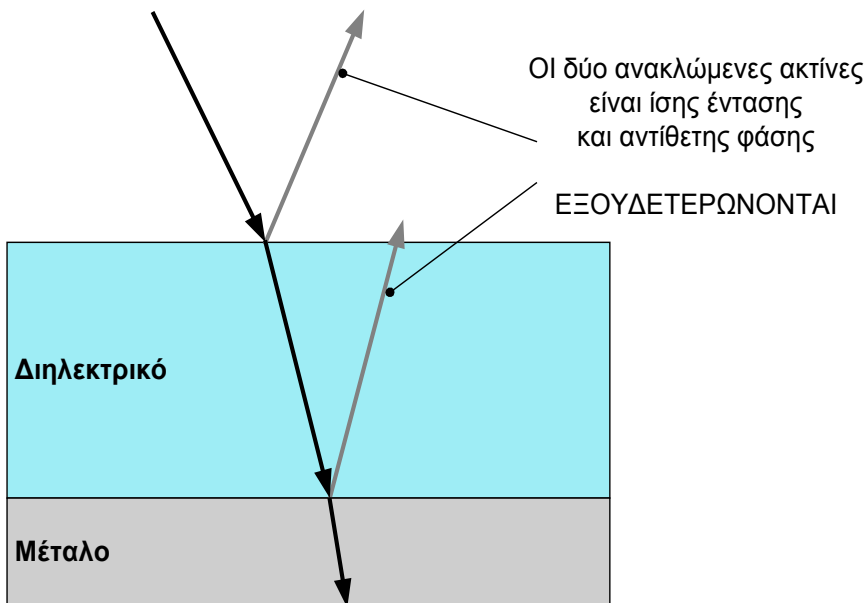
Αντιανακλαστικές επιστρώσεις

$n_{SI}=3,4$ Ανακλαστικότητα ως προς τον αέρα: $R = \frac{(3,4-1)^2}{(3,4+1)^2} = 0,297 \sim 30\%$

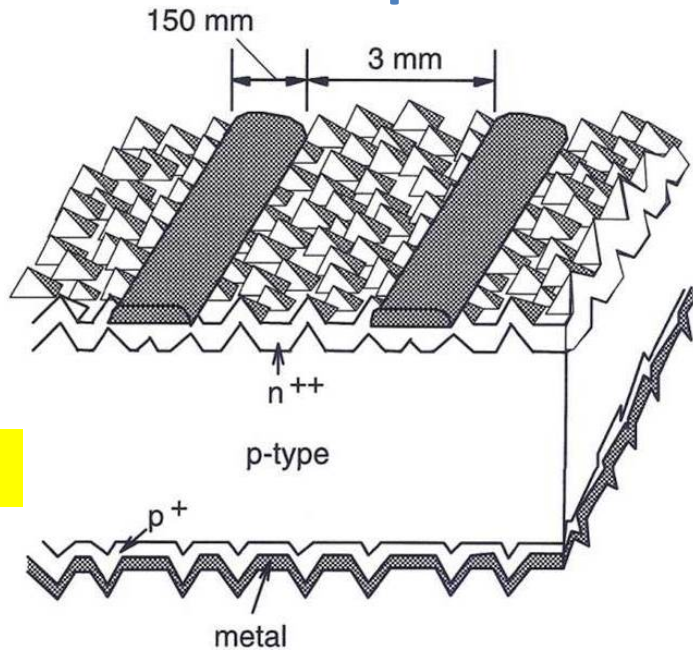
Αναγκαιότητα αντιανακλαστικών επιστρώσεων με κατάλληλο δ.δ. και πάχος

➤ Κατάλληλα υλικά SiO_2 ($n=1,5$), CeO_2 ($n=2,0$)

Πλακίδιο $\lambda/4$. $nd=\lambda/4$ $n = \sqrt{n_{Si} n_{\alpha \rho \alpha}} = 1,84$



«Εμπορικά» ΦΒ κρυσταλλικού πυριτίου, $\eta=11-15\%$ «1^{ης} γενιάς»



[1]

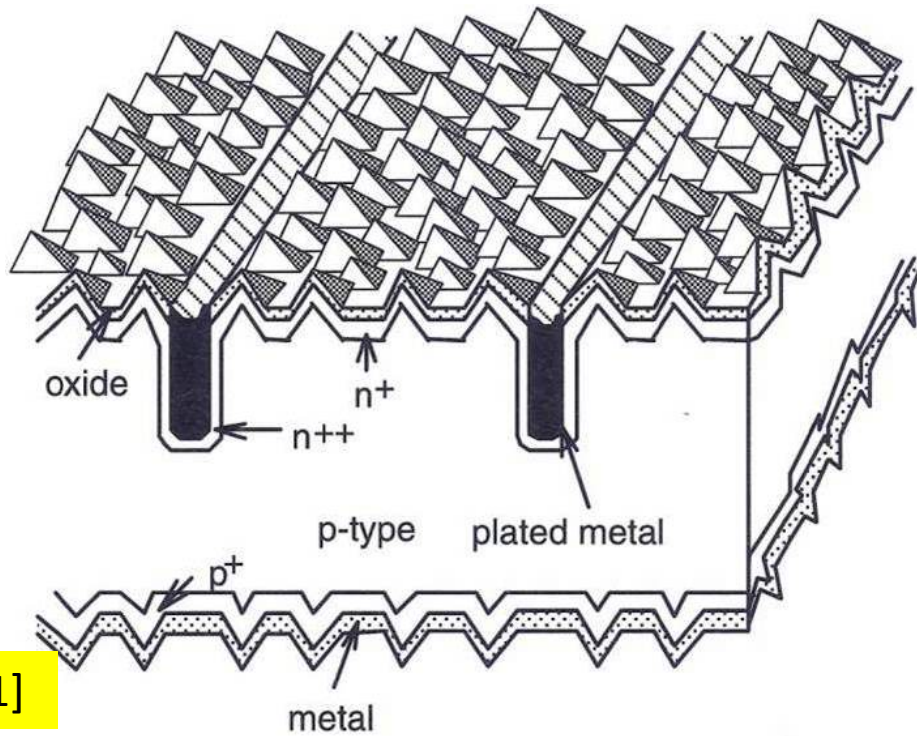
<http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>

- Αρχικό υλικό: Sz wafers.
- Κόβονται «τετράγωνα»
- Δημιουργία «πυραμίδων» με NaOH (αντί για αντιανακλαστικό)
- τραχύτητα και στην πίσω επιφάνεια
- επαφές με τη μέθοδο της «εκτύπωσης με οθόνη».

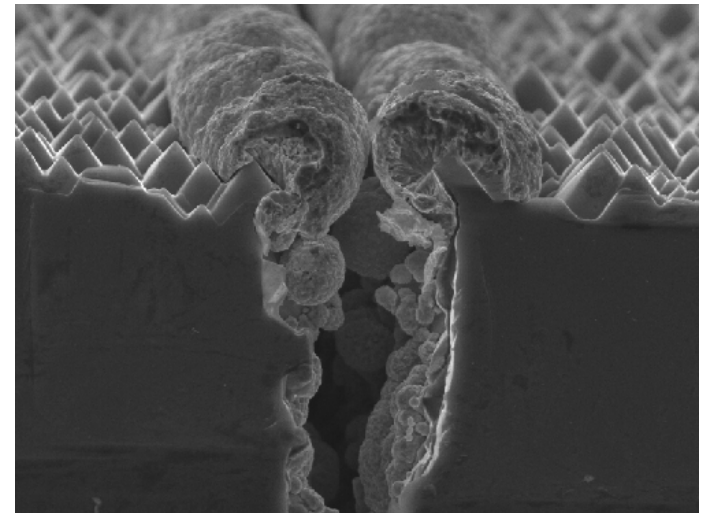
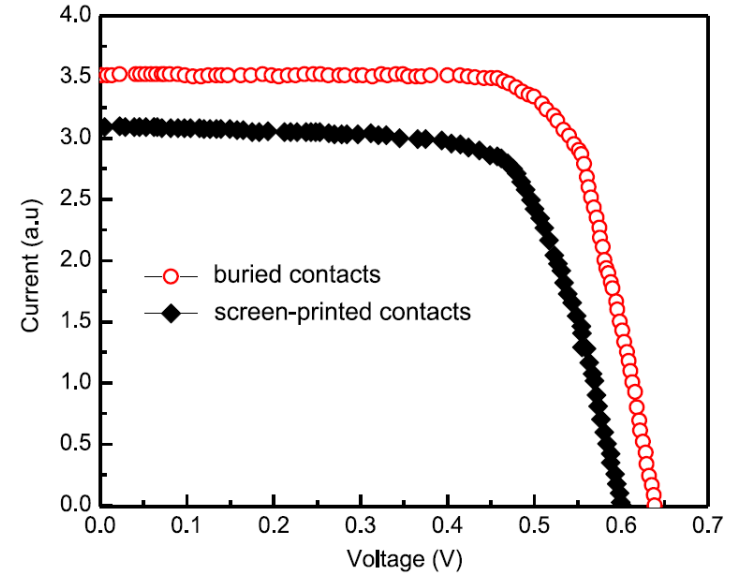


http://en.wikipedia.org/wiki/Monocrystalline_silicon

ΦΒ κρυσταλλικού πυριτίου με «θαμμένη» επαφή, $\eta=16-18\%$

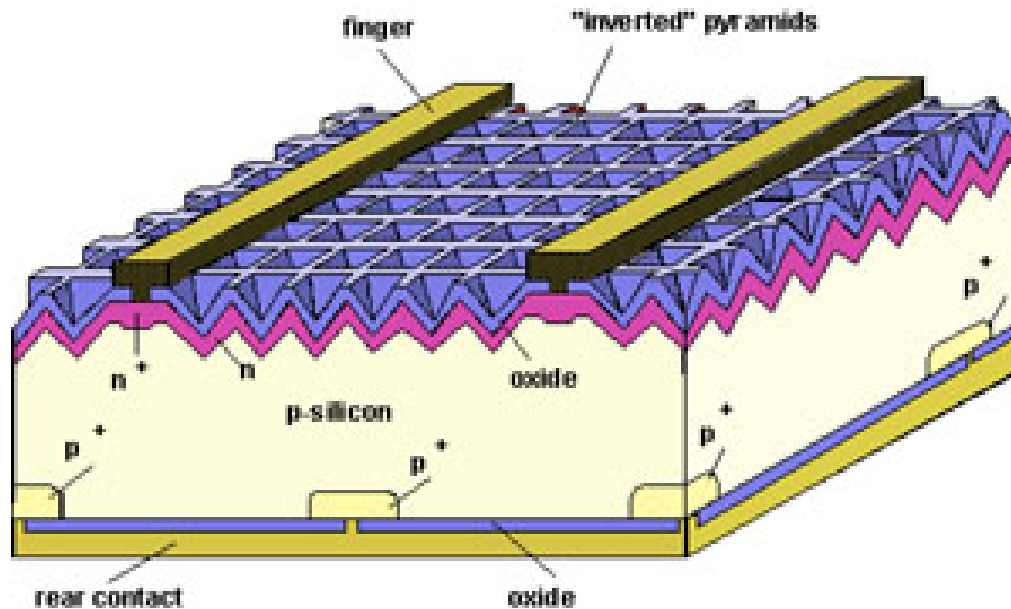


[1]



[3]

ΦΒ κρυσταλλικού πυριτίου PERC, $\eta=24\%$ (28% θεωρητικό μέγιστο)



[5]

Χρήση οξειδίου και στην περιοχή p για "passivation"

Απώλειες σε ΦΒ κρυσταλλικού πυριτίου (1) – ΦΒ στοιχεία (PV cells)

- Ανάκλαση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (Αντιανακλαστικές επιστρώσεις)
- Μη απορρόφηση φωτονίων με $E < E_g$ (Πολλαπλές επαφές με διαφορετικά E_g)
- Θερμικές απώλειες για $E > E_g$
- Επανασύνδεση φορέων (Μονοκρύσταλλος Si υψηλής καθαρότητας)
- Σκίαση εξαιτίας των επαφών (Θαμμένες επαφές)
- Αντιστάσεις επαφής (Περιοχές n^{++} , p^{++} με υψηλή συγκέντρωση προσμίξεων)
- Βραχυκυκλώσεις- pin holes (Υψηλή καθαρότητα Si)
- Απώλειες επιφανειών και άκρων (Χρήση οξειδίων-passivation)

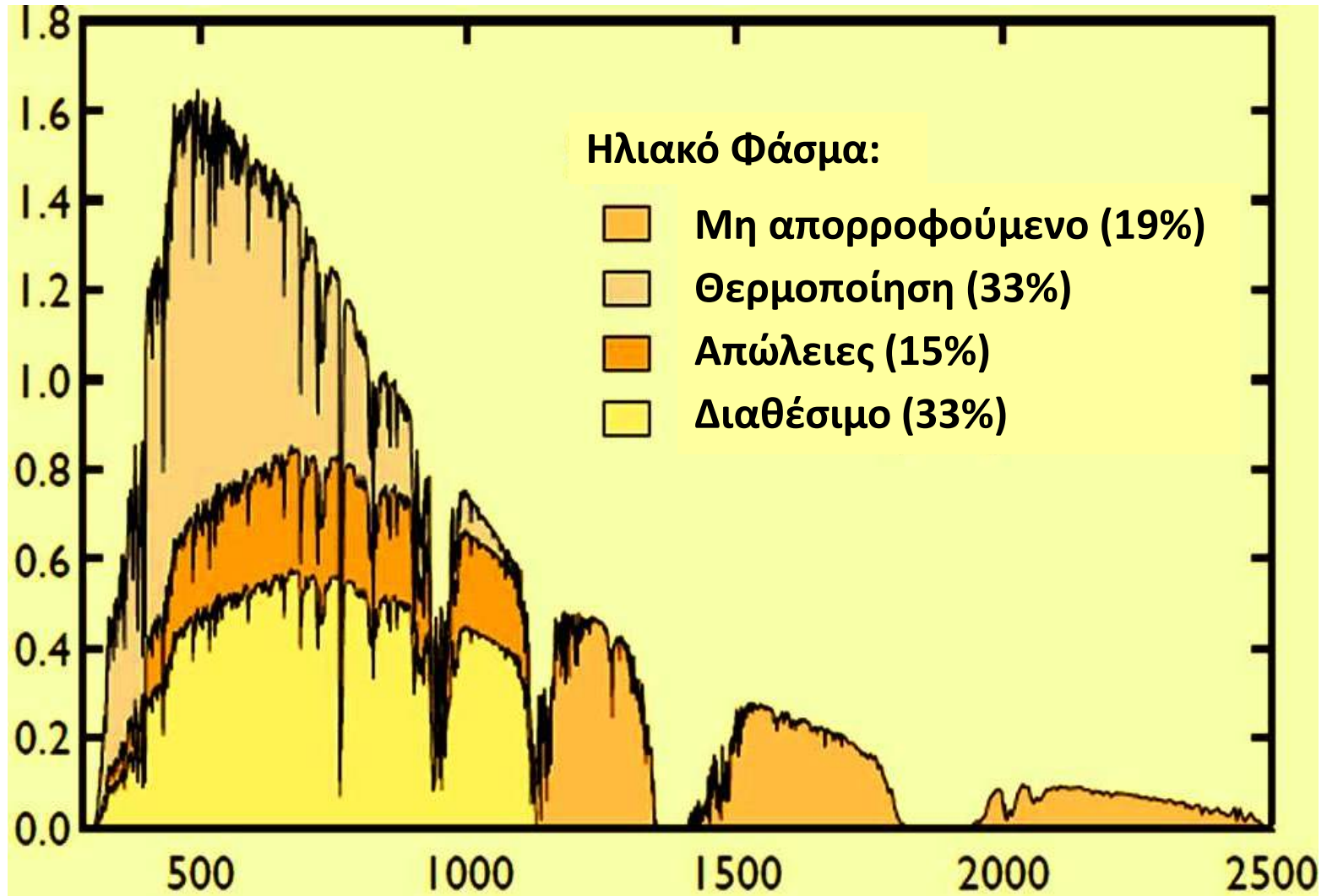
Απώλειες σε ΦΒ κρυσταλλικού πυριτίου (2)

– ΦΒ πλαίσια (PV modules)

- Ανάκλαση του καλύμματος (*Αντιανακλαστικές επιστρώσεις*)
- Ανομοιομορφίες των επιμέρους στοιχείων (*Ποιότητα παραγωγής*)
- Ηλεκτρική αντίσταση των εξωτερικών ηλεκτρικών συνδέσεων
- Ανομοιόμορφος φωτισμός λόγω σκιάσεων (*Δίοδοι παράκαμψης*)

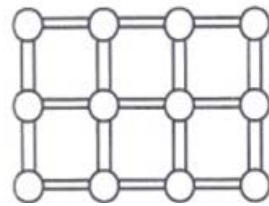
Φάσμα ηλιακής ακτινοβολίας

Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ($W m^{-2} nm^{-1}$)

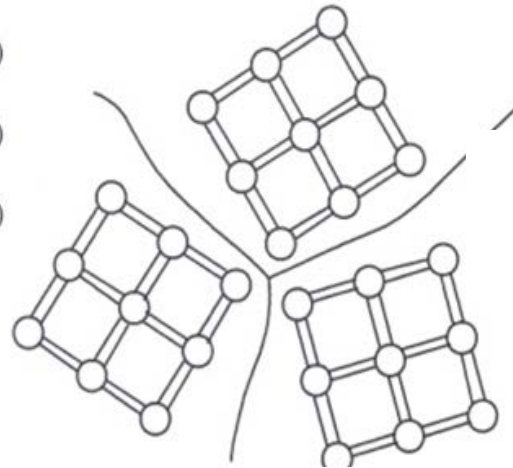


Μήκος κύματος (nm)

Πολυκρυσταλλικό ($\eta=10\%$) και άμορφο πυρίτιο ($\eta=5-8\%$)



Κρυσταλλική
ή δομή

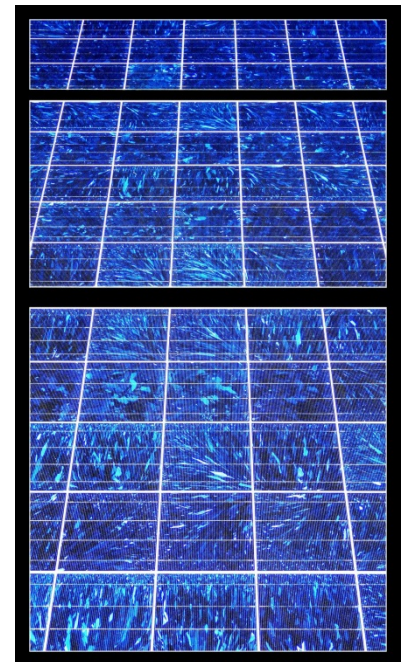


Όρια κόκκων
(grain
boundary)

Πολύ- κρυσταλλική δομή

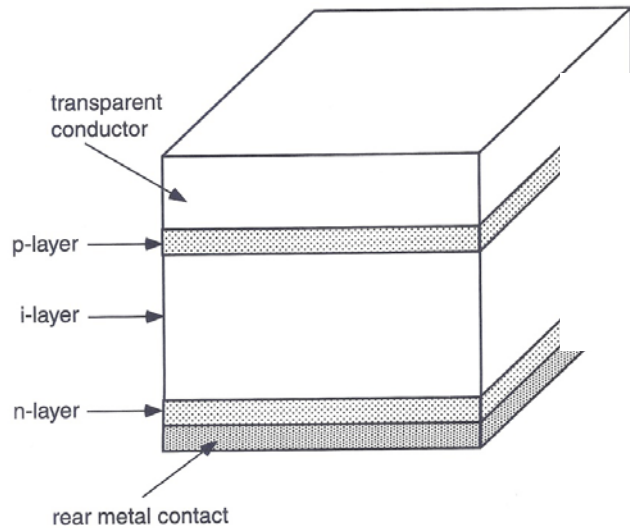


http://en.wikipedia.org/wiki/Thin_film_solar_cell

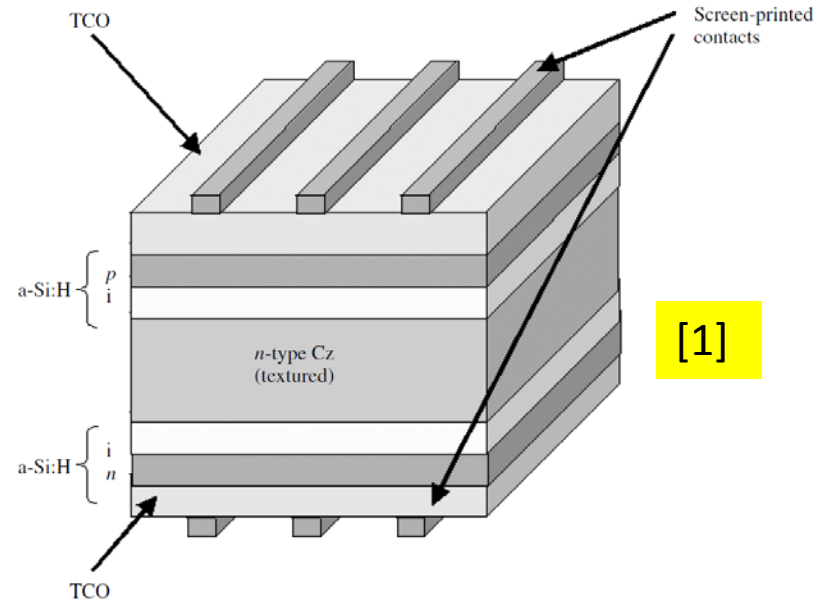


<https://www.flickr.com/photos/okinawa-soba/9070715672/>

Άμορφο πυρίτιο ($\eta = 5-8\%$)

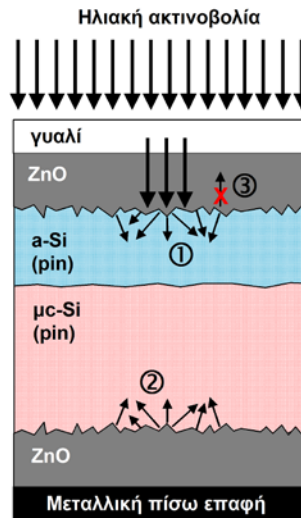


**Φωτο-επαγόμενη
υποβάθμιση
Φαινόμενο
Staebler-Wronski**

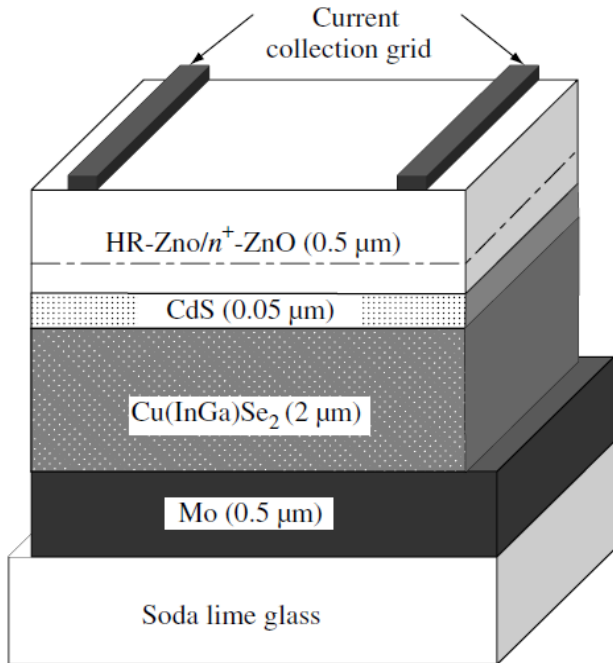


[1]

Χρήση επαφής $p-i-n$ λόγω πολύ μικρού μήκους διάχυσης ηλεκτρονίων. Η περιοχή i γίνεται περιοχή απογύμνωσης με ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο και οι φορείς ολισθαίνουν ως τις επαφές.

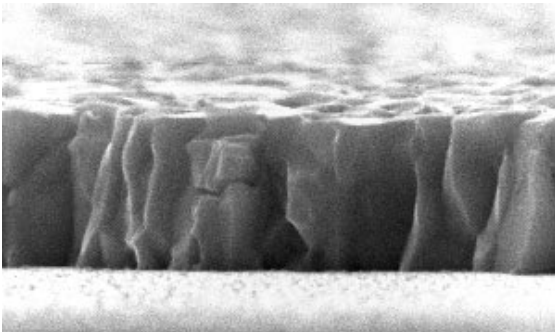


ΦΒ λεπτών υμενίων ($\eta=10-20\%$) «2^{ης} γενιάς»

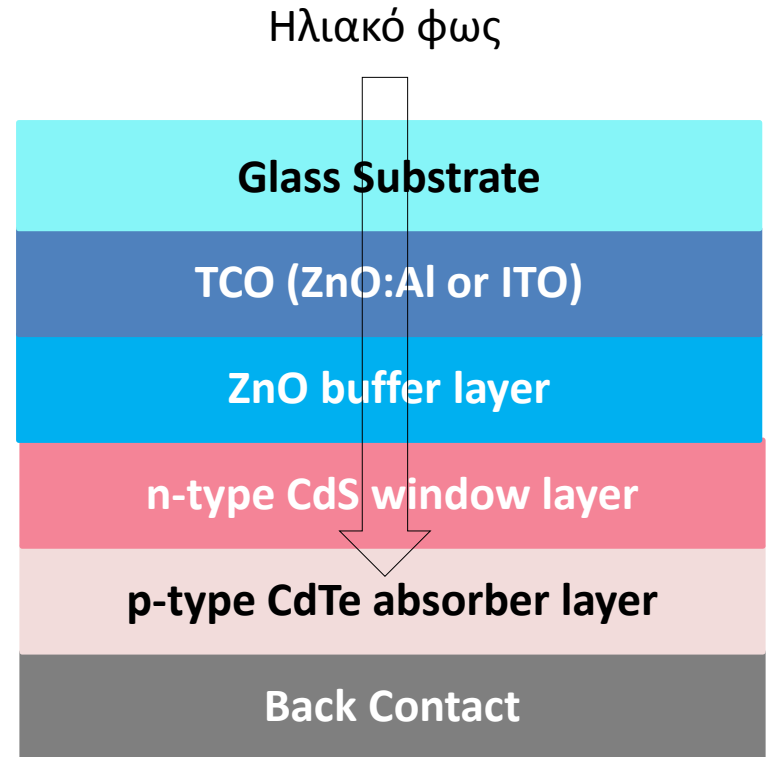


[1]

Τυπική διάταξη $Cu(InGa)Se_2$ ΦΒ στοιχείου

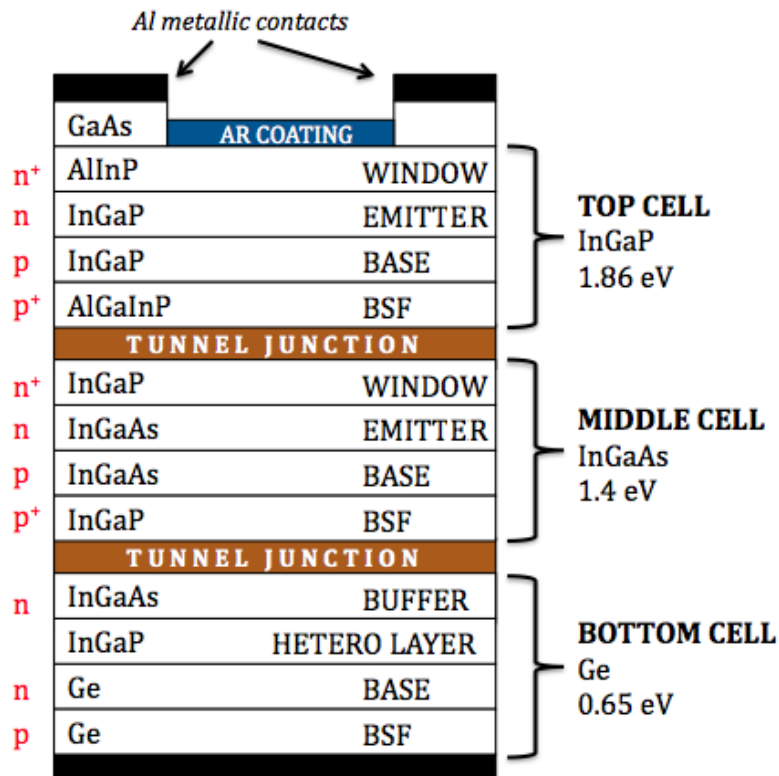


[1]

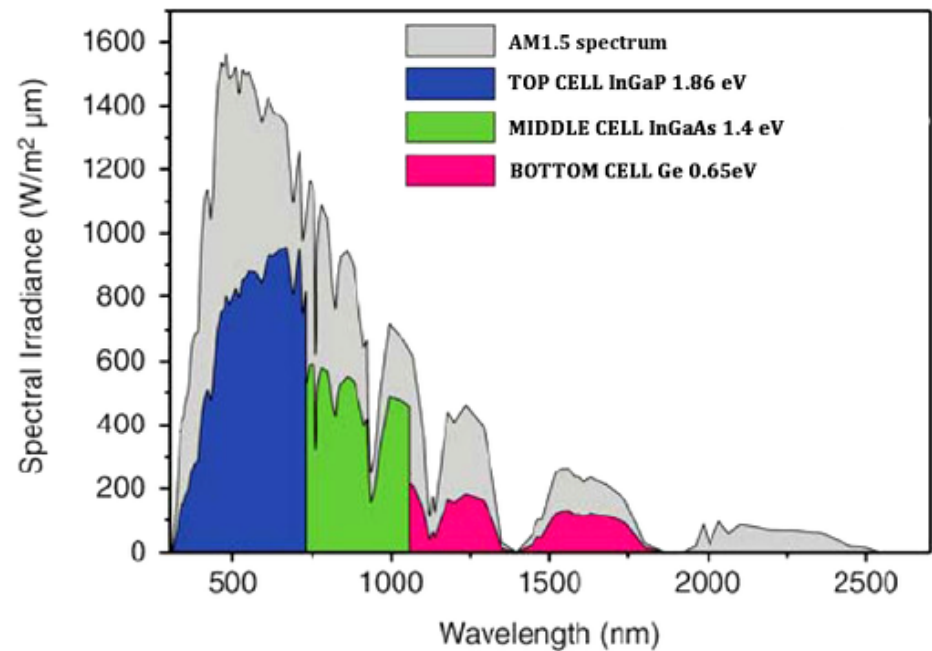


ΦΒ πολλαπλών επαφών (2)

($\eta=20-40\%$)

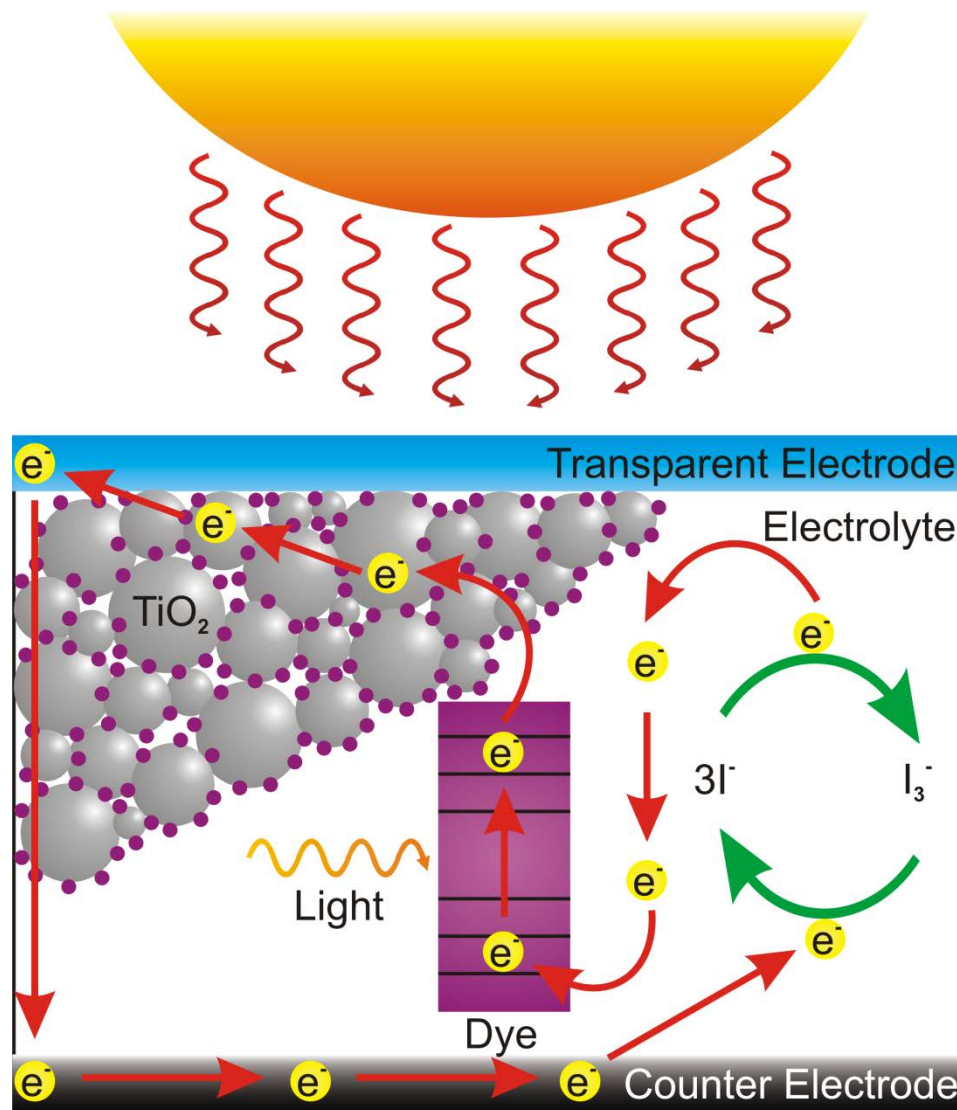


(a)



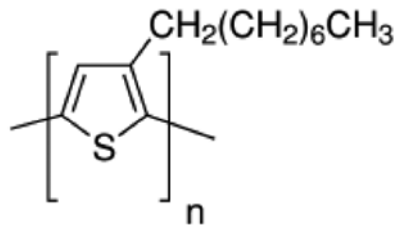
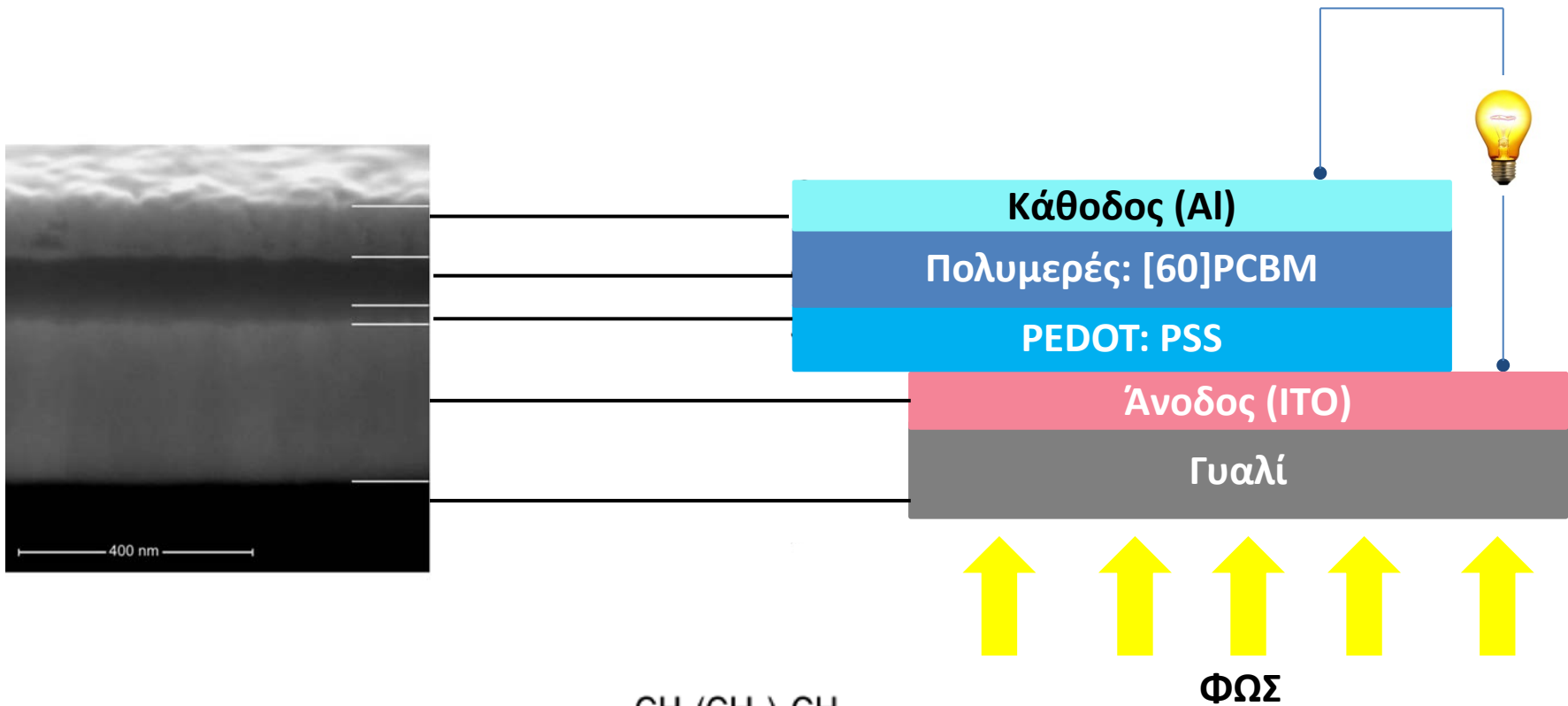
(b)

Φωτο-ευαισθητοποιημένα ΦΒ ($\eta \sim 10\%$) «3ης γενιάς»



http://commons.wiki media.org/wiki/File:Dye_Sensitized_Solar_Cell_Scheme.png

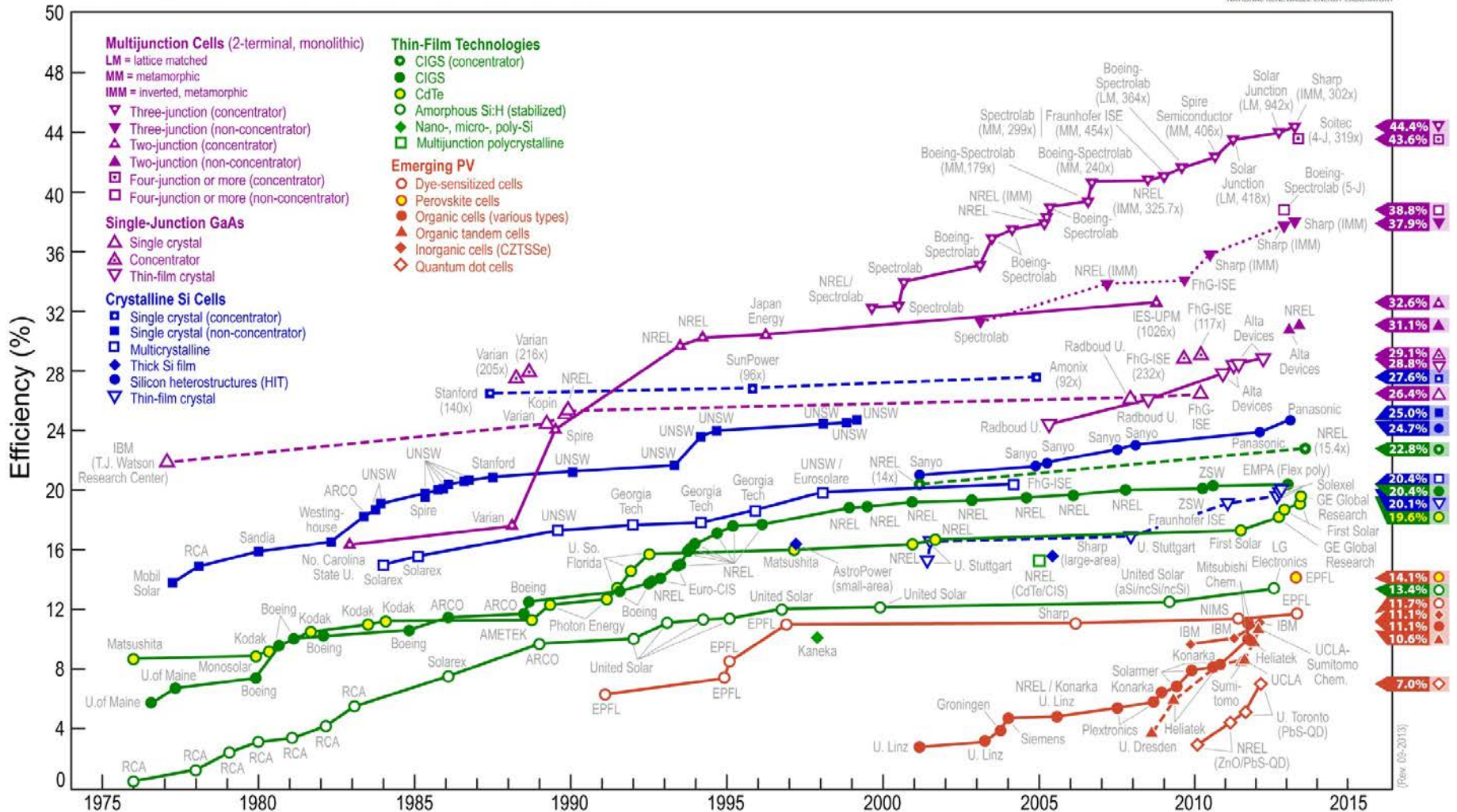
Οργανικά ΦΒ με πολυμερή ($\eta \approx 10\%$), «3^{ης} γενιάς»



Εξέλιξη αποδόσεων ΦΒ τεχνολογιών (1)

commons.wikimedia.org

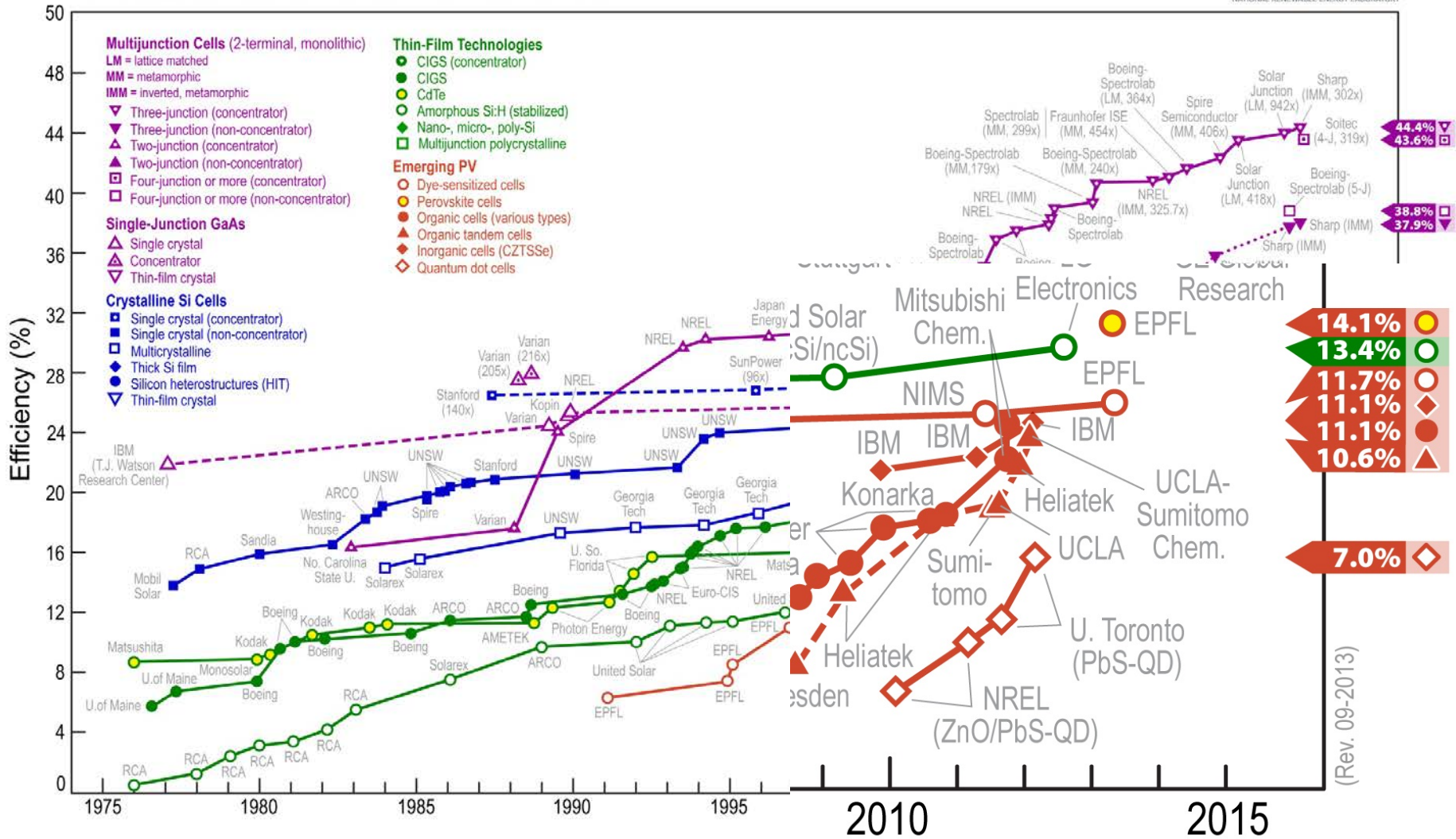
Best Research-Cell Efficiencies



Εξέλιξη αποδόσεων ΦΒ τεχνολογιών (2)

commons.wikimedia.org

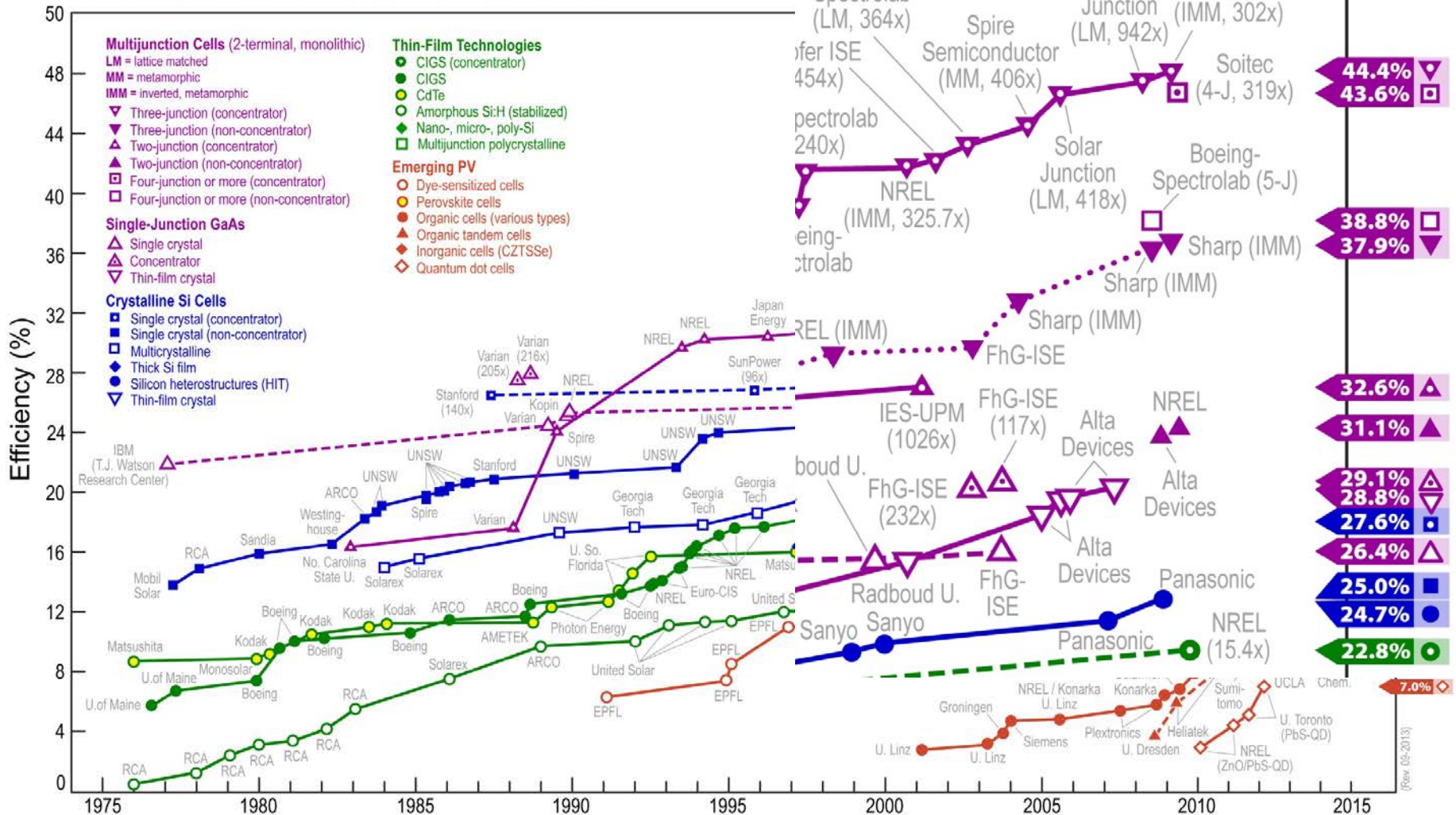
Best Research-Cell Efficiencies



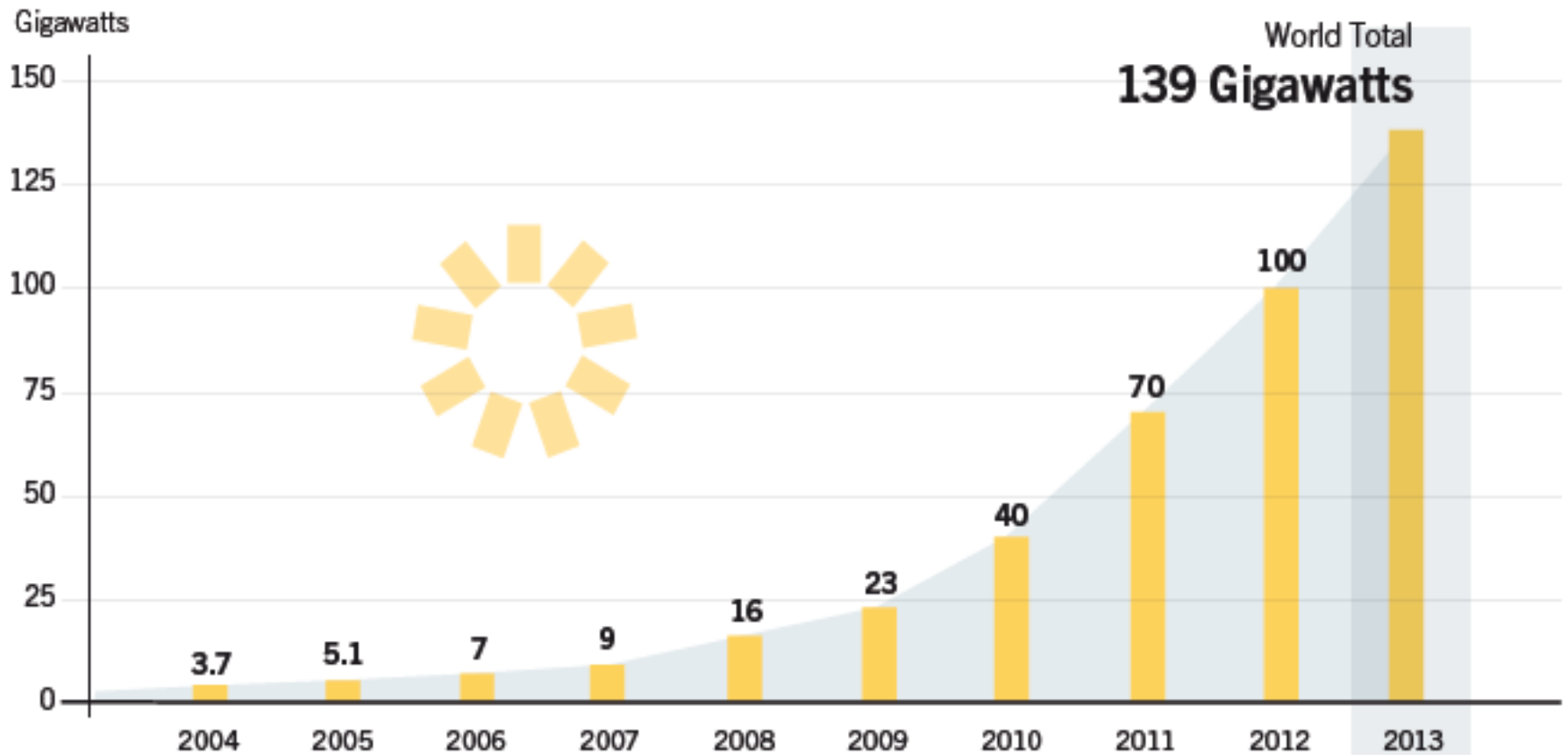
Εξέλιξη αποδόσεων ΦΒ τεχνολογιών (3)

commons.wikimedia.org

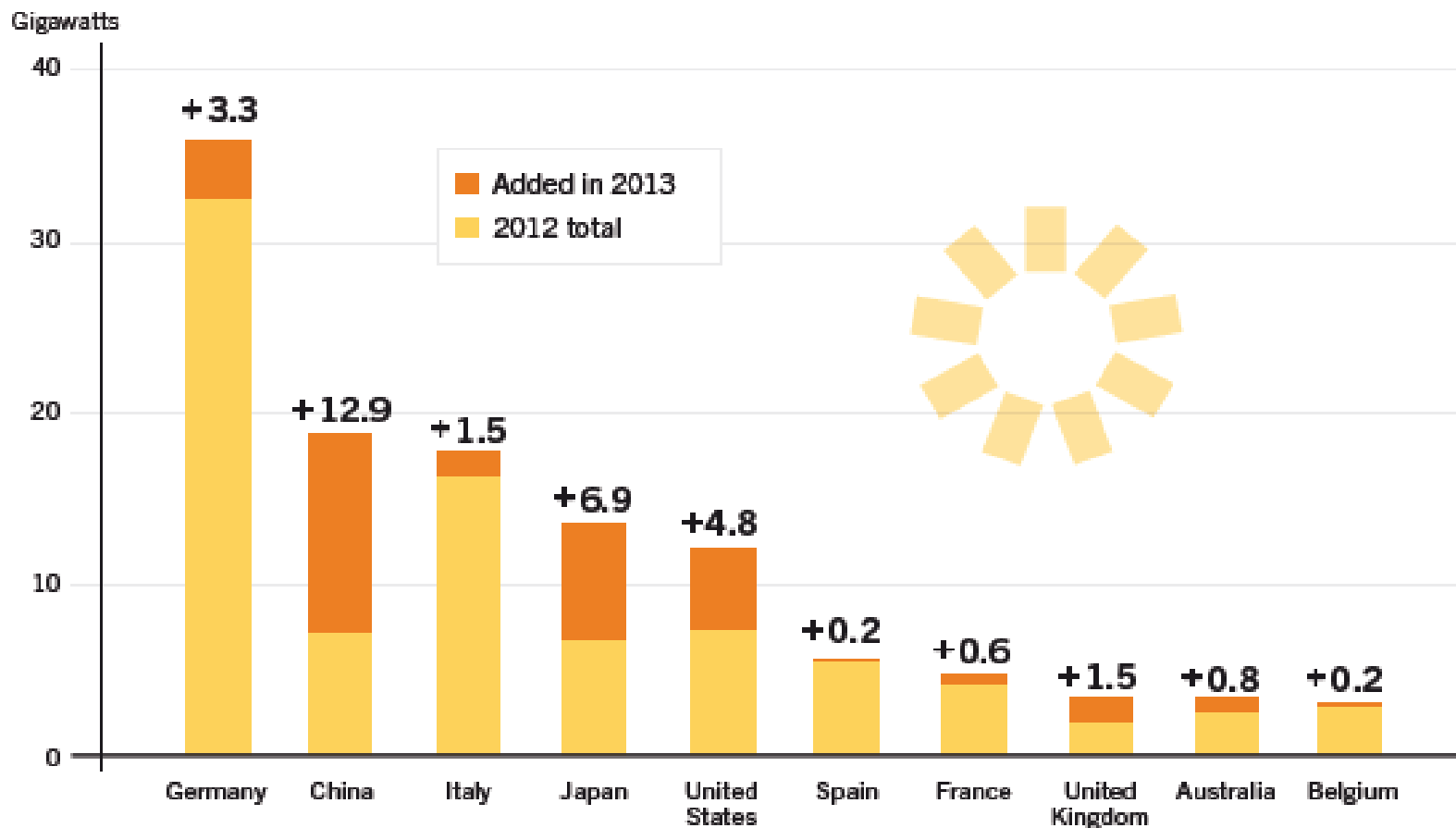
Best Research-Cell Efficiencies



Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς ΦΒ



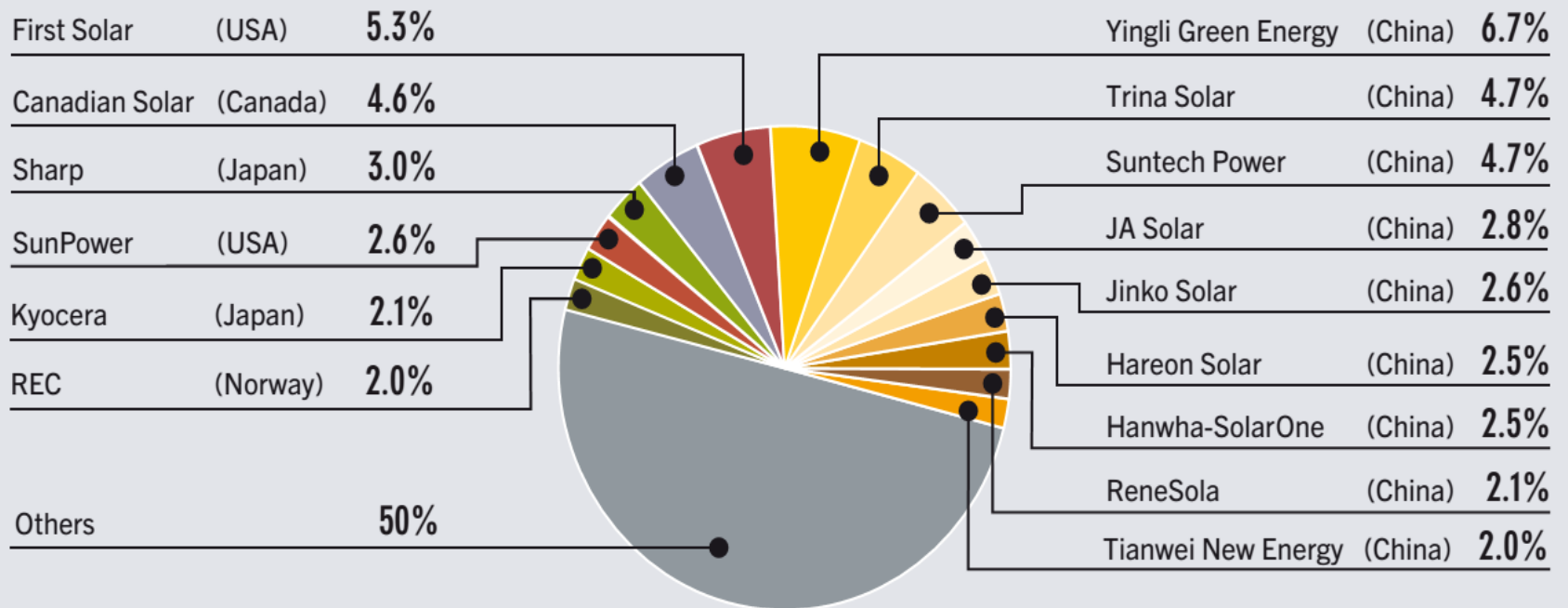
Οι 10 κορυφαίες χώρες εγκατεστημένης ΦΒ ισχύος



Εμπορικό κόστος τεχνολογίας Φ/Β (1)

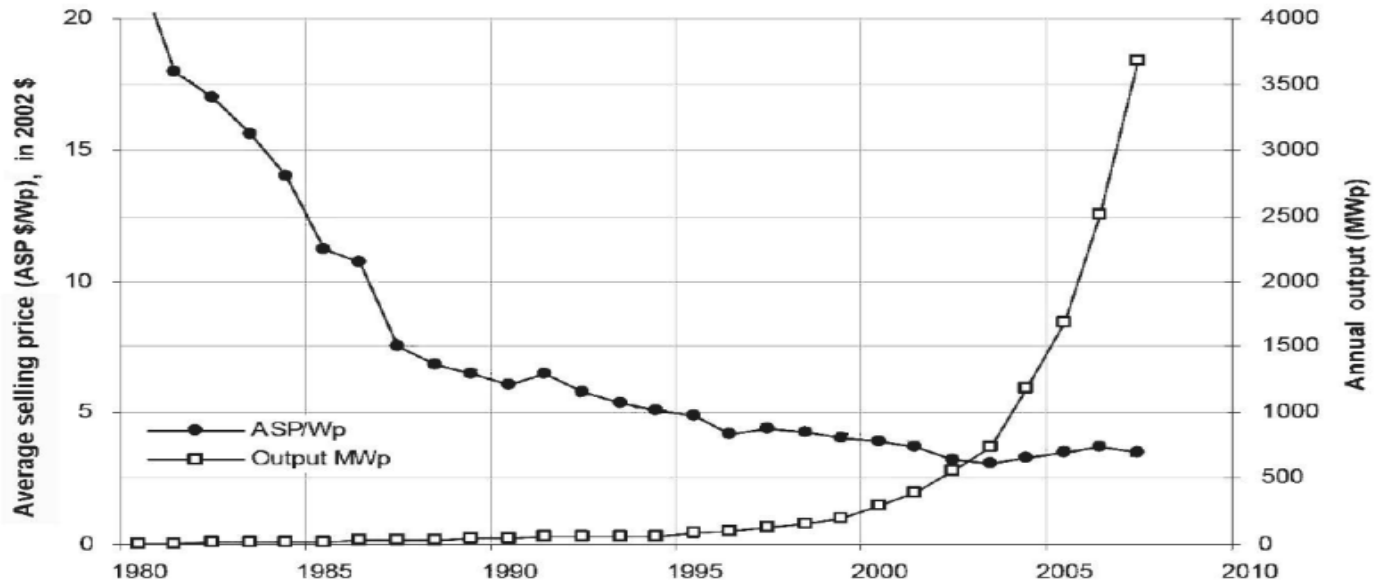
FIGURE 13. MARKET SHARES OF TOP 15 SOLAR PV MODULE MANUFACTURERS, 2012

[4]



Based on 35.5 GW produced in 2012.

Εμπορικό κόστος τεχνολογίας Φ/Β (2)



[7]

Figure 1.24 Average price and installation of solar cells: 1980–2007. The average price of solar cells dropped threefold from more than \$20 per peak watt in 1980 to \$6.5 per peak watt in 1990. The installation of solar cells steadily increased during that period. *Source: Solar Photovoltaic Industry, 2008 Global Outlook, Deutsch Bank.*

Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την 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.



Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση **1.0**.



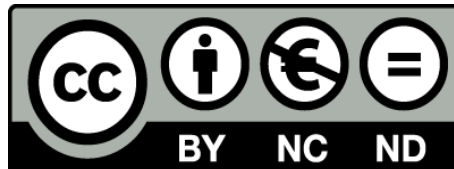
Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, **Λευθεριώτης Γεώργιος, 2015.**
«**Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Ενότητα: Φωτοβολταϊκά Συστήματα**»
Έκδοση: **1.0**. Πάτρα **2015**. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<https://eclass.upatras.gr/modules/units/?course=PHY1953&id=4285>



Σημείωμα Αδειοδότησης

- 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.



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Οι πηγές των εικόνων είναι:

[1] Antonio Luque & Steven Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & sons Ltd, 2003

[2] E. Wäckelgard, G.A. Nicklasson, C.G. Grannqvist, *Solar Energy: The State of the Art*, Department of Materials Science, The Ångström Laboratory, Uppsala University, James & James, 2001

[3] pveducation.org

[4] <http://www.tydexoptics.com>

[5] <http://www.kanoda.com/PVTechnologyandIndustry.html>

[6] REN21 – Renewable Policy Network for the 21st Century: *Renewables 2012 – Global Status Report*, www.ren21.net

[7] C. Julian Chen, *Physics of Solar Energy*, Copyright © 2011 John Wiley & Sons, Inc.

