

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Διδάσκων: Ιωάννης Γκιάλας

Κεφάλαιο 6

Φωτοβολταϊκά πλαίσια
ρη_επαφή και Φωτοβολταϊκή μετατροπή

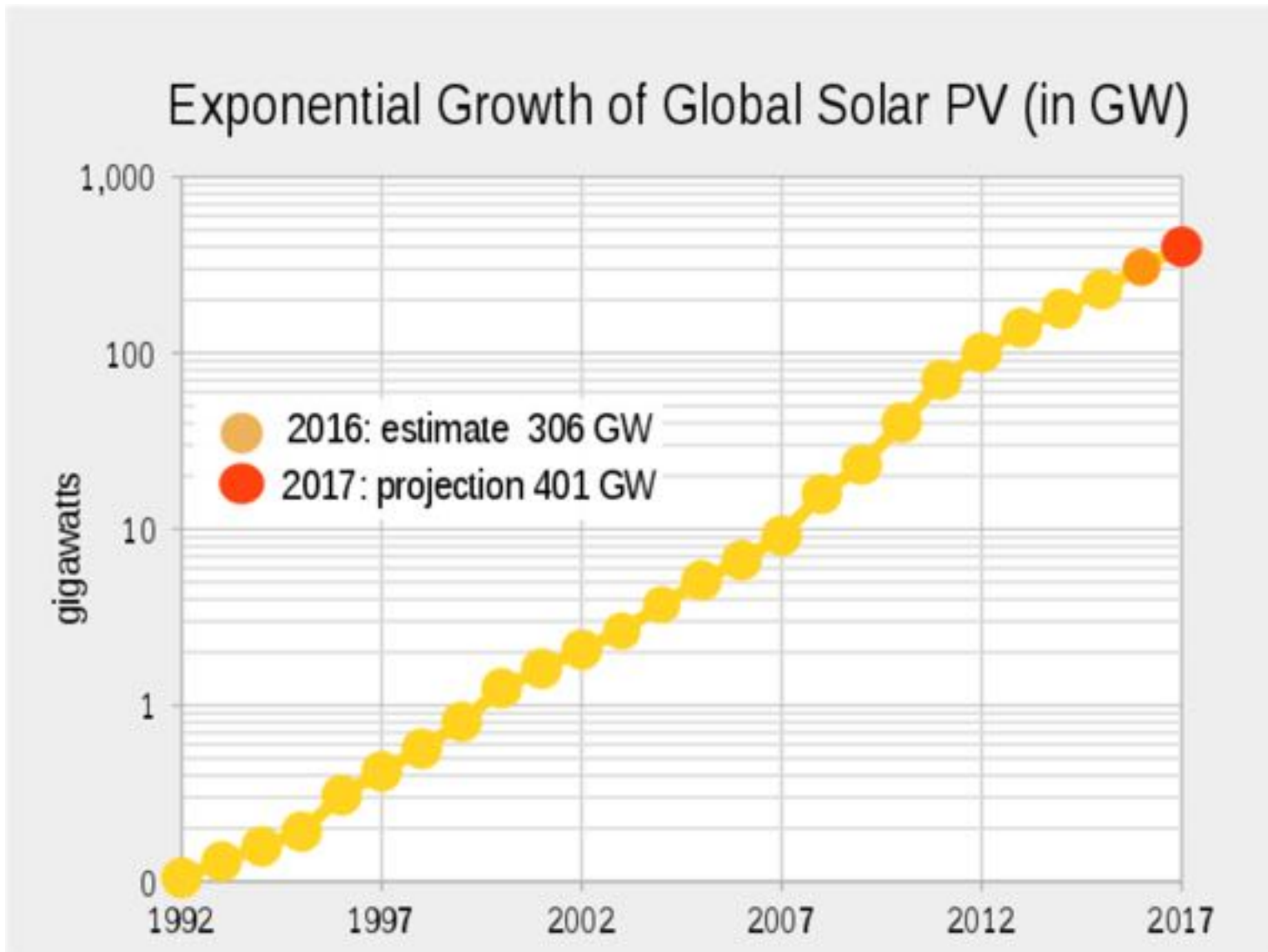
Τι είναι τα φωτοβολταϊκά

- Είναι ηλεκτρονικές διατάξεις που μετατρέπουν κατ' ευθείαν το ηλιακό φως σε ηλεκτρισμό.
- Βασίζονται σε ένα φαινόμενο της κβαντικής φυσικής, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Βιβλιογραφία, βιντεογραφία

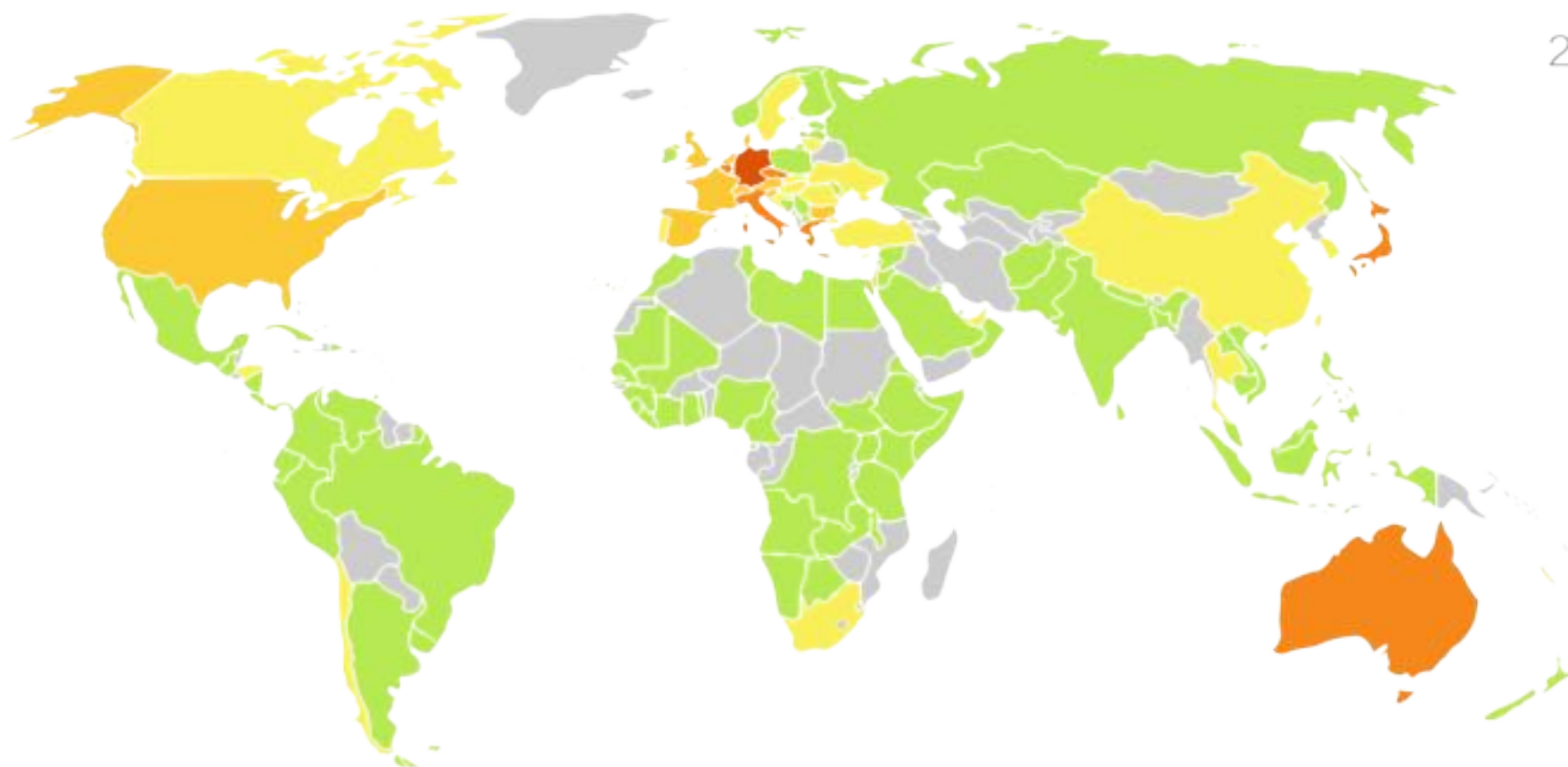
- <https://www.youtube.com/watch?v=1gta2ICarDw>
- <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/photovoltaics>

Παγκόσμια Εγκατεστημένη Φ/Β ισχύς

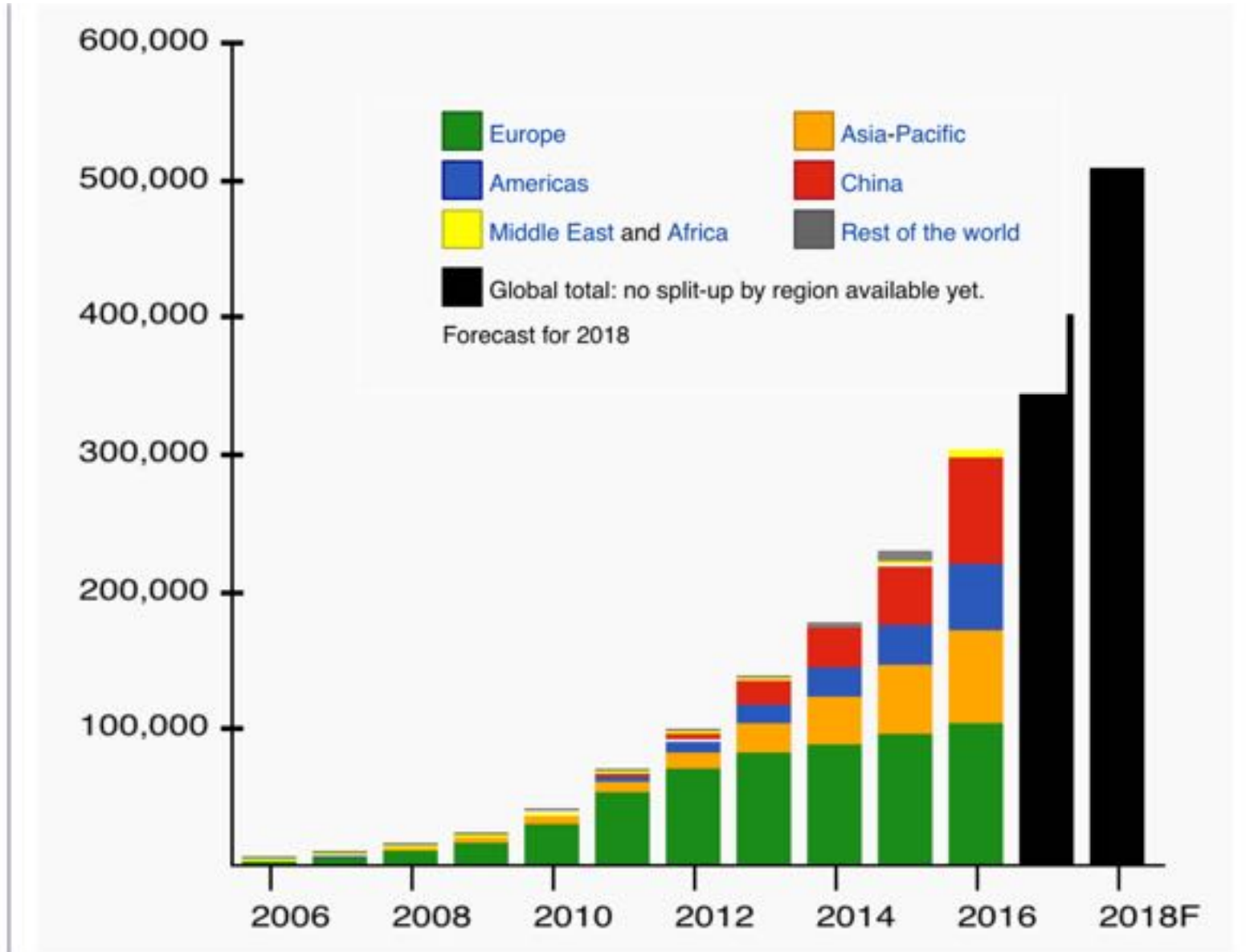


Εγκατεστημένη Φ/Β ισχύς ανά κάτοικο

2016

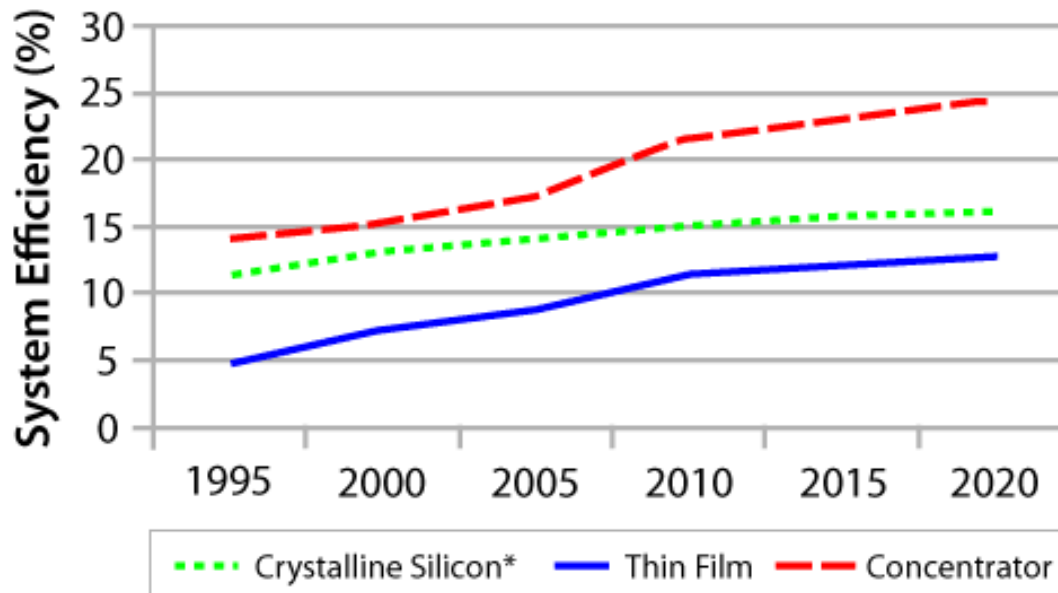


Εξέλιξη παγκόσμιας Φ/Β ισχύος



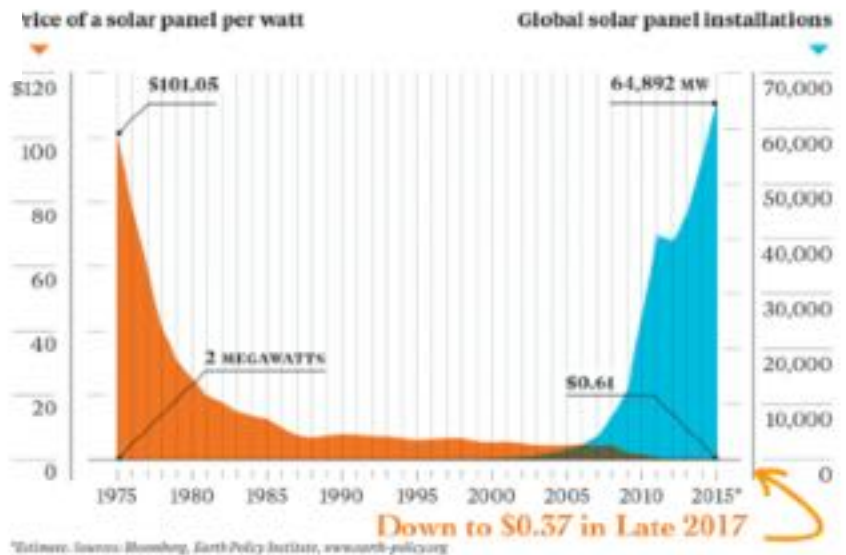
απόδοση ΦΒ πινάκων – Εξέλιξη τιμής

PV System Efficiency



Solar on Fire

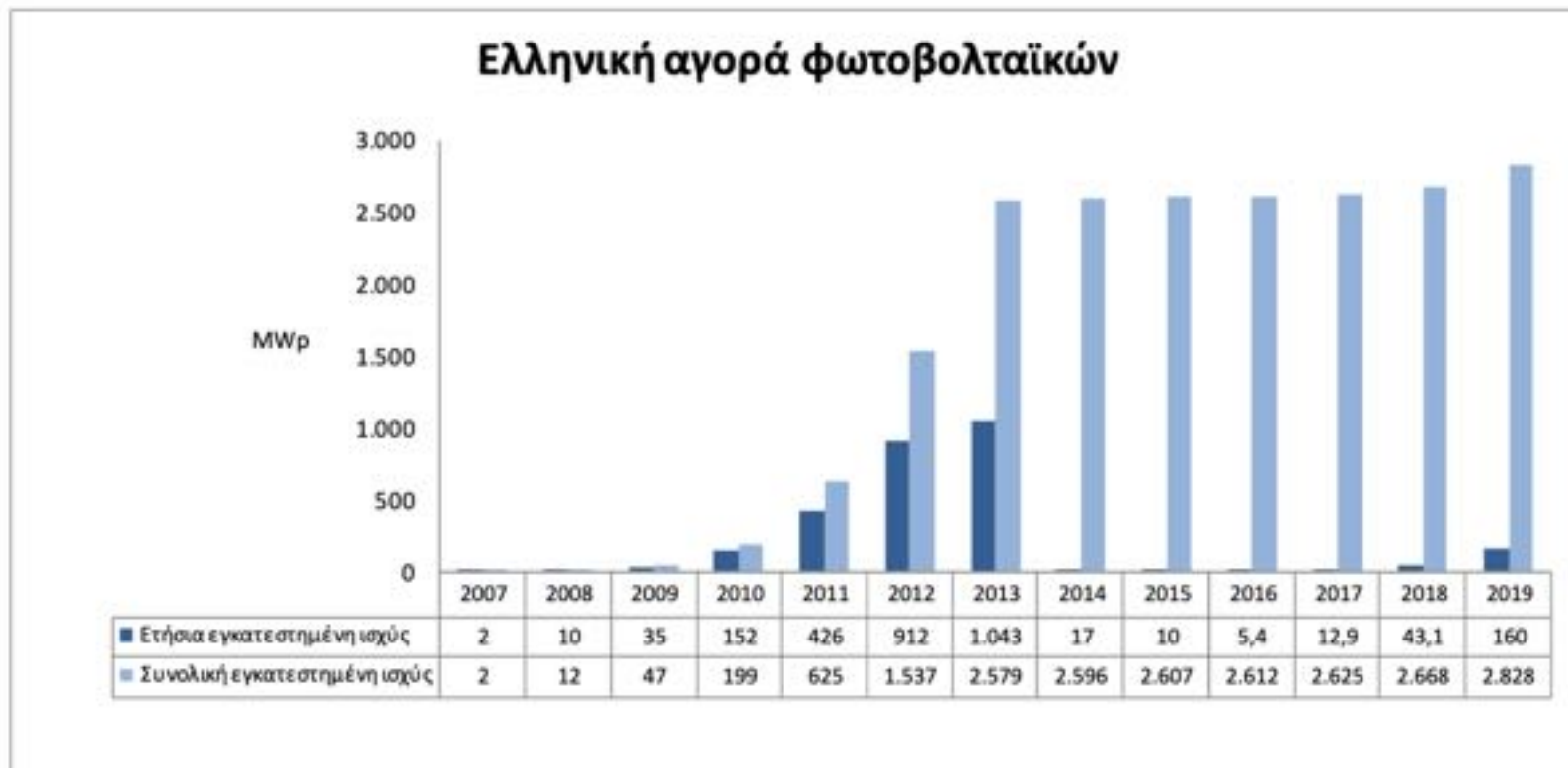
As prices have dropped, installations have skyrocketed.



Φωτοβολταϊκή ισχύς στην Ελλάδα

https://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2019_2Apr2020.pdf

Διασυνδεδεμένα συστήματα	MWp
Νέα εγκατεστημένη ισχύς διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών το 2019	160
Συνολική εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών ως και το 2019	2.828



Περιβαλλοντικό αποτύπωμα στην Ελλάδα – 2019

Στα τέλη του 2019 στην Ελλάδα ήταν εγκατεστημένα 2.828 μεγαβάτ (MWp) φωτοβολταϊκών, εκ των οποίων τα 2.255MWp επί εδάφους και τα υπόλοιπα σε στέγες κτιρίων. 1. Δέσμευση γης Η προβολή στο οριζόντιο επίπεδο των φωτοβολταϊκών πλαισίων των 2.255MWp καλύπτει περίπου 12.600 στρέμματα, είναι δηλαδή λίγο μικρότερη από την έκταση του Δήμου Αμαρουσίου στην Αττική ή του Δήμου Νεάπολης-Συκεών στη Θεσσαλονίκη. Η συνολική έκταση που δεσμεύουν αυτά τα 2.255MWp (μαζί με τα διάκενα μεταξύ των φωτοβολταϊκών συστοιχιών και την περιμετρική απόσταση ασφαλείας από τα όρια των γηπέδων) είναι περίπου 40.000 στρέμματα, όση δηλαδή είναι η έκταση του Δήμου Αθηναίων. Για σύγκριση, η έκταση που καταλαμβάνουν οι λιγνιτικοί σταθμοί και τα λιγνιτωρυχεία είναι, σύμφωνα με τη ΔΕΗ, 253.000 στρέμματα, είναι δηλαδή 6,3 φορές μεγαλύτερη από την έκταση που δεσμεύουν τα φωτοβολταϊκά.

Σύμφωνα με την ΕΛΣΤΑΤ2, η γεωργική γη στην Ελλάδα ανέρχεται σε 32,8 εκατ. στρέμματα (στατιστικά για το 2015 δημοσιευμένα το Νοέμβριο του 2017), εκ των οποίων καλλιεργούνται τα 29,2 εκατ. στρέμματα. Αυτό σημαίνει ότι τα φωτοβολταϊκά δεσμεύουν το 0,12% της γεωργικής γης ή αλλιώς το 0,03% της έκτασης της χώρας. Η γεωργική έκταση που μένει ακαλλιέργητη είναι 90 φορές μεγαλύτερη από την έκταση που δεσμεύουν τα φωτοβολταϊκά.

Περιβαλλοντικό αποτύπωμα

• 2. Κατανάλωση νερού

- Για τον καθαρισμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων απαιτούνται κατά μέσο όρο $0,114 \text{ m}^3$ νερού ανά παραγόμενη MWh (εύρος τιμών $0,1-0,13 \text{ m}^3/\text{MWh}$). Η ποσότητα αυτή είναι 30,5 φορές μικρότερη ανά παραγόμενη MWh από ένα λιγνιτικό σταθμό (σύμφωνα με τη ΔΕΗ, οι λιγνιτικοί σταθμοί καταναλώνουν κατά μέσο όρο $3,477 \text{ m}^3$ νερού ανά παραγόμενη MWh).
- Το 2017 παρήχθησαν περίπου 4 TWh από τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά, δηλαδή απαιτήθηκαν περίπου 456.000 m^3 νερού για τον καθαρισμό των φωτοβολταϊκών, όσο δηλαδή καταναλώνουν ετησίως 4.650 νοικοκυριά.

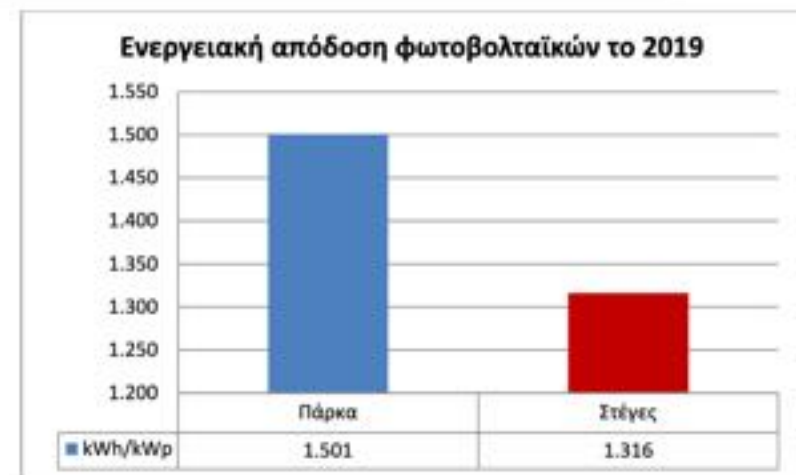
• 3. Αποσόβηση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα

- Στις θετικές περιβαλλοντικές επιδόσεις, σημειώνεται ότι η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά το 2017 αποσόβησε την έκλυση περίπου 3,96 εκατ. τόνων διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στην ατμόσφαιρα.

Ενεργειακή απόδοση ΦΒ στην Ελλάδα

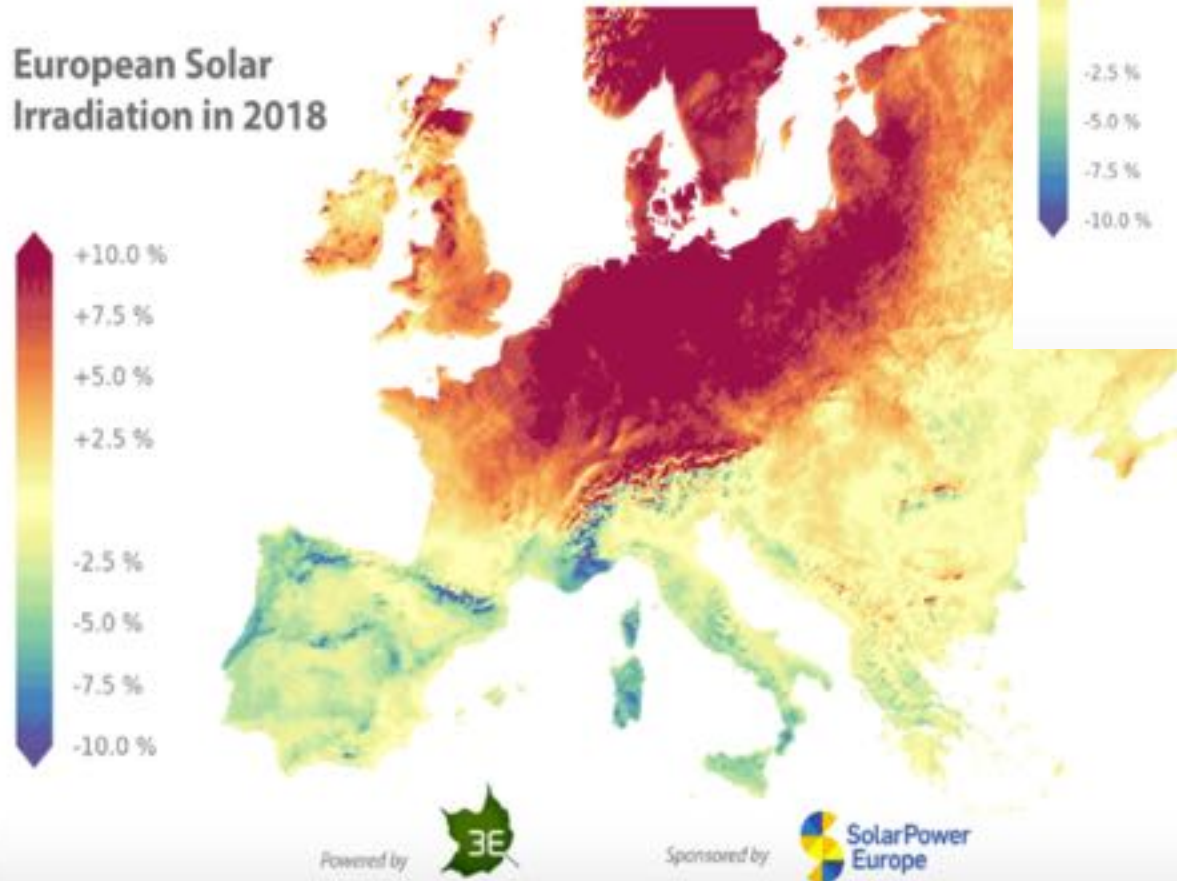


Γιατί πτώση το 2018, 2019;

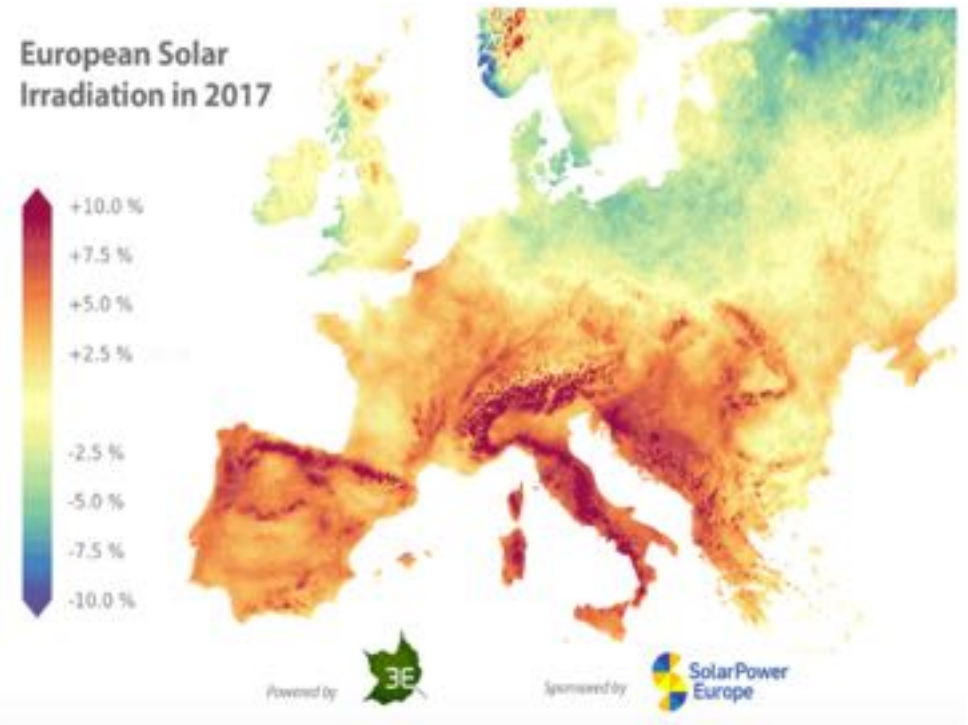


Μείωση ακτινοβολίας στη Νότια Ευρώπη

European Solar Irradiation in 2018



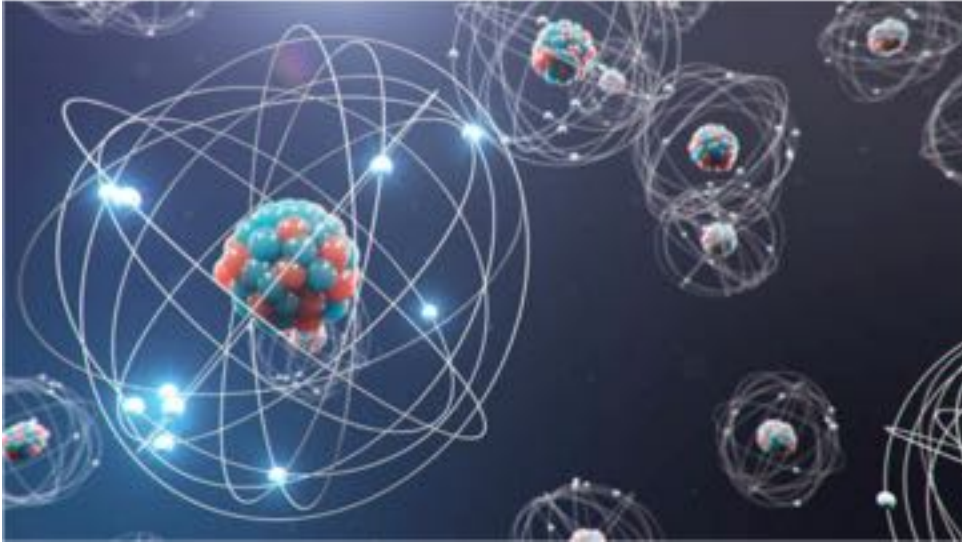
European Solar Irradiation in 2017



Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

- Δίοδος pn
- Φωτοβολταϊκή μετατροπή

Ας κοιτάξουμε από κοντά Άτομα σε μία κλασική προσέγγιση



Πυρήνας που αποτελείται από πρωτόνια (+) και ουδέτερα νετρόνια ενώ γύρω του περιφέρονται ηλεκτρόνια (-).

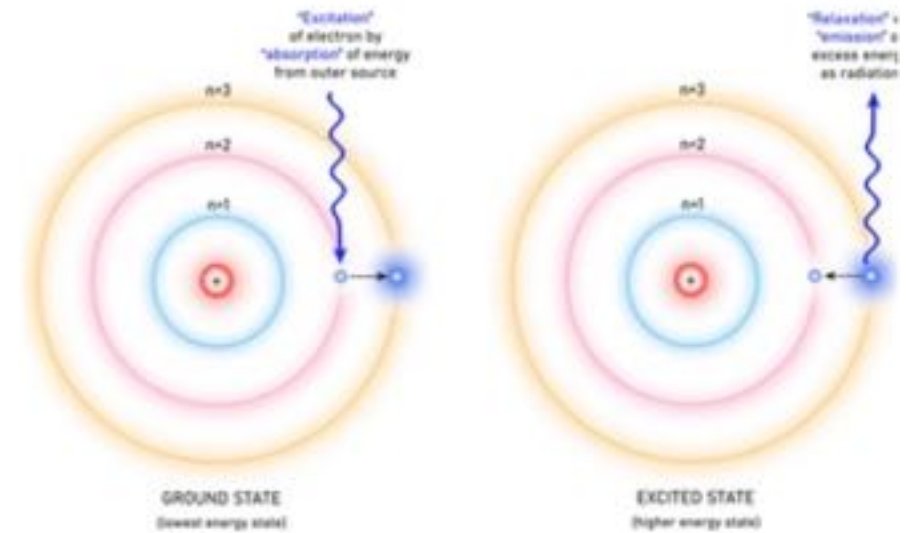
Το άτομο είναι ουδέτερο.
Άρα **αρ. πρωτ. = αρ. ηλεκτρονίων.**

Αριθμός πρωτονίων και νετρονίων λέγεται μαζικός αριθμός (A) .

Αριθμός πρωτονίων λέγεται **ατομικός αριθμός (Z)** και καθορίζει τις χημικές ιδιότητες των στοιχείων

... κβαντισμένη ενέργεια

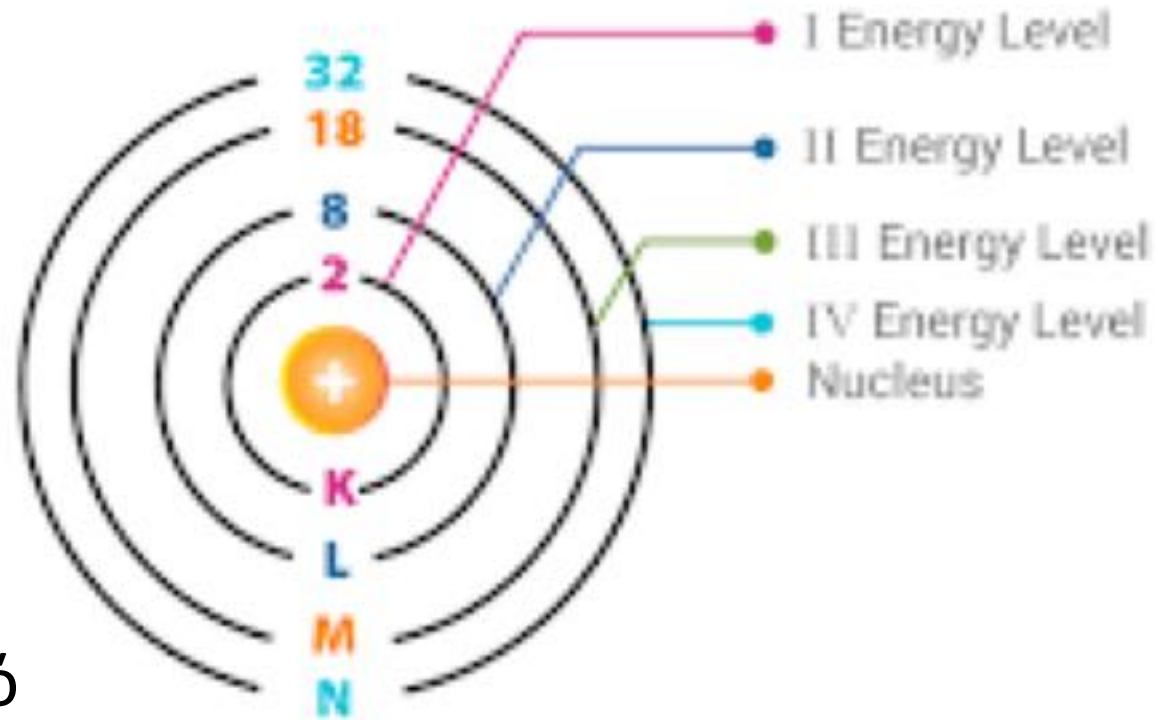
- Τα ηλεκτρόνια μπορούν να έχουν μόνο συγκεκριμένες ενέργειες, άρα και απόσταση από τον πυρήνα.
- Για ανεξάρτητα άτομα, μόνο 2 ηλεκτρόνια μπορούν να καταλαμβάνουν μία επιτρεπόμενη ενεργειακή κατάσταση
- Λέμε ότι οι ενεργειακές καταστάσεις είναι κβαντισμένες (δηλαδή διακριτές, όχι συνεχείς)
- Ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να μεταπηδήσει μεταξύ δύο επιτρεπόμενων ενεργειακών σταθμών E_i σε E_f με την εκπομπή ή απορρόφηση φωτονίου ενέργειας



$$E_f - E_i = h\nu$$

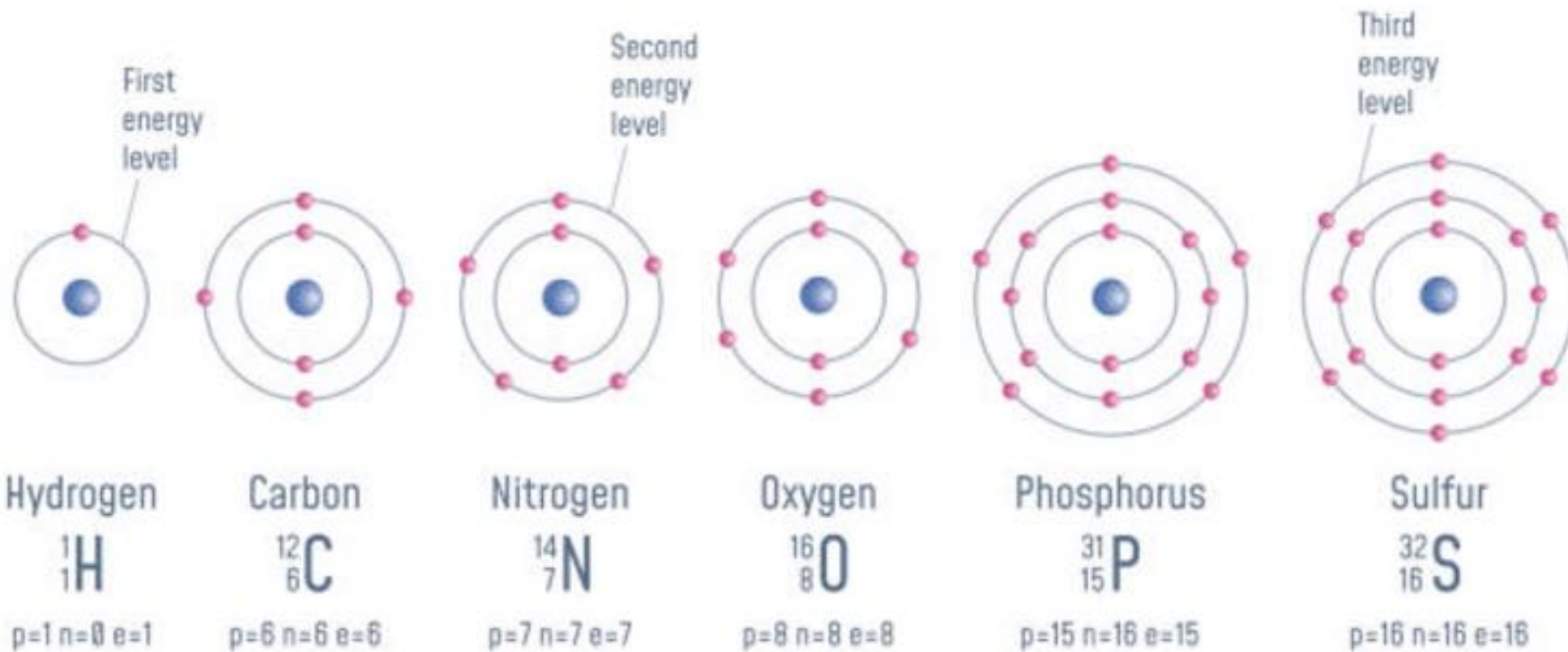
Ενεργειακές στάθμες και ηλεκτρονικές στοιβάδες

- Οι ενεργειακές στάθμες συμπληρώνονται ξεκινώντας από την χαμηλότερη, ελάχιστης ενέργειας με 2 ηλεκτρόνια ανά στάθμη και στο τέλος στις εξωτερικές στάθμες (μέγιστης απόστασης από τον πυρήνα).



- Οι ενεργειακές στάθμες ομαδοποιούνται σε στοιβάδες
- Στην εξωτερική στοιβάδα μπορώ να έχω άρτιο ή περιττό αριθμό **ηλεκτρονίων σθένους**

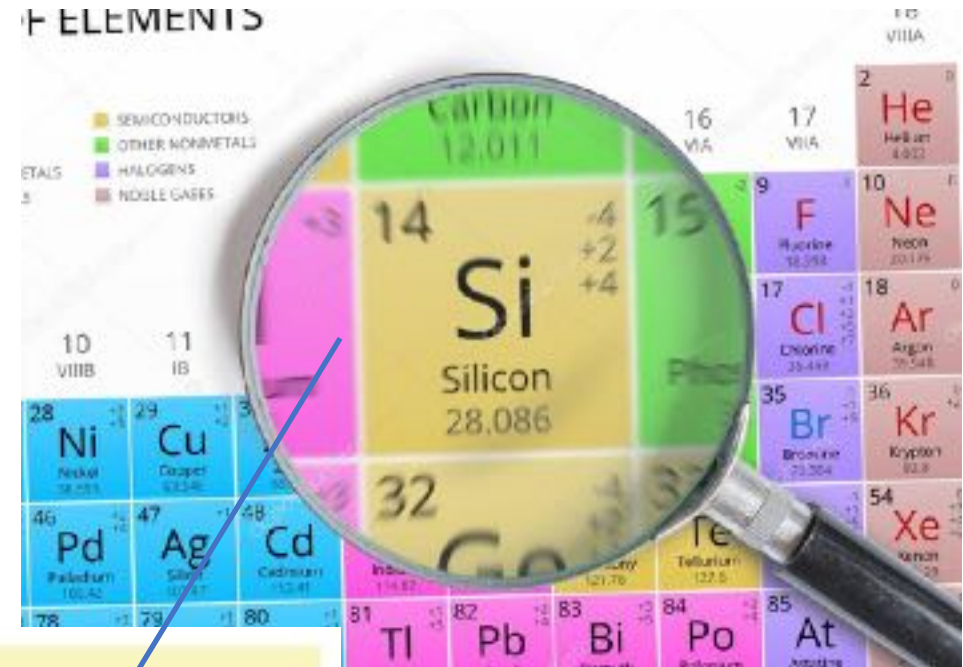
Παραδείγματα ηλεκτρονικών στοιβάδων



Περιοδικός πίνακας των στοιχείων

THE ELEMENTS

SEMICONDUCTORS
OTHER NONMETALS
METALS
HALOGENS
NOBLE GASES



ΠΕΡΙΟΔΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mb	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Th	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub						

μέταλλα
αμέταλλα
ευγενή αέρια

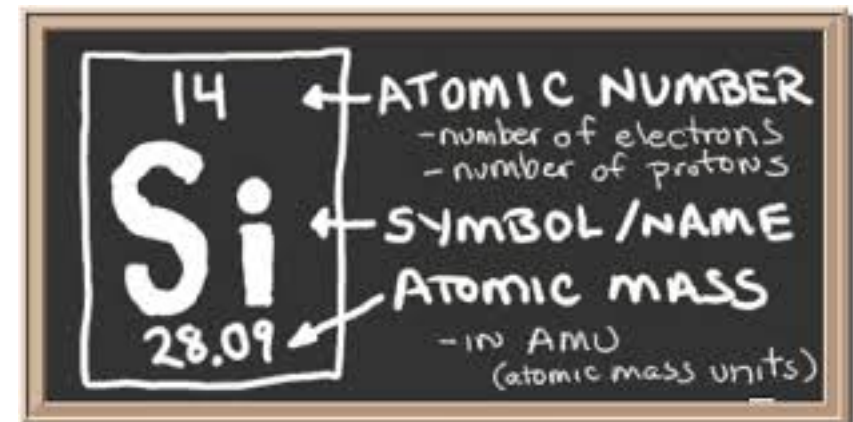
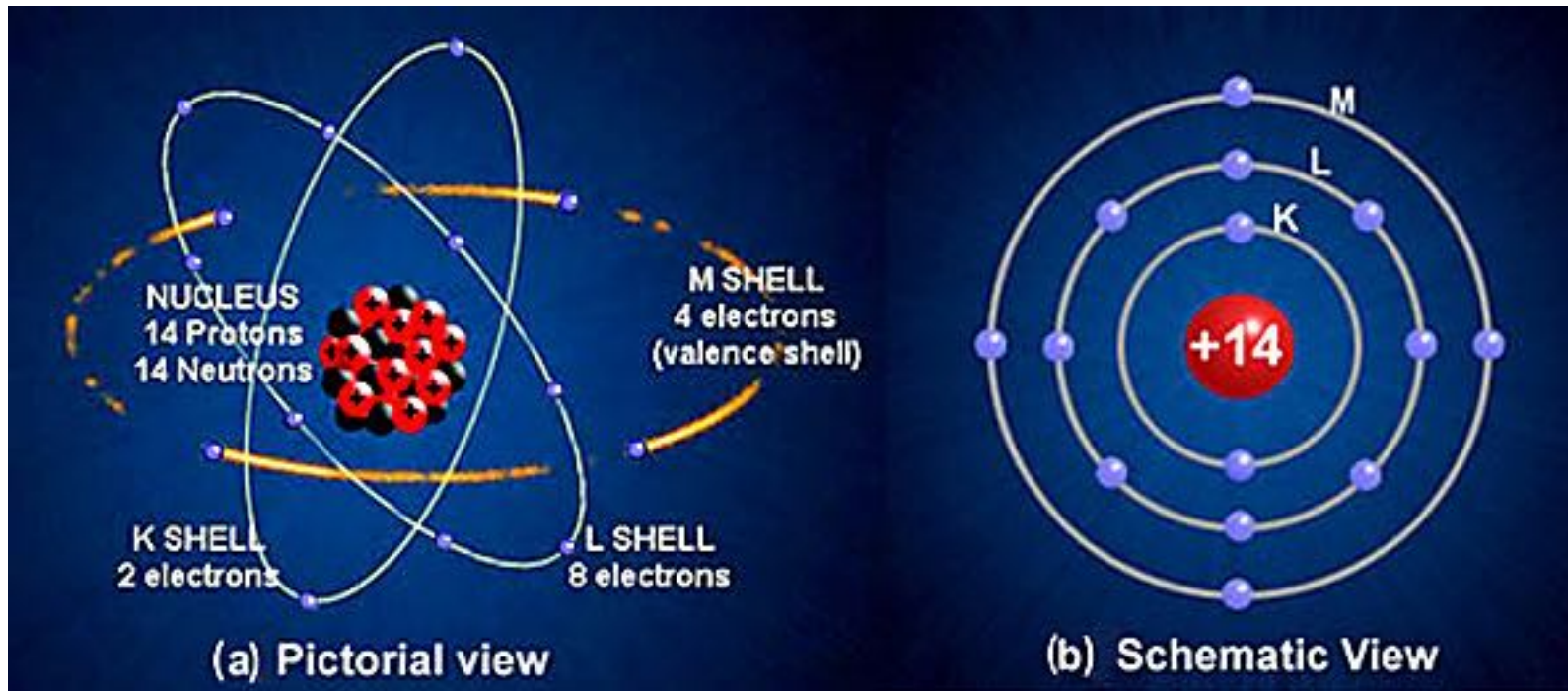
λανθανίδες

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

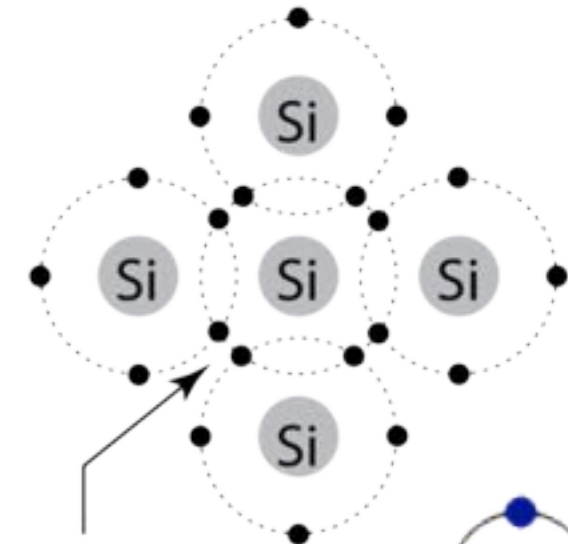
ακτινίδες

89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

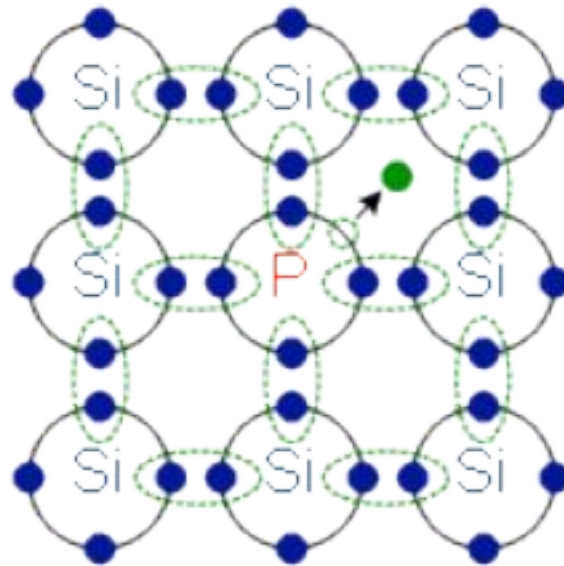
Άτομο Πυριτίου (Si)



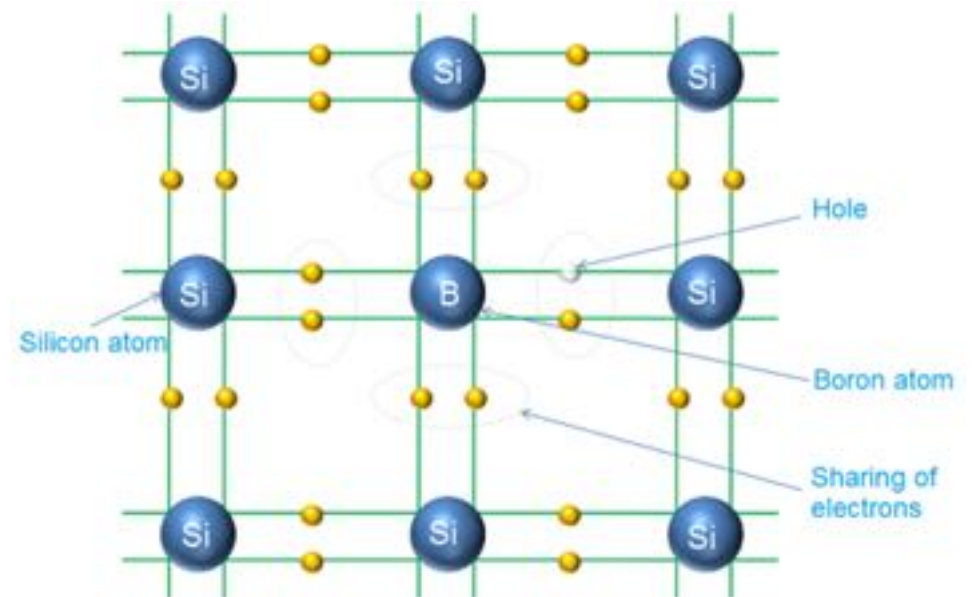
Πρόσμιξη με βόριο και φώσφορο



Shared electrons of a covalent bond.



The phosphorus atom donates its fifth valence electron. It acts as a free charge carrier.



Copyright © 2013-2014, Physics and Radio-Electronics. All rights reserved

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

- <https://www.youtube.com/watch?v=1gta2ICarD>
W

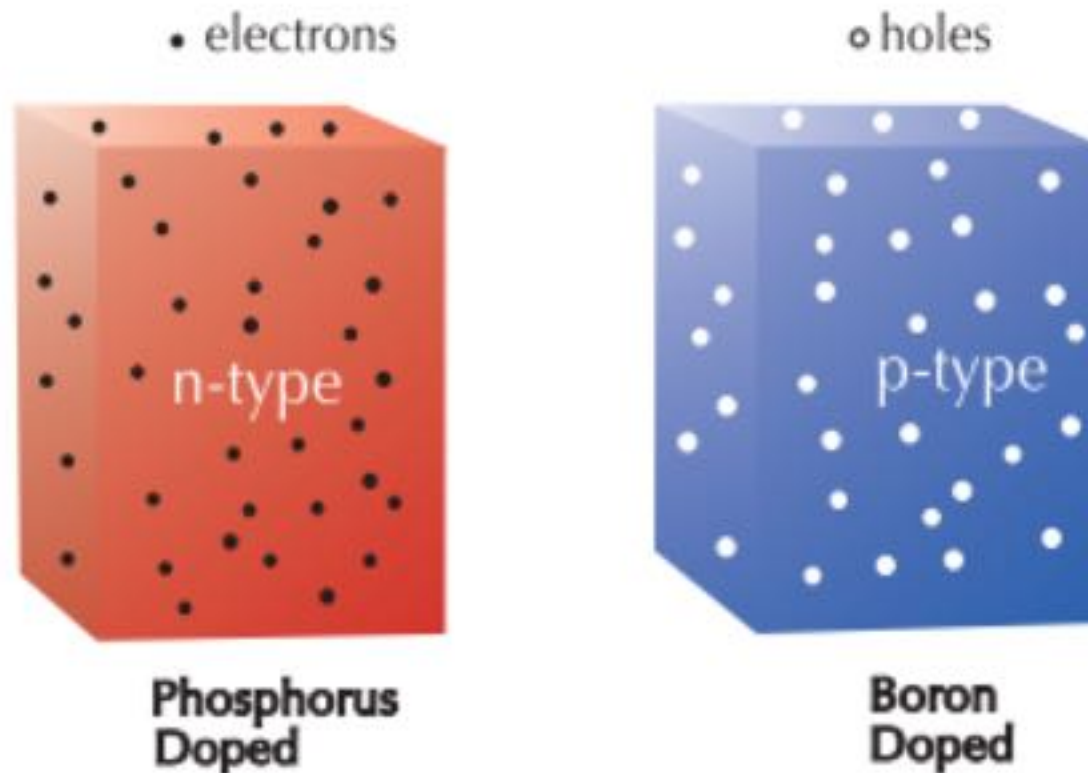


Figure 1 Doped silicon.

Εμπλουτισμένο πυρίτιο

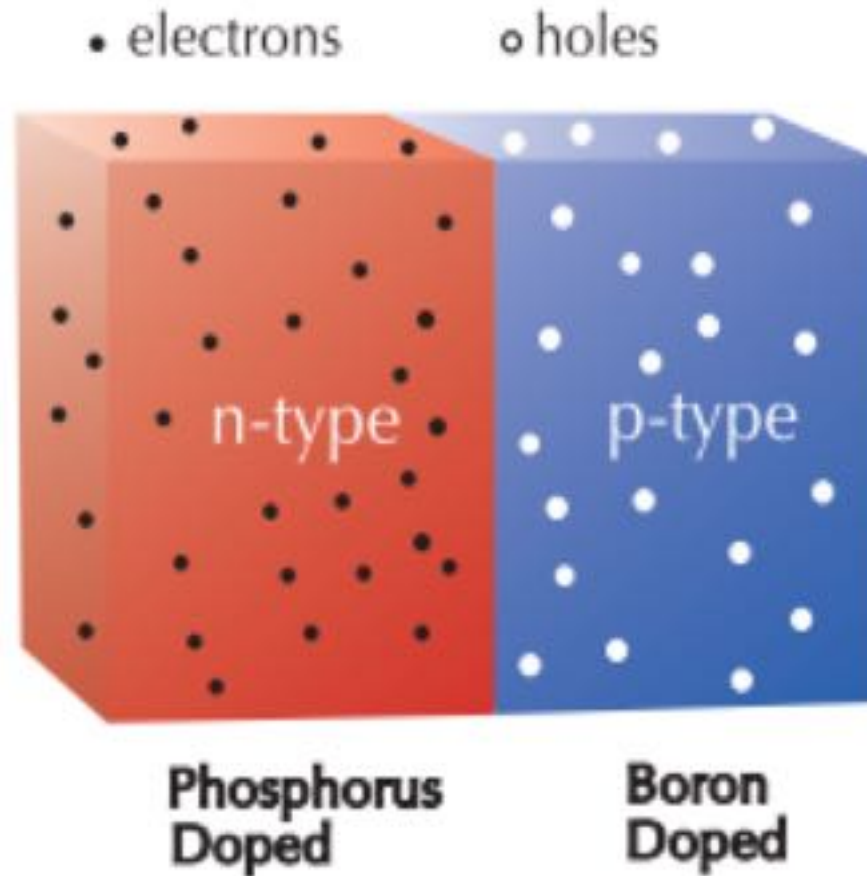


Figure 2 n-type and p-type materials brought together.

Ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο

- Ζώνη Απεμπλουτισμού (Depletion zone)
- Ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο (Built-in electric field)

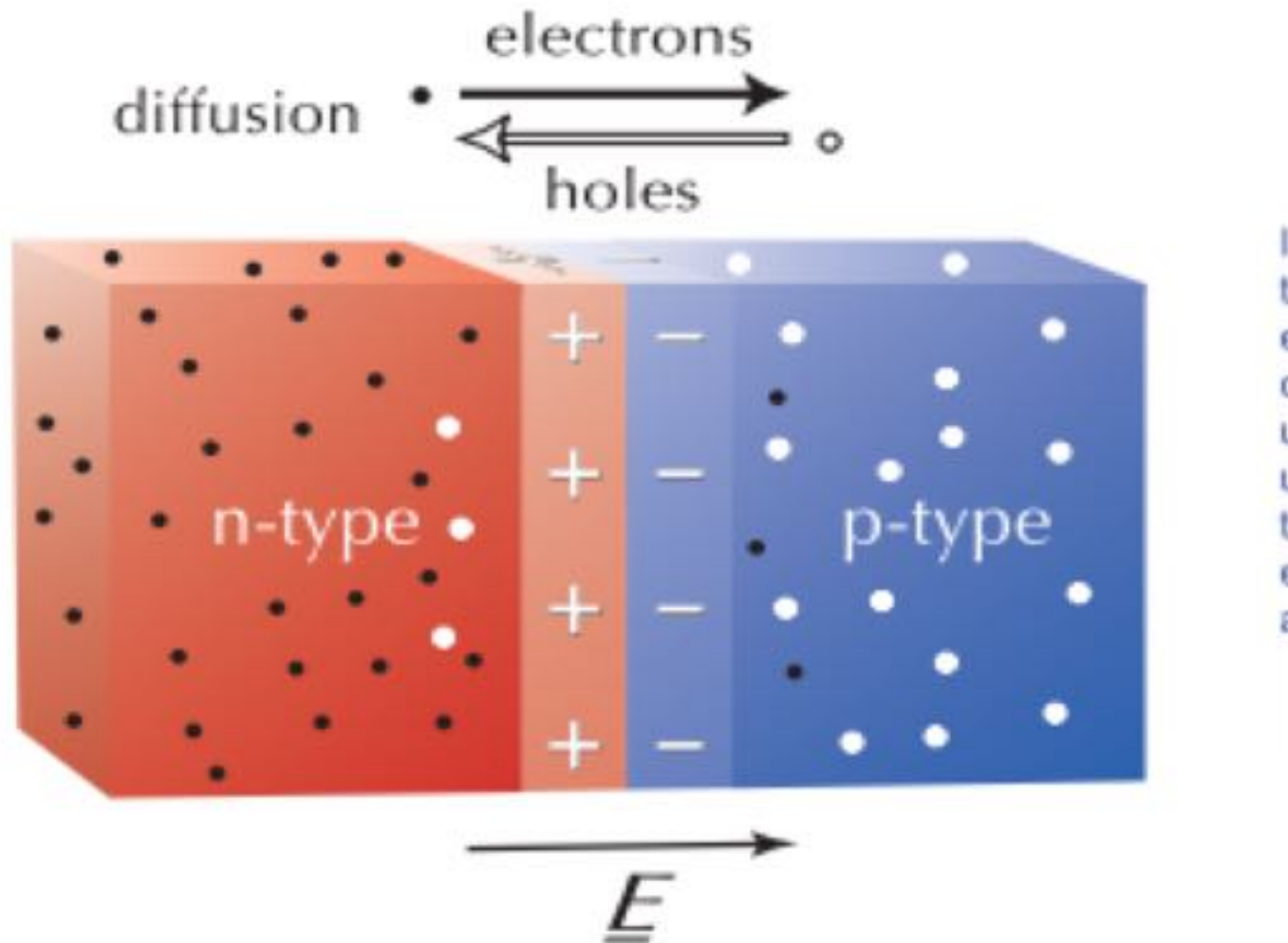
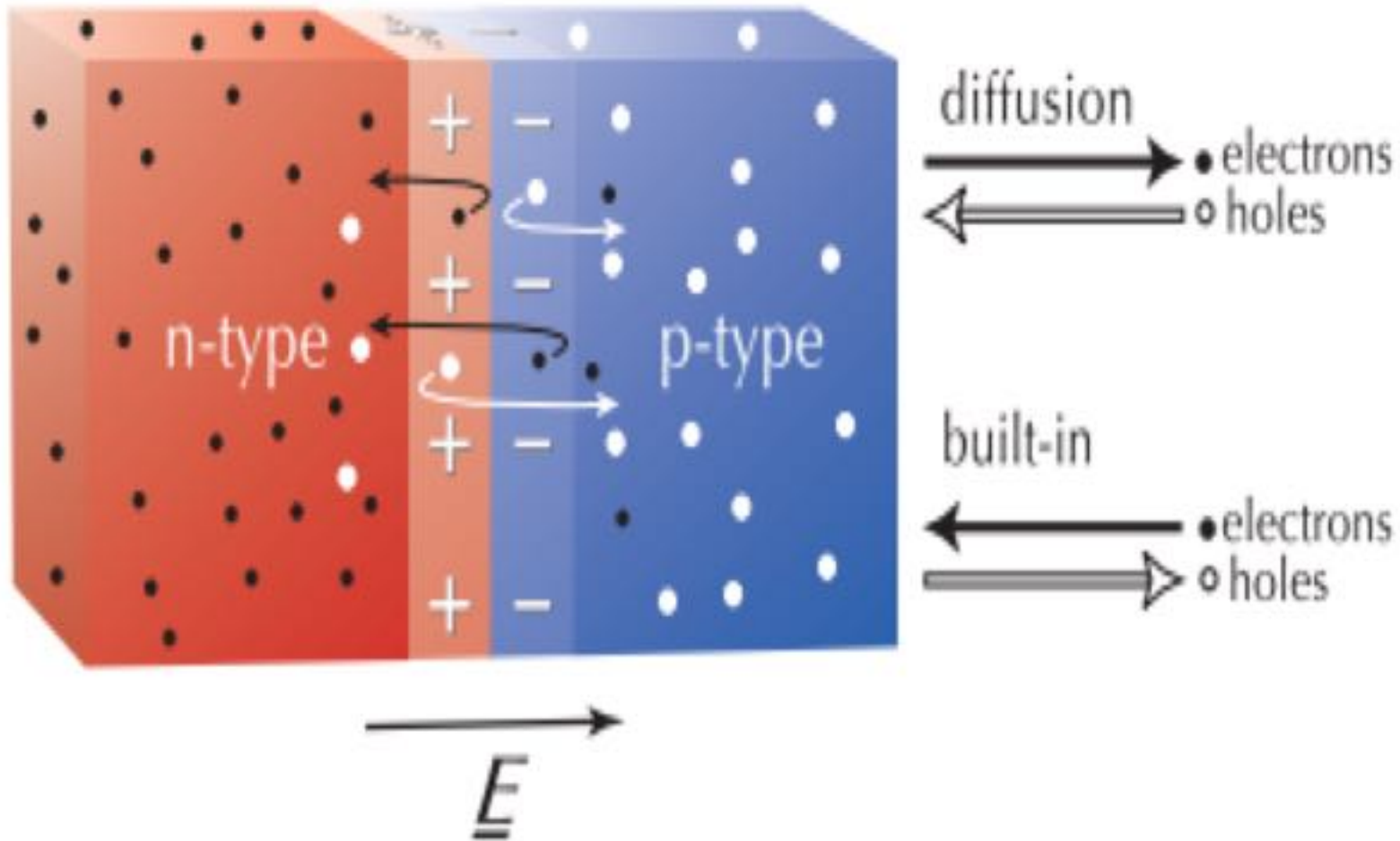


Figure 3 Diffusion establishes "built-in" electric field.

Πλειοψηφικοί και μειονοτικοί φορείς

- Μειοψηφικοί φορείς: Ηλεκτρόνια σε ημιαγωγού τύπου-p ή οπές σε ημιαγωγό τύπου-n.
- Μειοψηφικοί φορείς που θα βρεθούν μέσα στη ζώνη απεμπλουτισμού θα παρασυρθούν από το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο στην αντίστοιχη περιοχή και θα γίνουν φορείς πλειοψηφικοί ($I_{\text{παρ}}$) και θα μειώσει το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο
- Αντίθετο ρεύμα ($I_{\text{επαυ}}$) λόγω διάχυσης επαναφέρει το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο στην κατάσταση ισορροπίας

Διάχυση φορέων



Ευθεία Πόλωση

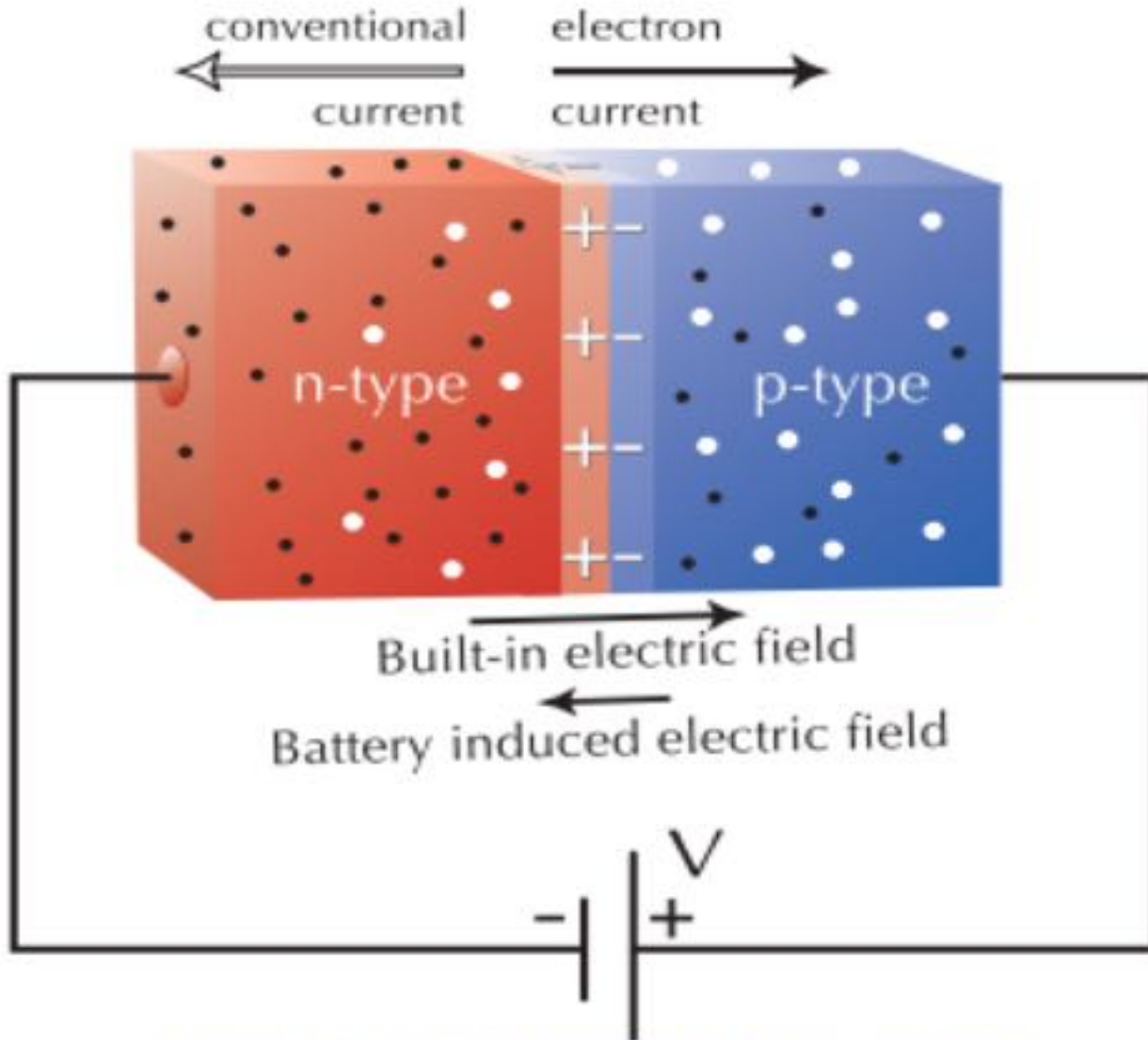


Figure 5 Forward bias of the p - n junction.

Ανάστροφη πόλωση

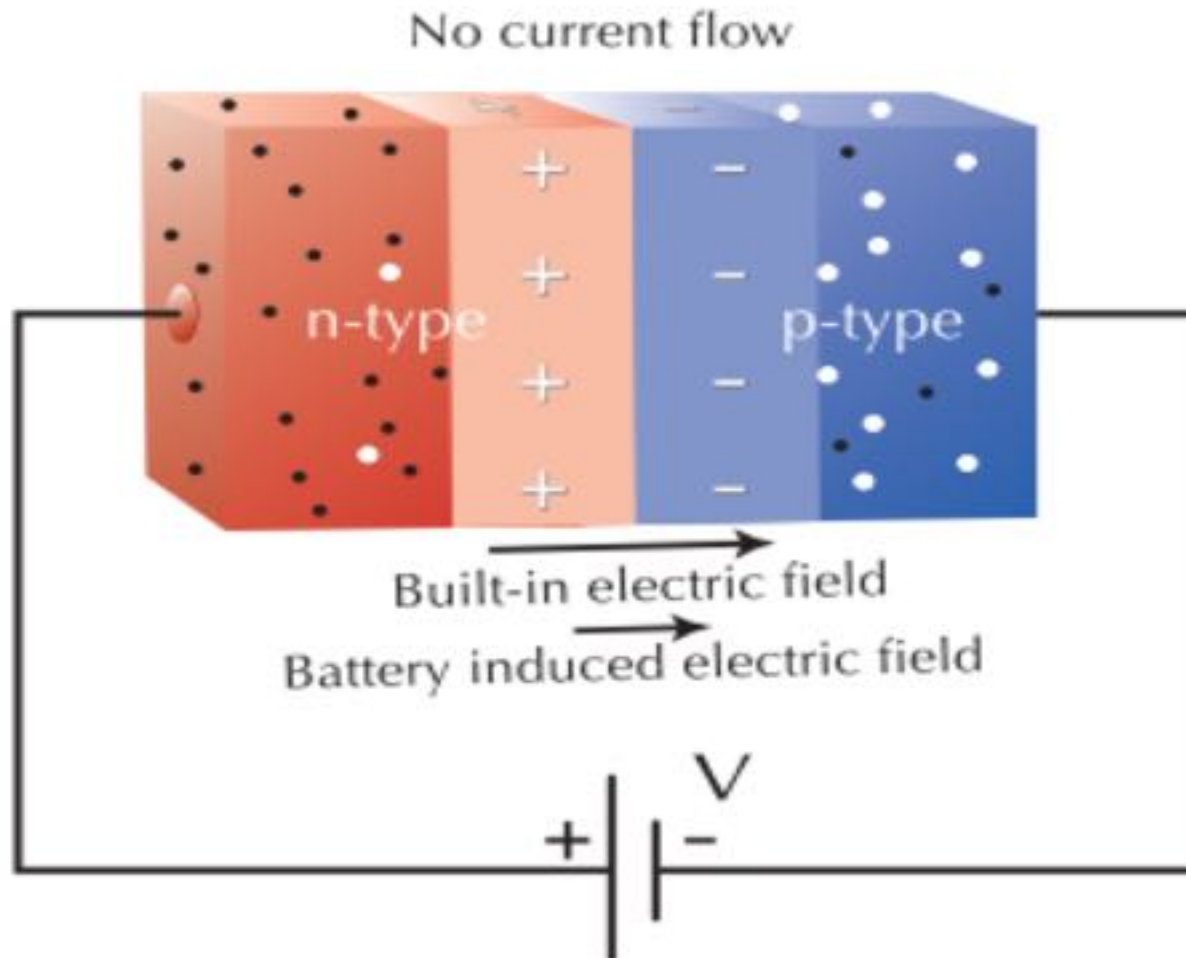
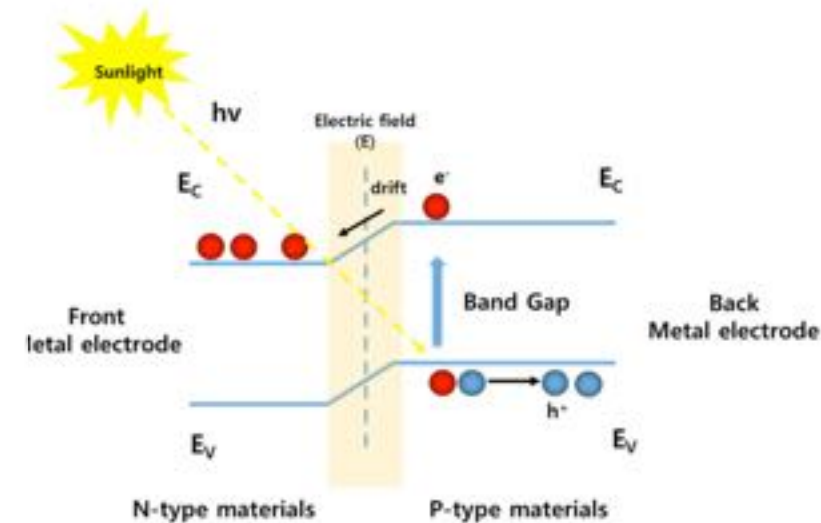
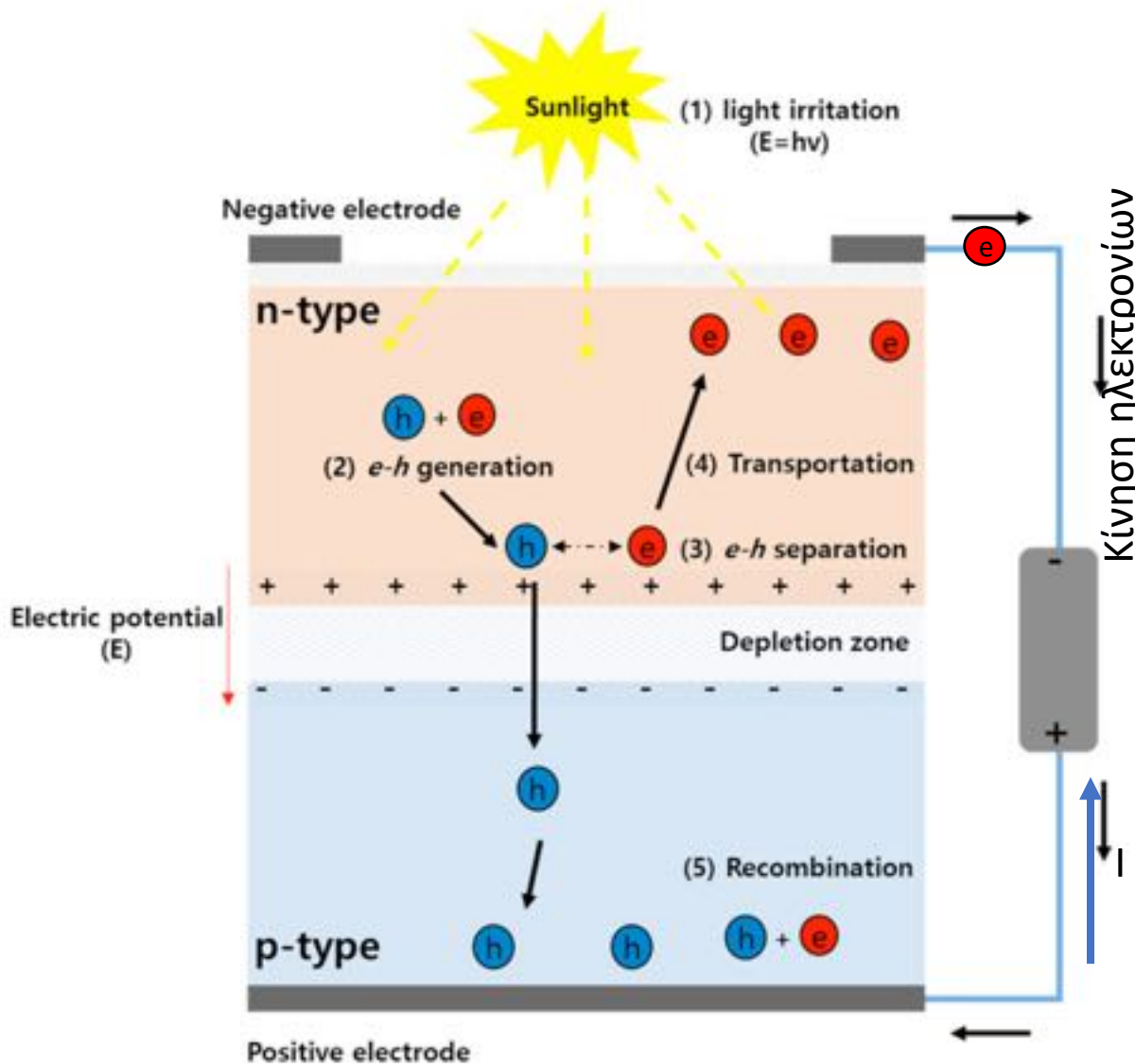


Figure 6 Reverse bias of the p - n Junction.

Προσθέτουμε φως



Καμπύλη I-V μίας διόδου

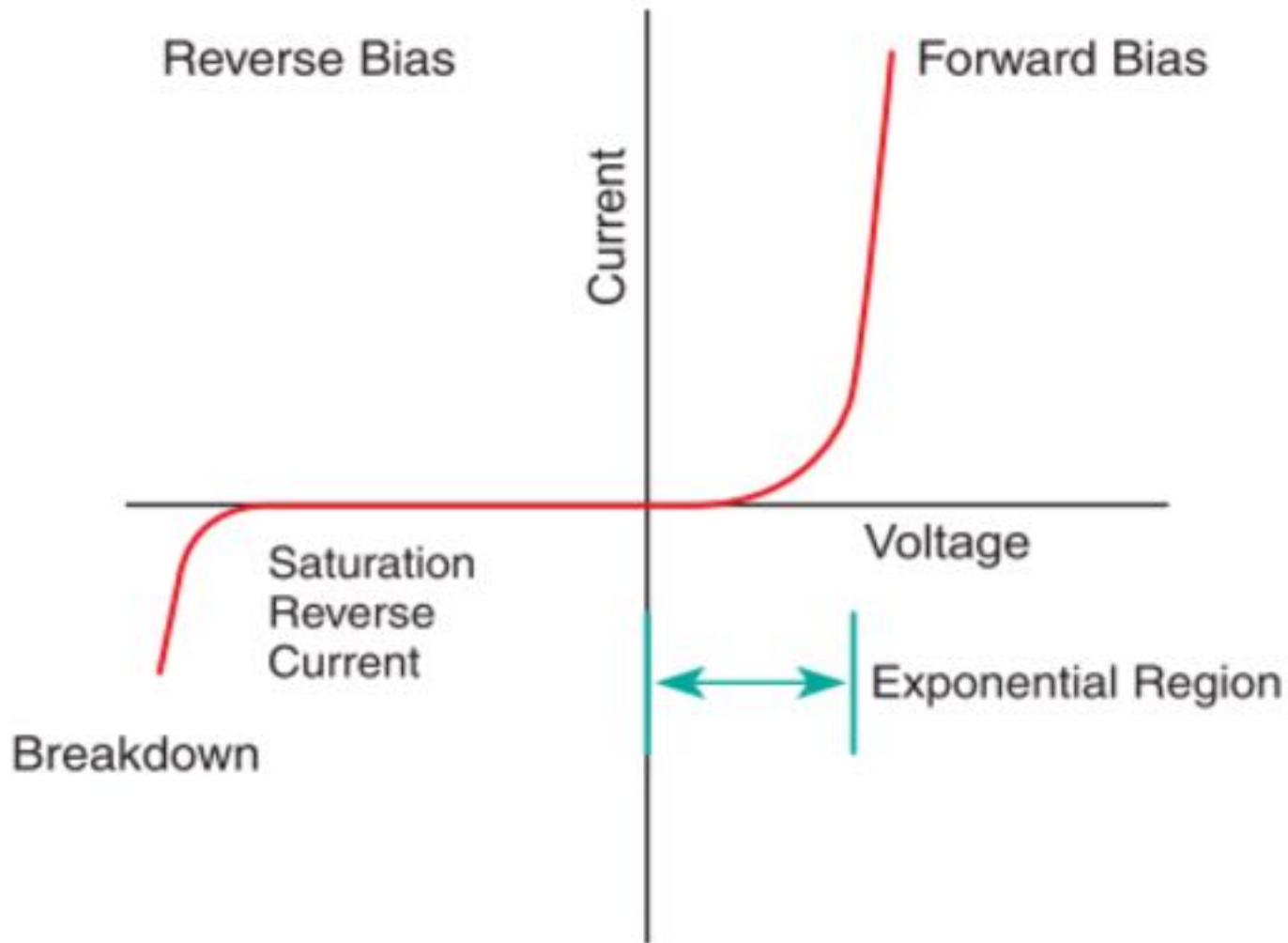
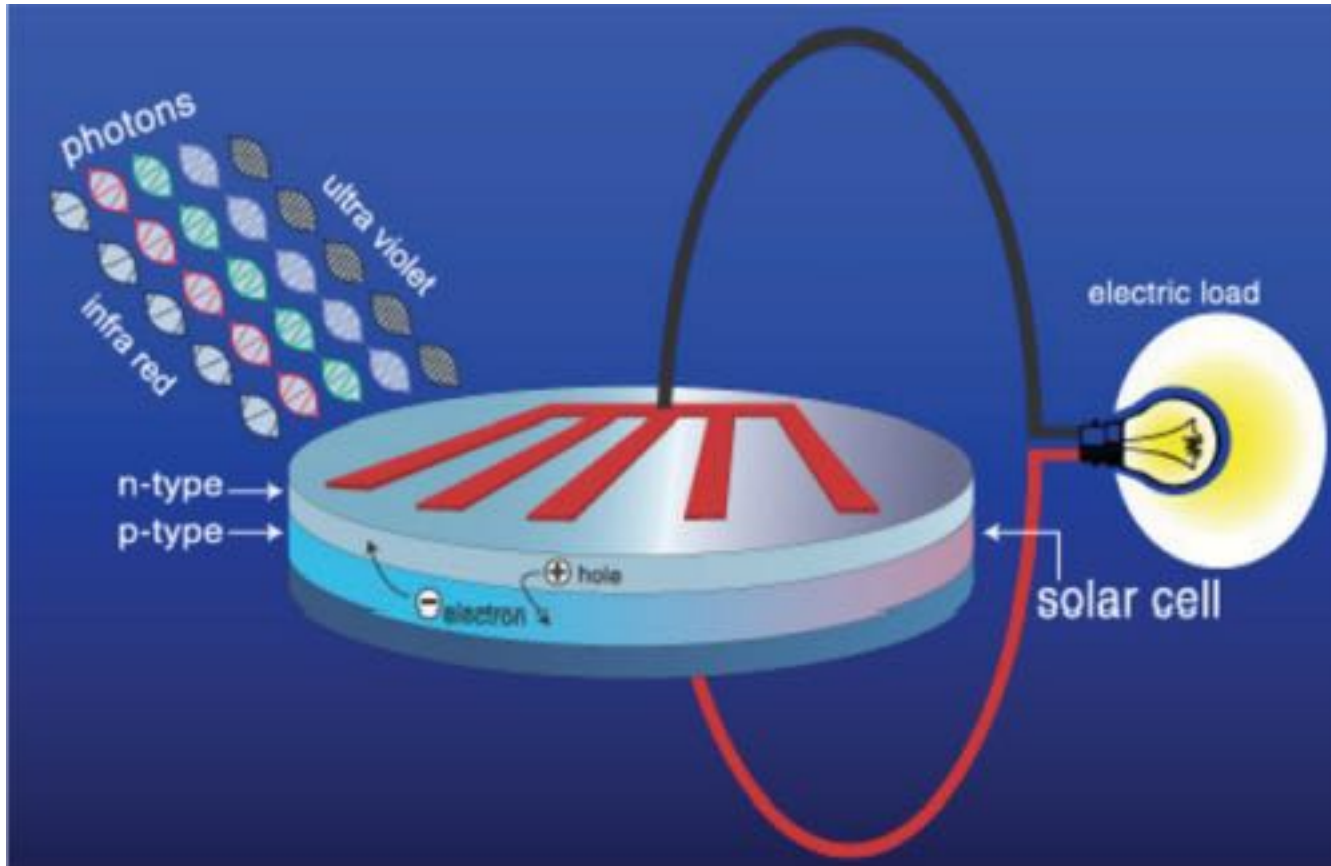


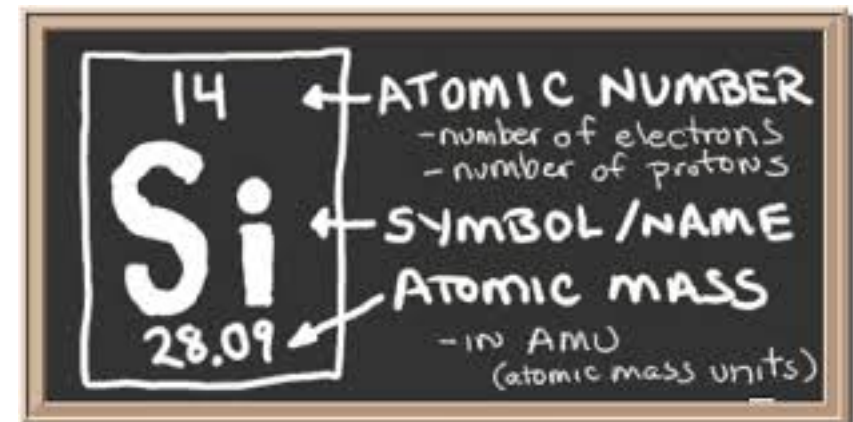
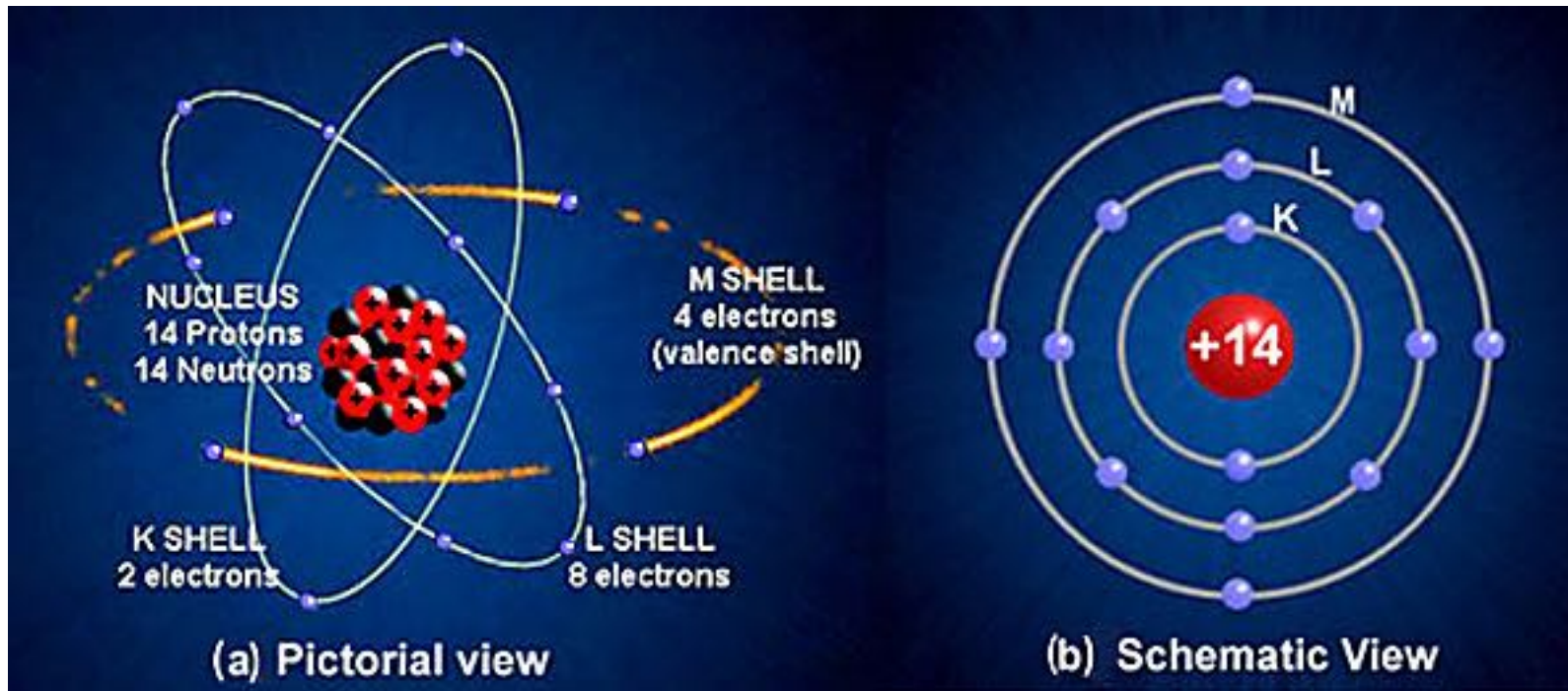
Figure 7 IV curve of the silicon $p-n$ junction diode.

Σχηματικό φωτοβολταϊκού στοιχείου

Φωτόνια φθάνουν στην ζώνη απεμπλουτισμού και μετατρέπονται μερικά σε ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών
Υπό την επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου κινούνται προς τις αντίστοιχες κατευθύνσεις

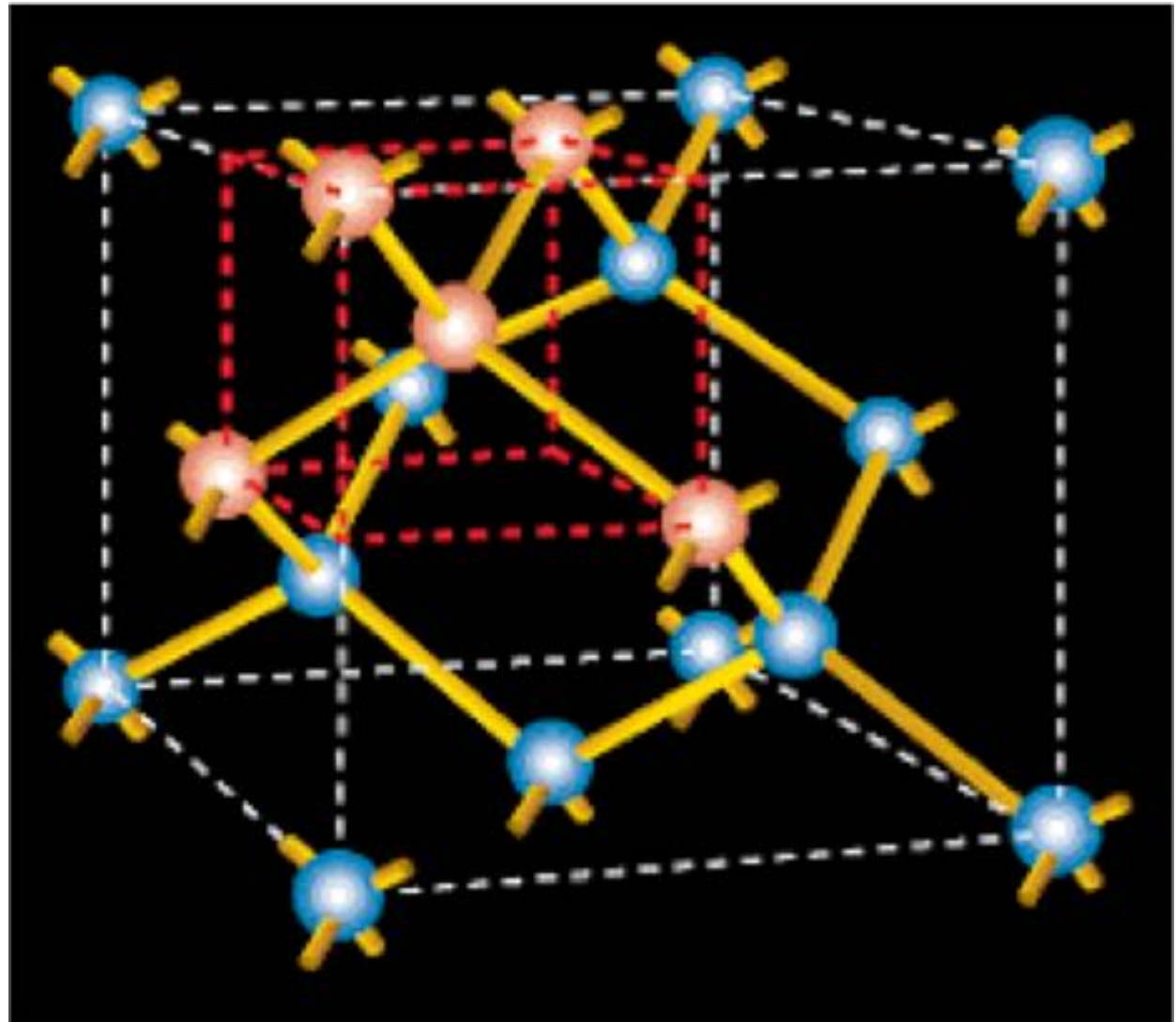


Πάλι το Άτομο Πυριτίου (Si)



...τώρα σε Πλέγμα κρυστάλλου πυριτίου

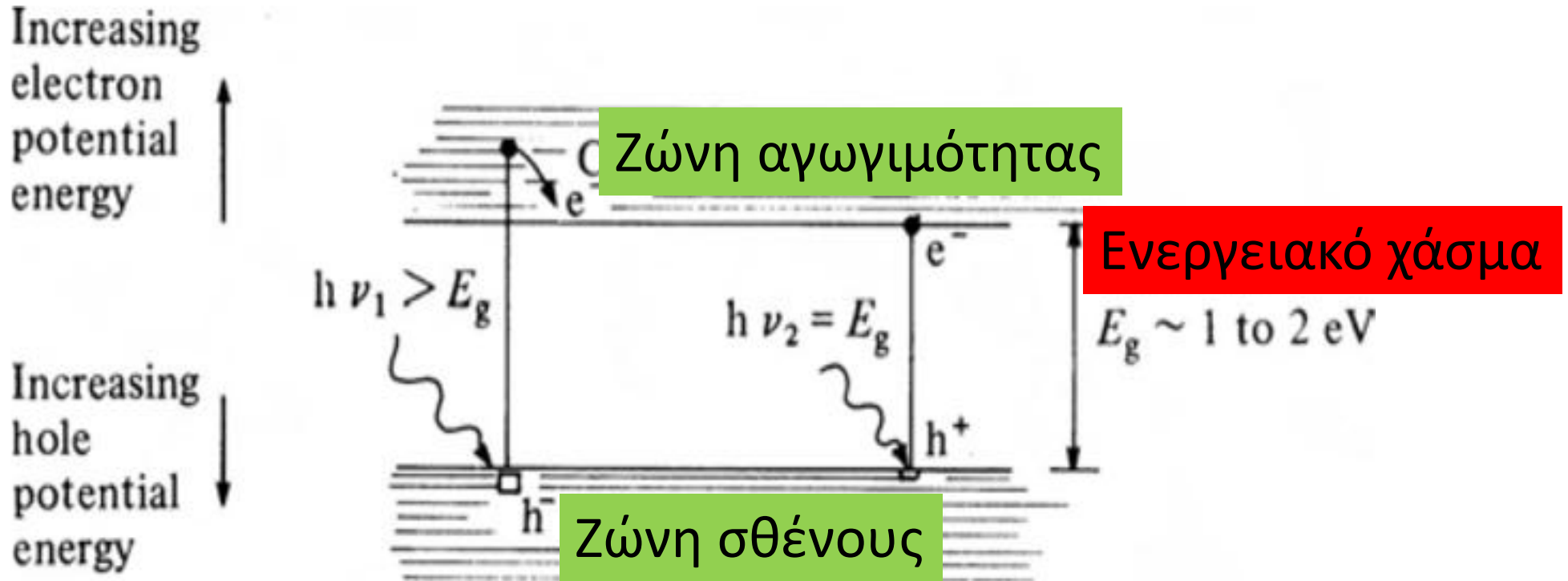
Τα στερεά υπάρχουν λόγω της έλξης των θετικών ιόντων στις κορυφές του πλέγματος και των ηλεκτρονίων που υπάρχουν μεταξύ τους (Δυνάμεις van der Waals, ομοιοπολικοί και ιοντικοί δεσμοί)



Ζώνη σθένους – ζώνη αγωγιμότητας

- Ποιες είναι οι ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων στον κρύσταλλο;
- Καθώς τα άτομα έρχονται κοντά και σχηματίζουν κρυστάλλους (δηλαδή το πλέγμα του στερεού) οι ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων μεταβάλλονται λίγο και ομαδοποιούνται σε ζώνες.
- Σε κάθε ζώνη οι επιτρεπτές ενέργειες είναι πρακτικά άπειρες αφού έχουμε 10^{23} ηλεκτρόνια σε μερικά γραμμάρια υλικού.
- Διακρίνονται οι ζώνες **σθένους** (valence band) και **αγωγιμότητας** (conduction band)
- Μεταξύ των ζωνών υπάρχει μια περιοχή ενεργειών που δεν είναι επιτρεπτές για τα ηλεκτρόνια. Είναι το ενεργειακό χάσμα εύρους E_g
- Για να φύγει ένα ηλεκτρόνιο από την μία ζώνη και να πάει στην άλλη πρέπει να απορροφήσει ενέργεια τουλάχιστον E_g .

Ενεργειακό χάσμα



1 electronvolt (eV) = 1.6×10^{-19} Joule

Αγωγοί-μονωτές

- Υλικά που έχουν άρτιο αριθμό ηλεκτρονίων στην εξωτερική στοιβάδα είναι συνήθως μονωτές.
- Για τα μέταλλα, ισχύει ότι έχουν 1 ηλεκτρόνιο στην εξωτερική στοιβάδα, άρα η ζώνη που τα περιέχει είναι μισογεμάτη, άρα τα ηλεκτρόνια μπορούν να πάρουν λίγη ενέργεια και να κινηθούν.
- Όπως είπαμε προηγουμένως...

Η ζώνη που βρίσκονται τα ηλεκτρόνια σθένους (δηλαδή η εξωτερική στοιβάδα στα άτομα) λέγεται ζώνη σθένους.

Τι Ενέργειες φωτονίων μας ενδιαφέρουν

Ενέργεια φωτονίου

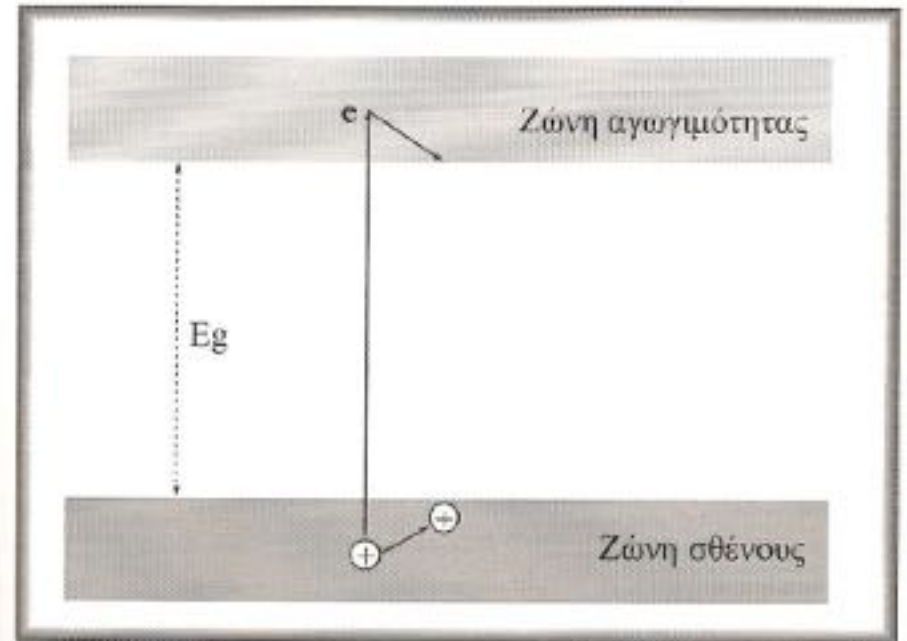
$$E = h\nu = hc/\lambda > E_g$$

Απώλεια ενέργειας σε θερμότητα

$$Q = E - E_g$$

Μέγιστο μήκος κύματος

$$\lambda_{max}(\mu m) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g(eV)}$$



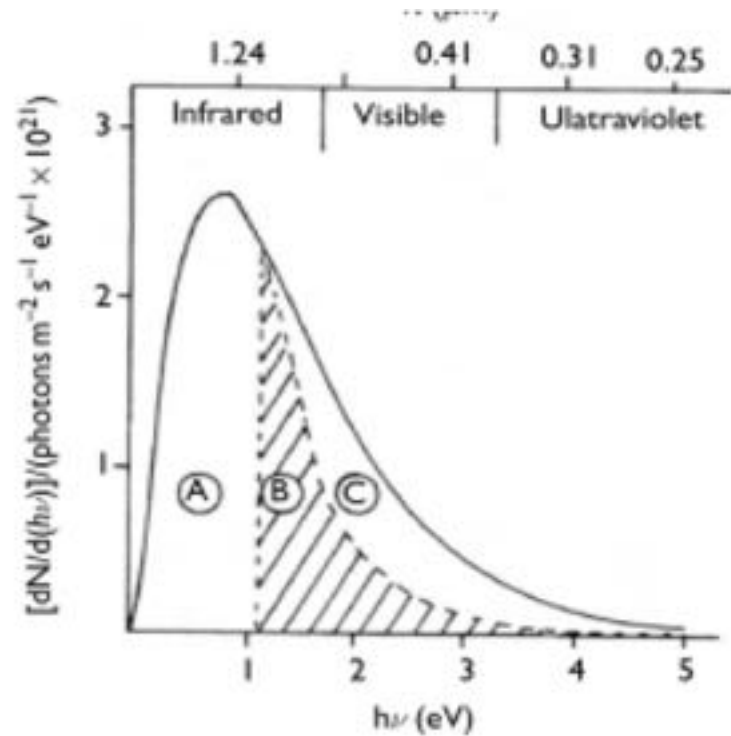
Σχήμα 4.13 Διάγραμμα για τον υπολογισμό της μέγιστης θεωρητικής απόδοσης μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό από ιδανικό ημιαγωγό, συναρτήσει του ενεργειακού χάσματος E_g .

Θεωρητική απόδοση ηλιακών στοιχείων

Μόνο η ενέργεια στην περιοχή B είναι διαθέσιμη για φωτοβολταϊκή ισχύ.

$$\max \frac{B}{A + B + C} \sim 47\%$$

Η χρήσιμη ισχύς εξαρτάται από την τάση στα ηλιακά στοιχεία.



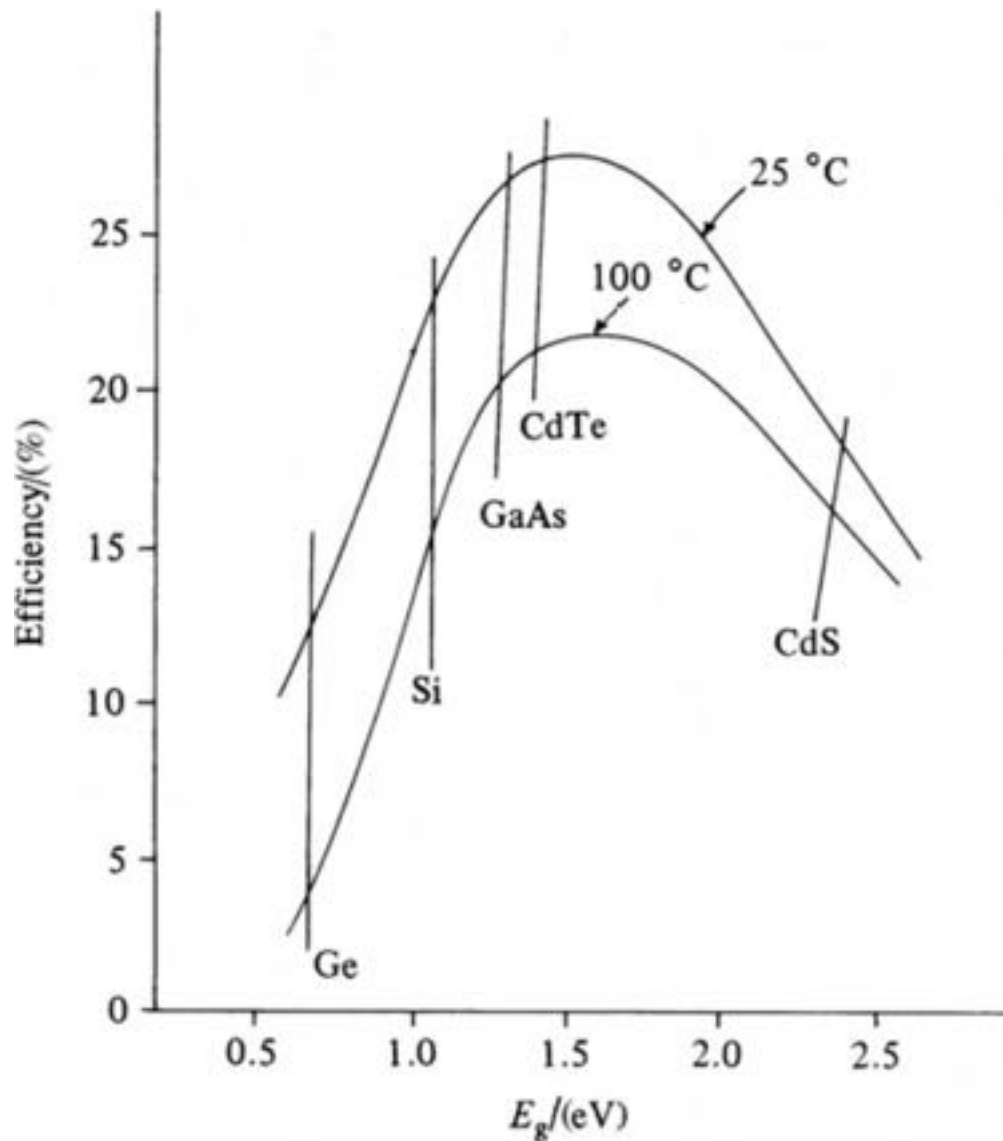
Για ρεύμα I , η μέγιστη χρήσιμη ισχύς είναι

$$P_{\text{χρήσιμη}} = IV_B < IE_g$$

Σε πρακτικές εφαρμογές $\frac{V_B}{E_g} \approx 75\%$

Άρα τελικά μόνο το 75% του 47% της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό

Βέλτιστη απόδοση Φ/B



- Βέλτιστη απορρόφηση φωτονίων από το ηλιακό φάσμα για βέλτιστη μετατροπή σε ηλεκτρισμό.
- Δηλαδή ελάχιστη σπατάλη ενέργειας σε θερμότητα.

Τάση κελιού έναντι ρεύματος

- Για μεγάλα ενεργειακά χάσματα έχουμε μεγαλύτερη τάση κελιού αλλά μικρότερο αριθμό φωτονίων άρα μικρότερο ρεύμα
- Αντίθετα μικρά ενεργειακά χάσματα συνεπάγονται μικρότερη τάση κελιού αλλά μεγαλύτερο αριθμό φωτονίων άρα μεγαλύτερο ρεύμα

• Απόδοση ηλιακών στοιχείων

Απόδοση ηλιακών στοιχείων

7.5-4

Πολλή σημαντική επιδίωξη η μεγιστοποίηση της απόδοσης

Πολλοί παράγοντες επηρεάζονται.

Προκαλούνται ~~εξαι~~ επιπλοκές θετικές και αρνητικές

Πολλοί μεγάλοι απόδοσει έχουν επιτευχθεί σε

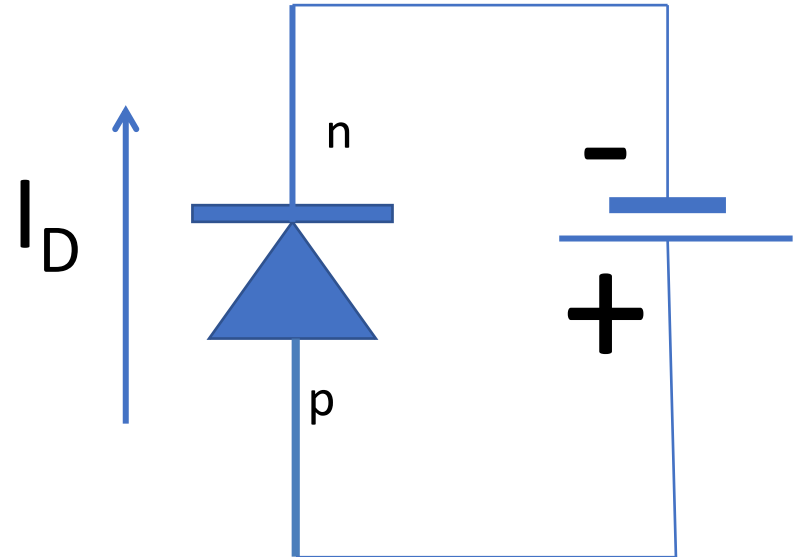
εργαστήριο,

Κύριο αρνητικό γνώρισμα το μεγάλο κόστος
και η μικρή διάρκεια ζωής.

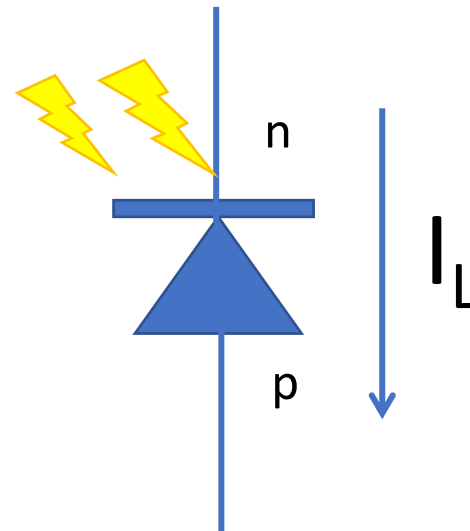
Σε ευρείες εφαρμογές στην επιφάνεια της γης
επιδιώκεται το ελάχιστο κόστος ανά kWh

Πόλωση επαφής

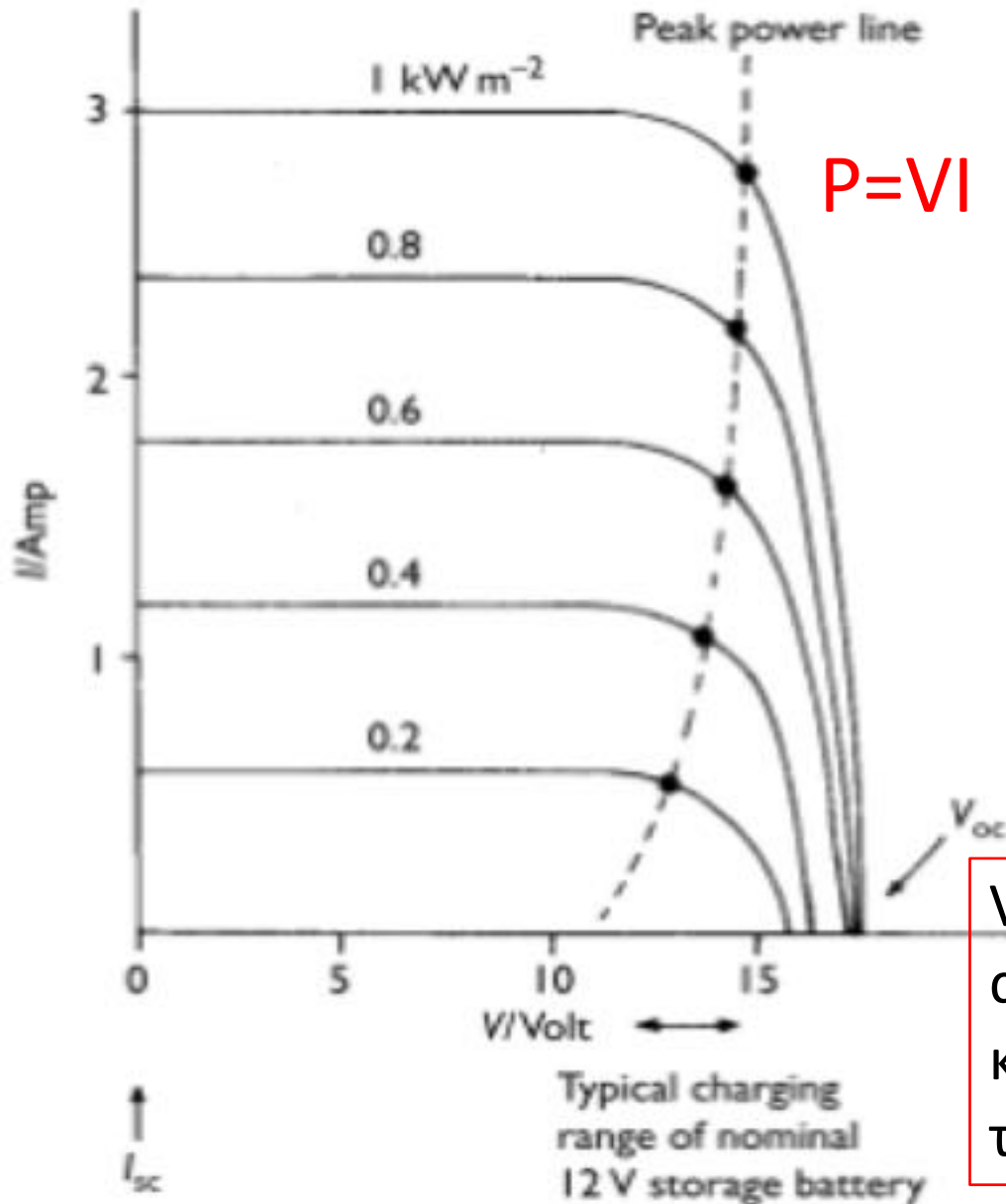
Δίοδος σε κύκλωμα με μπαταρία
Ρεύμα ορθής πόλωσης I_D από περιοχή p συνδεδεμένη με πόλο + σε περιοχή n συνδεδεμένη με τον αρνητικό πόλο της μπαταρίας.



Όταν το φως πέσει στην επαφή
(στην περιοχή n) προκαλεί αντίθετο ρεύμα I_L από περιοχή n σε περιοχή p.



Χαρακτηριστική καμπύλη I-V



$$P=VI$$

- Χαρακτηριστική καμπύλη 36 κυττάρων Si για φόρτιση μπαταρίας 12 V.
- Η γραμμή μέγιστης ισχύος ταιριάζει με την περιοχή φόρτισης της μπαταρίας
- Η μέγιστη ισχύς μεταφέρεται στο εξωτερικό φορτίο R_L όταν αυτό είναι ίσο με την εσωτερική αντίσταση της πηγής R_{int}

V_{OC} Τάση ανοικτού κυκλώματος

Εξάρτηση από την θερμοκρασία

$$V_{oc}(\theta) = V_{oc}(\theta_1) [1 - A(\theta - \theta_1)]$$

$$I_{sc}(\theta) = I_{sc}(\theta_1) [1 + B(\theta - \theta_1)]$$

$$A = 3.7 \times 10^{-3} \text{ (C}^{-1}\text{)}$$

$$B = 6.4 \times 10^{-4} \text{ (C}^{-1}\text{)}$$

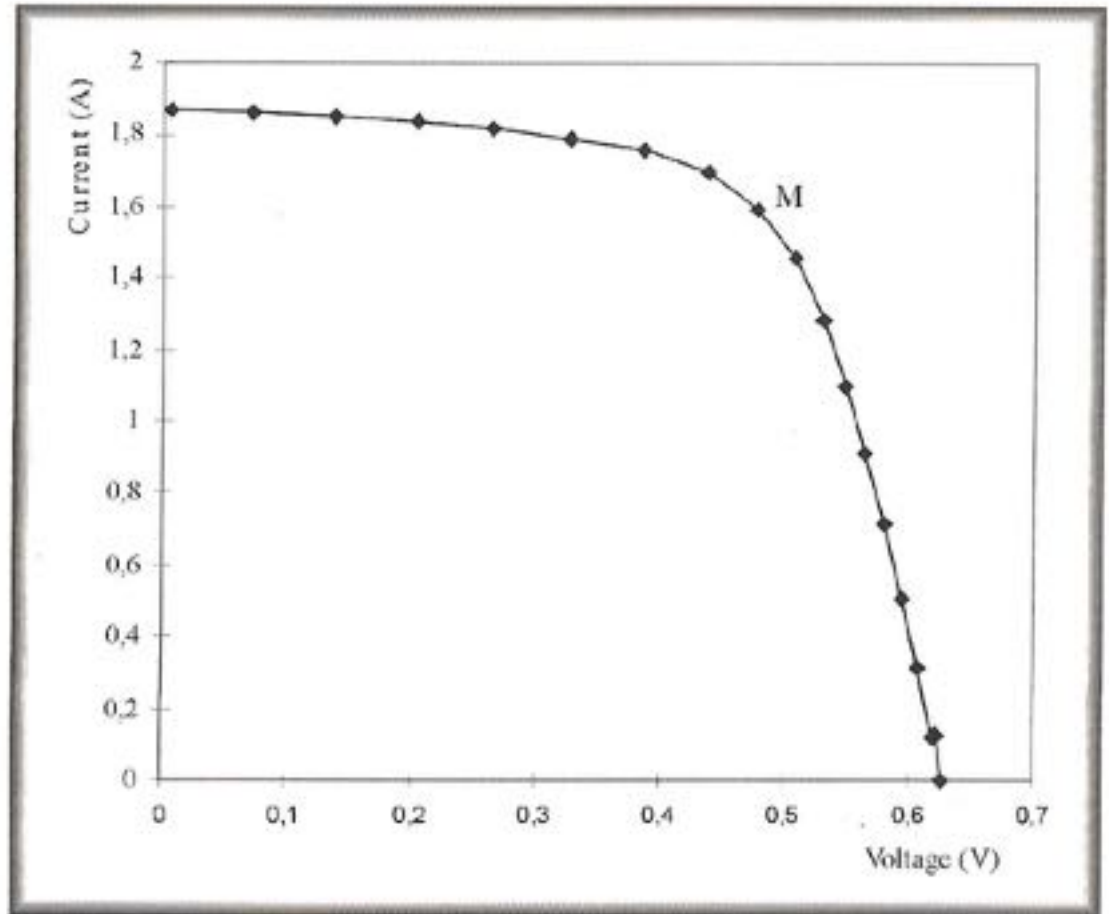
I_{SC} Ρεύμα βραχυκυκλώματος

•Χαρακτηριστική καμπύλη $I=I(V)$

I_{ph} αυξάνεται γραμμικά με την ένταση της ακτινοβολίας

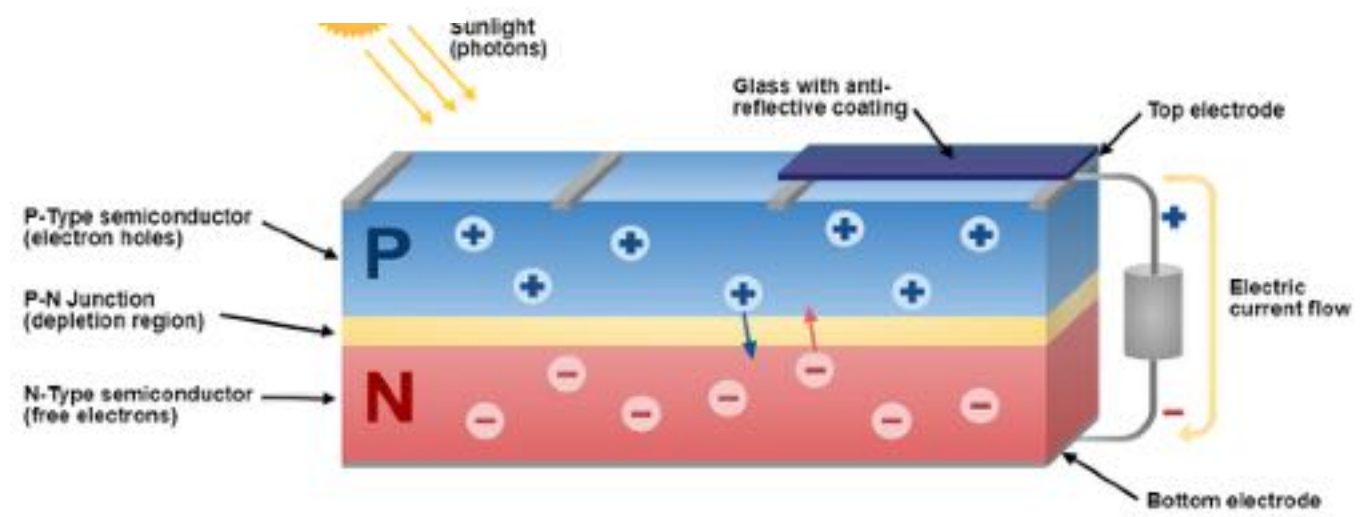
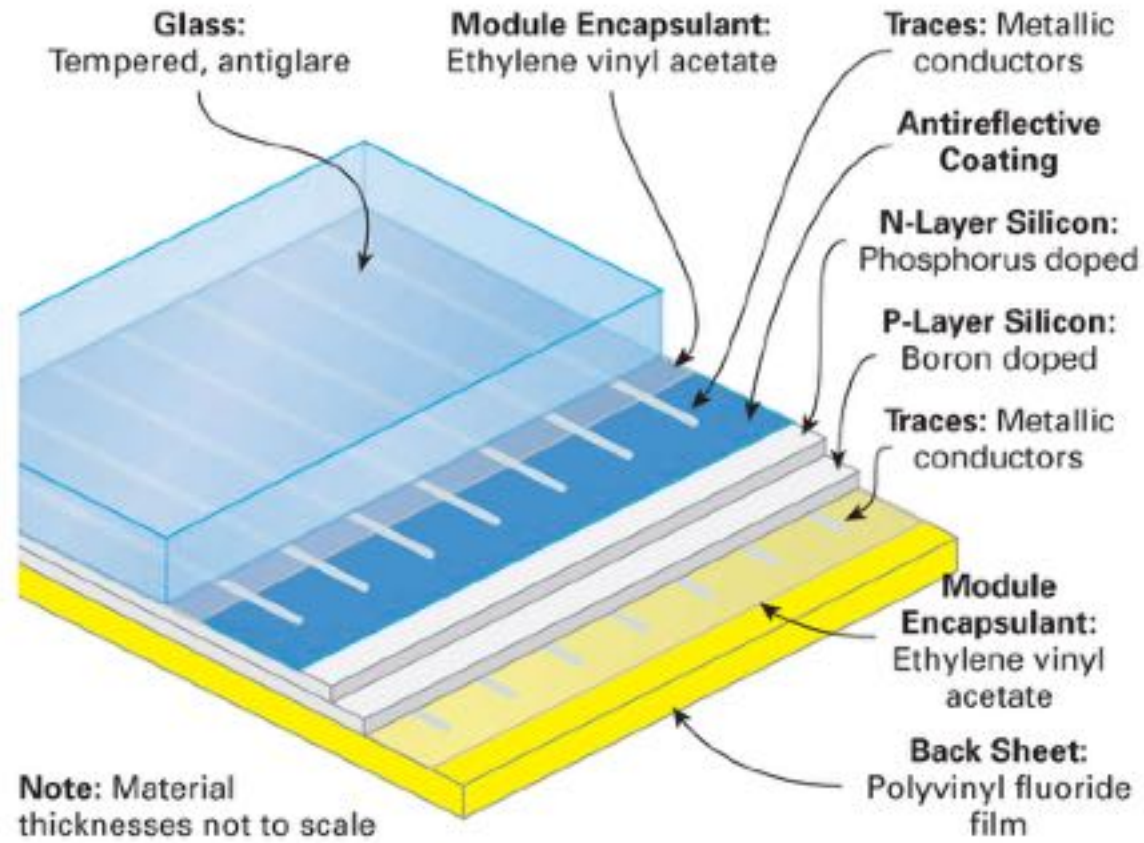
$$I_{ph} = q \xi N_{ph}$$

V_{oc} αυξάνεται λογαριθμικά



Σχήμα 4.15α Σύγκριση θεωρητικής χαρακτηριστικής καμπύλης $I=I(V)$ με πειραματικά δεδομένα. Το σημείο M αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ.

PV Module Anatomy





Συνδεσμολογίες φωτοβολταϊκών ΚΥΤΤΑΡΩΝ

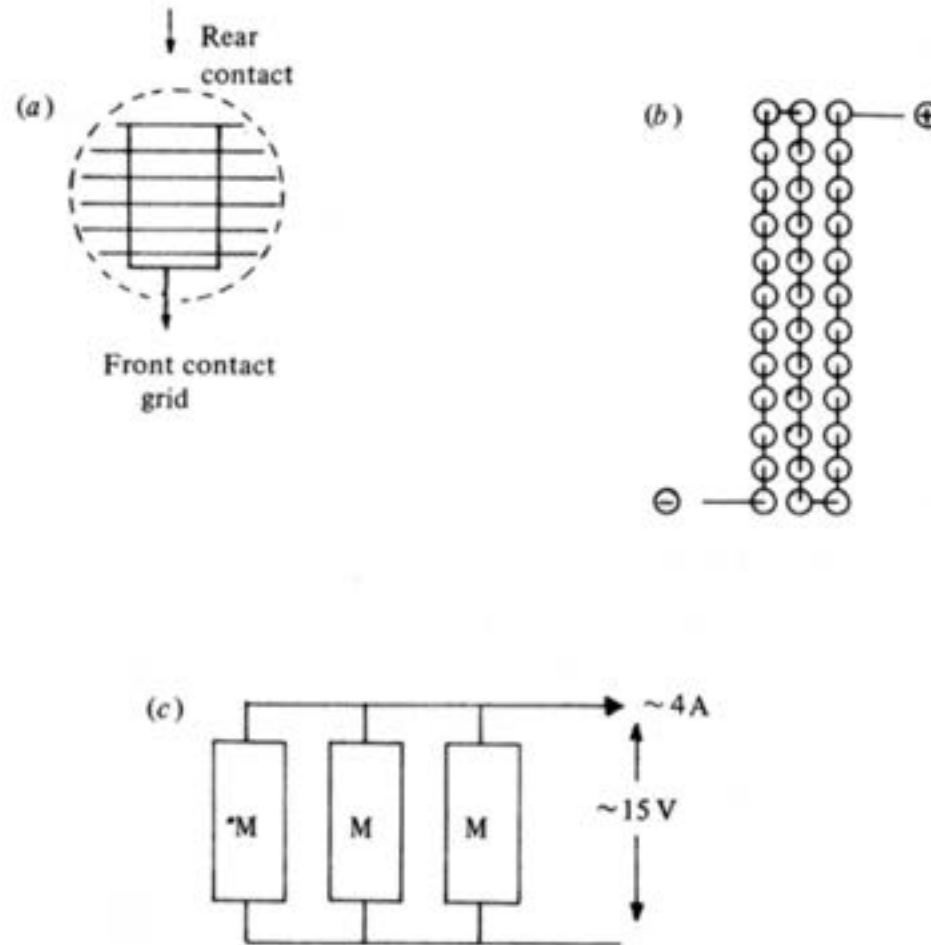
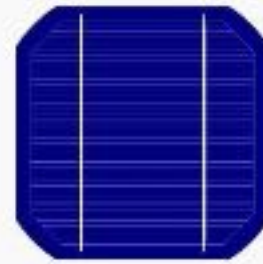


Figure 7.26 Typical arrangements of commercial Si solar cells. (a) Cell. (b) Module of 36 cells. (c) Array.

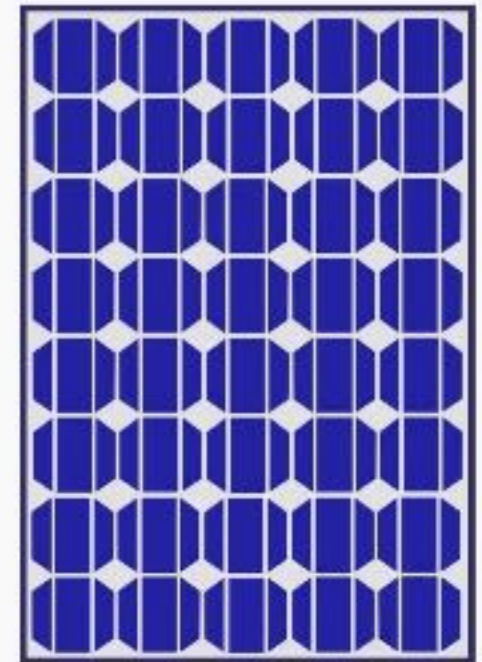
From a solar cell to a PV System



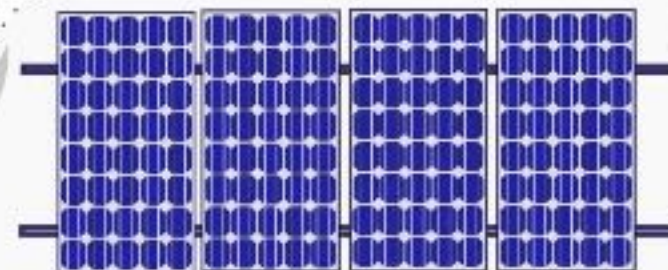
Solar Cell



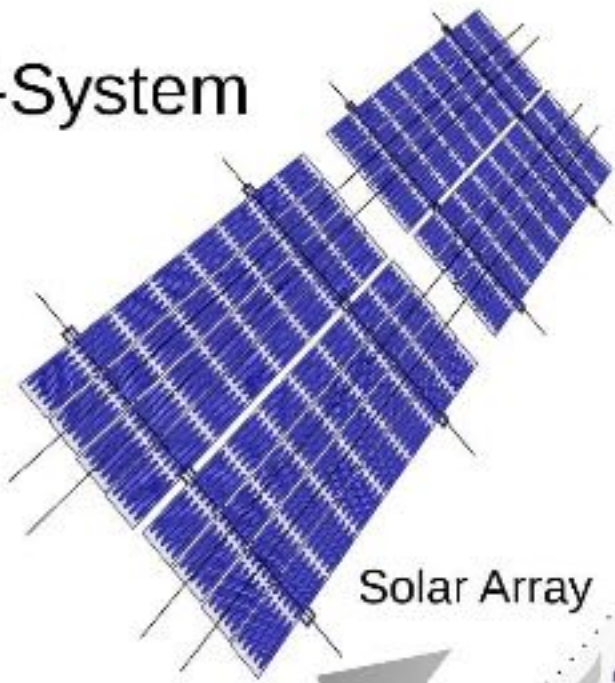
Solar Module



Solar Panel



Solar Array



PV-System

Electricity Meter

AC Isolator

Fusebox

Inverter

Battery

Charge Controller

Generation Meter

DC Isolator

Cabling

Mounting

Tracking System

Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ 7.3-4

Επιφάνεια πάνω επιφάνεια (απώλεια ~3%)
 Επιφάνεια τεταγμένα ηχητικός ~~+~~

Ανακλαση στην πάνω επιφάνεια (~1%)
 Ηλιακός ~40% ανακλαστικότητα, αλλά μπορεί να μειωθεί σε ~3%

Εσω αέρα με βυθός διαθρασε n_0
 κρύστα n_1
 κρύστα n_2

$$\rho_{ref} = \frac{(n_0 - n_1)^2}{(n_0 + n_1)^2}$$

Για $n_0 = 1$
 $n_1 = 1.6$
 ηλιασικό $\rho_{ref} = 5.3\%$

Για διηλεκτρικά
 βυθόσους
 ανακλαστικότητα

Για ηλιακούς είναι πιο περίπλοκο. Εξαρτάται από την συχνότητα και έχει μέση τιμή περίπου 3.5

Η ανακλαστικότητα στον αέρα φαίνεται

από $R_{ref} = 34\%$ (για 1eV)
 $R_{ref} = 54\%$ (για 5eV)

Απορροφήση ενέργειας WW, WW

Προσθήκη γετρωι υφειου παχους t.

Ελάχιστη ανάκλαση όταν $n_1 = \sqrt{n_0 n_2}$ και $t = \frac{\lambda}{4n_1}$

Για Si $n_1 = 1.9$, $t = 0.08 \mu m$.

$R_{ref} \approx 6\%$ για ευρεία εύρος συχνοτήτων

Επιπλέον $< E_g$ ($\approx 23\%$ απώλεια)

7.5-4

$h\nu < E_g$. Για Si ($E_g \approx 1.1 \text{ eV}$).

Τα ανενεργά φηκη κύματος είναι $\lambda > 1.1 \mu\text{m}$

και αντηροβωπένου το 23% υπακτινοβογια ~~AM1~~

Αν η ενέργεια απορροφηθεί, προκαλεί θερμότητα.

Μπορεί να κοπεί με φίλτρα, ή

Καλύτερα, να χρησιμοποιηθεί η θερμότητα.

Προνασφαιτική ενέργεια (απώλεια $\approx 33\%$)

Η προνασφαιτική ενέργεια $\cdot h\nu - E_g$ εμφανίζεται
ως θερμότητα

Κβαντική απόδοτικότητα (απώλεια 0.4%)

7.5-5

Το ποσοστό των απορροφούμενων ενεργών φωτονίων που προκαλεί παραγωγή ζεύγους ηλεκτρονίου-οπίου, πρέπει το υλικό να είναι αρκετά παχύ ώστε να απορροφάται το 95% των προσπίπτουσων ενεργών φωτονίων.

(Ανακλαστικό υπόστρωμα στο πίσω μέρος του στοιχείου)

- In many roof-integrated applications, strings are encapsulated (usually behind glass) to form a module (commonly referred to as a 'panel'). The PV panel is the principal building block of a PV system and any number of panels can be connected together to give the desired electrical output. However, two types of PV are best deposited as a thin film, and usually sold encapsulated in a polymer bonded to a substrate that can be used as part of the roofing material.
- Here, we only look at commercially available types of PV cell or film, any of which might be found in a module or film used on an active solar roof. We do not consider:
 - Gallium Arsenide cells. Due to their toxicity and potential carcinogenic properties, these are only used in rare applications such as satellites or demonstration solar-powered cars.
 - Organic-based PV solutions that are still under research.

Μονοκρυσταλλικά πάνελ

Φτιάχνονται από ένα μοναδικό κυλινδρικό κρύσταλλο πυριτίου. Είναι η πιο αποδοτικ'ξ τεχνολογία Φ/Β. Τυπική απόδοση είναι η μετατροπή 15% της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Η βιομηχανική διαδικασία είναι περίπλοκη, με αποτέλεσμα ψηλότερα κόστη από άλλες τεχνολογίες.

Πολυκρυσταλλικά πάνελ

- Also sometimes known as multicrystalline cells, polycrystalline silicon cells are made from cells cut from an ingot of melted and recrystallised silicon. The ingots are then saw-cut into very thin wafers and assembled into complete cells. They are generally cheaper to produce than monocrystalline cells, due to the simpler manufacturing process, but they tend to be slightly less efficient, with average efficiencies of around 12%.

- **Thick-film silicon PV panels**
- This is a variant on multicrystalline technology where the silicon is deposited in a continuous process onto a base material giving a fine grained, sparkling appearance. Like all crystalline PV, it is normally encapsulated in a transparent insulating polymer with a tempered glass cover and then bound into a metal framed module.

Φ/Β πάνελ από άμορφο πυρίτιο

Amorphous silicon cells are made by depositing silicon in a thin homogenous layer onto a substrate rather than creating a rigid crystal structure. As amorphous silicon absorbs light more effectively than crystalline silicon, the cells can be thinner - hence its alternative name of 'thin film' PV. Amorphous silicon can be deposited on a wide range of substrates, both rigid and flexible, which makes it ideal for curved surfaces or bonding directly onto roofing materials. This technology is, however, less efficient than crystalline silicon, with typical efficiencies of around 6%, but it tends to be easier and cheaper to produce. If roof space is not restricted, an amorphous product can be a good option. However, if the maximum output per square metre is required, specifiers should choose a crystalline technology.

Άλλα λεπτού υμενίου Φ/Β

A number of other materials such as cadmium telluride (CdTe) and copper indium diselenide (CIS) are now being used for PV modules. The attraction of these technologies is that they can be manufactured by relatively inexpensive industrial processes, certainly in comparison to crystalline silicon technologies, yet they typically offer higher module efficiencies than amorphous silicon. Most offer a slightly lower efficiency: CIS is typically 10-13% efficient and CdTe around 8 or 9%. A disadvantage is the use of highly toxic metals such as Cadmium and the need for both carefully controlled manufacturing and end-of-life disposal; although a typical CdTe module contains only 0.1% Cadmium, which is reported to be lower than is found in a single AA-sized NiCad battery.



Μονοκρυσταλλικό
Πυρίτιο

Πολυκρυσταλλικό Πυρίτιο



Λεπτά Υμένια

Τέλος παρουσίασης



Πόσα ηλεκτρόνια μπορεί να χωρέσει μία στιβάδα

Πόσα ηλεκτρόνια μπορεί να χωρέσει μία
στιβάδα;

Εχουμε μία ^(επιχειρηματική) ενεργειακή στάθμη ανά άτομο,
2 ηλεκτρόνια ανά στάθμη

6×10^{23} άτομα σε 12 gr C, 14 gr Si.

Σε $T \approx 0$ K (απόλυτο μηδέν)

Μία στιβάδα που είναι εντελώς γεμάτη
δεν επηρεάζει την μετακίνηση ηλεκτρονίων
αρα αυτή είναι μία κατάσταση που
απαιτείται ελαφρύς φωτισμός.

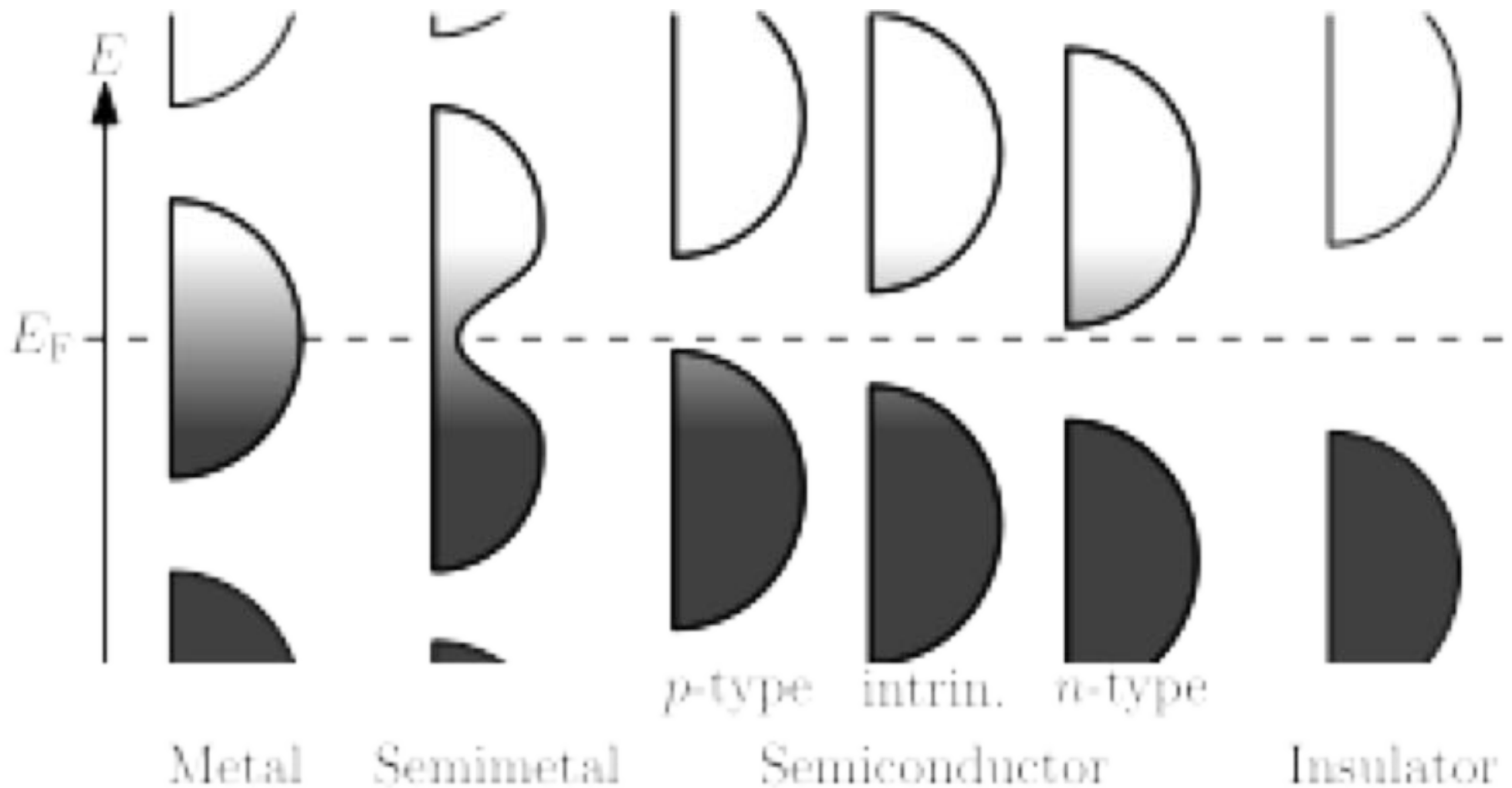
Αγωγιμότητα σε αγωγούς και μονωτές

Στους μονωτές (και στους ηφιαγωγούς) η σ ²
ζώνη σθένους είναι γειρανή.

Για να κινήσει ένα ηλεκτρόνιο, πρέπει να
προσάγει αρκετή ενέργεια $> E_g$ για να
πηδήξει το απαγορευμένο ενεργειακό χάσμα
και να βρεθεί στην επόμενη ~~επιπέδα~~ ζώνη
επιτρεπόμενων ενεργειών, των ζώνων ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ.

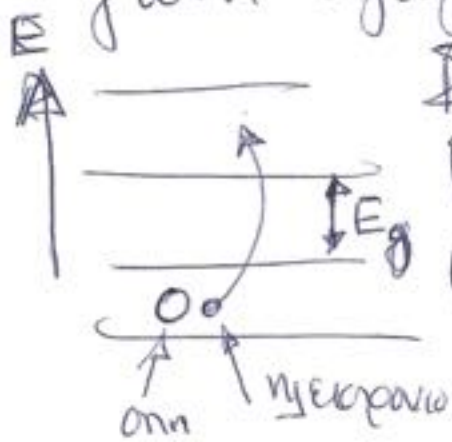
Πως θα γίνει αυτός (πρόσληψη φωτονίου
θερμική ενέργεια, κ.λπ.)

Ενεργειακές ζώνες στα υλικά



Οπές

Όταν η θερμοκρασία ανέβει
το ηλεκτρικό τείχος δε χαλαρώνει και μπορεί
ένα μέρος της ενέργειας αυτής να μεταφερθεί
σε ένα ηλεκτρόνιο που θα κάνει την
μετάβαση από την J_{min} σε ένα στήν
στην αγωγιμότητα.



Στην J_{min} ~~απλά~~ σείας μένει μία
κενή θέση που ήταν το ηλεκτρόνιο
που λείπει **ΟΠΗ**

Οι οπές συμπεριφέρονται σαν
δωρεϊδικά φορτίον $+e$

Η ελαφρή p-n του πυριτίου (Si)

72-1

Το διαμείγμα στο εμπορικό Si ~~παρέχει~~ περιέχει
προσφίξει $\approx 10^{18}$ άτομα cm^{-3} (< 1 άτομο ανά 10^9)

Είναι η βάση ουσίας της μικροηλεκτρονικής βιομηχανίας

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του Si περιγράφονται από
την θεωρία του ενεργειακού χάσματος $\left\{ \begin{array}{l} \text{ημιαγωγιμότητα} \\ \text{ημιόδηου} \end{array} \right.$

Η πυκνότητα ηλεκτρονίων ~~π~~ στην ημι
αγωγιμότητα και οπεί στην ημιόδηου

στο Si είναι ανάλογες του $\exp(-E_g/2kT)$

(2)

30/11

ΕΜΠΙΡΑΚΤΙΣΜΟΣ (DOPING)

72-2

Προσθετω στο Si (τετραθενεία, ομάδα IV
του περιοδικού πίνακα)

πυρίτιος τριθενίου Βορείου (B, ομάδα III)

Αφήνει κενή θέση ηλεκτρονίου (σημ)

που παρέχει ελεύθερα ηλεκτρόνια, με ενέργεια
κόστα στην ζώνη αθέρους.

Αυτές οι σημεί κινούνται φαινομενικά στο
υλικό σαν φορείς θετικού ρεύματος.

Ο υφιστάμενος λέγεται P (positive) με σημεί φορείς
φορτίου

Αν η προομιζή είναι ένα άτομο μεγαλύτερο
θενός (π.χ. 5-θενός φωσφορός, V)
είναι δόση νεκροτών.

Έχουμε ηλιαχτό των n (negative)
με ηεονασφατικά ηεκρόνια αγωγιμότητας
των φορείς ρεματός (ηειοηηηικού φορεί)

Ενέργεια Fermi (Χημικό δυναμικό)

Ενέργεια φέρει στο ενεργειακό χάσμα από
όπου η ηλεκτρόνια ή οπεί (φορείς ηλεκτρικού ρεύματος
ή η p-ζώνη αντίστοιχα) δεχόμενοι να
περατούν στον ζώνη αγωγιμότητας ή εδίου
αύξηση. $\Phi_{\text{Fermi}} \ll E_g$.

Είναι συνώνυμο του "χημικού δυναμικού".
Είναι μία παράμετρος που επηρεάζει τον προσδιορισμό
της πυκνότητας φορέων ηλεκτρικού ρεύματος.

Για μια Si p-n επαφή

Ισθα ενεργότητας $\sim 10^{22} \text{ m}^{-3}$, $E_g = 1.1 \text{ eV}$

$$(\phi_n + \phi_p) \approx 0.3 \text{ V} \Rightarrow V_{B(I=0)} \approx 0.8 \text{ V}$$

ΖΩΝΗ ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

Το επίπεδο Fermi χαρακτηρίζει όλο τον ημιαγωγό.

Η περιοχή τύπου-p έχει αρνητικό φορτίο
και -n θετικό

Παραγεται ηλεκτρικό πεδίο που ελκει οπές
και ηλεκτρόνια μακριά από την περιοχή της

επαφής ΖΩΝΗ ΑΠΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

Εστω n και p οι πυκνότητες ηλεκτρονίων και οπών

Τότε $np = C = \text{σταθερά}$

Περιοχή p : $np = C = (10^{10} \text{ m}^{-2})(10^{22} \text{ m}^{-3}) = 10^{32} \text{ m}^{-6}$

Περιοχή n : $np = C = (10^{22} \text{ m}^{-3})(10^{10} \text{ m}^{-3}) = 10^{32} \text{ m}^{-6}$

$$n + p = 10^{22} \text{ m}^{-3}$$

Ζωνν ανεξαρτησίας: $n = p$ εφ' ορισμού

$$n^2 = p^2 = C = 10^{32} \text{ m}^{-6}$$

$$n = p = 10^{16} \text{ m}^{-3}$$

$$n + p = 2 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$$

Μείωση
και $\sim 10^5$

Πλάτος ζωνν: $w \approx \left[\left(\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_r V_B}{e n p} \right) \right]^{1/2}$

ϵ_0 : διαγ. ουσ. ζωννών
 ϵ_r : σχετική διαγ. ουσ.

7.2-12

Si μεωχρήρωση προσφύειν 10^{22} m^{-3}
 και $\omega \approx 0,5 \text{ fm}$

Ένταση ηλεκτρικού πεδίου $E = \frac{V_B}{w} \sim 2 \times 10^6 \text{ V m}^{-1}$

Για να μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αυτό το πεδίο για την δημιουργία βέλους πρέπει να υπάρχουν φορείς μείωσης που θα διαχυθούν στη J_{min} απεμπνευσμού και θα επιταχυνθούν από το ηλεκτρικό πεδίο.

Πρέπει $\omega < L$ (μήκη διαχύσης) (βλ. έρε εσοφειν διαζεβν)

ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΦΩΤΟΝΙΟΥ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Ας προσθεσουμε φως. Η κυρίαρχη διαδικασία είναι η γένεση ζευγών ηλεκτρονίων-οπών.

Το φως απορροφάται από το ημιαγωγό και αυτό παράει την ενεργειακή χαρτα, $h\nu \geq E_g$

Για τα υλικά ημιαγωγών ηλιακών στοιχείων (Si)

$E_g \approx 1.1 \text{ eV}$. (SI) INDIRECT BAND GAP TRANSITIONS

Φωτόνα με ενέργεια κοντά σε αυτό το E_g απορροφούνται με σημαντικά ~~χαμηλά~~ δυναμικά για ηλιακό στοιχείο. $h\nu \pm h\omega \geq E_g$ ω συχνότητα ~~δυναμικά~~ δυναμικά

DIRECT BAND GAP TRANSITION (π.χ. GaAs)
Δεν έχουμε ~~παράλληλο~~ δόνηση του μεγάλου (βλ. σχήμα)

Για τους ημιαγωγοί η απορρόφηση φωτονίου για την υπερνίκηση του ενεργειακού χάσματος συμβαίνει στη περιοχή του ηλιακού φάσματος

(Si)
$$\nu > E_g/h \approx \frac{(1.1 \text{ eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})}{6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}} = 0.27 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$$\lambda \approx \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{0.27 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}} = 1.1 \mu\text{m}$$

Ροή φωτονίων στο ηλιακό φάσμα

$$\sim \frac{1 \text{ kW m}^{-2}}{(2 \text{ eV})(1.6 \times 10^{19} \text{ J eV}^{-1})} \approx 3 \times 10^{21} \text{ φωτόνια m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Αρα η απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας
πρέπει να δημιουργήσει ~~σε~~ μεγάλο αριθμό
ζευγών ηλεκτρονίων-οπών.

Αν αυτή η παραγωγή ζευγών αμβει κοντά
στην επαφή p-n.
το πεδίο στην περιοχή διαχωρισμού λειτουργεί σαν ΗΕΛ

Τι Ενέργειες φωτονίων μας ενδιαφέρουν

Ενέργεια φωτονίου

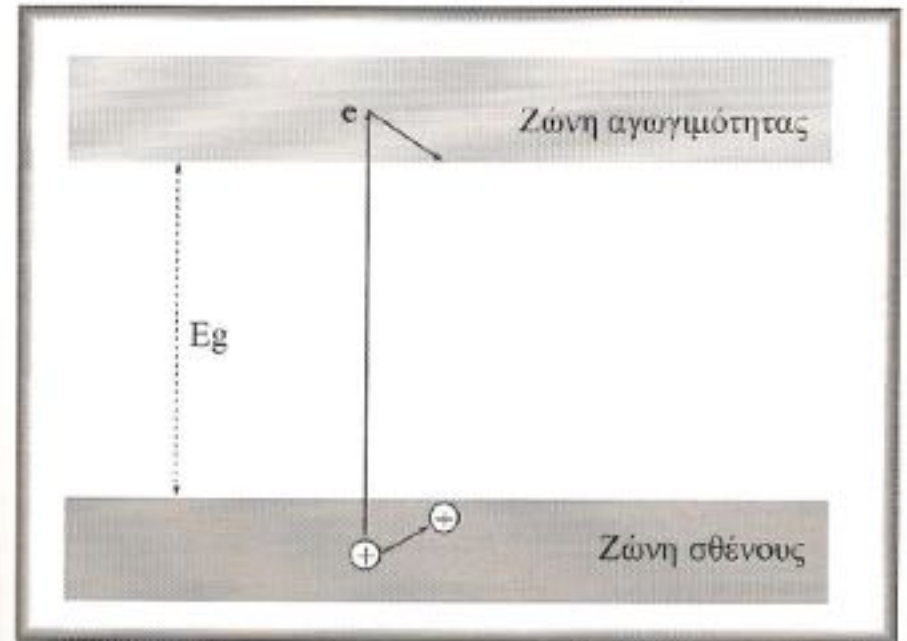
$$E = h\nu = hc/\lambda > E_g$$

Απώλεια ενέργειας σε θερμότητα

$$Q = E - E_g$$

Μέγιστο μήκος κύματος

$$\lambda_{max}(\mu m) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g(eV)}$$



Σχήμα 4.13 Διάγραμμα για τον υπολογισμό της μέγιστης θεωρητικής απόδοσης μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό από ιδανικό ημιαγωγό, συναρτήσει του ενεργειακού χάσματος E_g .

Απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας . (Φαθ. κορυφιασων. 7441) (Εξ. 6η)

Για παραγωγή ισχύος από φωτοβολταϊκά

→ Το ηλιακό φάσμα περιλαμβάνει συχνότητα που φτάνει για παραγωγή ισχύος ($h\nu < E_g$) (περιοχή Α)
Η απορρόφηση παράγει τόσο θερμότητα αλλά όχι ηλεκτρισμό

→ Για $h\nu > E_g$, η επιπλέον ενέργεια $E_g - h\nu$ ~~αποβάλλεται~~ απορροάζεται σαν θερμότητα (C)

→ Άρα υπάρχει βέλτιστο ενεργειακό φάσμα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΔΙΟΔΟΥ pn



Ρεύματα

- Ρεύμα παραγωγής (I_g)

Σύμφωνα με το ενσωματωμένο ηλεκτρικό πεδίο. Μειοψηφικοί φορείς που περνάνε από την ζώνη απεμπλουτισμού. Ηλεκτρόνια από το p στο n. Οπές με αντίθετη κίνηση.

- Ρεύμα επανένωσης (I_r)

Οι φορείς λόγω διάχυσης επανενώνονται, πράγμα που ισοδυναμεί με ρεύμα I_r , αντίθετο από το I_g

ΣΚΟΤΕΙΝΗ ΔΙΟΔΟΣ

Χωρίς πόλωση $I_r = I_g$

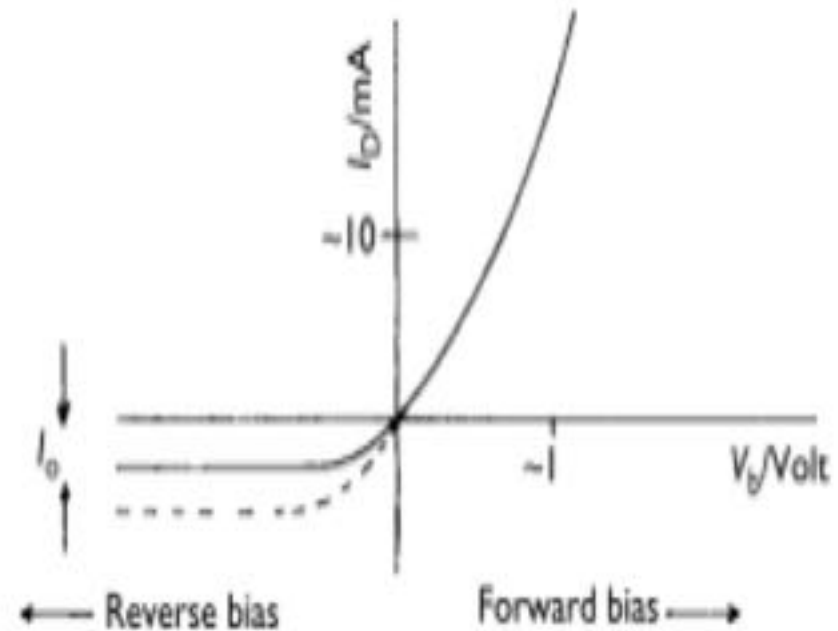
Για θετική πόλωση με εξωτερικό δυναμικό V_B (π.χ. από μπαταρία)

$$I_r = I_g e^{\frac{eV_B}{kT}}$$

Το συνολικό ρεύμα χωρίς φωτισμό (dark current) είναι

$$I_D = I_r - I_g = I_0 \left[e^{\frac{eV_B}{kT}} - 1 \right]$$

Όπου $I_0 = I_g$ (εξίσ. Shockley)



I_0 είναι το ρεύμα κορεσμού υπό αντίστροφη πόλωση ή **ρεύμα διαρροής**. Εξαρτάται από την θερμοκρασία

Επαφή pn σε φως

- Η απορρόφηση φωτονίων αυξάνει πολύ το ρεύμα παραγωγής (I_g) Στο σκοτάδι υπάρχει μόνο ένα αμελητέο ρεύμα από θερμική διέγερση.
- Οι οπές έλκονται προς την πλευρά του p-ημιαγωγού δίνοντας του θετική τάση.

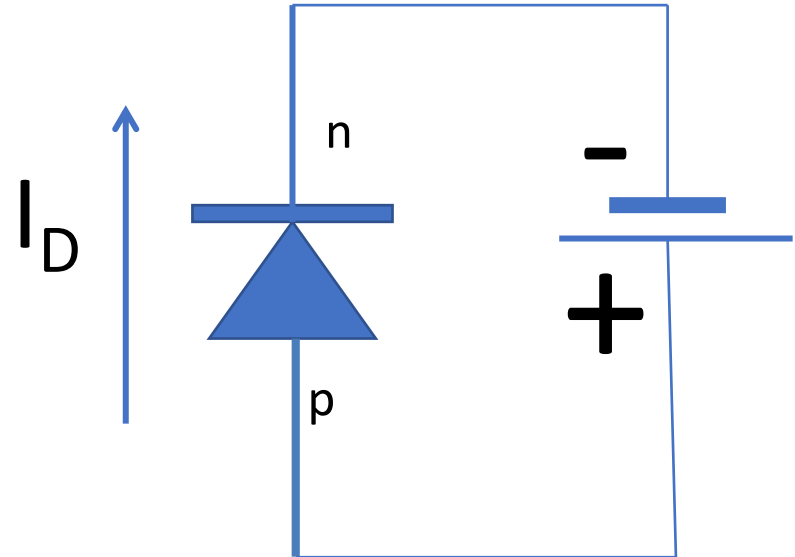
Το ρεύμα παραγωγής λόγω των φωτονίων είναι I_L

Το ρεύμα του φωτοβολταϊκού κυττάρου

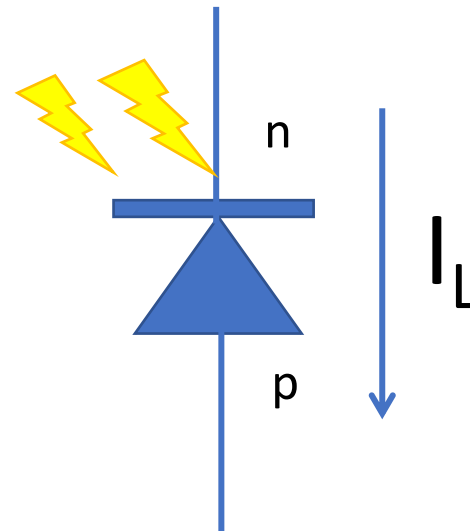
$$I = I_D - I_L = I_r - I_g = I_0 \left[e^{\frac{eV_B}{kT}} - 1 \right] - I_L$$

Πόλωση επαφής

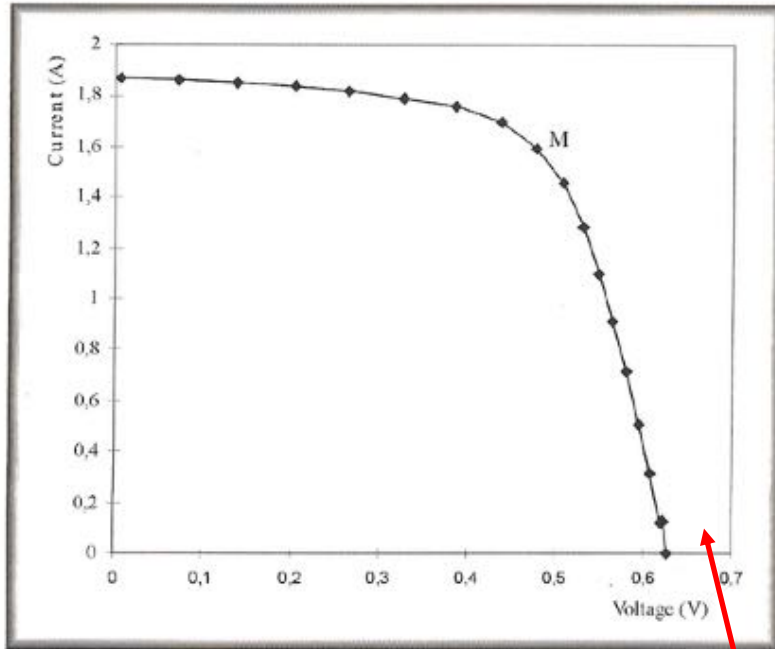
Δίοδος σε κύκλωμα με μπαταρία
Ρεύμα ορθής πόλωσης I_D από περιοχή p συνδεδεμένη με πόλο + σε περιοχή n συνδεδεμένη με τον αρνητικό πόλο της μπαταρίας.



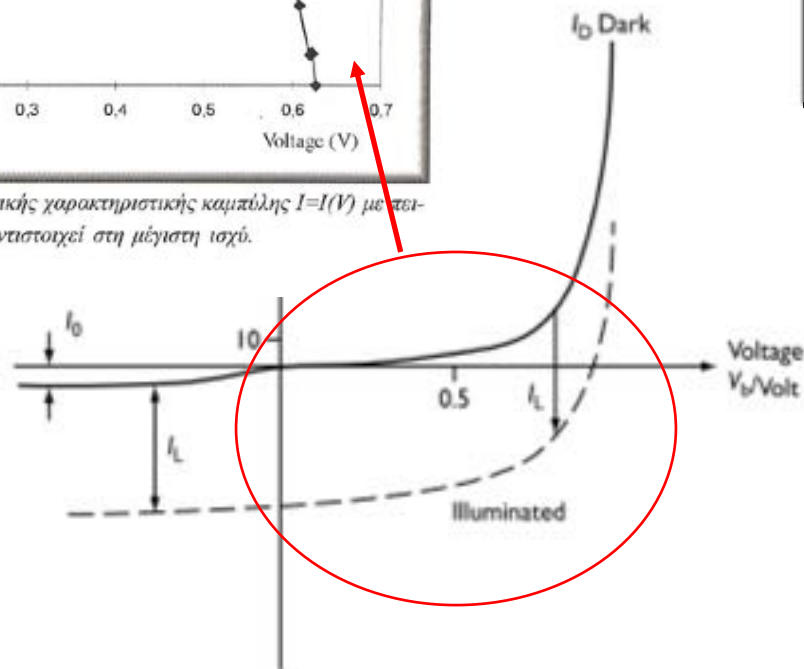
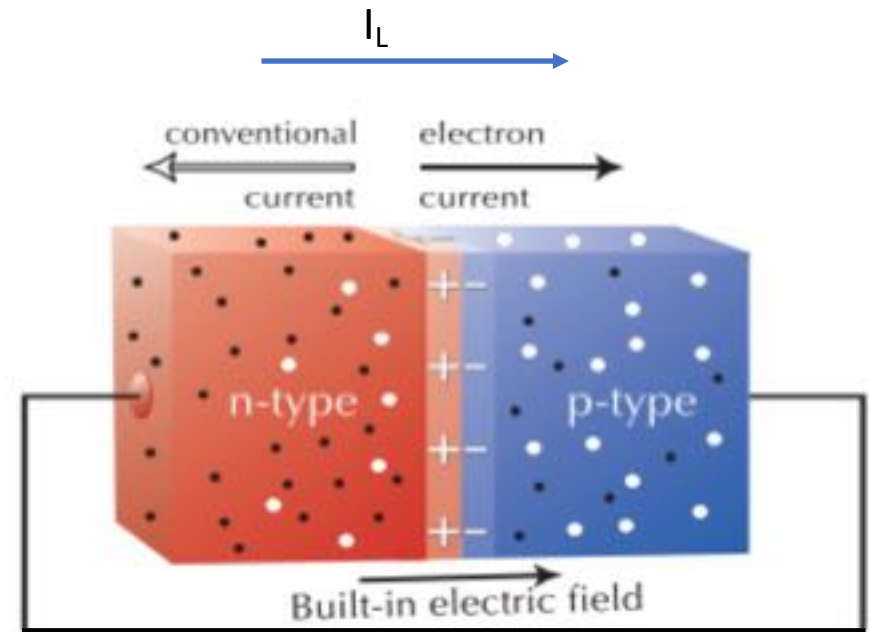
Όταν το φως πέσει στην επαφή
(στην περιοχή n) προκαλεί αντίθετο ρεύμα I_L από περιοχή n σε περιοχή p.



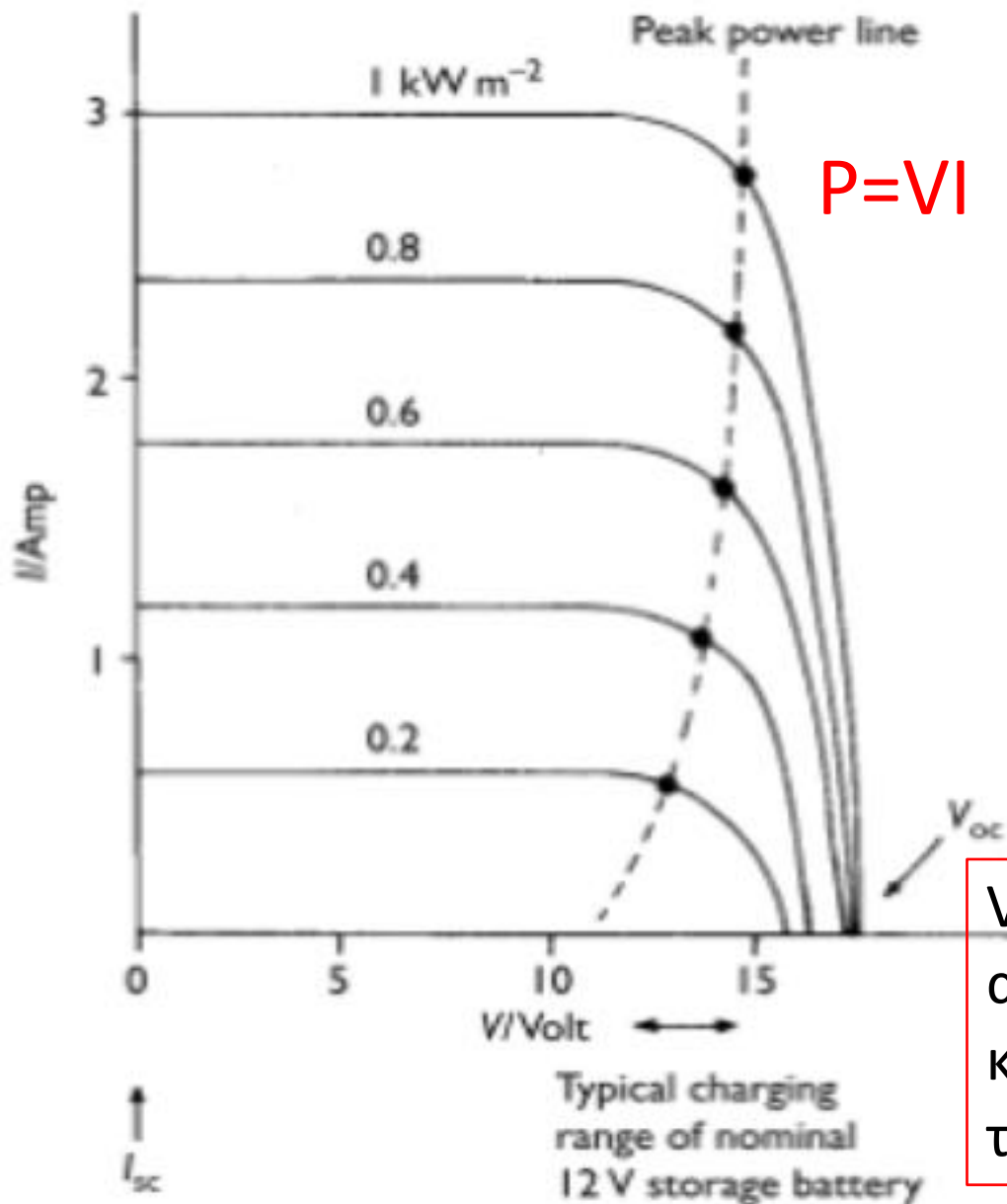
Χαρακτηριστική καμπύλη ΦΒ



Σχήμα 4.15α Σύγκριση θεωρητικής χαρακτηριστικής καμπύλης $I=I(V)$ με πειραματικά δεδομένα. Το σημείο M αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ.



Χαρακτηριστική καμπύλη I-V



$$P=VI$$

- Χαρακτηριστική καμπύλη 36 κυττάρων Si για φόρτιση μπαταρίας 12 V.
- Η γραμμή μέγιστης ισχύος ταιριάζει με την περιοχή φόρτισης της μπαταρίας
- Η μέγιστη ισχύς μεταφέρεται στο εξωτερικό φορτίο R_L όταν αυτό είναι ίσο με την εσωτερική αντίσταση της πηγής R_{int}

V_{OC} Τάση ανοικτού κυκλώματος

Εξάρτηση από την θερμοκρασία

$$V_{oc}(\theta) = V_{oc}(\theta_1) [1 - A(\theta - \theta_1)]$$

$$I_{sc}(\theta) = I_{sc}(\theta_1) [1 + B(\theta - \theta_1)]$$

$$A = 3.7 \times 10^{-3} \text{ (C}^{-1}\text{)}$$

$$B = 6.4 \times 10^{-4} \text{ (C}^{-1}\text{)}$$

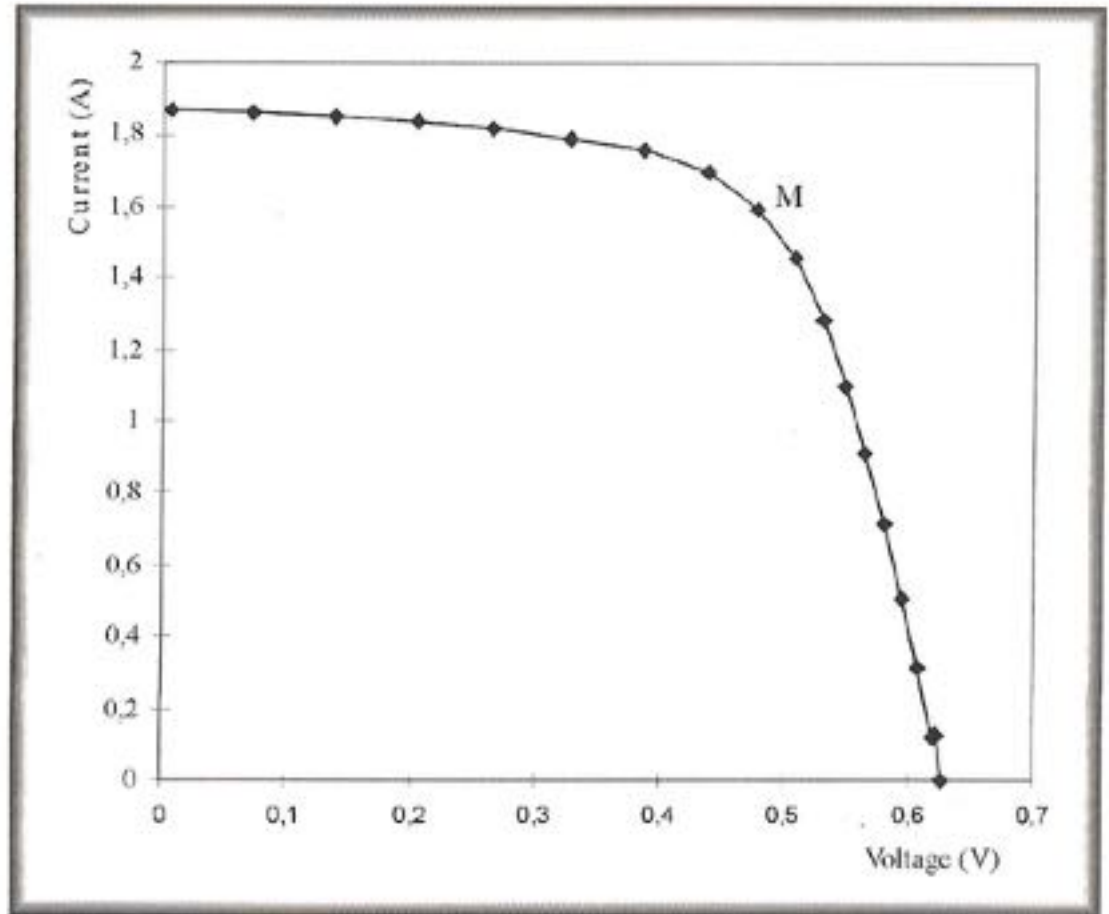
I_{SC} Ρεύμα βραχυκυκλώματος

•Χαρακτηριστική καμπύλη $I=I(V)$

I_{ph} αυξάνεται γραμμικά με την ένταση της ακτινοβολίας

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

V_{oc} αυξάνεται λογαριθμικά



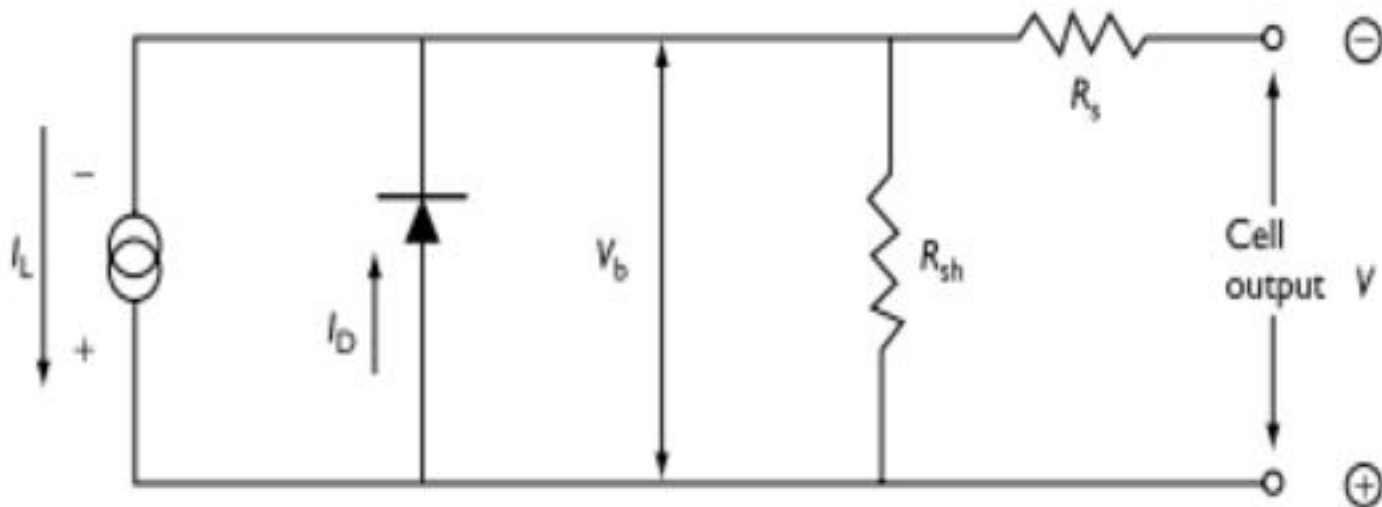
Σχήμα 4.15α Σύγκριση θεωρητικής χαρακτηριστικής καμπύλης $I=I(V)$ με πειραματικά δεδομένα. Το σημείο M αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ.

Ιδιότητες κυκλώματος ΦΒ

R_s : Αντίσταση σε σειρά (series). Κυρίως να φθάσουν οι φορείς από τον ημιαγωγό στα ηλεκτρόδια (απώλεια περίπου 0.3%)

R_{sh} : Αντίσταση παράλληλα (Shunt). Από ατέλειες στην κατασκευή. Πρέπει να είναι άπειρη για να μην έχουμε απώλειες.

$$I = I_L - I_D - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$



Πάχος φωτοδιόδου

- Η μετατροπή φωτονίων σε ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων πρέπει να γίνει στην ζώνη απεμπλουτισμού.
- Τα φωτόνια απορροφώνται από το υλικό μέχρι να φθάσουν στην ΖΑ.

Αριθμός φωτονίων που περνάει το υλικό

$$N = N_0 e^{-ax}$$

a : Συντελεστής απορρόφησης

Για το πυρίτιο και $\lambda=0.8 \mu\text{m}$,
 $a=1000 \text{ cm}^{-1}$ 50% φωτονίων
περνάει $x=0.7 \mu\text{m}$

Με πάχος $300 \mu\text{m}$ απορροφάται το
σύνολο σχεδόν των φωτονίων

**Η επαφή pn βρίσκεται σε βάθος $1 \mu\text{m}$
επειδή :**

Στο $\lambda_{\text{max}}=0.55 \mu\text{m} \rightarrow a=7000 \text{ cm}^{-1}$

**Και μετά από $1 \mu\text{m}$ απορροφάται το
50% των φωτονίων.**

Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ΦΒ επαφής pn

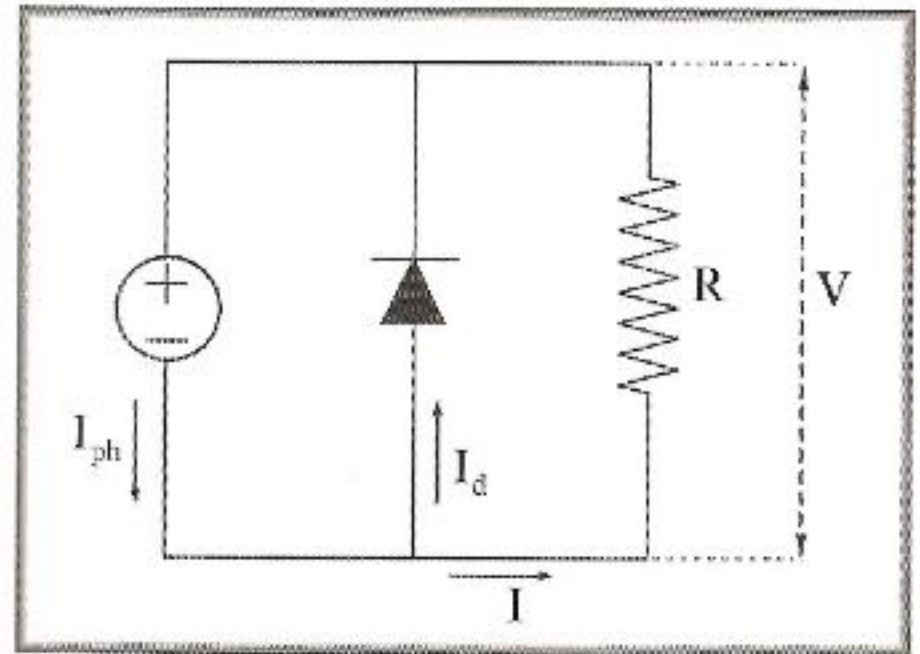
$$I_{ph} = q\xi N_{ph}$$

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$I_d = I_d(V) = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

Av $I=0$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right)$$

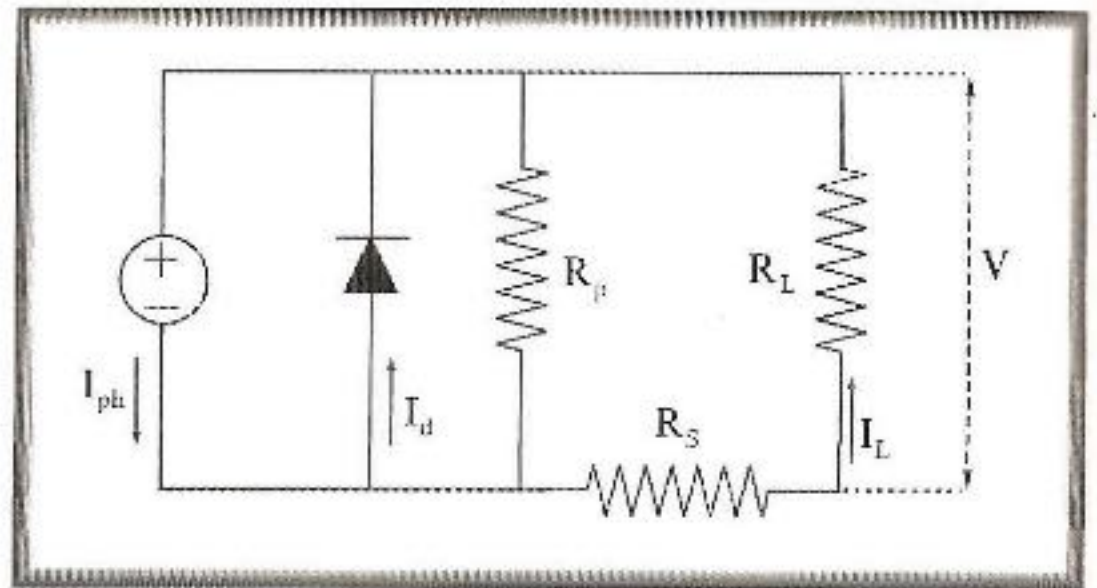


Σχήμα 4.12 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Ισοδύναμο κύκλωμα με εσωτερική αντίσταση

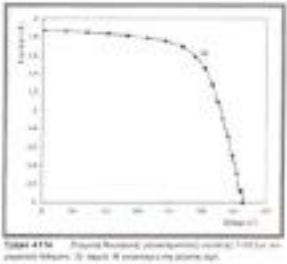
$$V_L = V - I_L R_S$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_L + R_L I_L)}{kT} \right) - 1 \right]$$



Σχήμα 4.15b Ισοδύναμο κύκλωμα μη ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου με ισοδύναμη αντίσταση σε σειρά καθώς και παράλληλη.

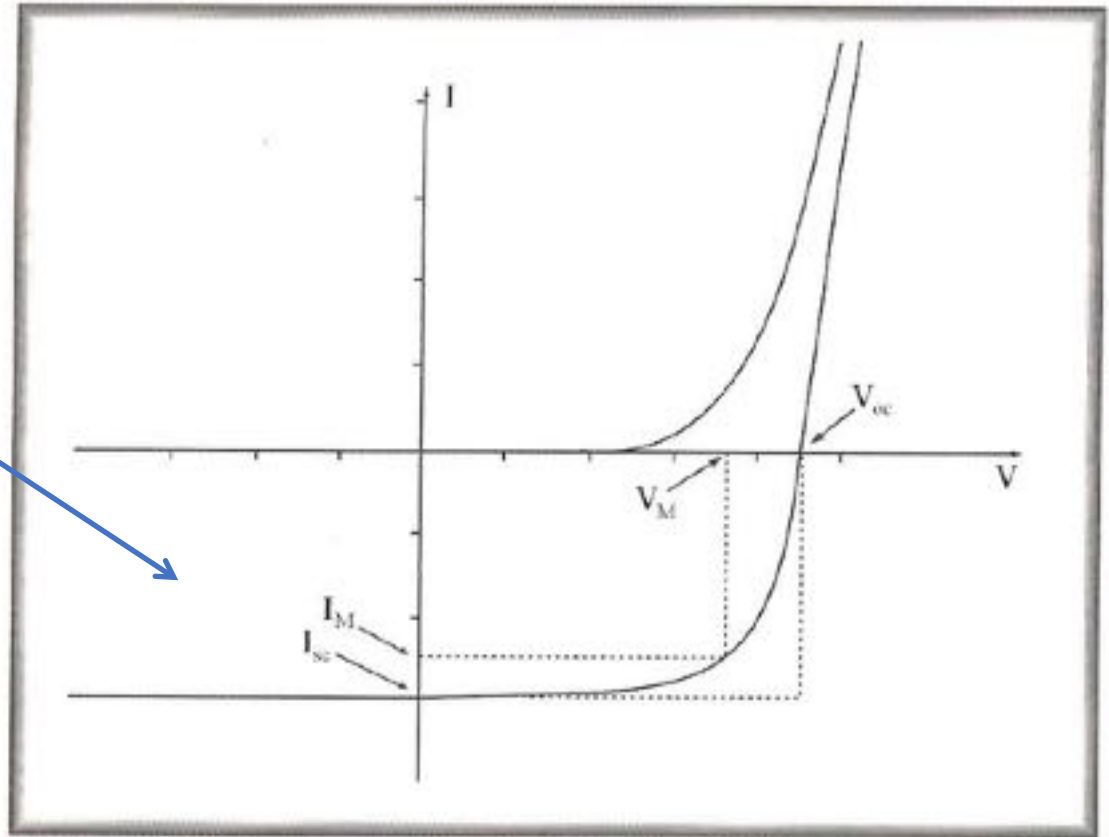
•Χαρακτηριστική καμπύλη



I_M, V_M σημείο μέγιστης ισχύος

V_{oc} : Τάση ανοικτού κυκλώματος

I_{sc} : Ρεύμα βραχυκύκλωσης



Σχήμα 4.15c Η χαρακτηριστική καμπύλη $I-V$ ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου στο σκοτάδι και στο φως. Πρέπει να τονίσουμε ότι αυτός είναι ένας άλλος τρόπος γραφικής παράστασης της καμπύλης $I-V$, ο οποίος δεν περιορίζεται μόνο στο ένα τεταρτημόριο. Διακρίνονται τα δύο ορθογώνια που ο λόγος των εμβαδών τους καθορίζει την τιμή του συντελεστή πλήρωσης.