



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ Ι

4ο Εξάμηνο

2020-2021

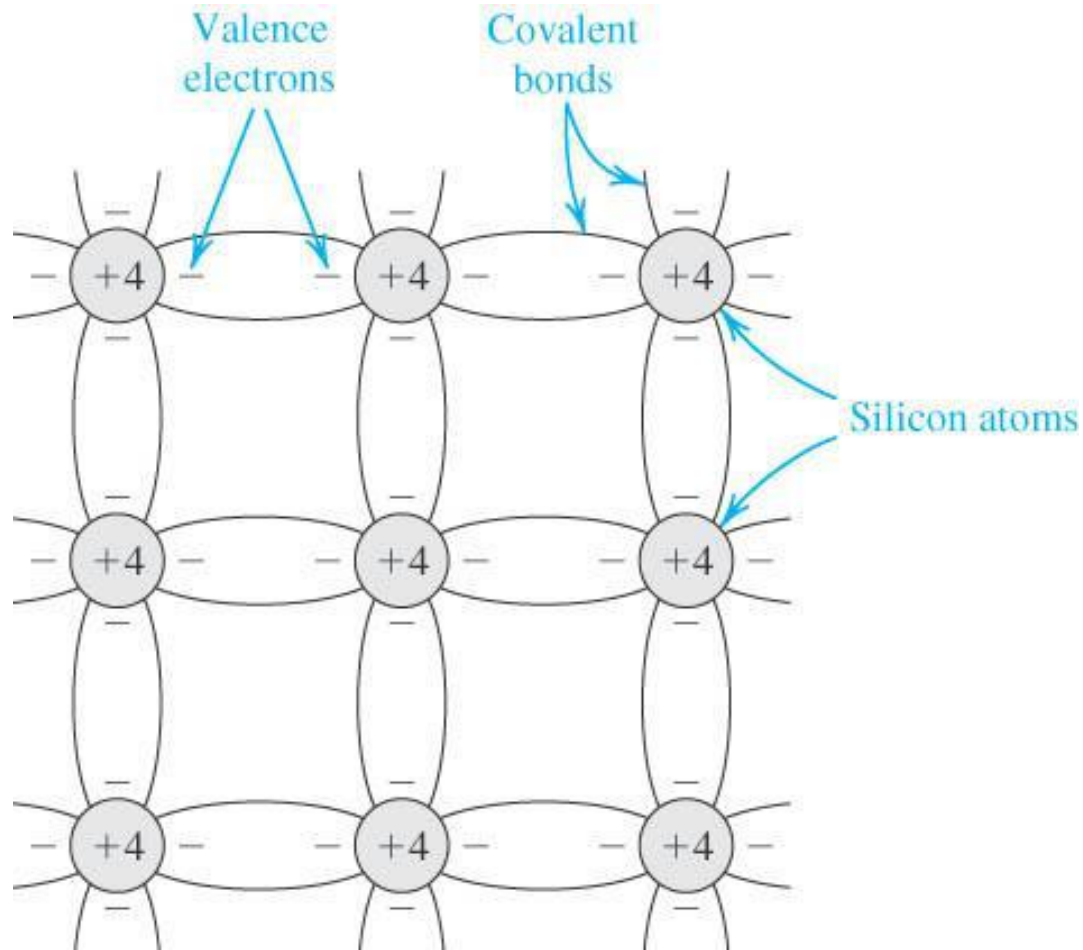
Μάθημα 03-3-2021 και 04-3-2021

Νικόλαος Βουδούκης

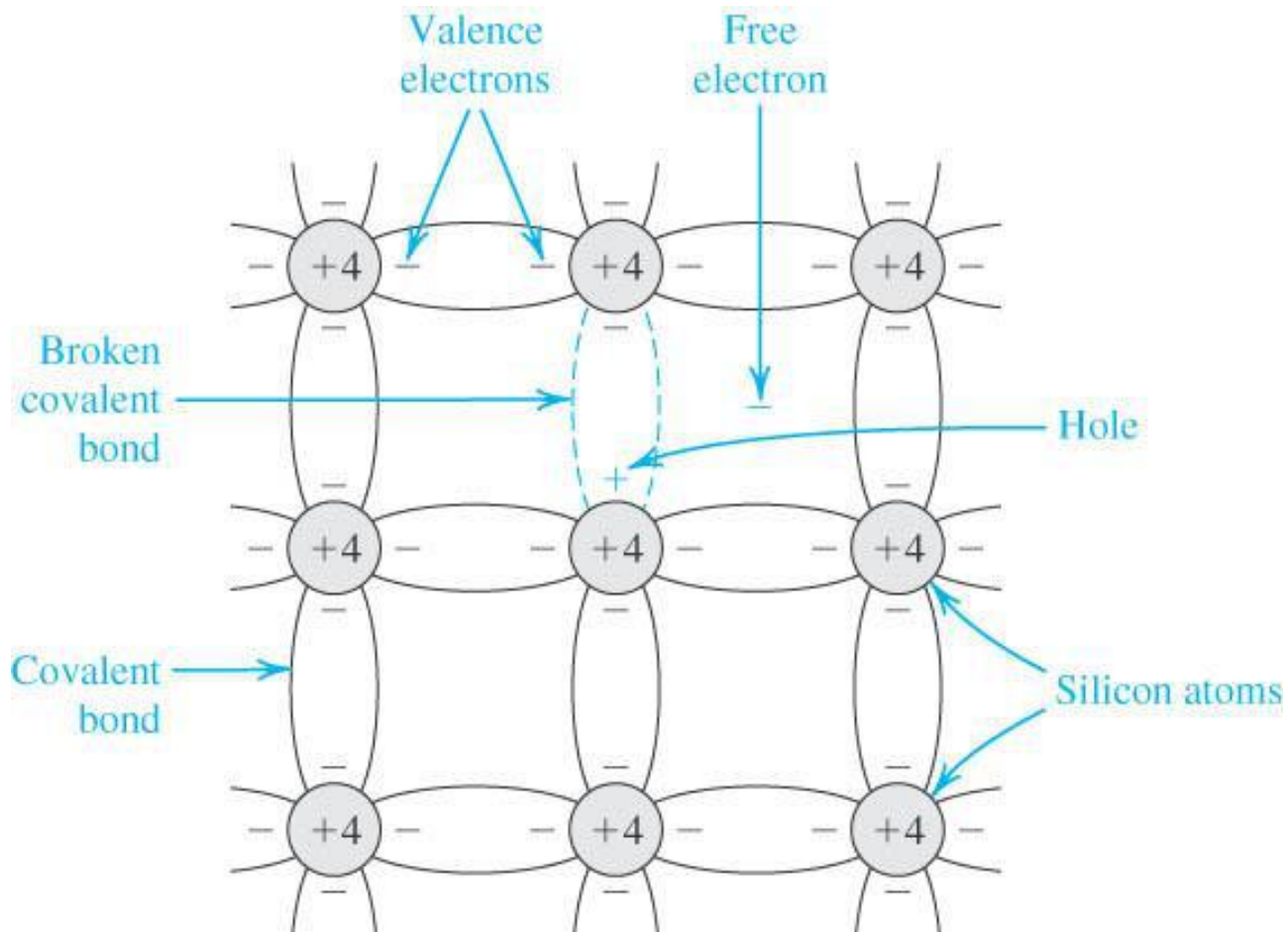
Συνοπτική παρουσίαση των ημιαγωγών με σχήματα

III	IV	V
	ΑΝΘΡΑΚΑΣ C	
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ Al	ΠΥΡΙΤΙΟ Si	ΦΩΣΦΟΡΟΣ P
ΓΑΛΛΙΟ Ga	ΓΕΡΜΑΝΙΟ Ge	ΑΡΣΕΝΙΚΟ As
ΙΝΔΙΟ In		ΑΝΤΙΜΟΝΙΟ Sb

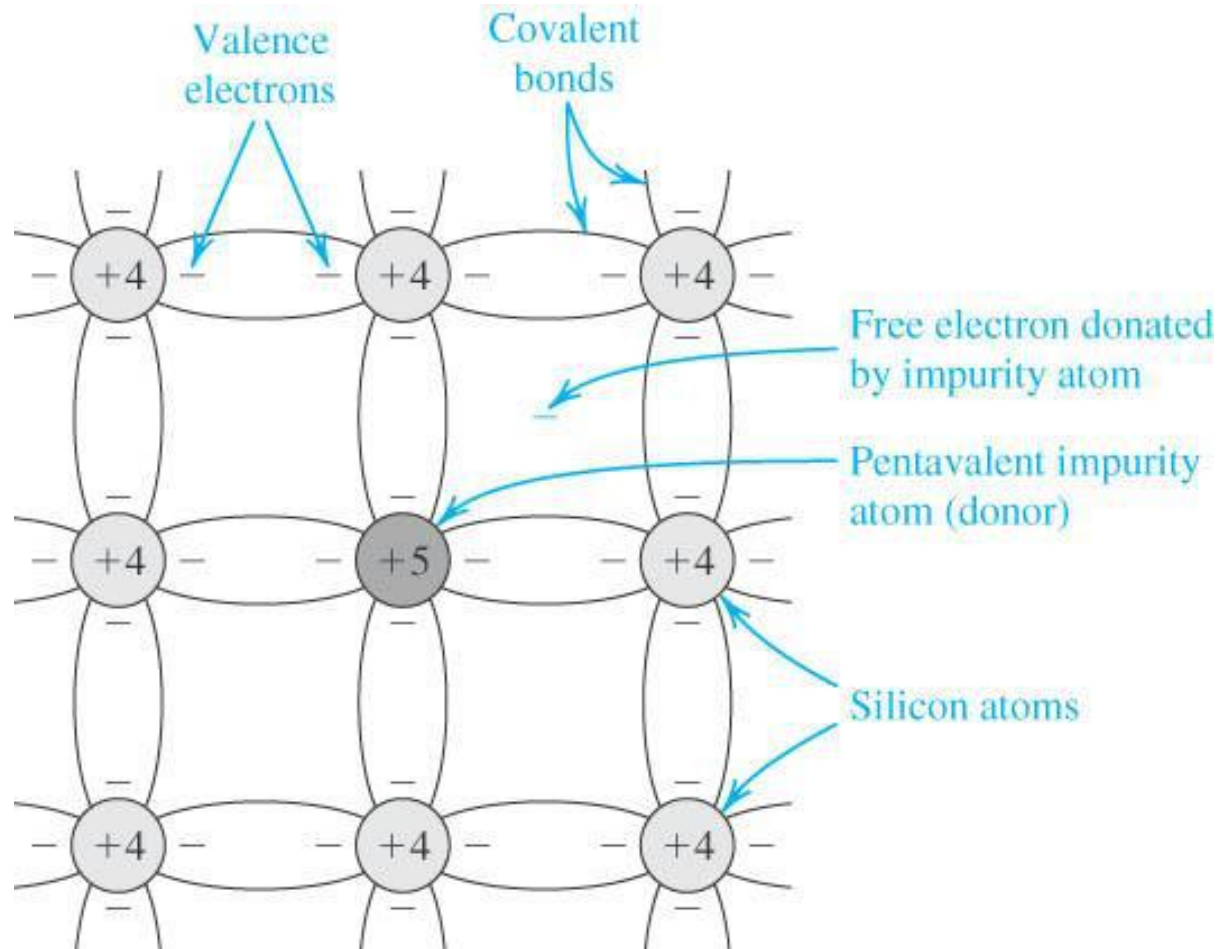
Το μέρος του περιοδικού πίνακα, που περιέχει το βασικό στοιχείο της έμβιας ύλης (Ανθρακας) και τους βασικούς ημιαγωγούς (Si, GaAs, Ge, InSb).



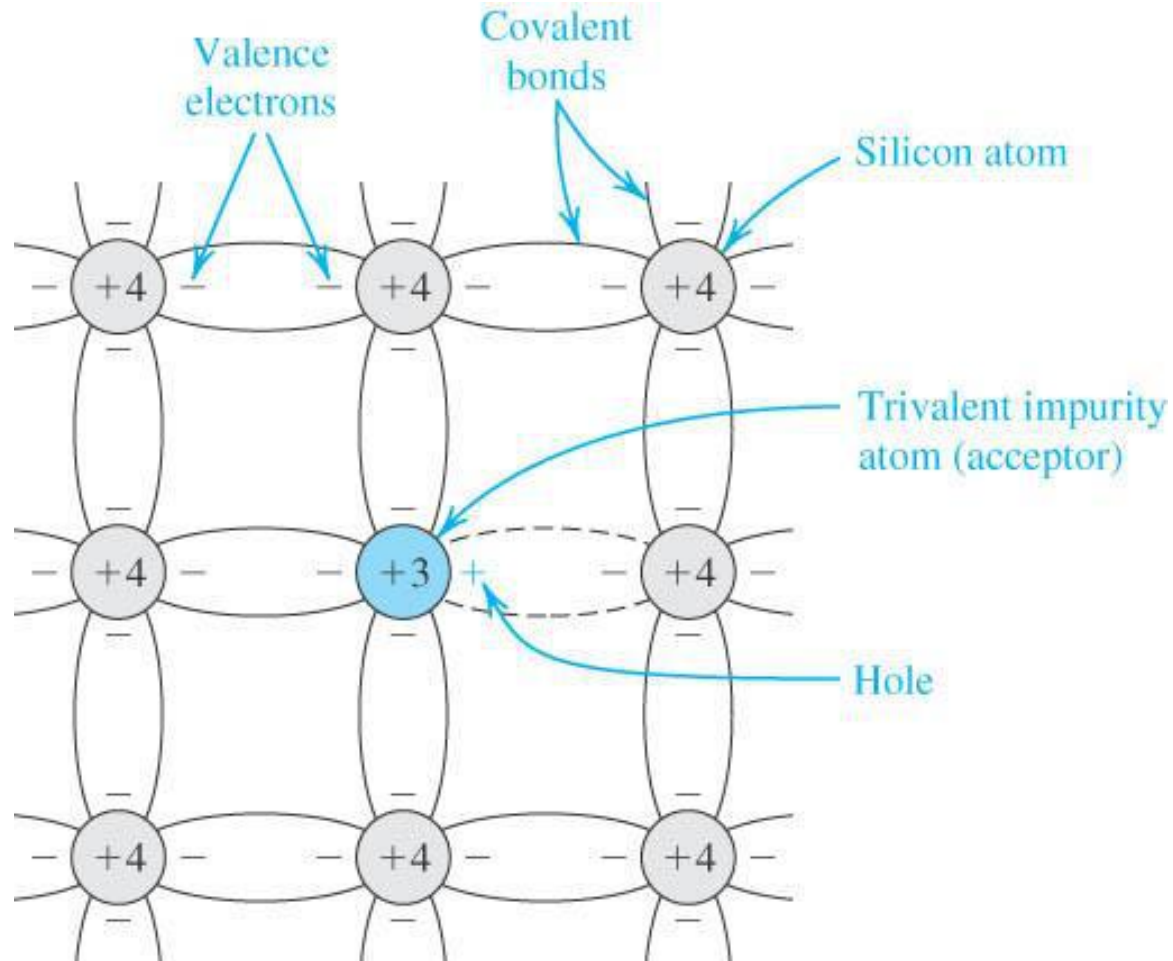
Two-dimensional representation of the silicon crystal. The circles represent the inner core of silicon atoms, with +4 indicating its positive charge of $+4q$, which is neutralized by the charge of the four valence electrons. Observe how the covalent bonds are formed by sharing of the valence electrons. At 0 K, all bonds are intact and no free electrons are available for current conduction.



At room temperature, some of the covalent bonds are broken by thermal ionization. Each broken bond gives rise to a free electron and a hole, both of which become available for current conduction.

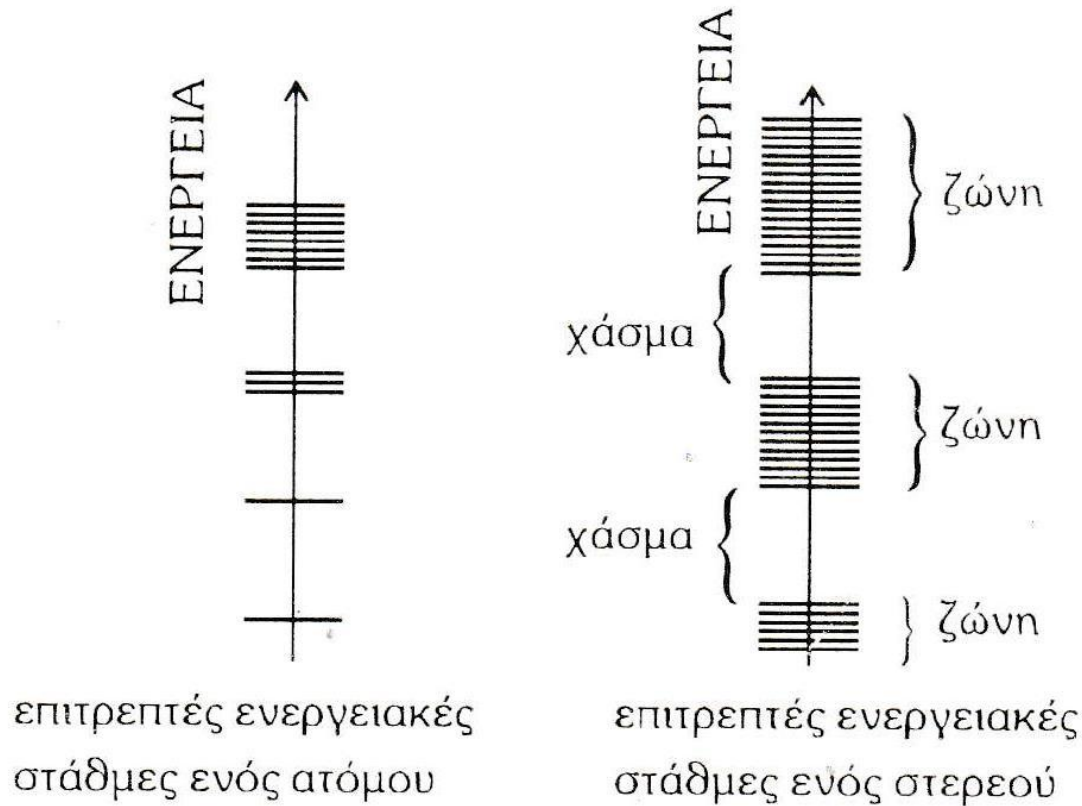


A silicon crystal doped by a pentavalent element. Each dopant atom donates a free electron and is thus called a donor. The doped semiconductor becomes n type.



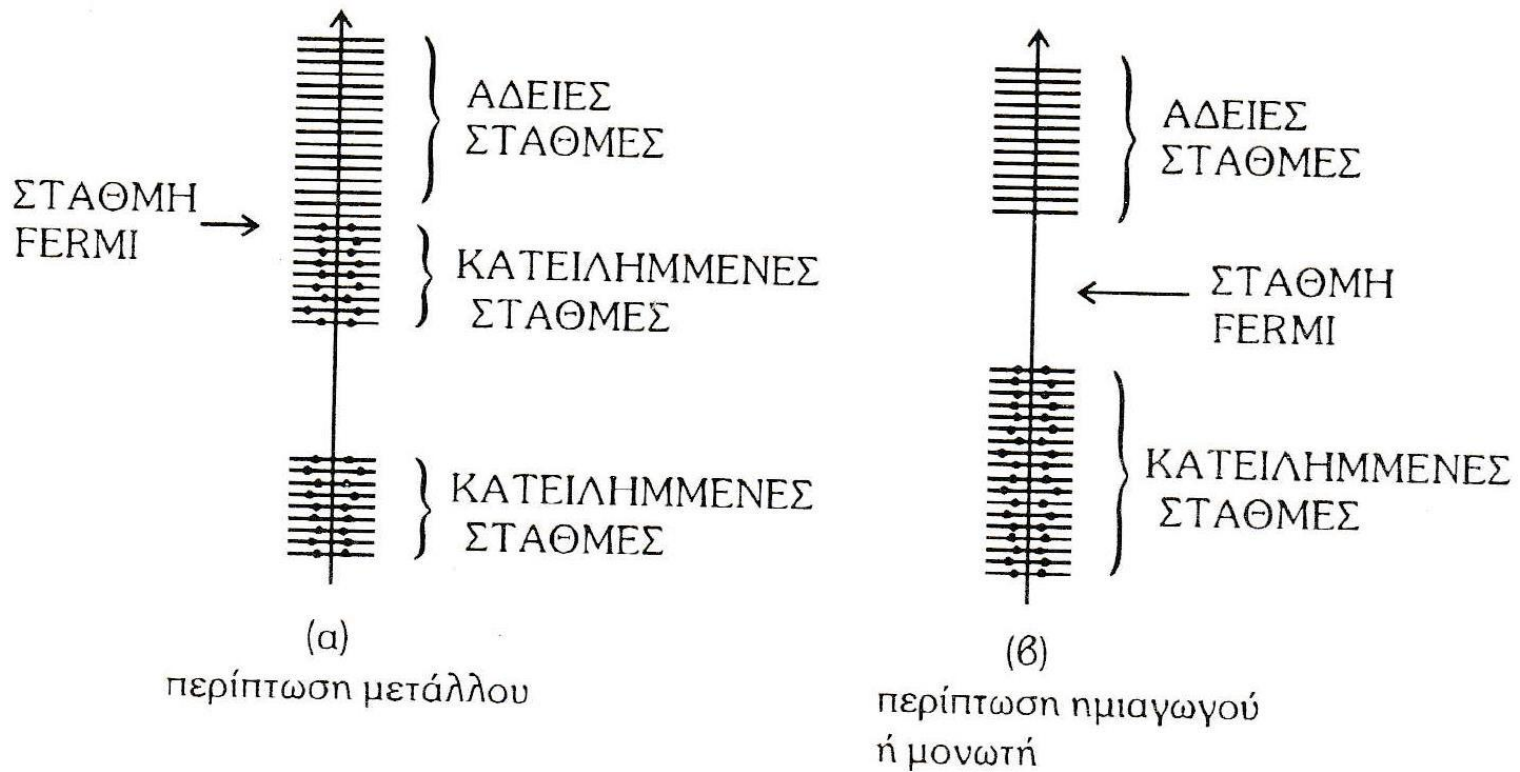
A silicon crystal doped with a trivalent impurity. Each dopant atom gives rise to a hole, and the semiconductor becomes *p* type.

Συνοπτική παρουσίαση των ημιαγωγών με σχήματα



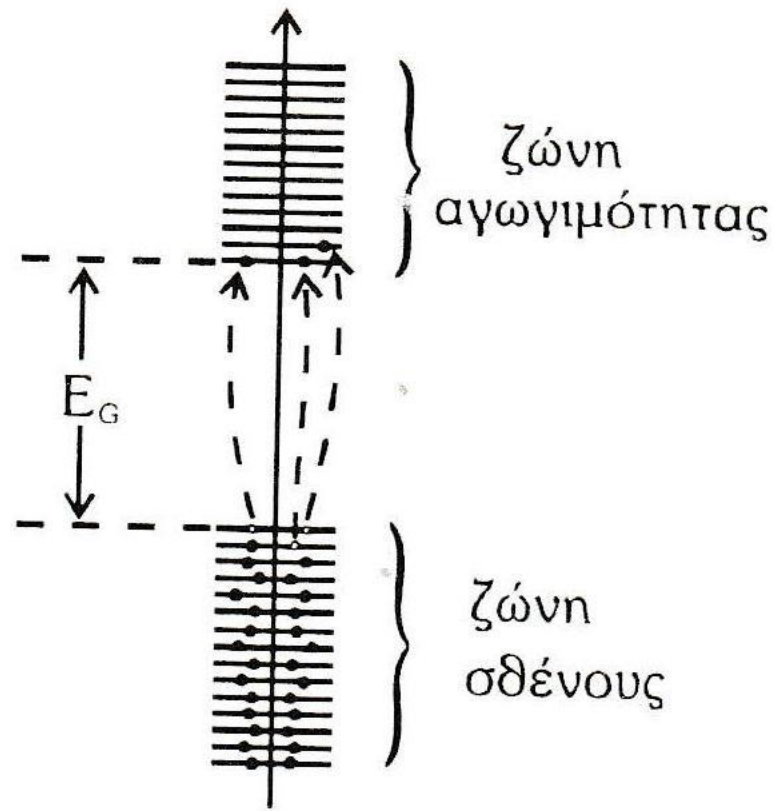
Επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες ενός ατόμου και ενός στερεού (σχηματικά). Στο στερεό οι στάθμες ομαδοποιούνται σε ενεργειακές ζώνες αφήνοντας μεταξύ τους διάκενα απαγορευμένων περιοχών, που ονομάζονται χάσματα.

Συνοπτική παρουσίαση των ημιαγωγών με σχήματα

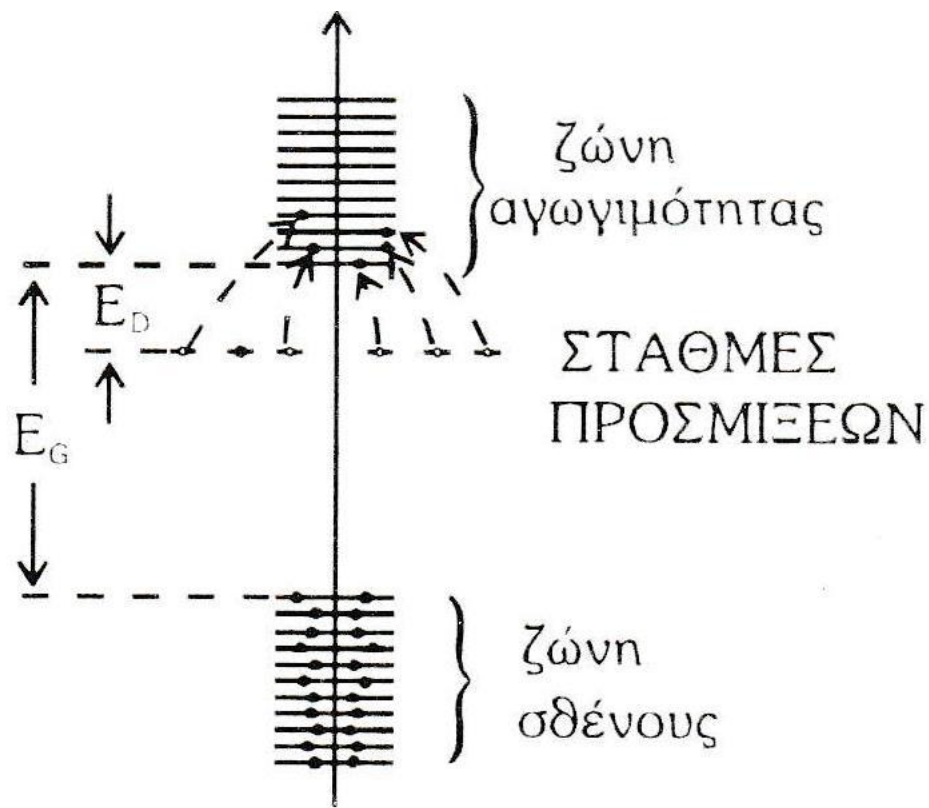


Σε ένα μέταλλο (α) η ανώτερη κατειλημμένη στάθμη είναι στο εσωτερικό μιας ζώνης, η οποία κατά συνέπεια είναι μισογεμάτη. Σε ένα ημιαγωγό (ή μονωτή) η ανώτερη κατειλημμένη στάθμη συμπίπτει με το άνω πέρας μιας ζώνης κι έτσι δεν υπάρχουν μισογεμάτες ζώνες.

Συνοπτική παρουσίαση των ημιαγωγών με σχήματα

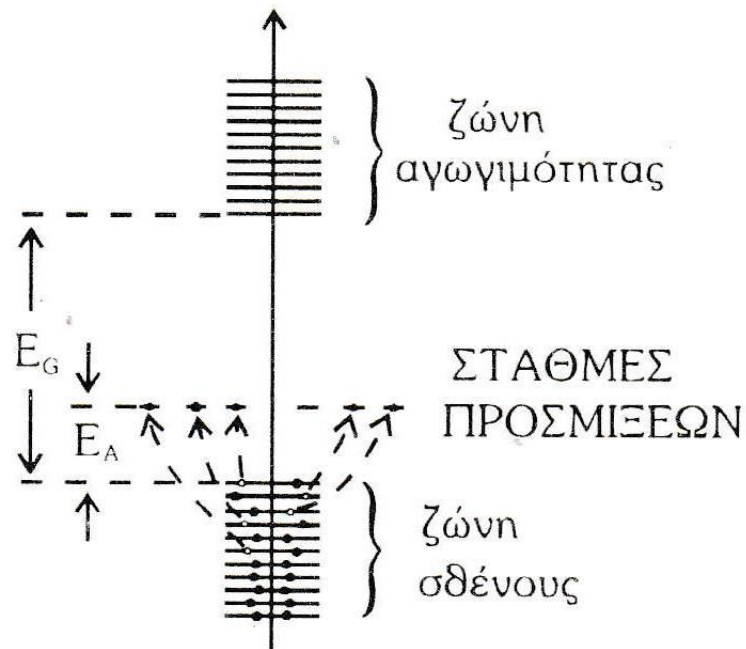


Θερμική διέγερση ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας ενός καθαρού (ή όπως λέγεται ενδογενούς) ημιαγωγού.



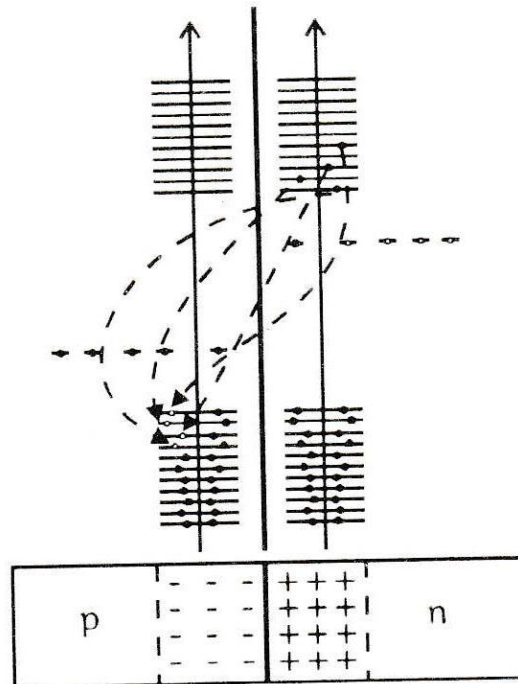
: Ενεργειακές στάθμες ημιαγωγού με προσμίξεις ατόμων σθένους κατά ένα ανωτέρου από το σθένος του κύριου υλικού. Η στάθμη Fermi έχει μετατοπισθεί από τη μέση περίπου του χάσματος σε θέση πολύ κοντά στο άνω πέρασ του και συμπίπτει με τις στάθμες των προσμίξεων. Οι κύριοι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι τα διεγερμένα στη ζώνη αγωγιμότητας ηλεκτρόνια, ενώ οι οπές στη ζώνη σθένους είναι σχεδόν αμελητέες. Γι' αυτό το λόγο οι ημιαγωγοί αυτοί λέγονται ημιαγωγοί τύπου η.

Συνοπτική παρουσίαση των ημιαγωγών με σχήματα



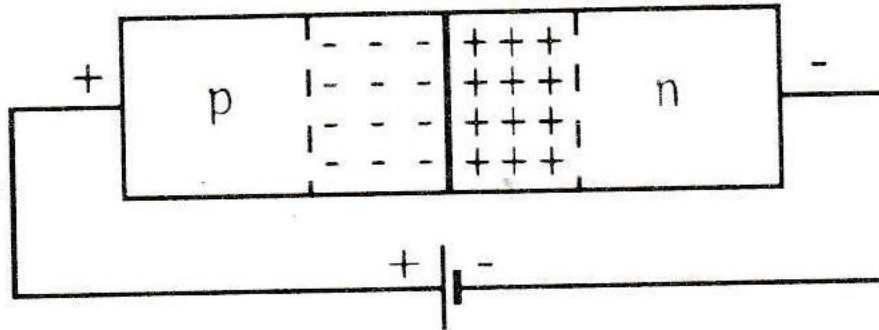
Ενεργειακές στάθμες ημιαγωγού με προσμίξεις σθένους κατά ένα κατώτερου από το σθένος του κύριου υλικού. Οι κύριοι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι οι οπές στη ζώνη σθένους, οι οποίες έχουν δημιουργηθεί λόγω θερμικής διεγέρσεως των ηλεκτρονίων από τη ζώνη σθένους στις στάθμες προσμίξεων. Ο αριθμός ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας είναι σχεδόν μηδέν. Επομένως οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι οι θετικά (positive) φορτισμένες οπές και γι' αυτό οι ημιαγωγοί αυτοί λέγονται ημιαγωγοί τύπου p.

Συνοπτική παρουσίαση των ημιαγωγών με σχήματα

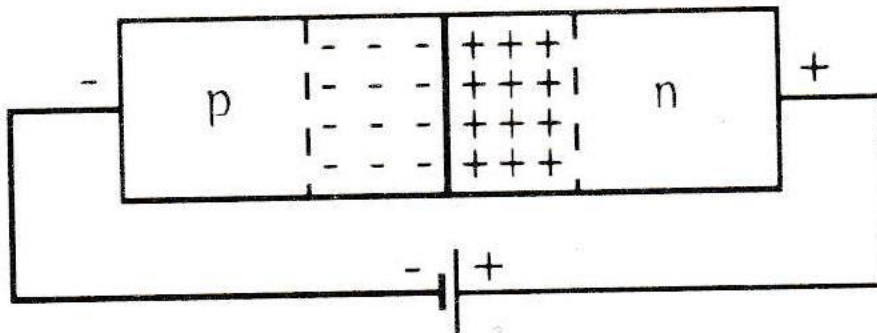


Επαφή ενός ημιαγωγού τύπου p με έναν ημιαγωγό τύπου n . Λόγω της διαφοράς ενεργειακών σταθμών, ηλεκτρόνια από τη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού τύπου n , θα μεταφερθούν μέσω της επαφής στις οπές της ζώνης σθένους του ημιαγωγού τύπου p . Κατά συνέπεια εκατέρωθεν της επαφής θα δημιουργηθούν δύο περιοχές, η μια αριστερά, αρνητικά φορτισμένη και η άλλη δεξιά, θετικά φορτισμένη. Τα χωρικά αυτά φορτία θα δημιουργήσουν μια διαφορά δυναμικού η οποία τελικά θα εξισορροπήσει τη ροή φορτίων δια μέσου της επιφάνειας. Στις δύο φορτισμένες περιοχές ο αριθμός των φορέων (των οπών αριστερά και των ηλεκτρονίων στα δεξιά) είναι σημαντικά μειωμένος.

Συνοπτική παρουσίαση των ημιαγωγών με σχήματα

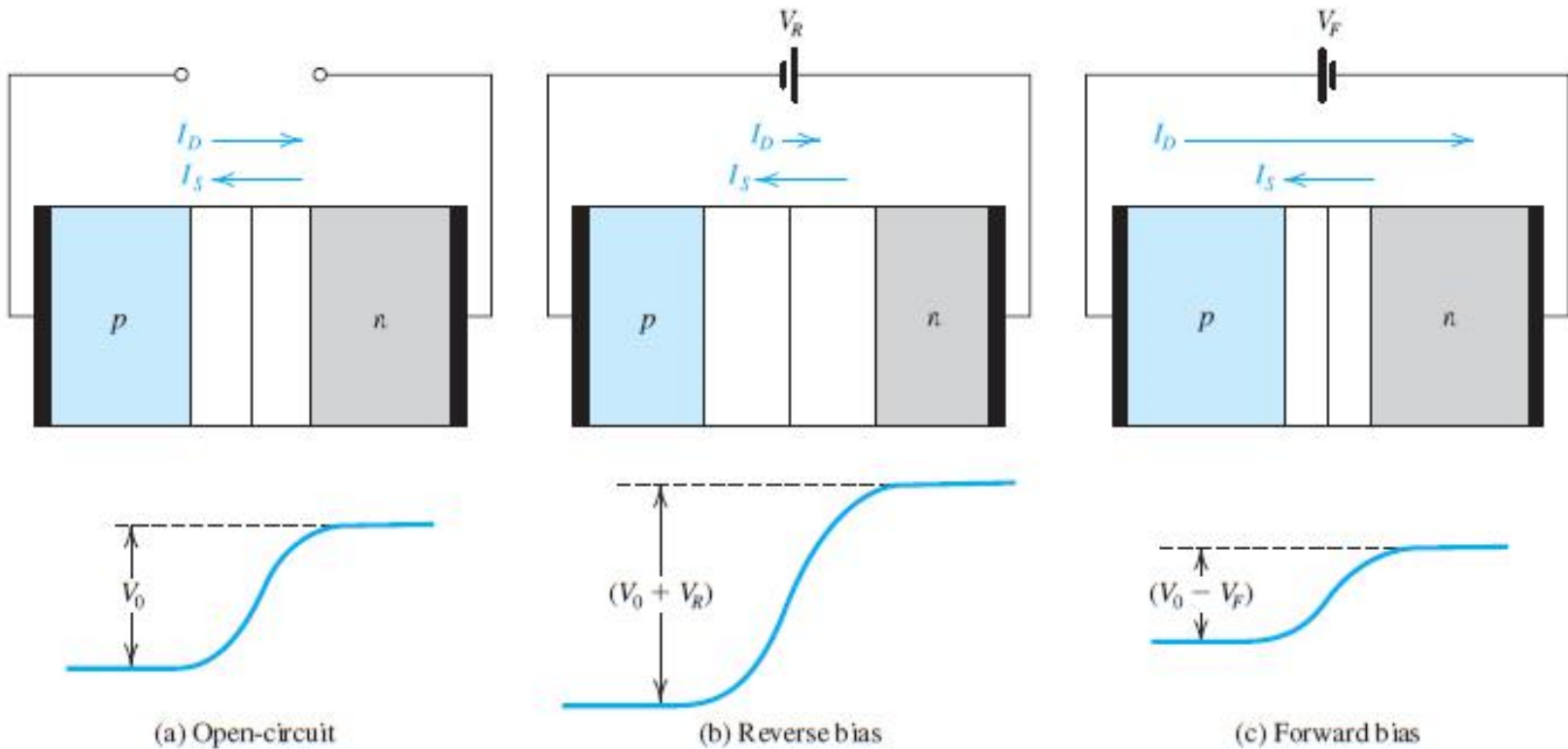


Επιβολή εξωτερικής τάσεως ορθής πολικότητας σε μια επαφή p-n.

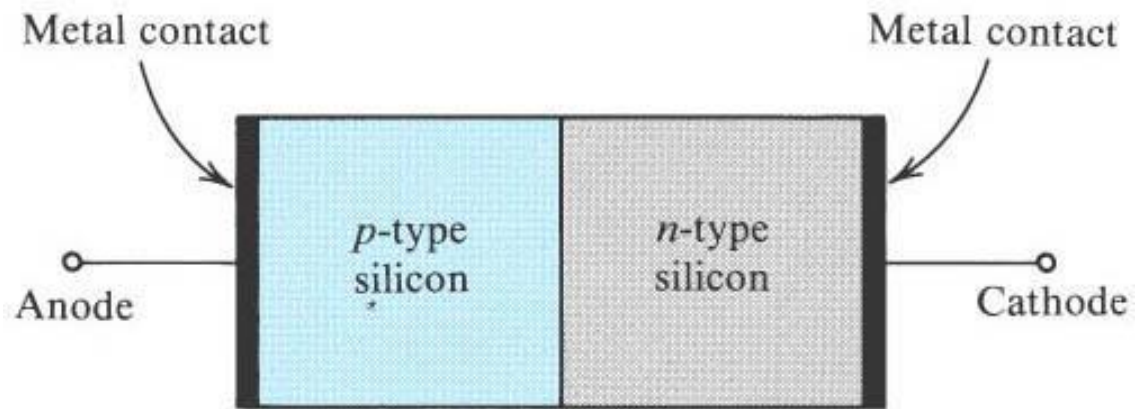


Επιβολή εξωτερικής τάσεως ανάστροφης πολικότητας σε μια επαφή p-n.

Επαφή pn

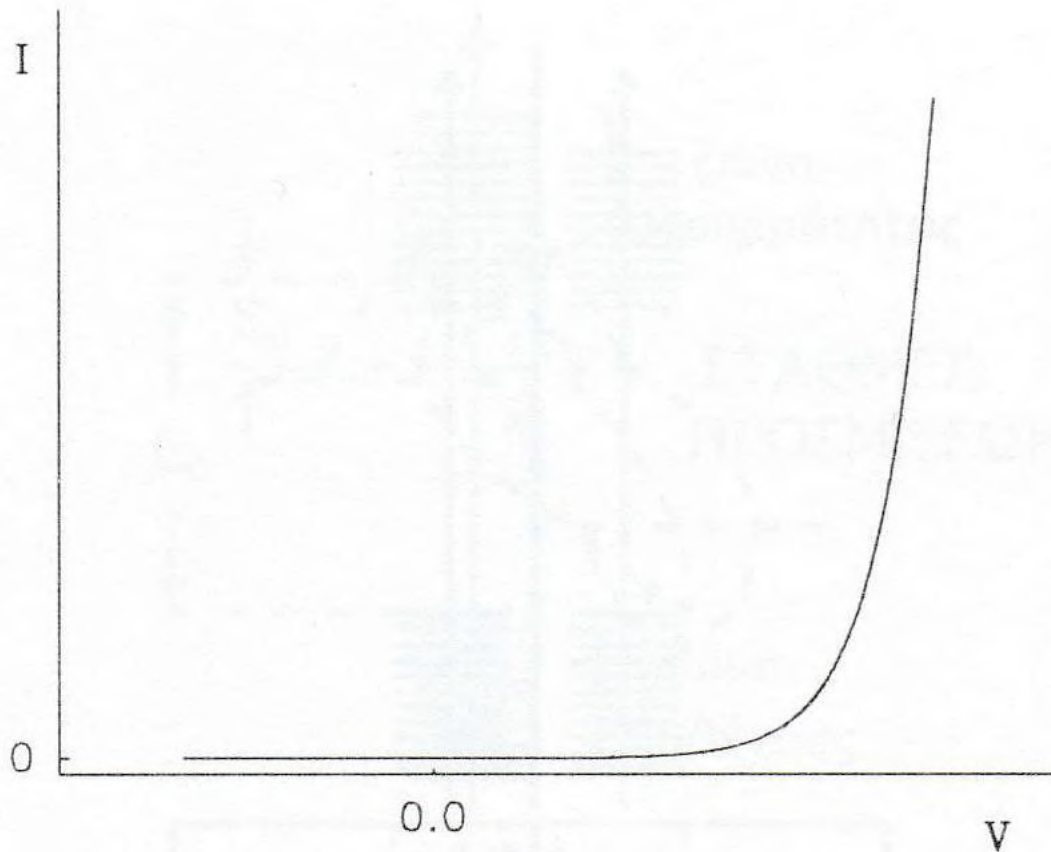


The pn junction in: (a) equilibrium; (b) reverse bias; (c) forward bias.



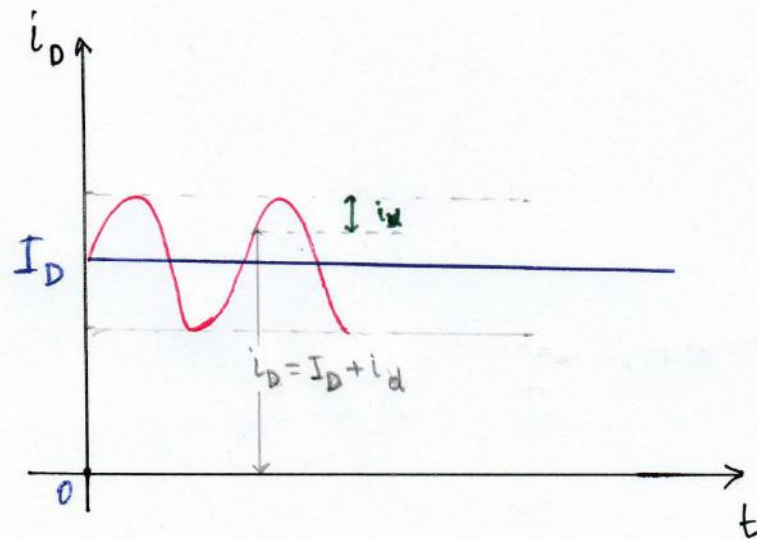
Simplified physical structure of the junction diode.

Συνοπτική παρουσίαση των ημιαγωγών με σχήματα



Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος I - τάσεως V , για μια διάταξη p - n . Θετική τιμή της τάσεως σημαίνει ότι ο θετικός πόλος είναι συνδεδεμένος με τον ημιαγωγό p και ο αρνητικός με τον n .

Συμβολισμός



i_D : ολική τιμή

I_D : dc τιμή

i_d : στιγμιαία τιμή ac συνιστώσας

i_D

I_D

i_d

I_d : πλάτος ημιτόνου

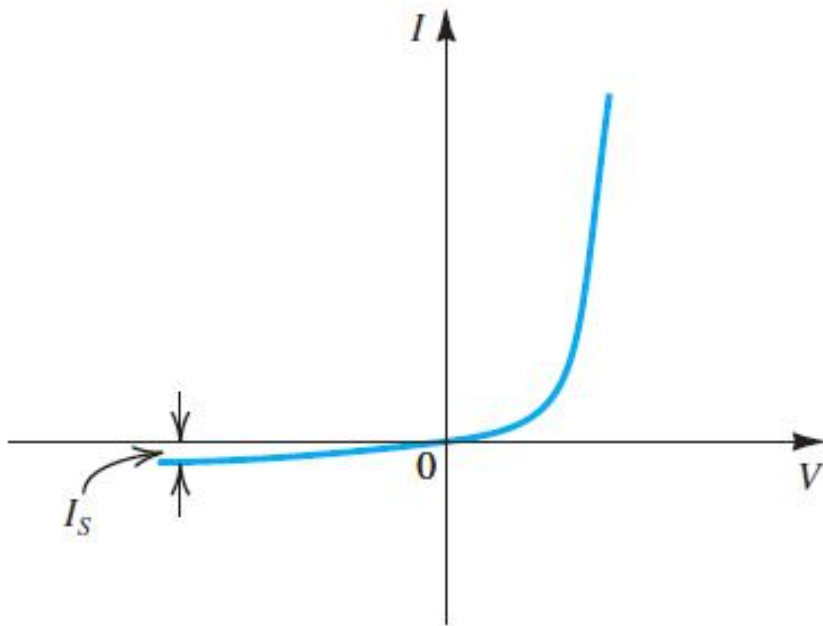
$$i_d = I_d \cdot \sin \omega t$$

έχει αντισταθεί από I_0

$$i_d = I_0 \sin \omega t$$

I_d

Χαρακτηριστική I-V διόδου



$$I = I_S(e^{V/V_T} - 1)$$

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

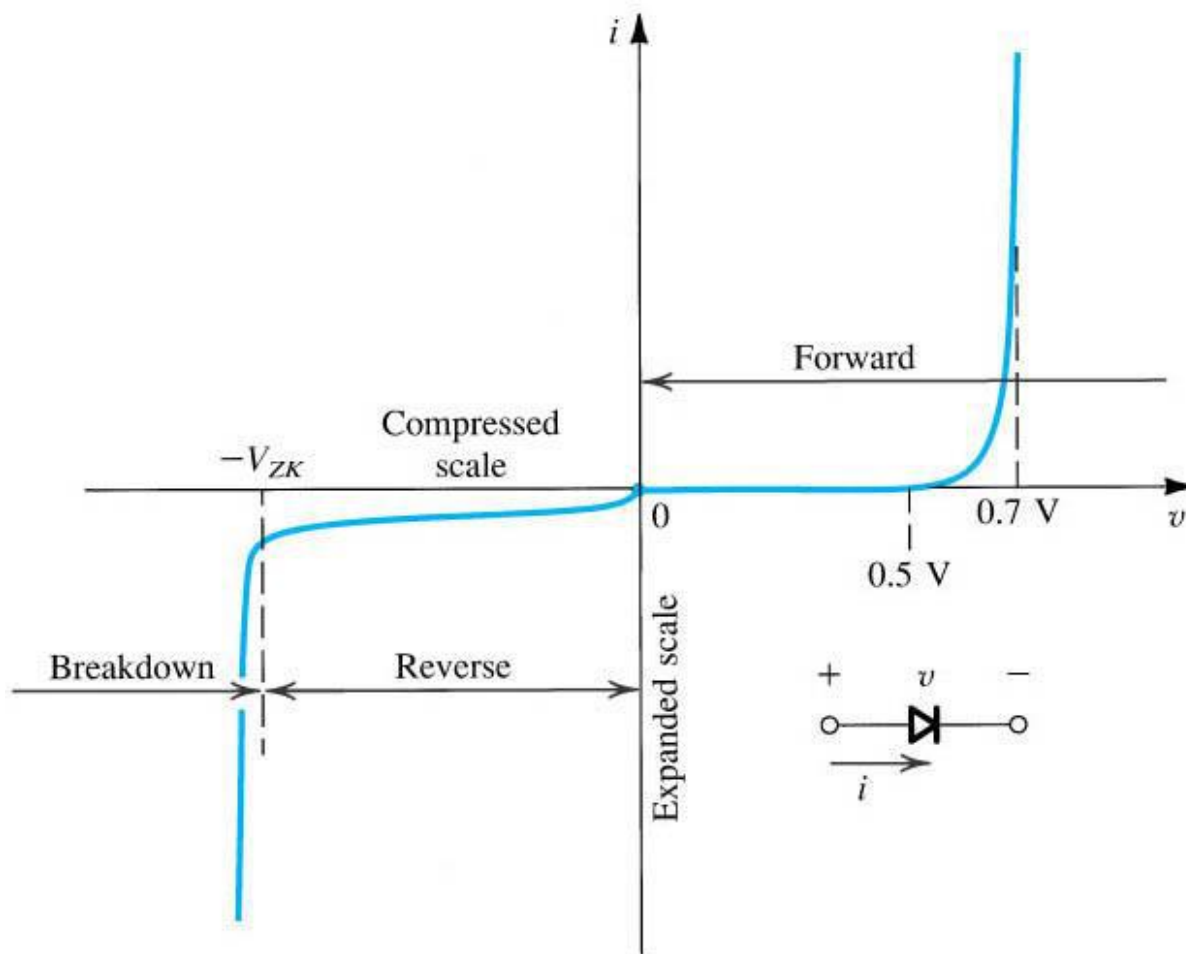
where

k = Boltzmann's constant = 8.62×10^{-5} eV/K = 1.38×10^{-23} joules/kelvin

T = the absolute temperature in kelvins = $273 + \text{temperature in } ^\circ\text{C}$

q = the magnitude of electronic charge = 1.60×10^{-19} coulomb

Χαρακτηριστική I-V διόδου



Quantity	Relationship	Values of Constants and Parameters (for Intrinsic Si at $T = 300\text{ K}$)
Carrier concentration in intrinsic silicon (cm^{-3})	$n_i = BT^{3/2} e^{-E_g/2kT}$	$B = 7.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$ $E_g = 1.12 \text{ eV}$ $k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ $n_i = 1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$
Diffusion current density (A/cm^2)	$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$ $J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$	$q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ coulomb}$ $D_p = 12 \text{ cm}^2/\text{s}$ $D_n = 34 \text{ cm}^2/\text{s}$
Drift current density (A/cm^2)	$J_{\text{drift}} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$	$\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ $\mu_n = 1350 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)	$\rho = 1/[q(p\mu_p + n\mu_n)]$	μ_p and μ_n decrease with the increase in doping concentration
Relationship between mobility and diffusivity	$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$	$V_T = kT/q \simeq 25.9 \text{ mV}$
Carrier concentration in n -type silicon (cm^{-3})	$n_{n0} \simeq N_D$ $p_{n0} = n_i^2/N_D$	
Carrier concentration in p -type silicon (cm^{-3})	$p_{p0} \simeq N_A$ $n_{p0} = n_i^2/N_A$	
Junction built-in voltage (V)	$V_0 = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$	