

Φυσική και Τεχνολογία Υλικών και Διατάξεων Στερεάς Κατάστασης

Δρ Χρήστος Τσάμης

Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας

ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»

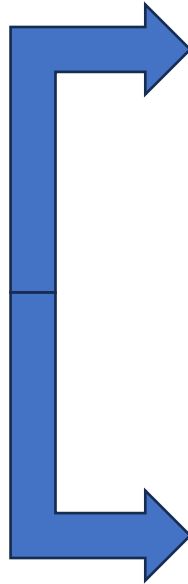
c.tsamis@inn.demokritos.gr

Πάτρα, 2025

Η Επαφή Μετάλλου-Ημιαγωγού

D. A. Neamen, *Semiconductor Physics and Devices*
McGraw-Hill, 4th Ed. (2012)
Ενότητες 9.1-9.2

Επαφή Μετάλλου-Ημιαγωγού (Ετεροεπαφή-Heterojunction)



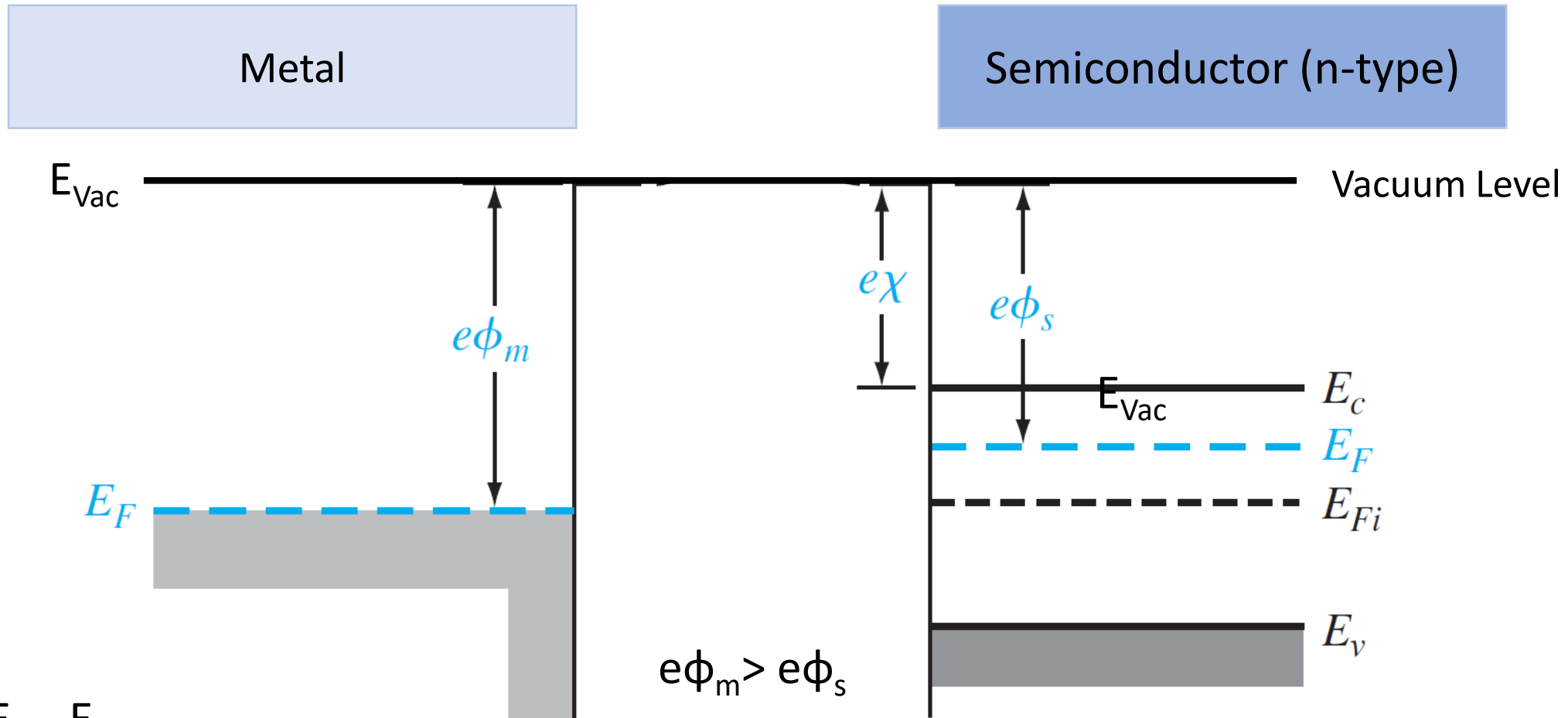
Επαφή Schottky (Schottky contact)

Μία επαφή στην οποία η χαρακτηριστική ρεύματος τάσης είναι μη-γραμμική με ανορθωτική συμπεριφορά (αντίστοιχη με την επαφή pn)

Ωμική επαφή (Ohmic contact)

Μία επαφή όπου η χαρακτηριστική ρεύματος τάσης είναι γραμμική και δεν εμφανίζει συμπεριφορά ανόρθωσης

Επαφή Schottky (Schottky contact)



$$e\phi_m = E_{vac} - E_F$$

ϕ_m : metal work function

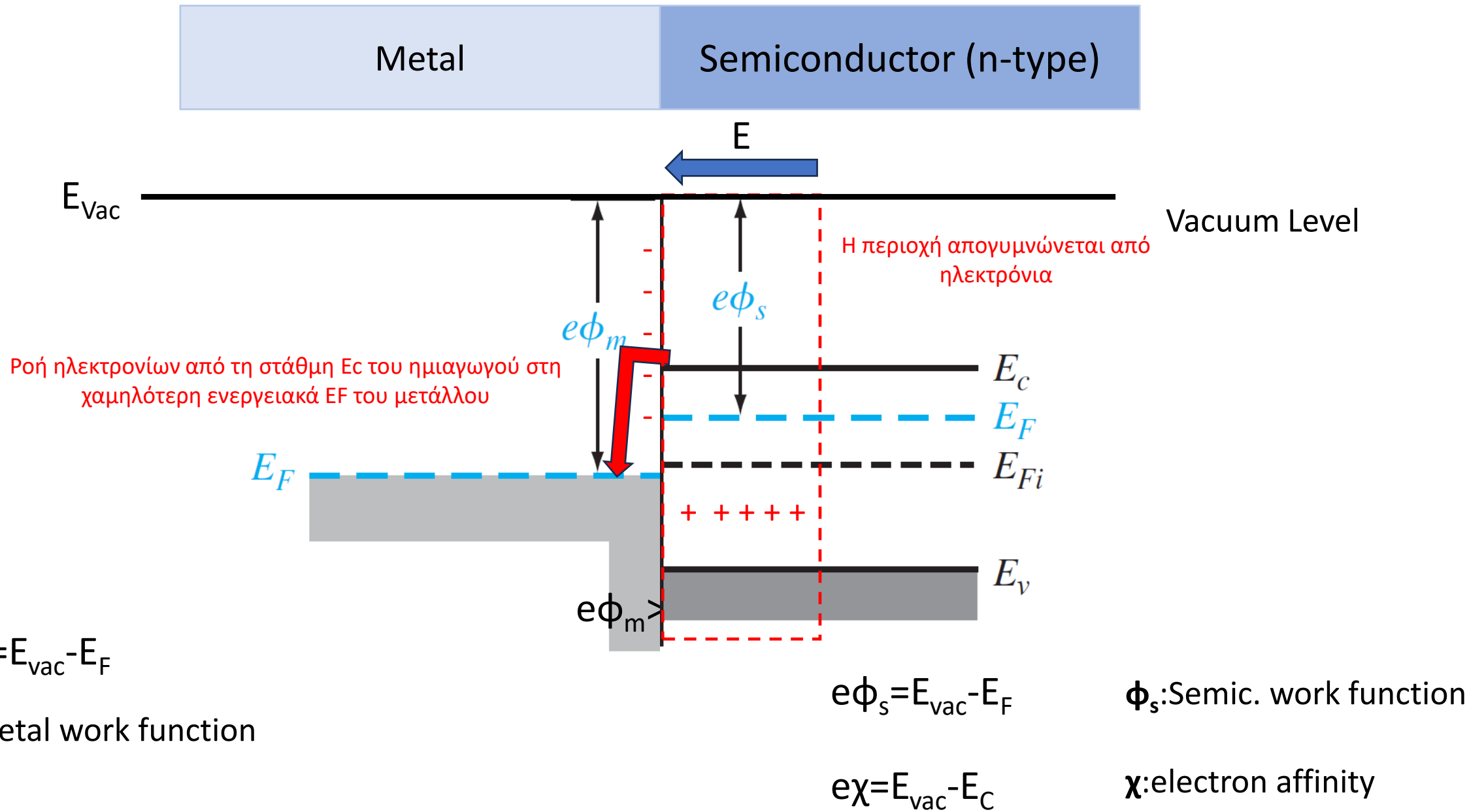
$$e\phi_s = E_{vac} - E_F$$

$$e\chi = E_{vac} - E_c$$

ϕ_s : Semic. work function

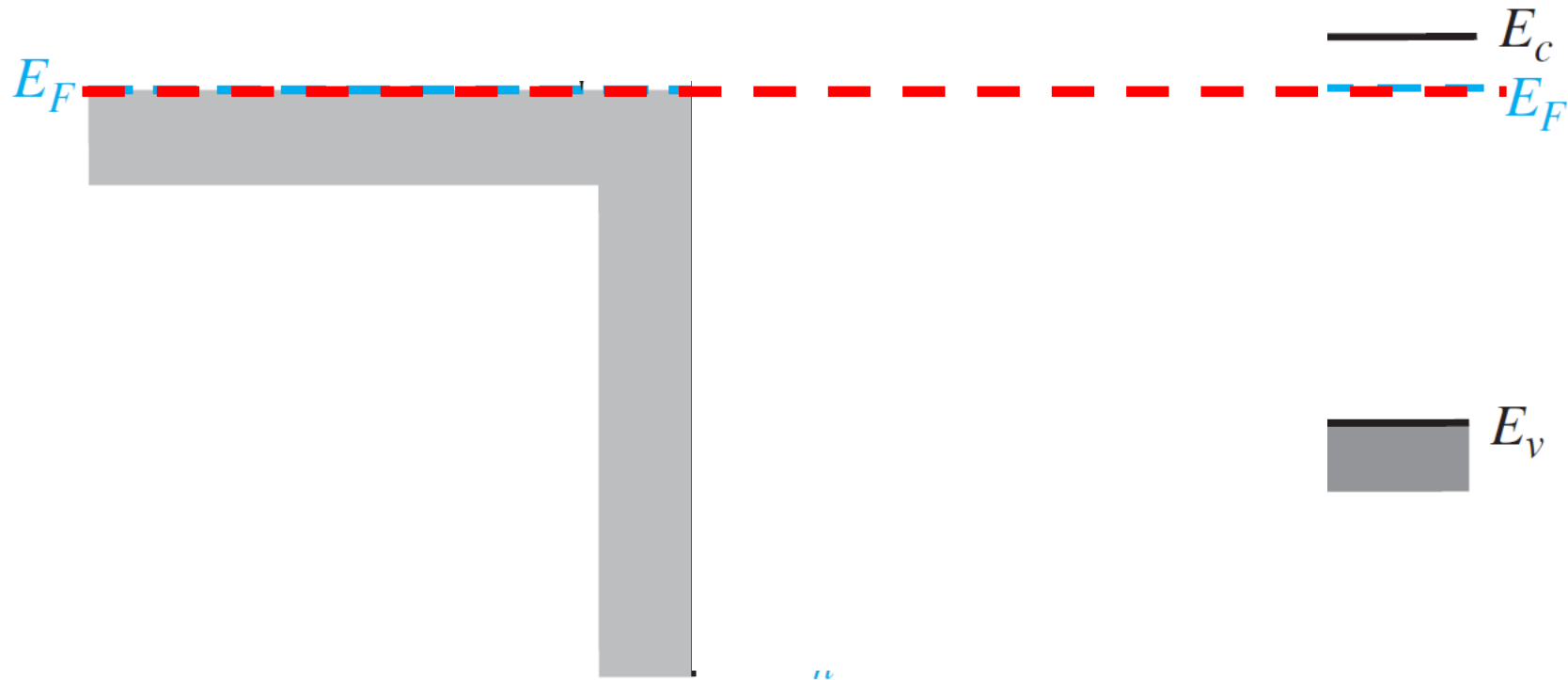
χ : electron affinity

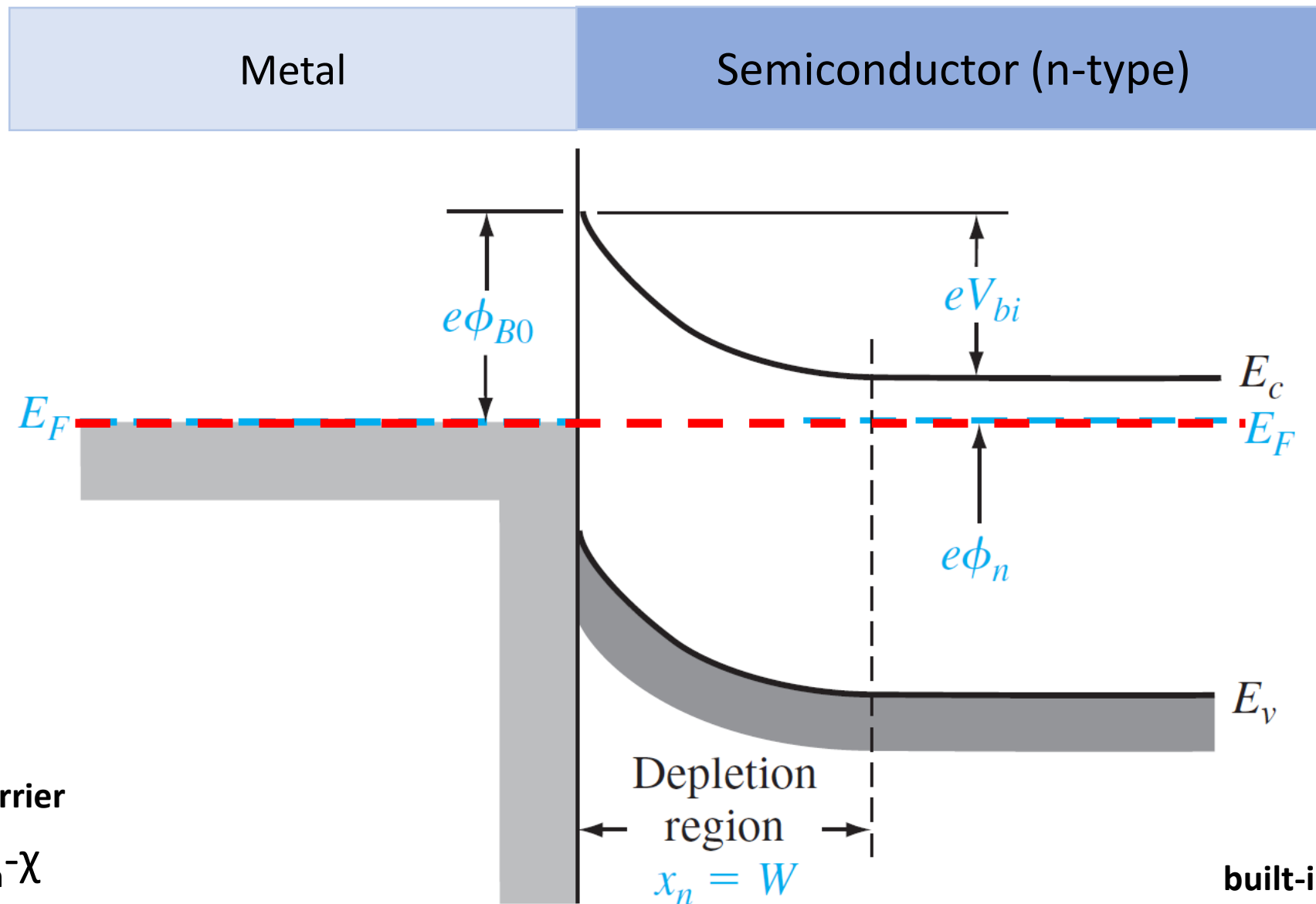
Επαφή Schottky (Schottky contact)





Μετά την επαφή στη Θερμοδυναμική Ισορροπία το σύστημα M-S έχει **μία στάθμη Fermi**





Schottky barrier

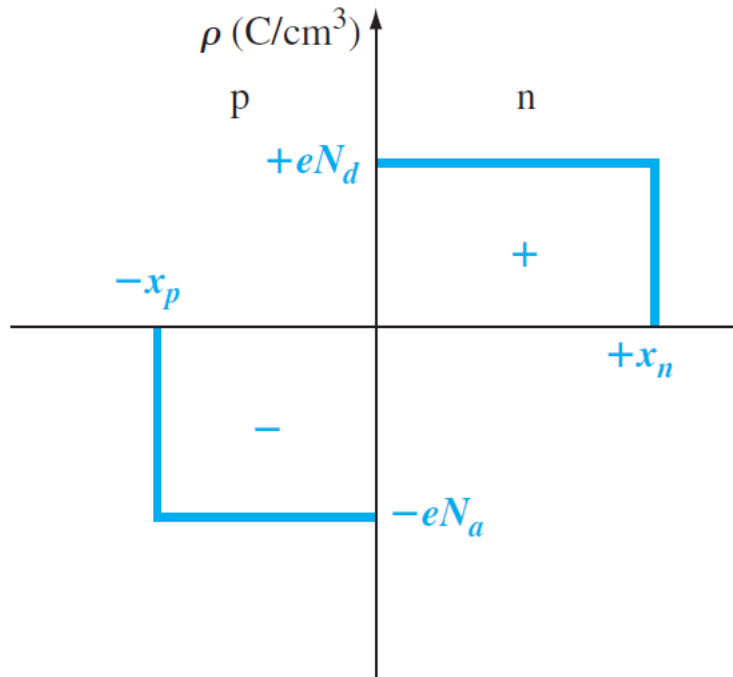
$$\phi_{B0} = \phi_m - \chi$$

built-in potential barrier

$$V_{bi} = \phi_{B0} - \phi_n$$

Αναλυτική επίλυση εξισώσεων για επαφή M-S

Αντίστοιχα με επαφή pn
(Abrupt junction)



Εφαρμόζω την εξίσωση του Poisson για τον ημιαγωγό

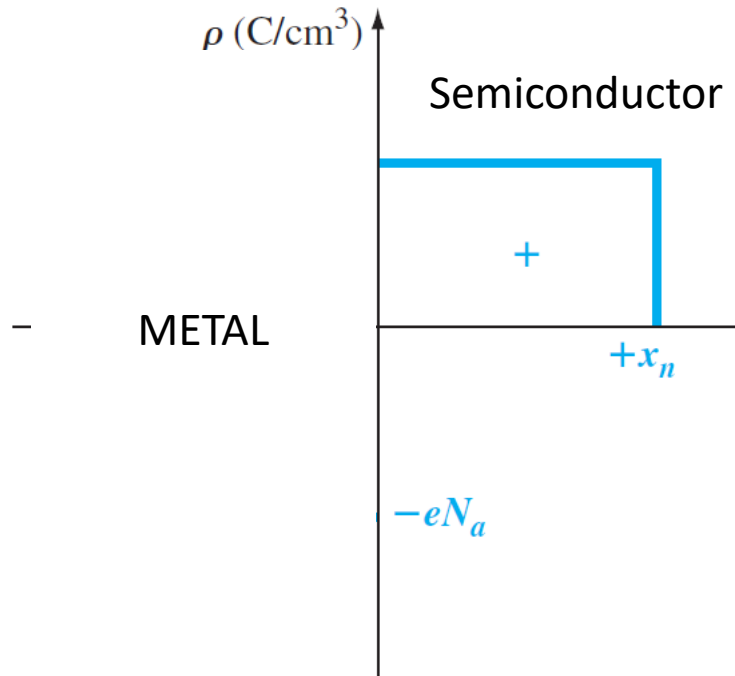
$$\frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = -\frac{d\mathcal{E}(x)}{dx}$$

$$\rho(x) = eN_D, \quad 0 < x < x_n$$

$$\mathcal{E} = \int \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} dx$$

Αναλυτική επίλυση εξισώσεων για επαφή M-S

Αντίστοιχα με επαφή pn
(Abrupt junction)



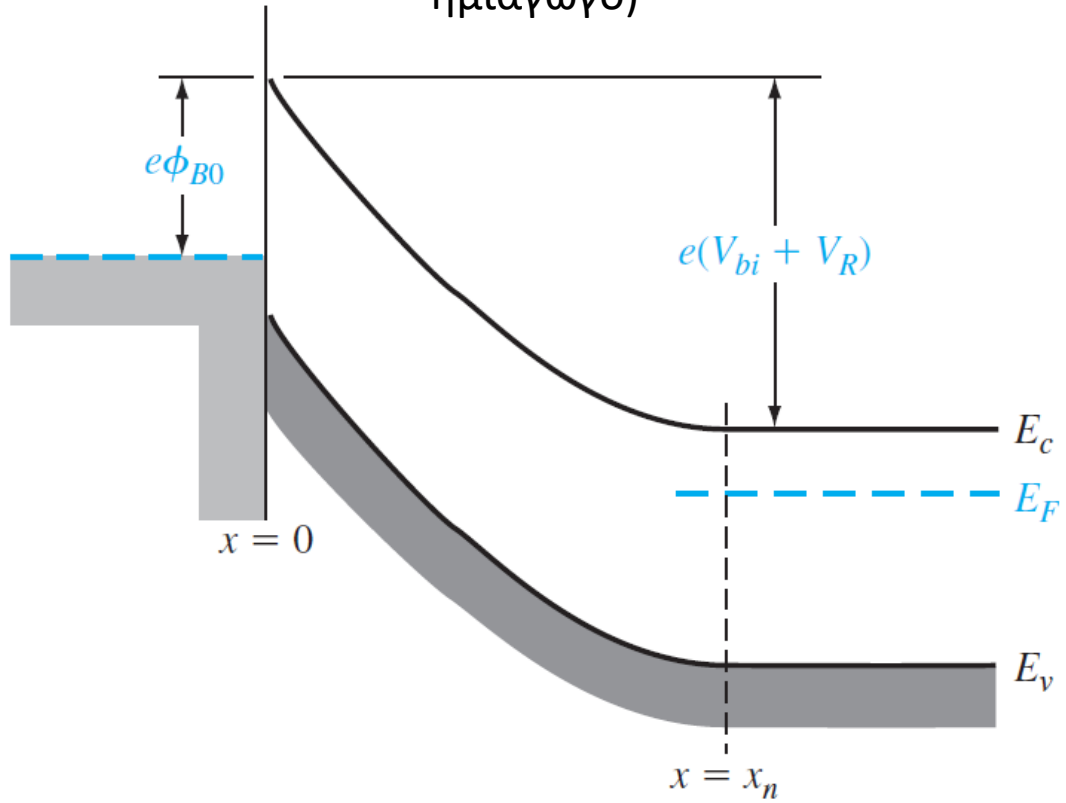
Εφαρμόζω την εξίσωση του Poisson για τον ημιαγωγό

$$\frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = -\frac{d\mathcal{E}(x)}{dx}$$

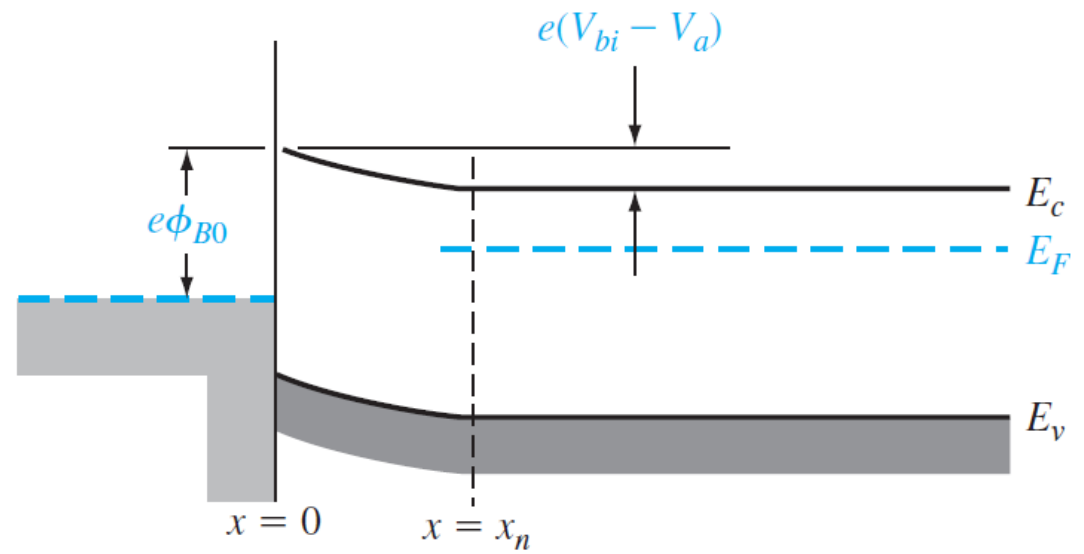
$$\rho(x) = eN_D, \quad 0 < x < x_n$$

$$\mathcal{E} = \int \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} dx$$

Ανάστροφη πόλωση
(Θετική τάση στον
ημιαγωγό)



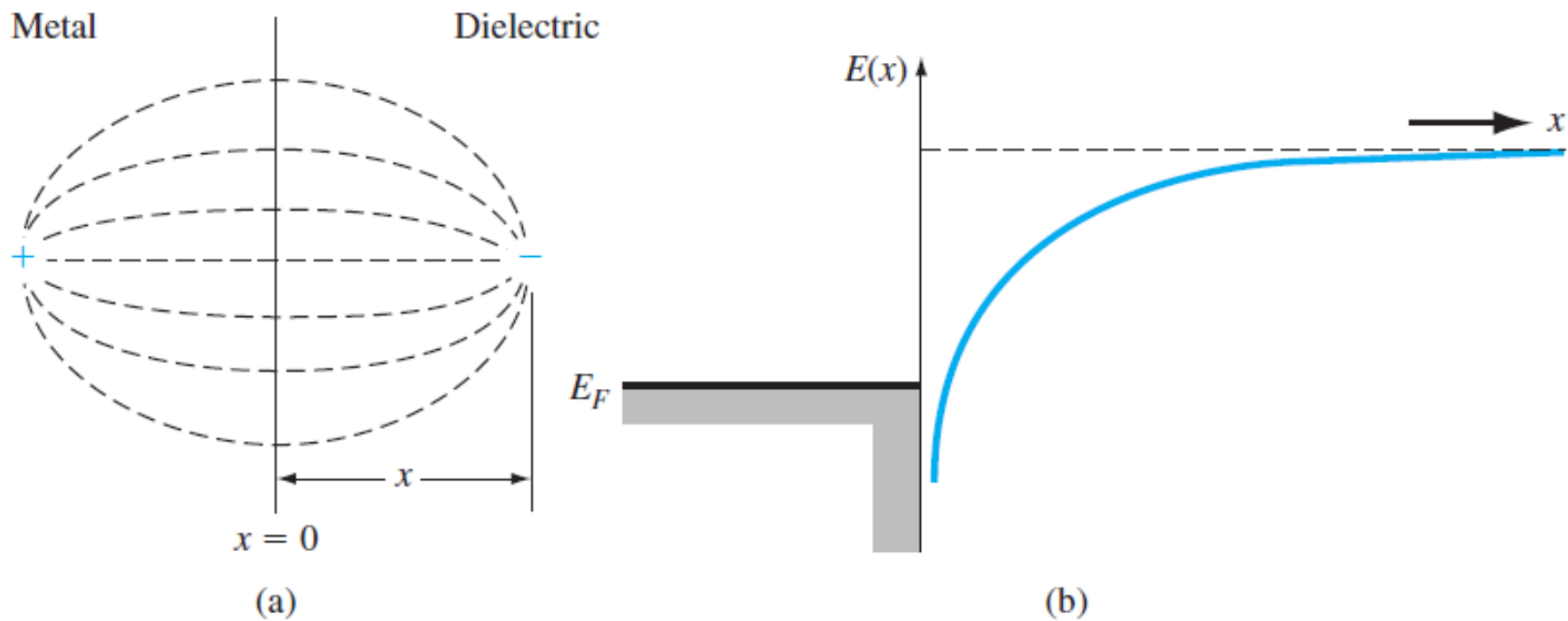
Ορθή πόλωση
(Θετική τάση στο
μέταλλο)



Συμπεριφορά αντίστοιχη με επαφή pn

Μη γραμμικά φαινόμενα- Επίδραση στο φραγμό δυναμικού

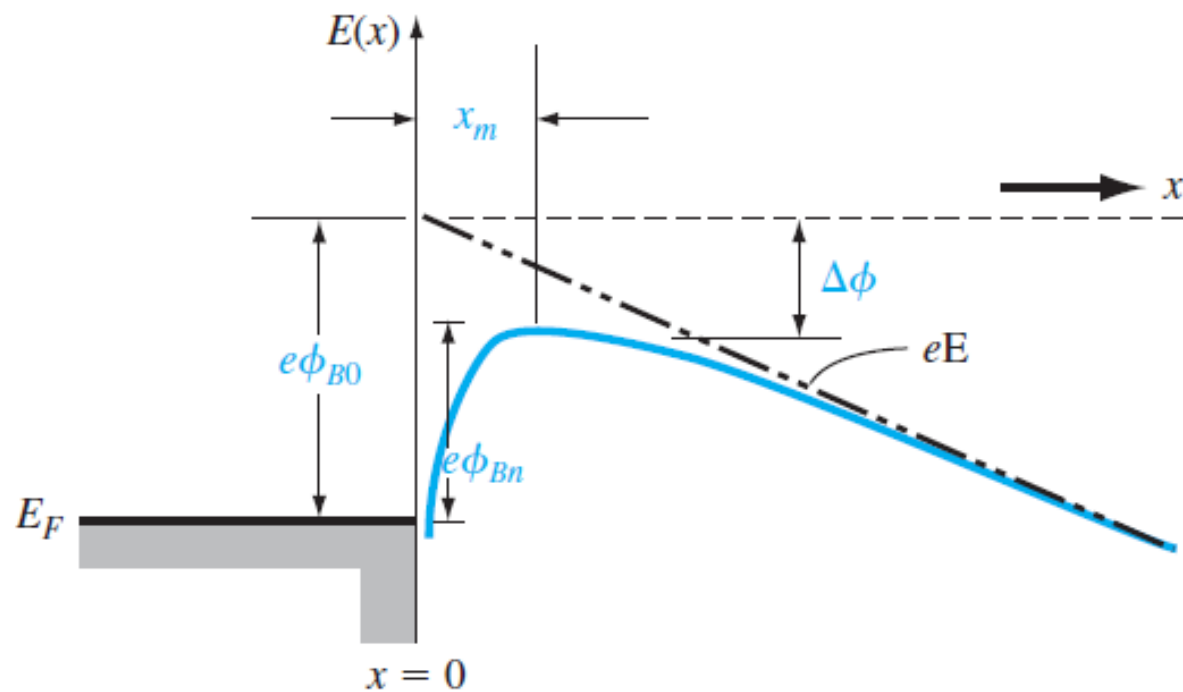
Schottky Barrier Lowering



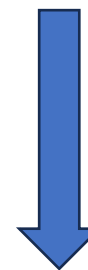
$$F = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_s(2x)^2} = -eE$$

Μη γραμμικά φαινόμενα- Επίδραση στο φραγμό δυναμικού

Schottky Barrier Lowering



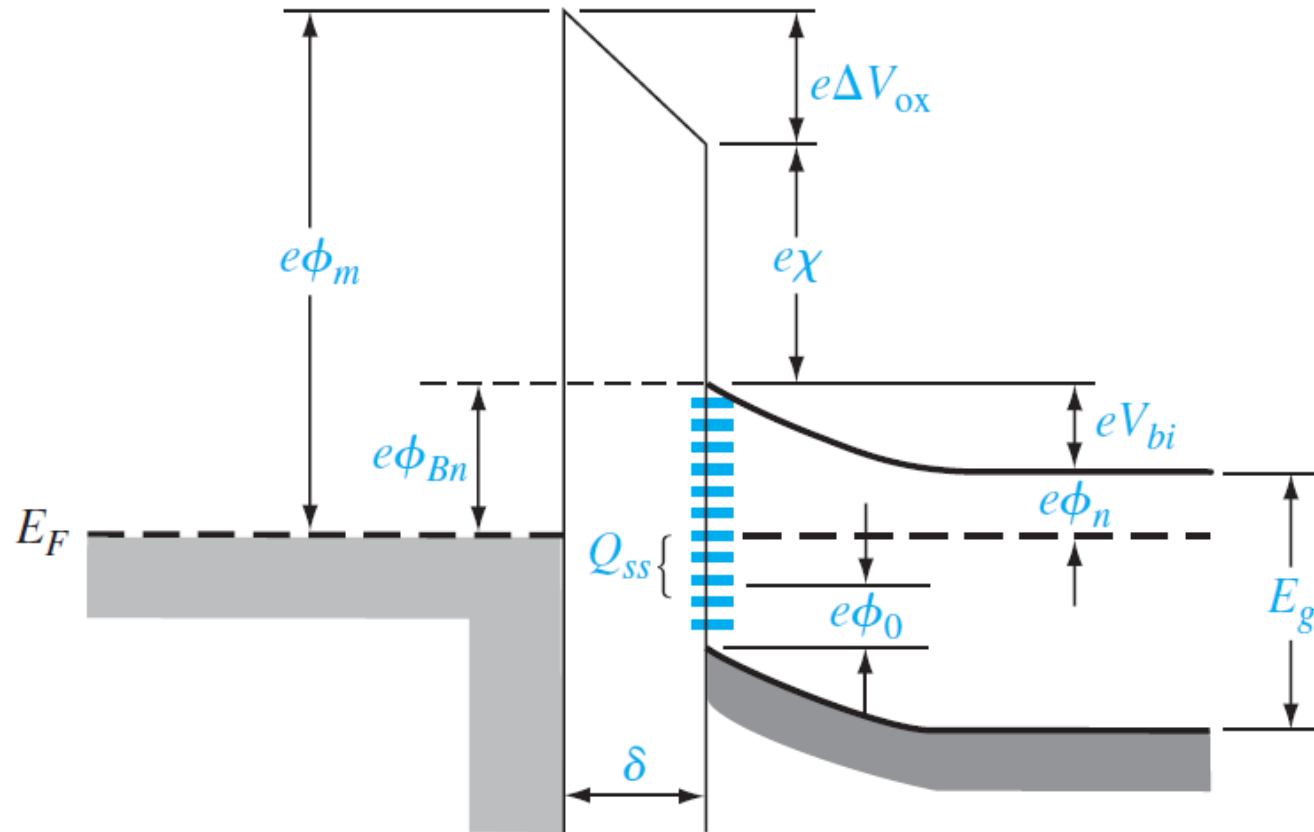
$$\varphi(x) = - \int_x^{\infty} E dx = \frac{-e}{16\pi\epsilon_S x}$$



$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_S}}$$

Μη γραμμικά φαινόμενα- Επίδραση στο φραγμό δυναμικού

Επιφανειακές καταστάσεις (Interface States)



Σχέση ρεύματος τάσης

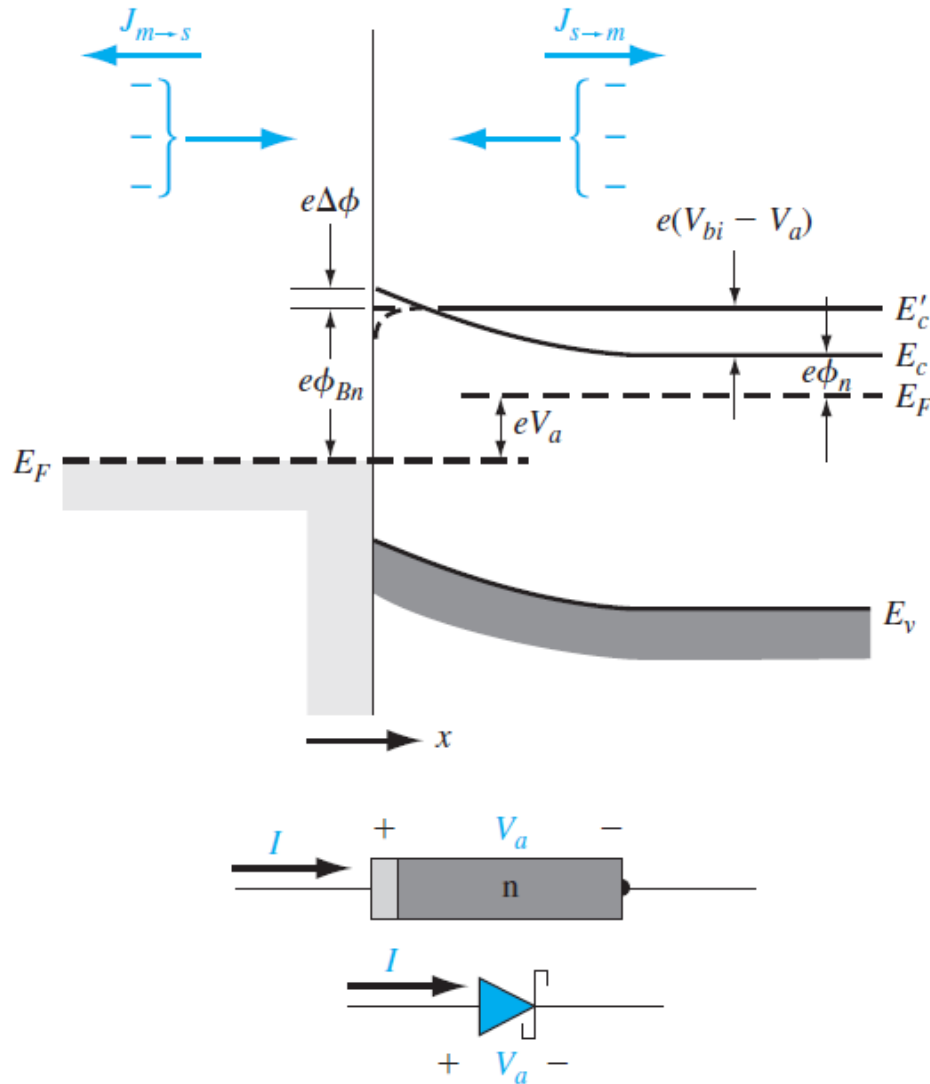
Το ρεύμα στην επαφή MS οφείλεται σε **φορείς πλειονότητας**: μεταφορά φορέων πάνω από το φραγμό δυναμικού με **θερμιονική εκπομπή**

$J_{S \rightarrow M}$: Ροή ηλεκτρονίων από τον ημιαγωγό (S)
στο μέταλλο (M)

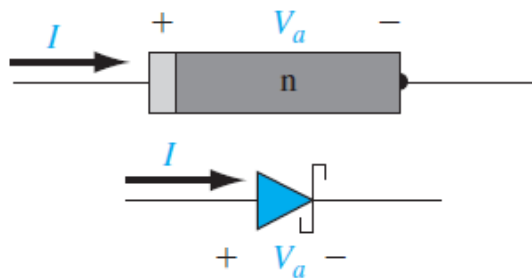
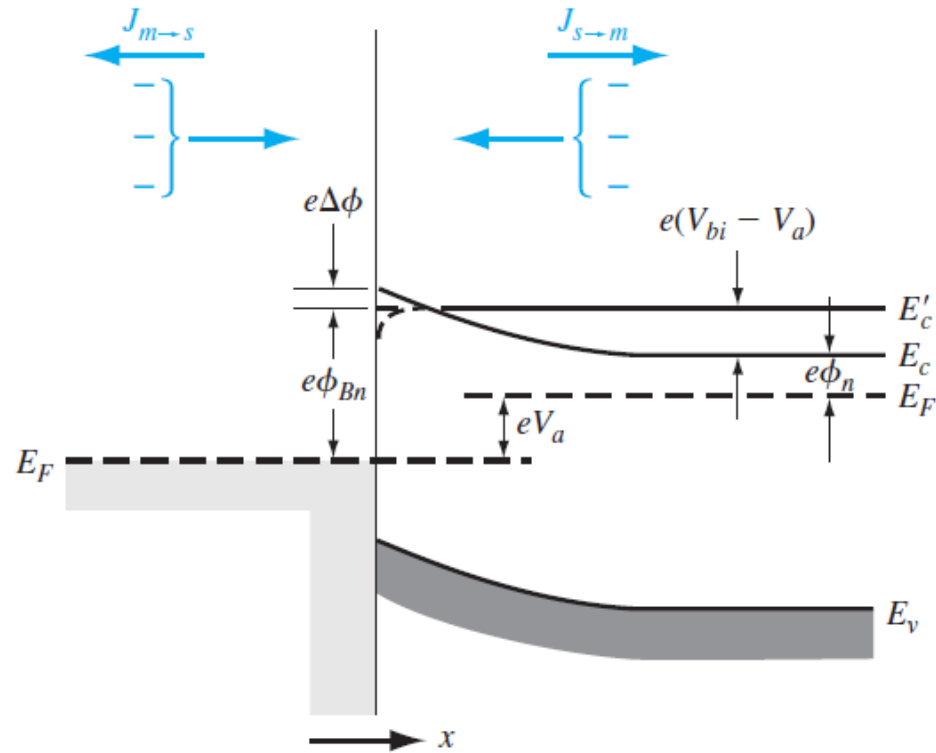
$J_{M \rightarrow S}$: Ροή ηλεκτρονίων από το μέταλλο (M)
στον ημιαγωγό (S)

Η συμβατική φορά το ρεύματος είναι αντίθετη από την ροή των ηλεκτρονίων

$$J = J_{S \rightarrow M} - J_{M \rightarrow S}$$



Σχέση ρεύματος τάσης



$$J = \left[A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{Bn}}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$A^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \quad \text{Σταθερά Richardson}$$

$$J = J_{sT} \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$J_{sT} = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{Bn}}{kT}\right)$$

Ανάστροφο ρεύμα κόρου
(Reverse saturation current)

Σύγκριση επαφής Schottky και επαφής p-n

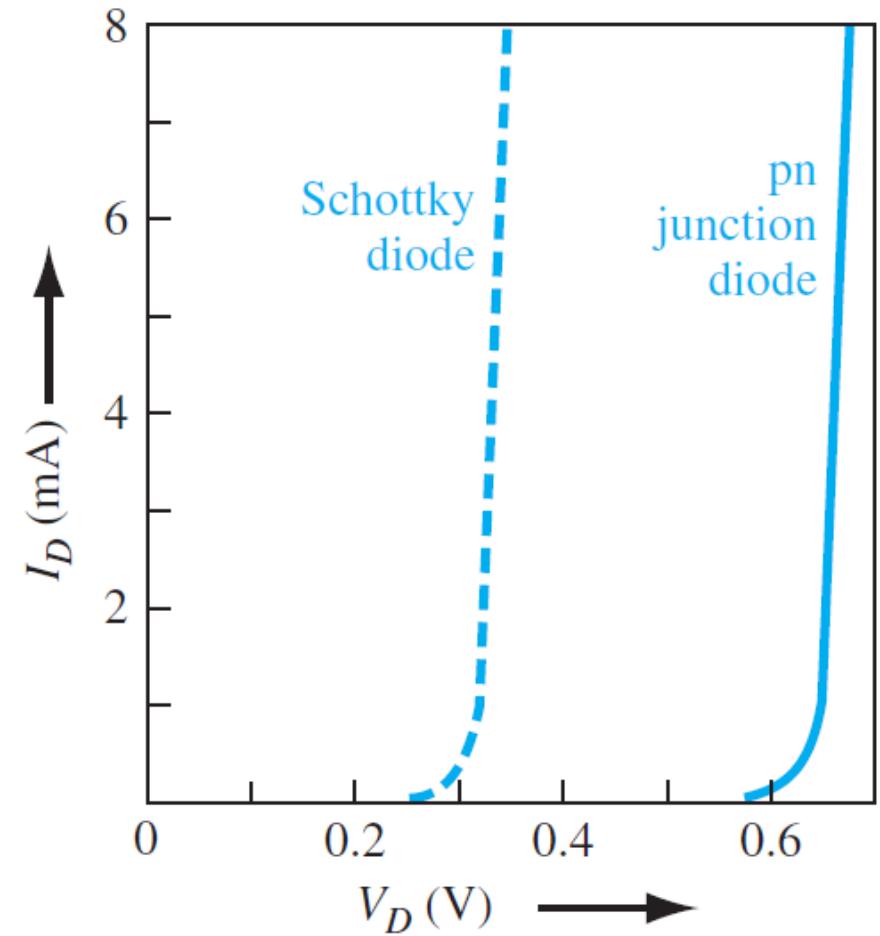
$$J = J_S \left[\exp \left(\frac{eV_a}{kT} \right) - 1 \right]$$

Επαφή pn

$$J_S = \left[\frac{eD_p p_{no}}{L_p} + \frac{eD_n n_{po}}{L_n} \right]$$

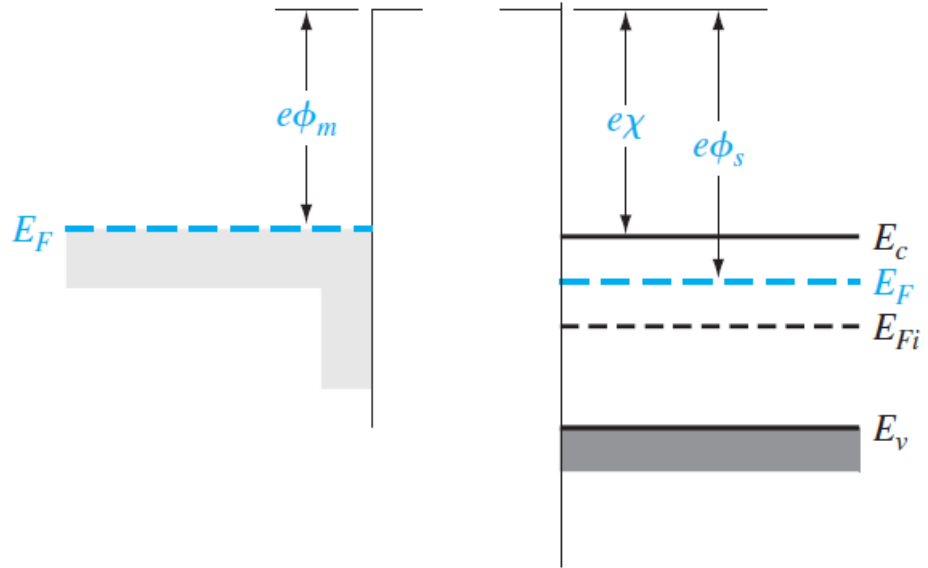
Επαφή Schottky

$$J_{ST} = A^* T^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_{Bn}}{kT} \right)$$



Ωμική επαφή (Ohmic contact)

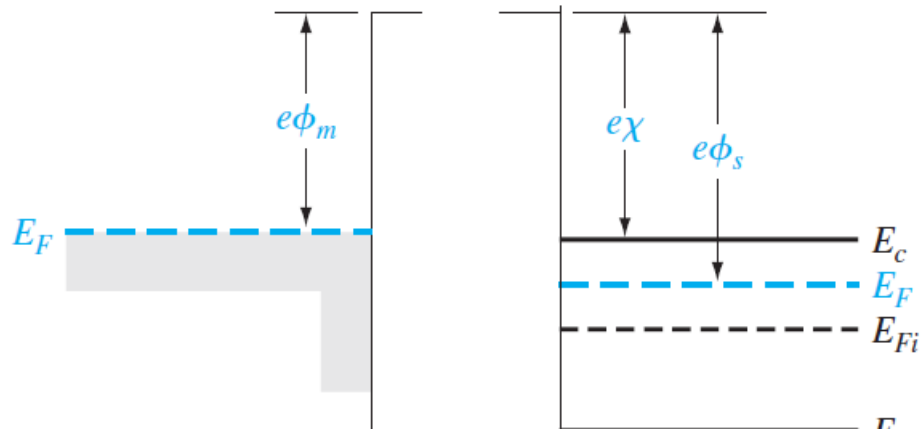
$$E\phi_m < e\phi_s$$



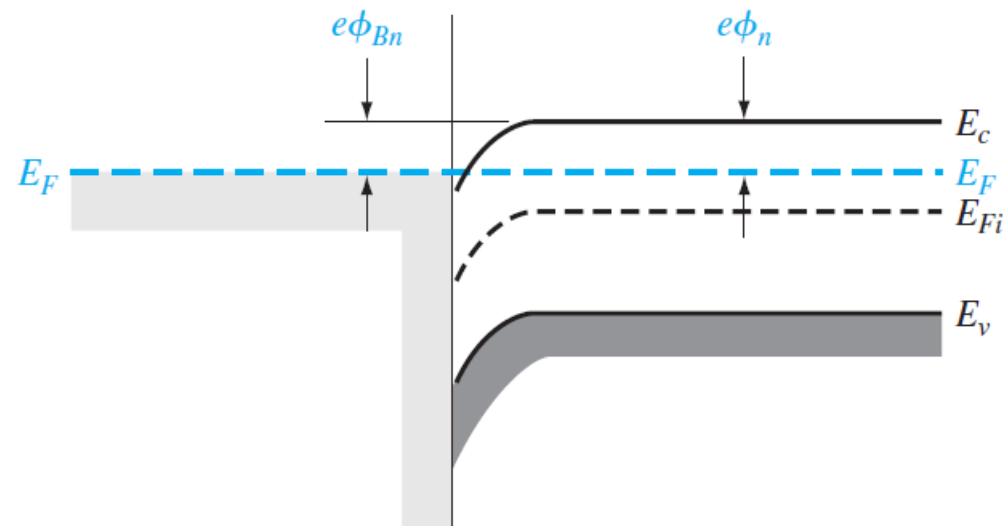
(a)

Ωμική επαφή (Ohmic contact)

$$E\phi_m < e\phi_s$$

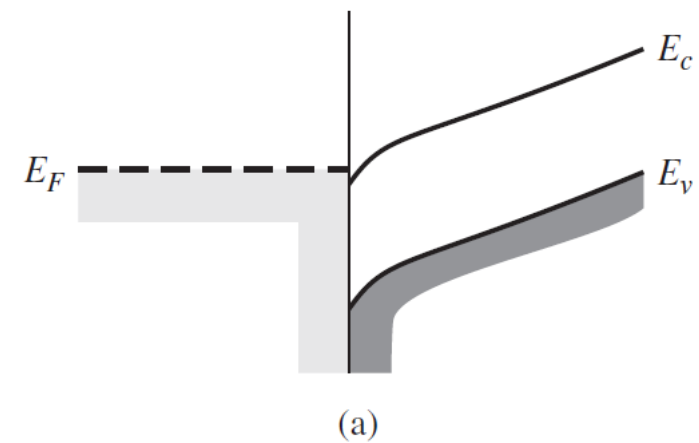
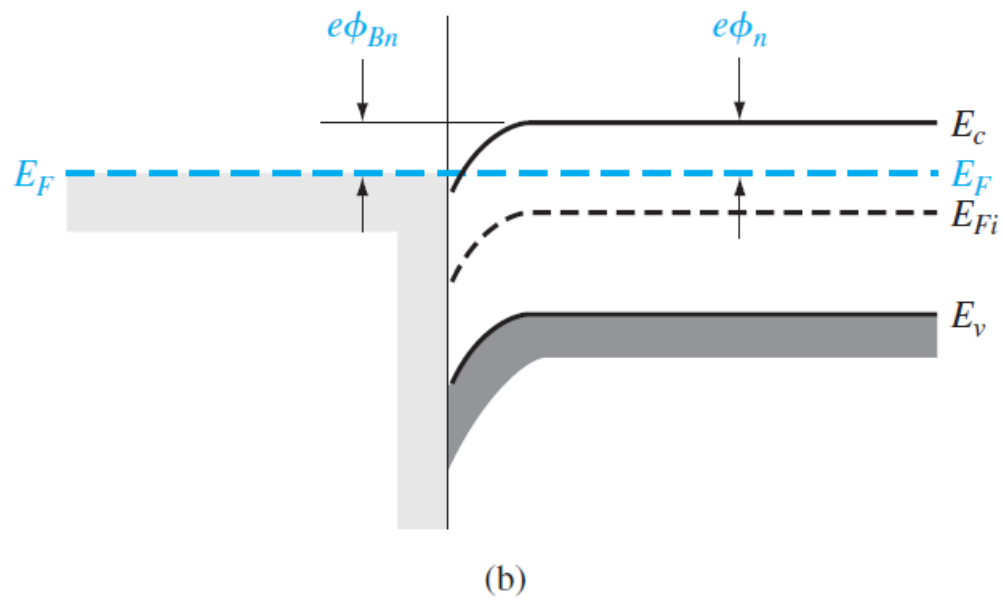


(a)



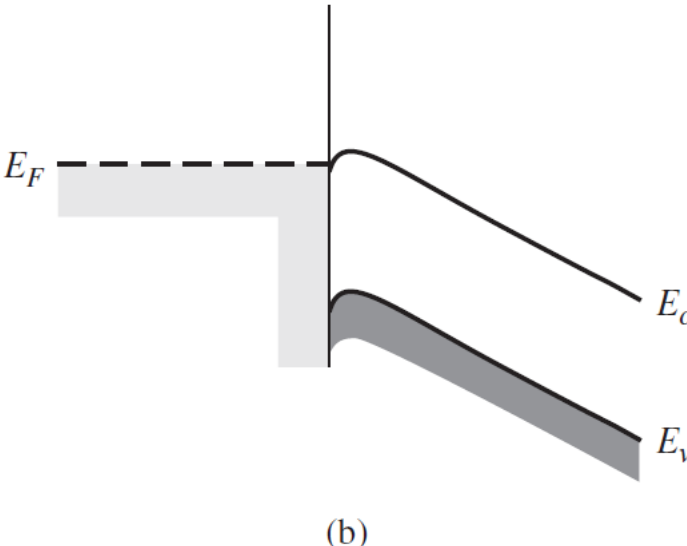
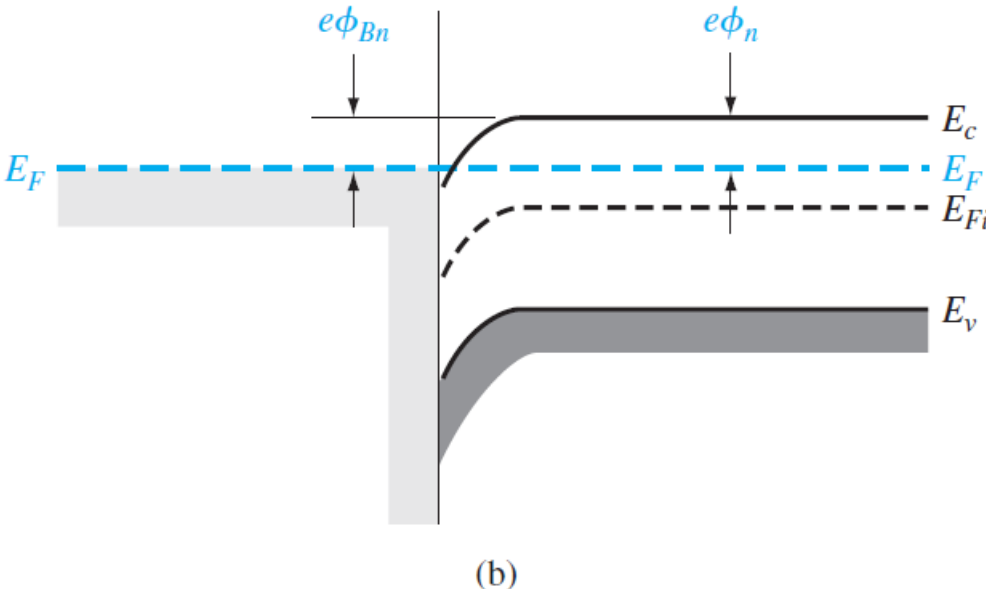
(b)

Ωμική επαφή (Ohmic contact)



Θετική τάση στο μέταλλο

Ωμική επαφή (Ohmic contact)

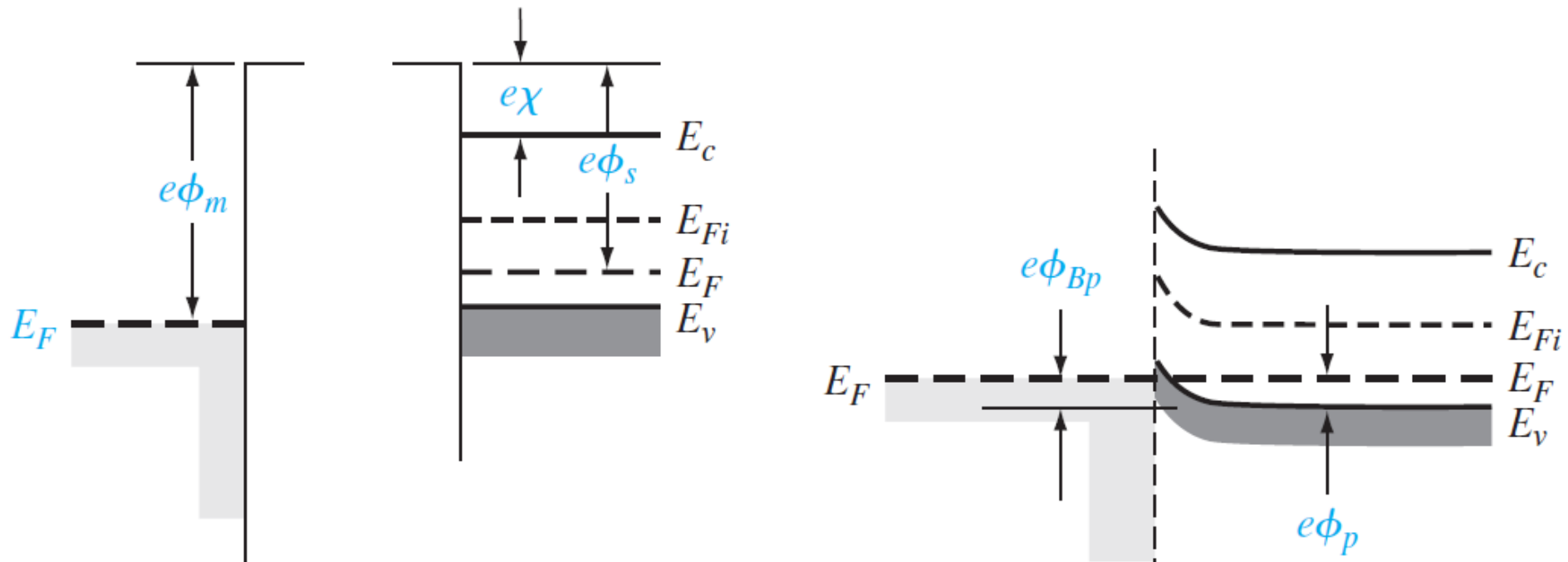


Θετική τάση στον ημιαγωγό

Ωμική επαφή (Ohmic contact)

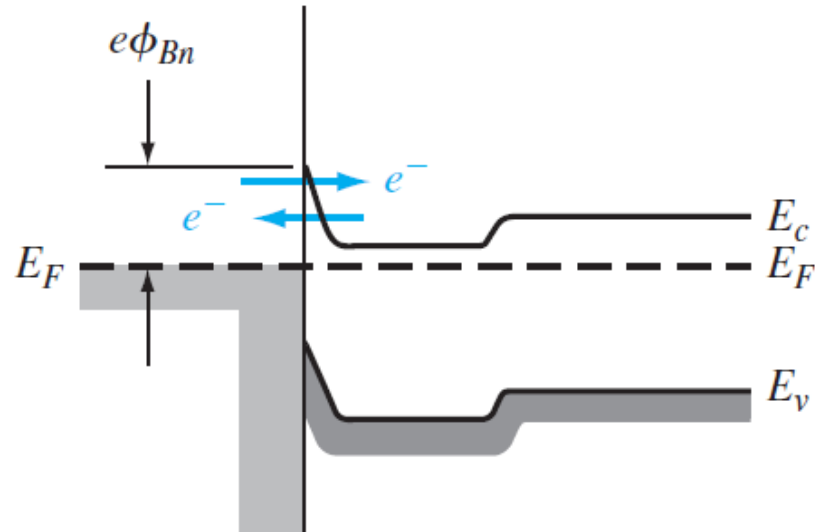
Επαφή μετάλλου – ημιαγωγού p-type

$$e\phi_m < e\phi_s$$



Ωμική επαφή (Ohmic contact)

Επαφή μετάλλου – ημιαγωγού με υψηλή νόθευση

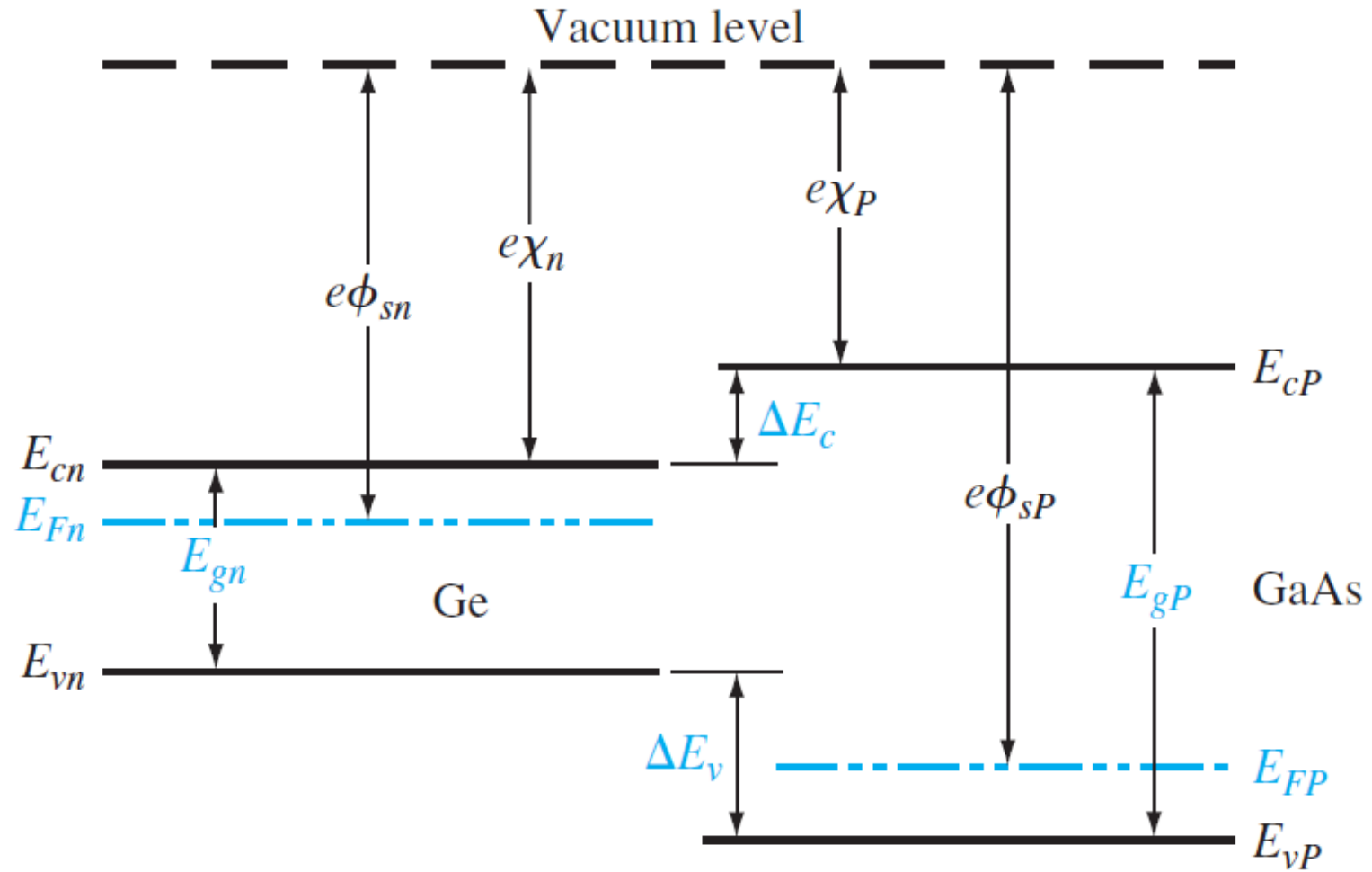


Tunneling current

$$J_t \propto \exp\left(\frac{-e\Phi_{Bn}}{E_{00}}\right)$$

$$E_{00} = \frac{e\hbar}{2} \sqrt{\frac{N_D}{\epsilon_S m_n^*}}$$

ΕΤΕΡΟΕΠΑΦΕΣ (HETEROJUNCTIONS)



Η Επαφή Μετάλλου-Ημιαγωγού

Table 9.1 | Work functions of some elements

Element	Work function, ϕ_m
Ag, silver	4.26
Al, aluminum	4.28
Au, gold	5.1
Cr, chromium	4.5
Mo, molybdenum	4.6
Ni, nickel	5.15
Pd, palladium	5.12
Pt, platinum	5.65
Ti, titanium	4.33
W, tungsten	4.55

Table 9.2 | Electron affinity of some semiconductors

Element	Electron affinity, χ
Ge, germanium	4.13
Si, silicon	4.01
GaAs, gallium arsenide	4.07
AlAs, aluminum arsenide	3.5