

Φυσική και Τεχνολογία Υλικών και Διατάξεων Στερεάς Κατάστασης

Δρ Χρήστος Τσάμης

Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας

ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»

c.tsamis@inn.demokritos.gr

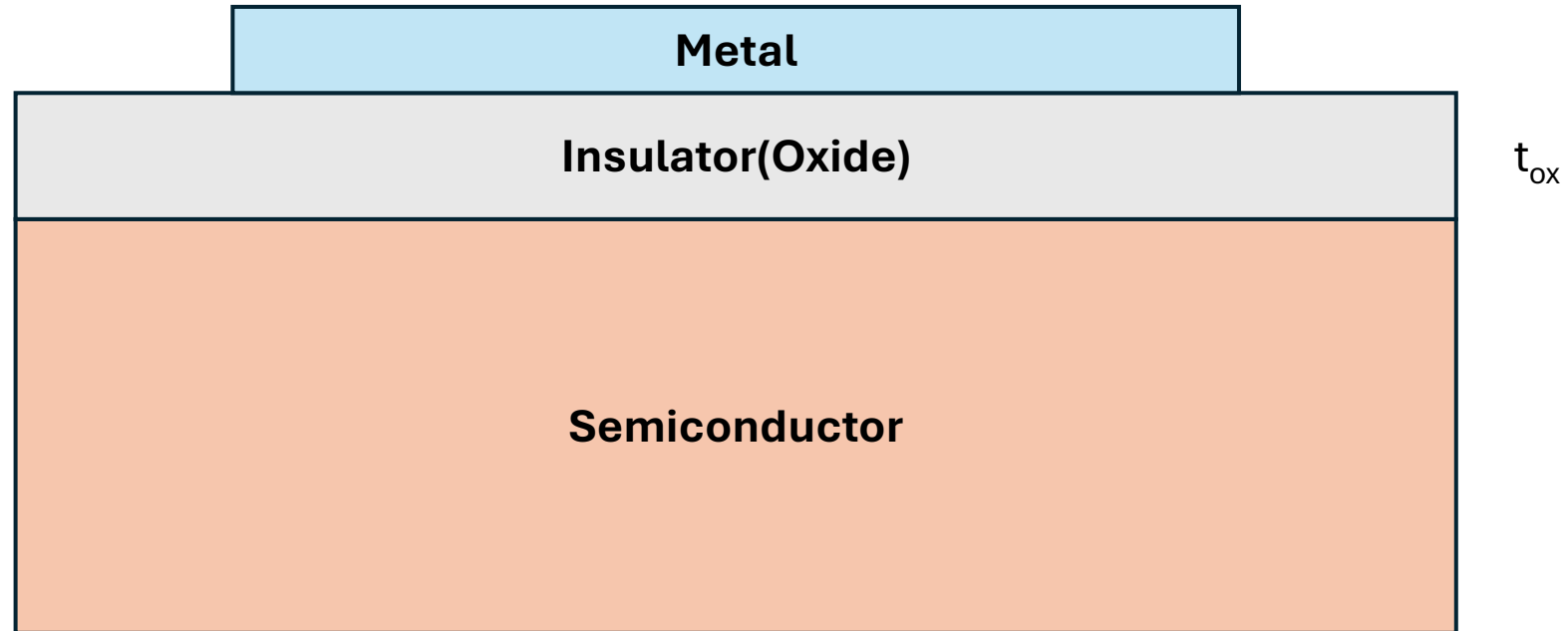
Πάτρα, 2025

Δομή MIS/MOS

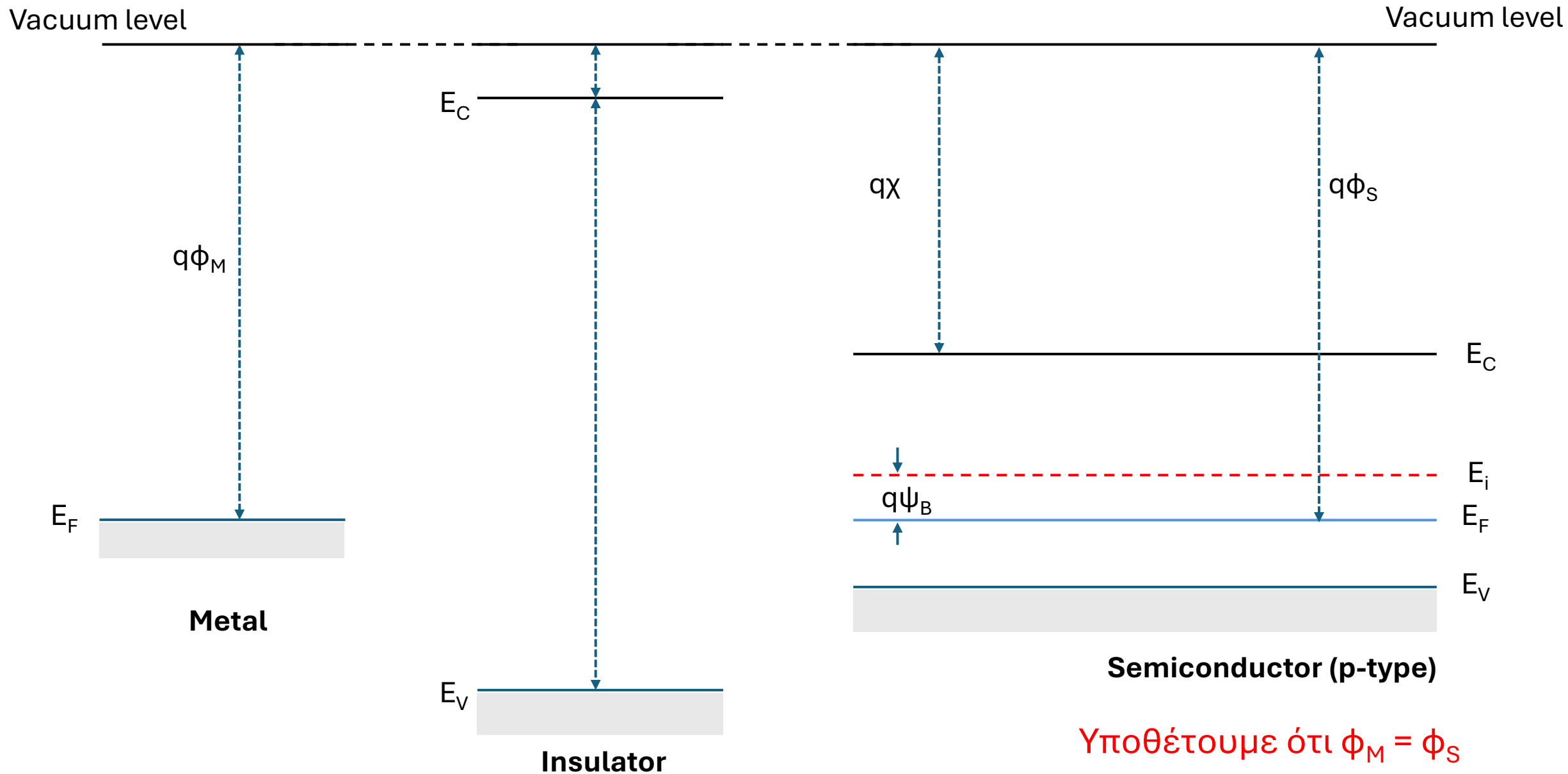
D. A. Neamen, *Semiconductor Physics and Devices*
McGraw-Hill, 4th Ed. (2012)

Ενότητες 7.1-7.4, 8.1- 8.4

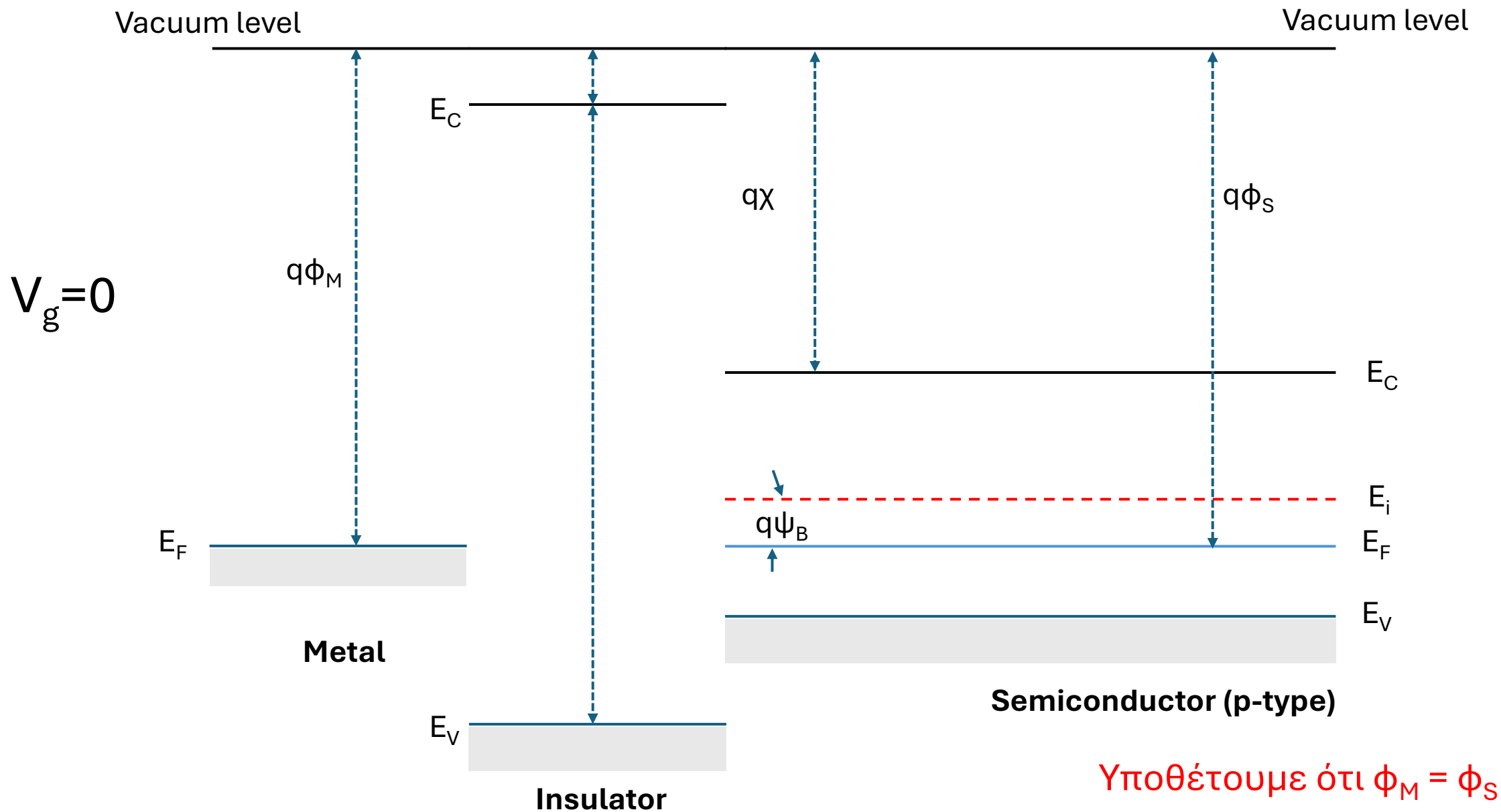
Δομή Metal-Insulator(Oxide)-Semiconductor (MIS/MOS)



Ενεργειακό διάγραμμα δομής Metal-Insulator(Oxide)-Semiconductor (MIS/MOS)



Ενεργειακό διάγραμμα δομής Metal-Insulator(Oxide)-Semiconductor (MIS/MOS)



Ενεργειακό διάγραμμα δομής Metal-Insulator(Oxide)-Semiconductor (MIS/MOS)

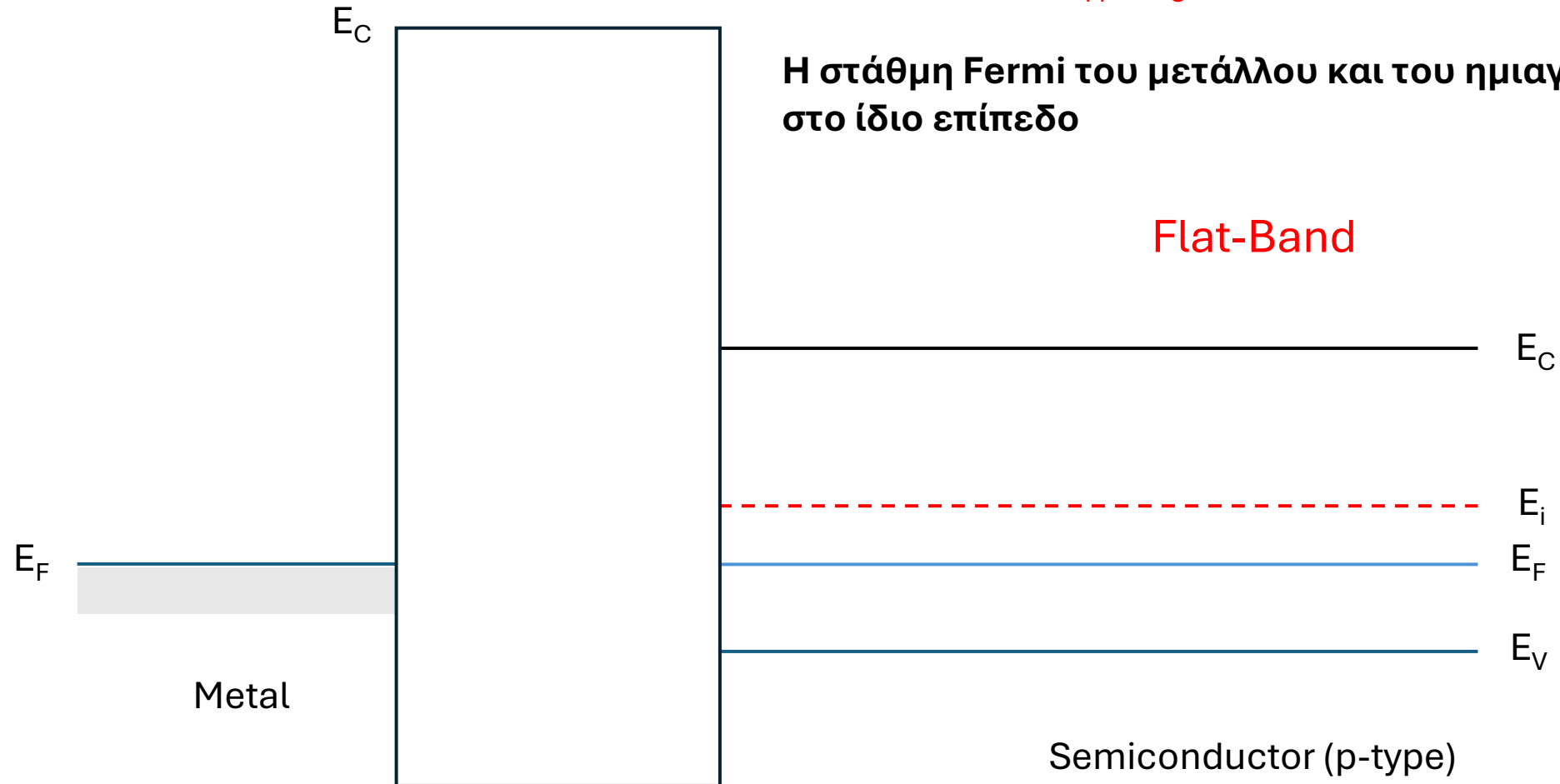
$$V_g = 0$$

Θ.Ι

Υποθέτουμε ότι $\phi_M = \phi_S$ (Δεν ισχύει στη γενική περίπτωση)

Η στάθμη Fermi του μετάλλου και του ημιαγωγού είναι στο ίδιο επίπεδο

Flat-Band

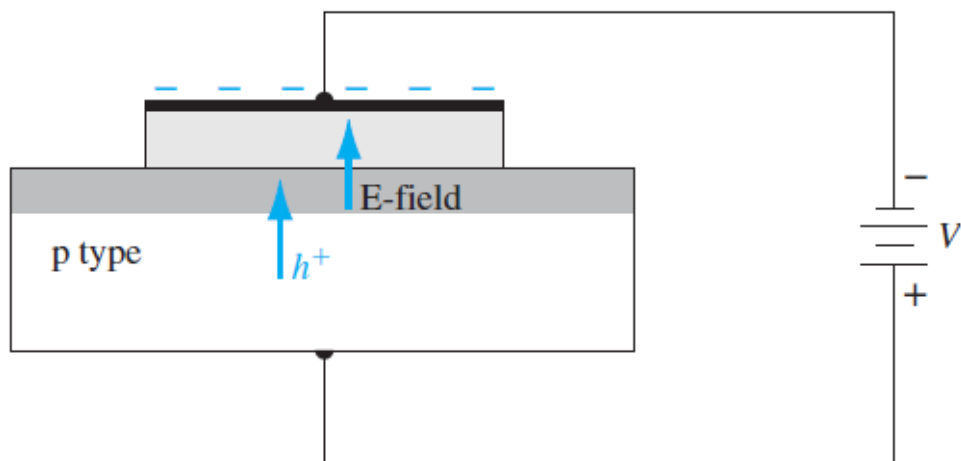


Θ.Ι : Θερμοδυναμική ισορροπία

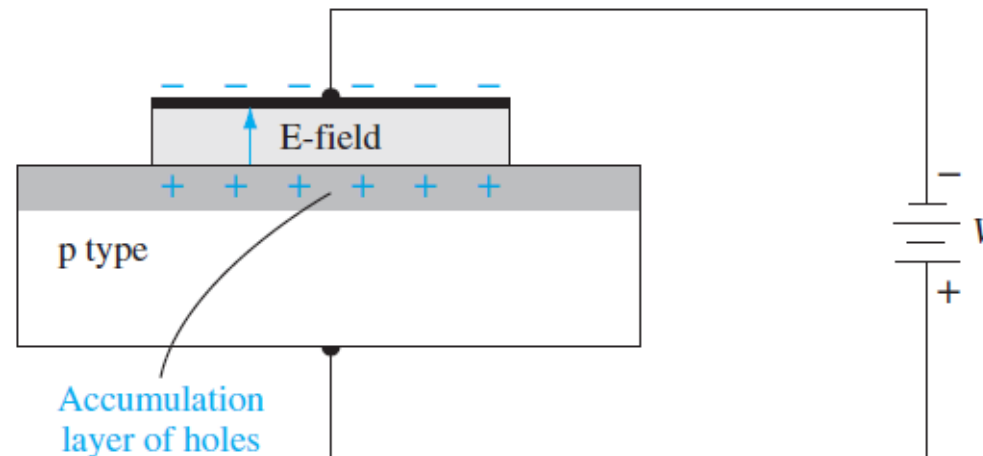
Ενεργειακό διάγραμμα δομής Metal-Insulator(Oxide)-Semiconductor (MIS/MOS)

Τι θα γίνει αν εφαρμόσω μία **αρνητική τάση** στο μέταλλο?

$$V_g < 0$$



Οπές έλκονται στη διεπιφάνεια ημιαγωγού/μονωτή



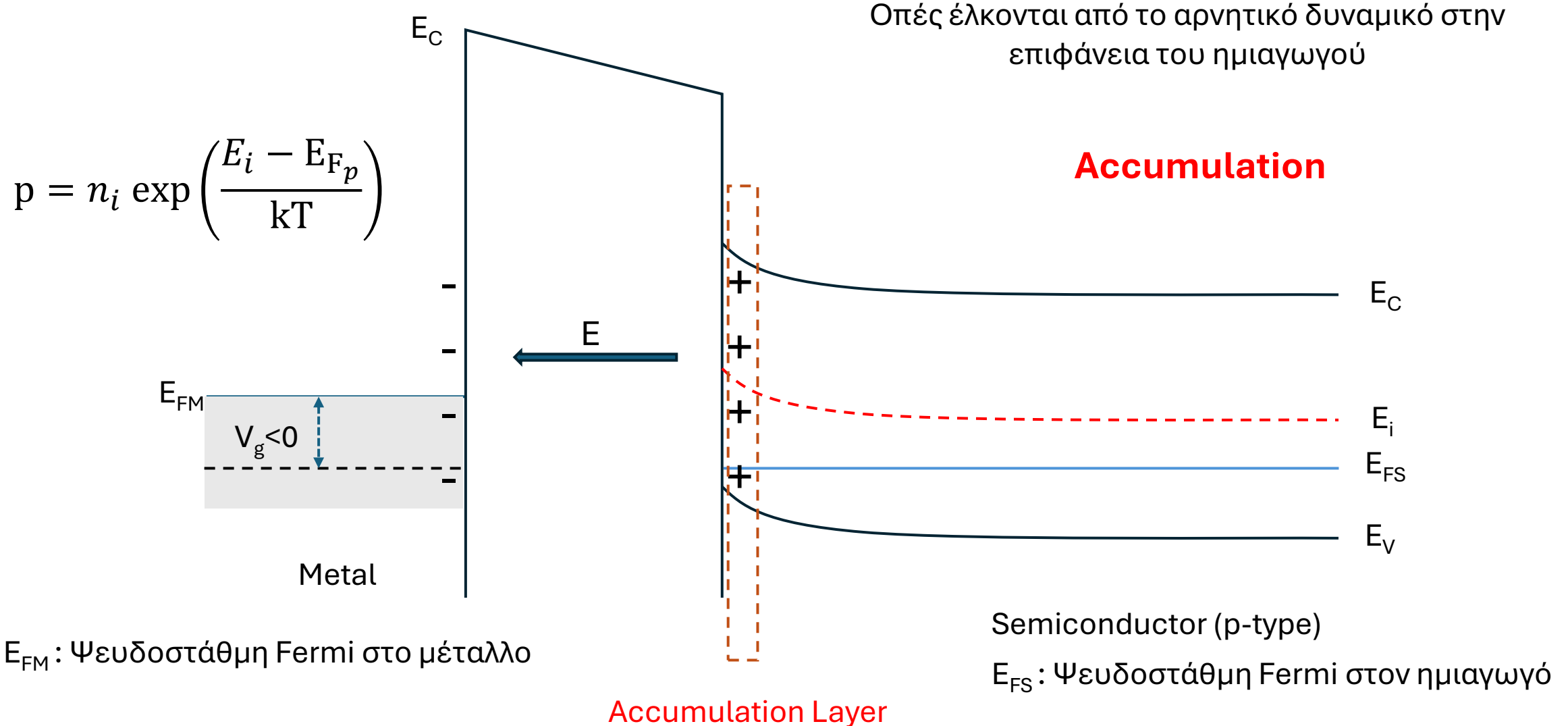
Η συγκέντρωση των οπών στην επιφάνεια αυξάνει σε σχέση με το υπόστρωμα (**Accumulation**)

Πως θα αλλάξει το ενεργειακό διάγραμμα?

Ενεργειακό διάγραμμα δομής Metal-Insulator(Oxide)-Semiconductor (MIS/MOS)

$$V_g < 0$$

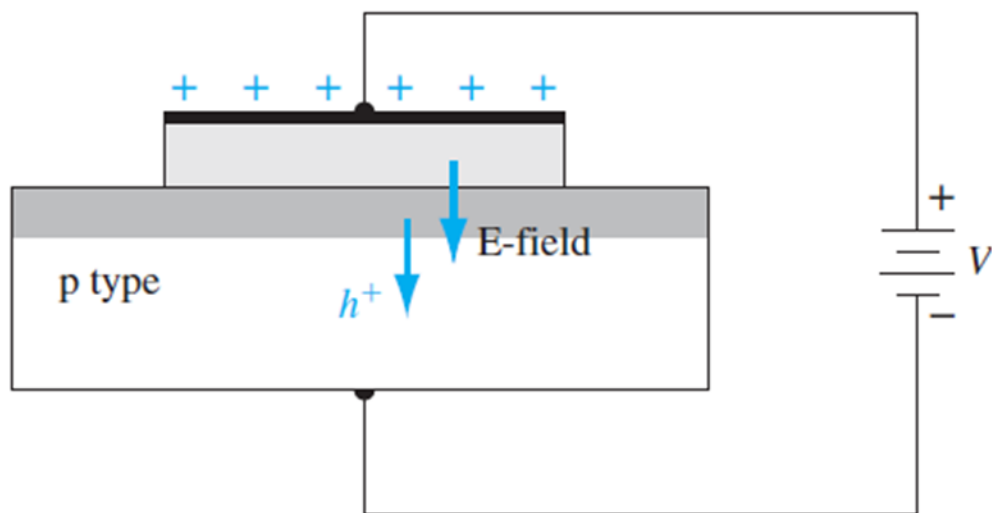
Εκτός Θ.Ι



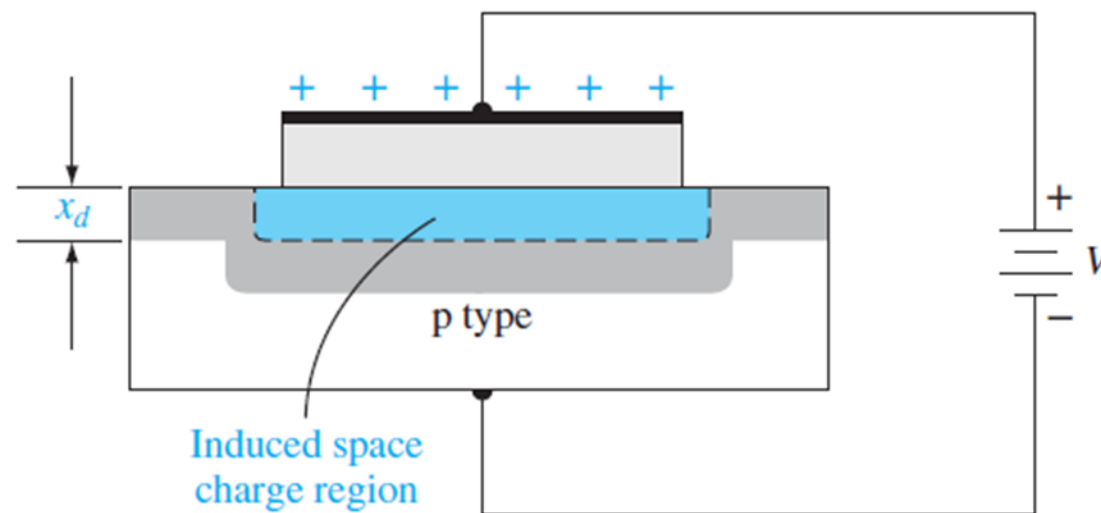
Ενεργειακό διάγραμμα δομής Metal-Insulator(Oxide)-Semiconductor (MIS/MOS)

Τι θα γίνει αν εφαρμόσω μία **θετική τάση** στο μέταλλο?

$$V_g > 0$$



Οι οπές απομακρύνονται από τη διεπιφάνεια
ημιαγωγού/μονωτή



Σχηματίζεται μία περιοχή απογύμνωσης από οπές
στην επιφάνεια (**Induced Space Charge Region**)

Διακρίνουμε δύο φάσεις ανάλογα με την τιμή του V_g

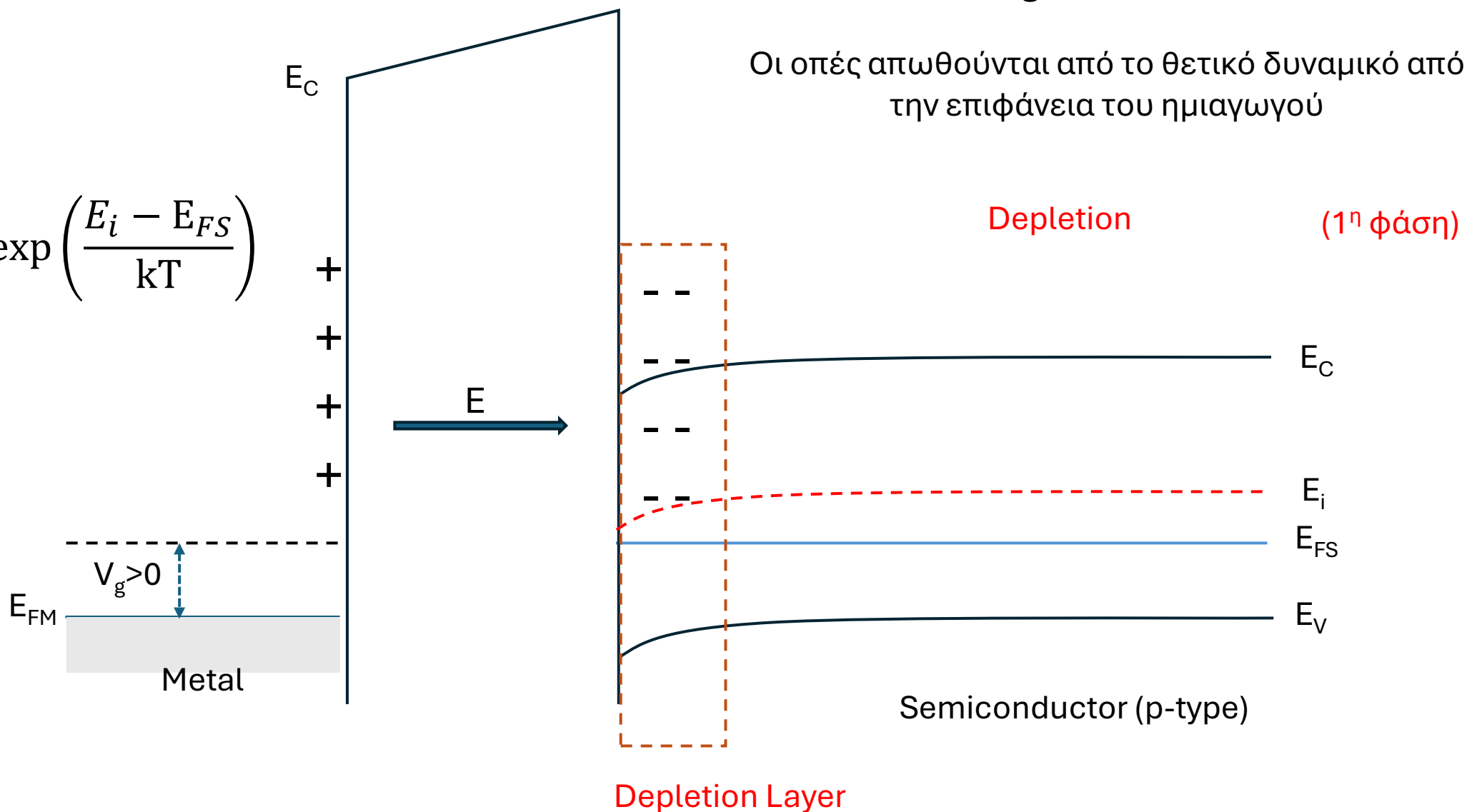
Πως θα αλλάξει το ενεργειακό διάγραμμα?

Ενεργειακό διάγραμμα δομής Metal-Insulator(Oxide)-Semiconductor (MIS/MOS)

$$V_g > 0$$

Εκτός Θ.Ι

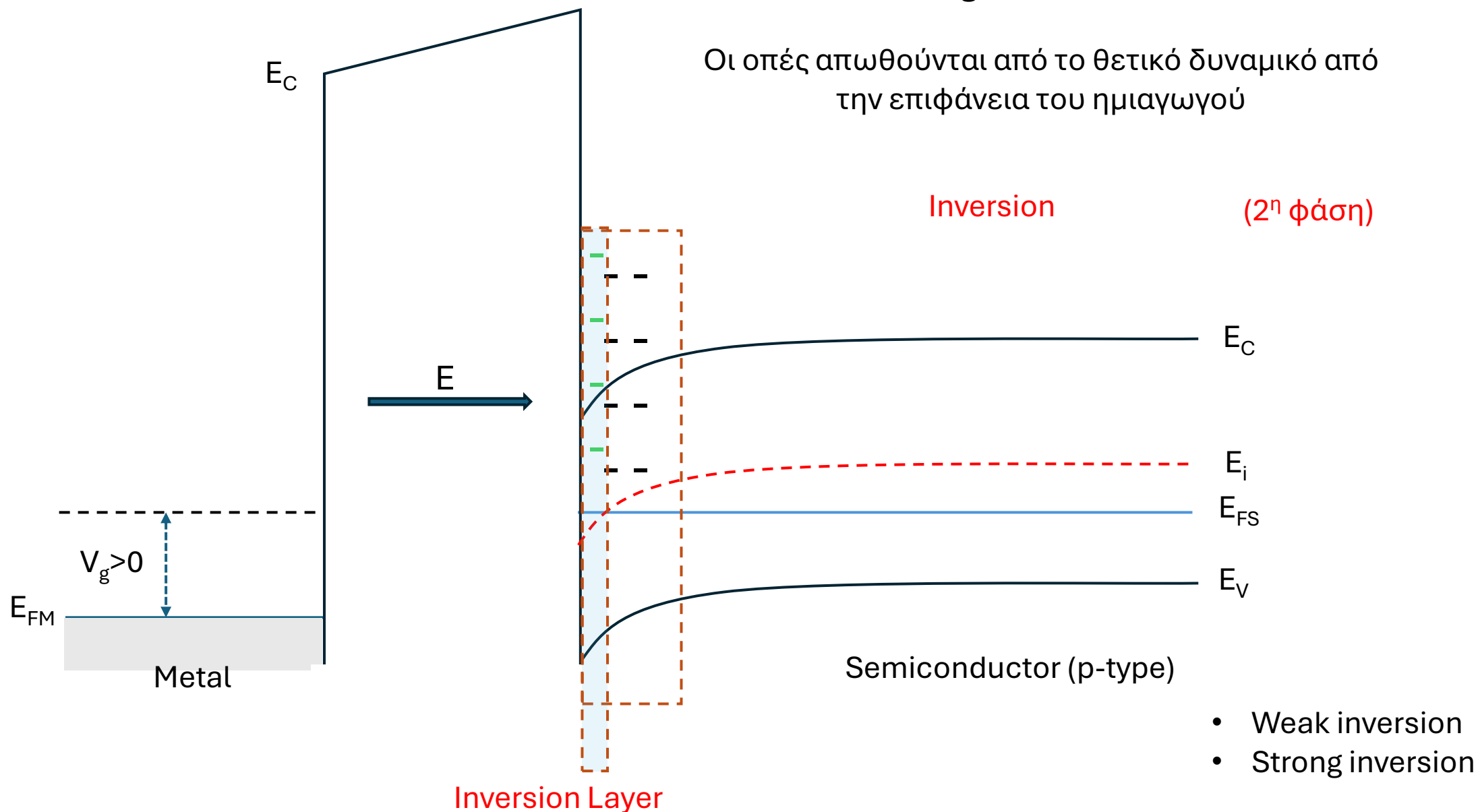
$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_{FS}}{kT}\right)$$



Ενεργειακό διάγραμμα δομής Metal-Insulator(Oxide)-Semiconductor (MIS/MOS)

$$V_g > 0$$

Εκτός Θ.Ι



Weak inversion

Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στην επιφάνεια **παραμένει μικρότερη** από τη συγκέντρωση των οπών στο βάθος του ημιαγωγού

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_{FS} - E_i}{kT}\right)$$

$$n_{\text{Surface}} < p_{\text{Bulk}} = N_A$$

Strong inversion

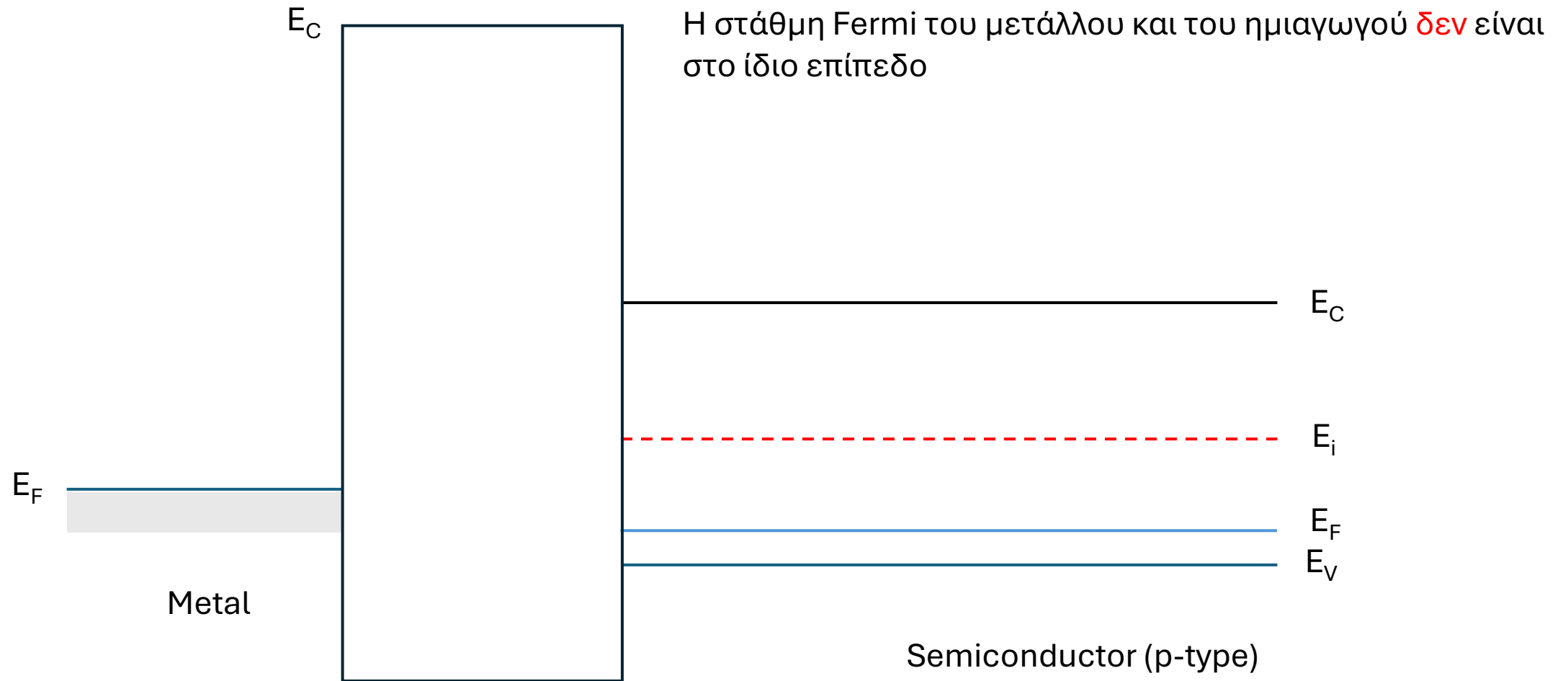
Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στην επιφάνεια **γίνεται μεγαλύτερη** από τη συγκέντρωση των οπών στο βάθος του ημιαγωγού

$$n_{\text{Surface}} > p_{\text{Bulk}} = N_A$$

Ενεργειακό διάγραμμα δομής Metal-Insulator(Oxide)-Semiconductor (MIS/MOS)

Στη γενική περίπτωση $\phi_M \neq \phi_S$

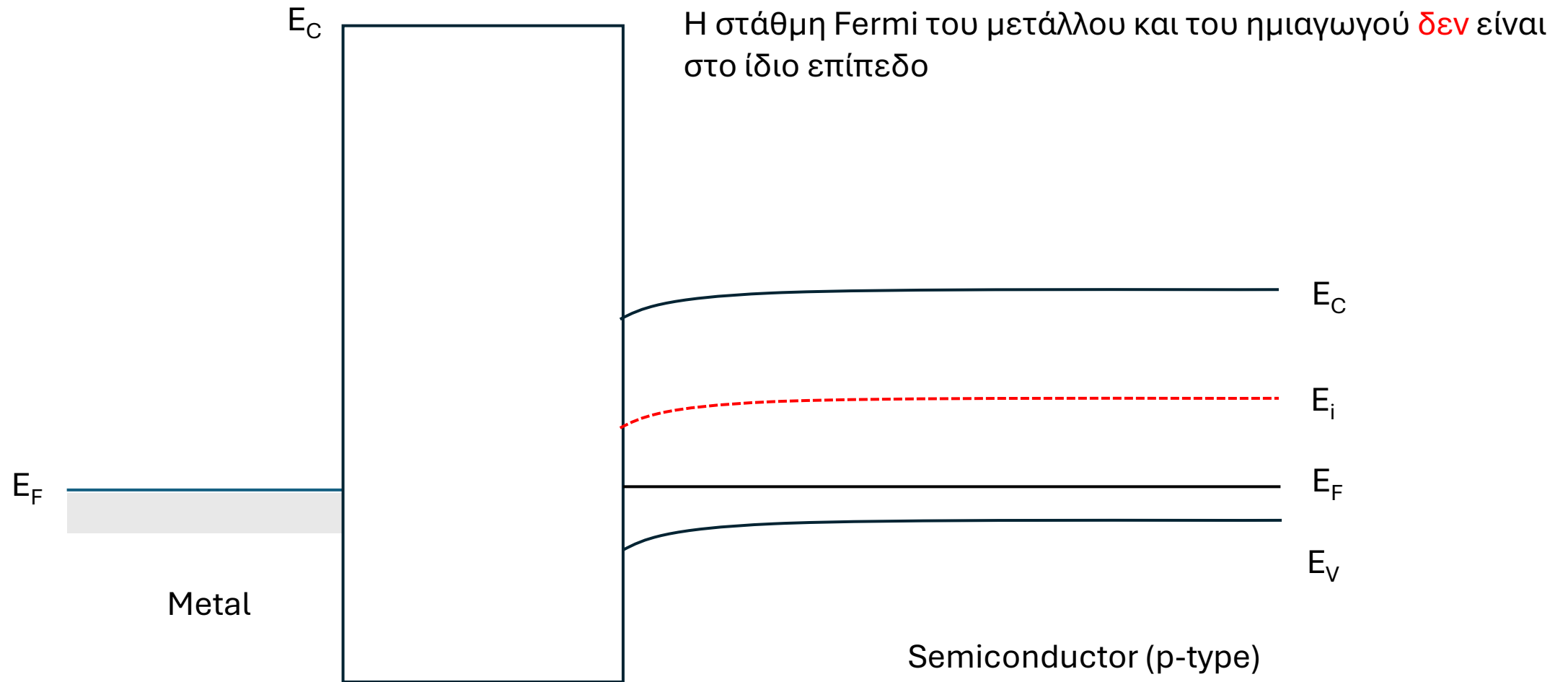
Θ.Ι



Ενεργειακό διάγραμμα δομής Metal-Insulator(Oxide)-Semiconductor (MIS/MOS)

Στη γενική περίπτωση $\phi_M \neq \phi_S$

Θ.Ι



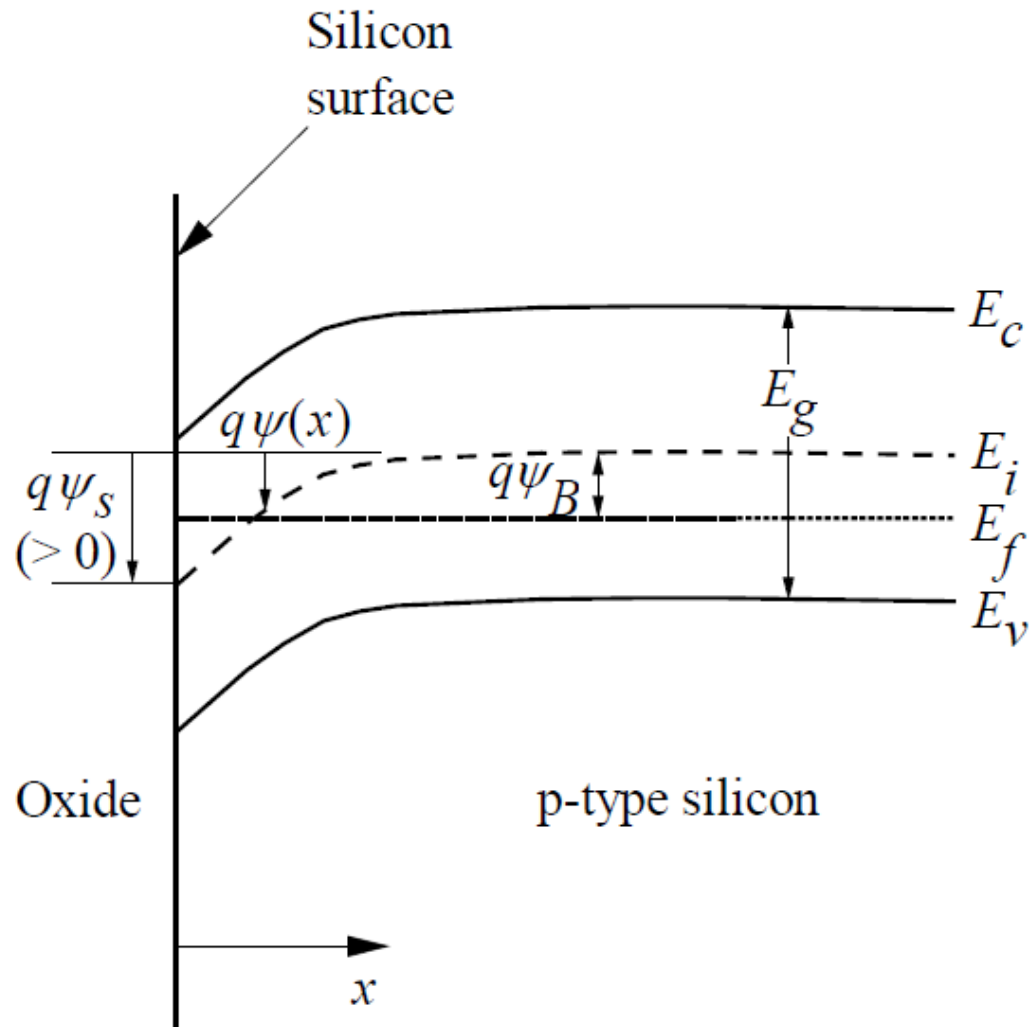
Με εφαρμογής μίας τάσης $V_{g=}V_{FB}$ μπορώ να επιτύχω οι ζώνες να είναι οριζόντιες (**Flat-Band**)

Επίλυση εξίσωσης Poisson στη δομή MIS/MOS

$$\psi_i(x) = -\frac{E_i(x)}{q}$$

$$\psi(x) = \psi_i(x) - \psi_i(x=\infty)$$

Το $\psi(x)$ είναι θετικό όταν οι στάθμες γέρνουν προς τα κάτω



Συνοριακή συνθήκη

$$\psi(0) = \psi_s$$

ψ_s : Surface potential

$$\psi(\infty) = 0$$

Επίλυση εξίσωσης Poisson στη δομή MIS/MOS

$$\frac{d^2\psi(x)}{d^2x} = -\frac{dE}{dx} = -\frac{q}{\epsilon_s} \cdot [p(x) - n(x) - N_A^-]$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_{Fp}}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{-q\phi_i + q\phi_F}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{q\psi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{-q\psi}{kT}\right) = p_o \exp\left(\frac{-q\psi}{kT}\right)$$

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_i}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{-q\phi_F + q\phi_i}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{q\psi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{q\psi}{kT}\right) = n_o \exp\left(\frac{q\psi}{kT}\right)$$

Από ουδετερότητα φορτίου στο όγκο του
ημιαγωγού έχω



$$p_o = n_o + N_A^-$$

$$N_A^- = p_o - p_o$$

$$\frac{d^2\psi(x)}{d^2x} = -\frac{q}{\epsilon_s} \cdot \left[p_o \left(e^{-\frac{q\psi}{kT}} - 1 \right) - n_o \left(e^{\frac{q\psi}{kT}} - 1 \right) \right]$$

Αν θεωρήσουμε ότι $N_A \gg n_i$ έχουμε

$$\frac{d^2\psi(x)}{d^2x} = -\frac{q}{\epsilon_s} \cdot \left[N_A \left(e^{-\frac{q\psi}{kT}} - 1 \right) - \frac{n_i^2}{N_A} \left(e^{\frac{q\psi}{kT}} - 1 \right) \right]$$



$$\epsilon^2 = \left(\frac{d\psi}{dx} \right)^2 = \frac{2kTN_A}{\epsilon_{Si}} \left[\left(e^{-\frac{q\psi}{kT}} + \frac{q\psi}{kT} - 1 \right) + \frac{n_i^2}{N_A^2} \left(e^{\frac{q\psi}{kT}} - \frac{q\psi}{kT} - 1 \right) \right]$$

Στην επιφάνεια του ημιαγωγού ($x=0$) ισχύει $\mathcal{E}(x=0) = \mathcal{E}_s$ και $\psi(x=0) = \psi_s$

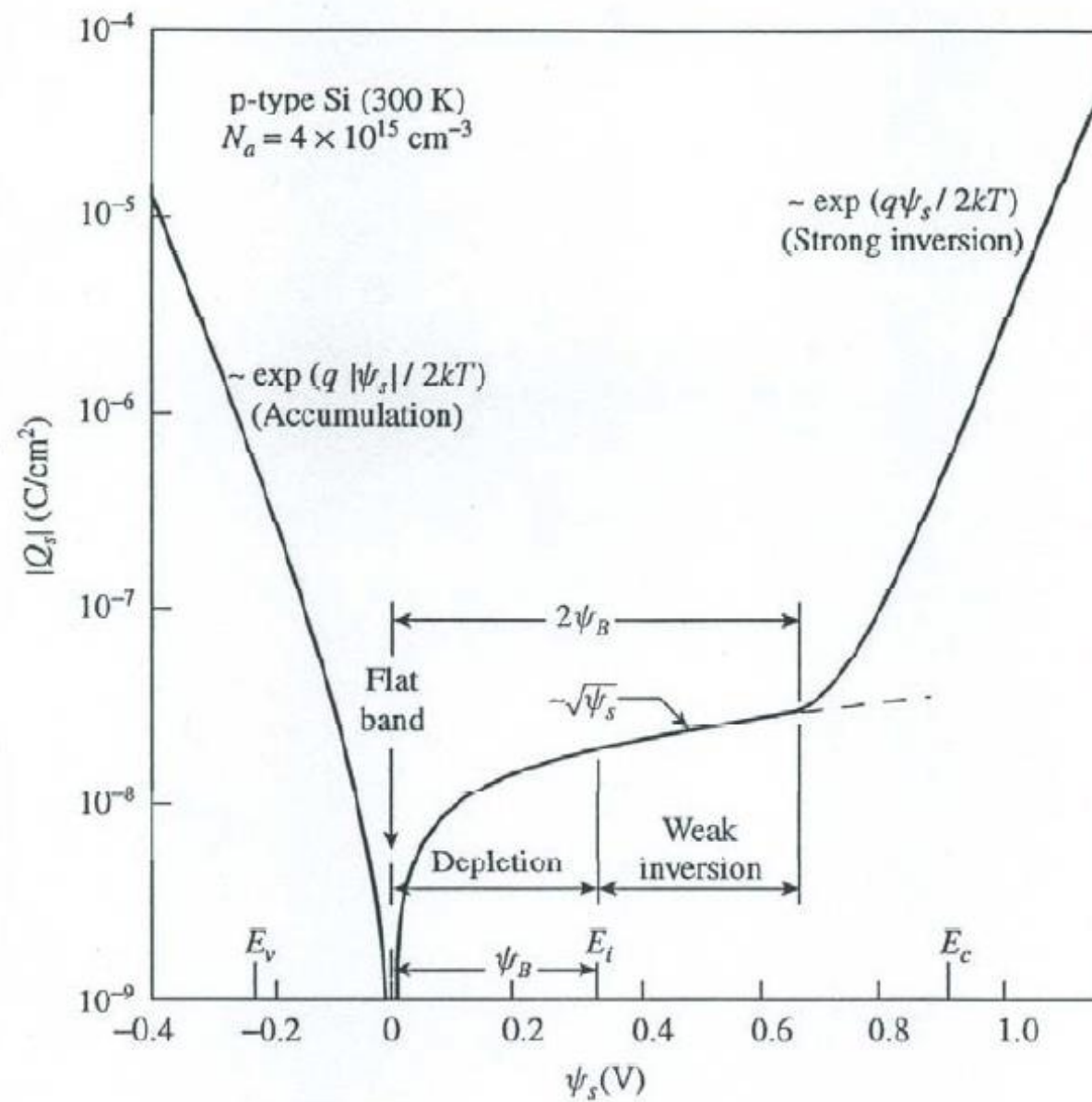
Εφαρμόζω το νόμο του Gauss για τις θέσεις $x=0$ και $x=\infty$



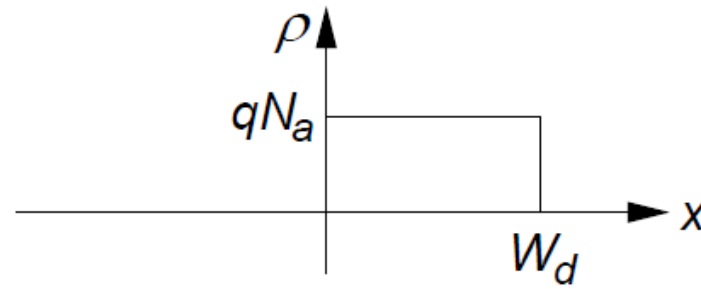
Το συνολικό φορτίο στο ημιαγωγό δίνεται από τη σχέση

$$Q_S = -\epsilon_{Si}\mathcal{E}_s = \pm\sqrt{2\epsilon_{Si}kTN_A} \left[\left(e^{-\frac{q\psi_s}{kT}} + \frac{q\psi_s}{kT} - 1 \right) + \frac{n_i^2}{N_A^2} \left(e^{\frac{q\psi_s}{kT}} - \frac{q\psi_s}{kT} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Εξάρτηση φορτίου από το επιφανειακό δυναμικό

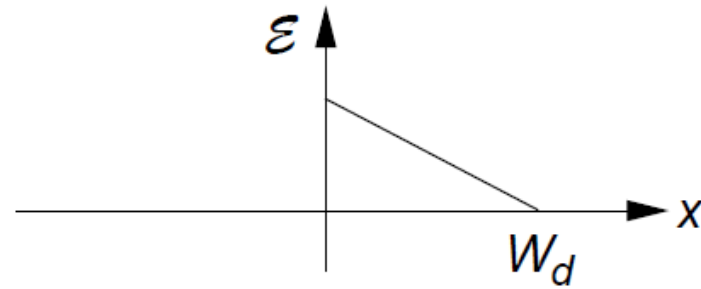


Depletion approximation



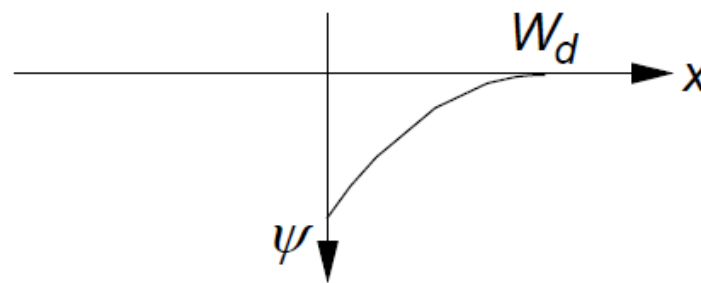
$$Q_d = qN_a W_d$$

$$\mathcal{E} = qN_a(W_d - x)/\epsilon_{si}$$



$$\psi = qN_a(W_d - x)^2/2\epsilon_{si}$$

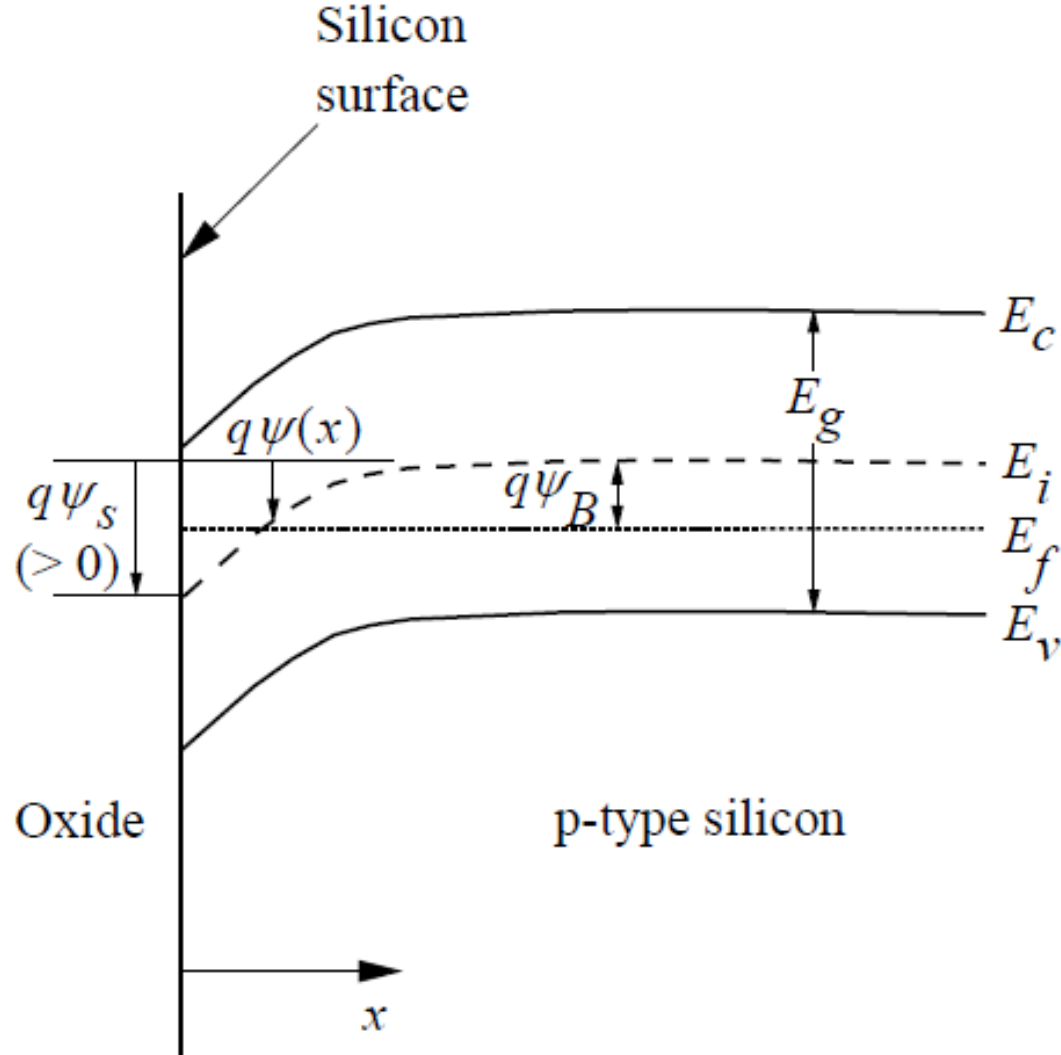
$$\Rightarrow \psi_s = qN_a W_d^2/2\epsilon_{si}$$



$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_{si}\psi_s}{qN_a}}$$

$$\psi = \psi_s \left(1 - \frac{x}{W_d}\right)^2$$

Condition for strong inversion



$$\psi_s(inv) = 2\psi_B = 2 \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right)$$

i.e., $(n_i^2/N_a^2)\exp(q\psi_s/kT) = 1$.

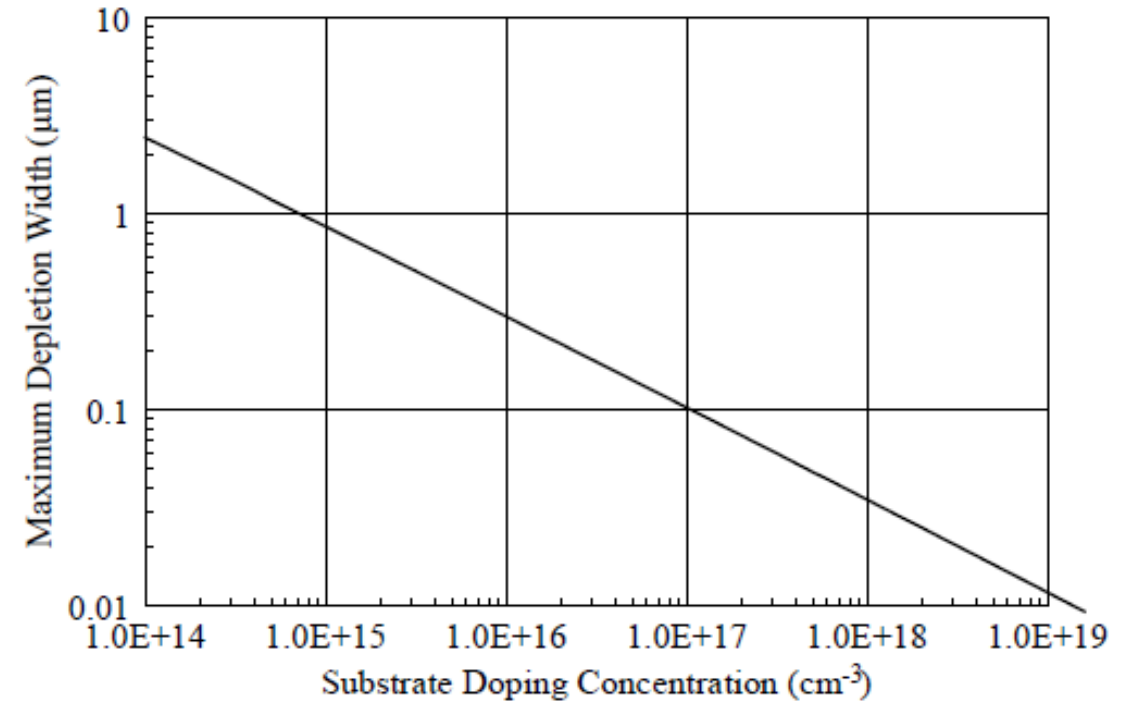
And the electron concentration at the surface equals the hole concentration in the bulk Si.

Maximum depletion width

In contrast to p-n junctions, W_d reaches a maximum value W_{dm} at the onset of strong inversion when

$$\psi_s = 2\psi_B = 2(kT/q)\ln(N_a/n_i):$$

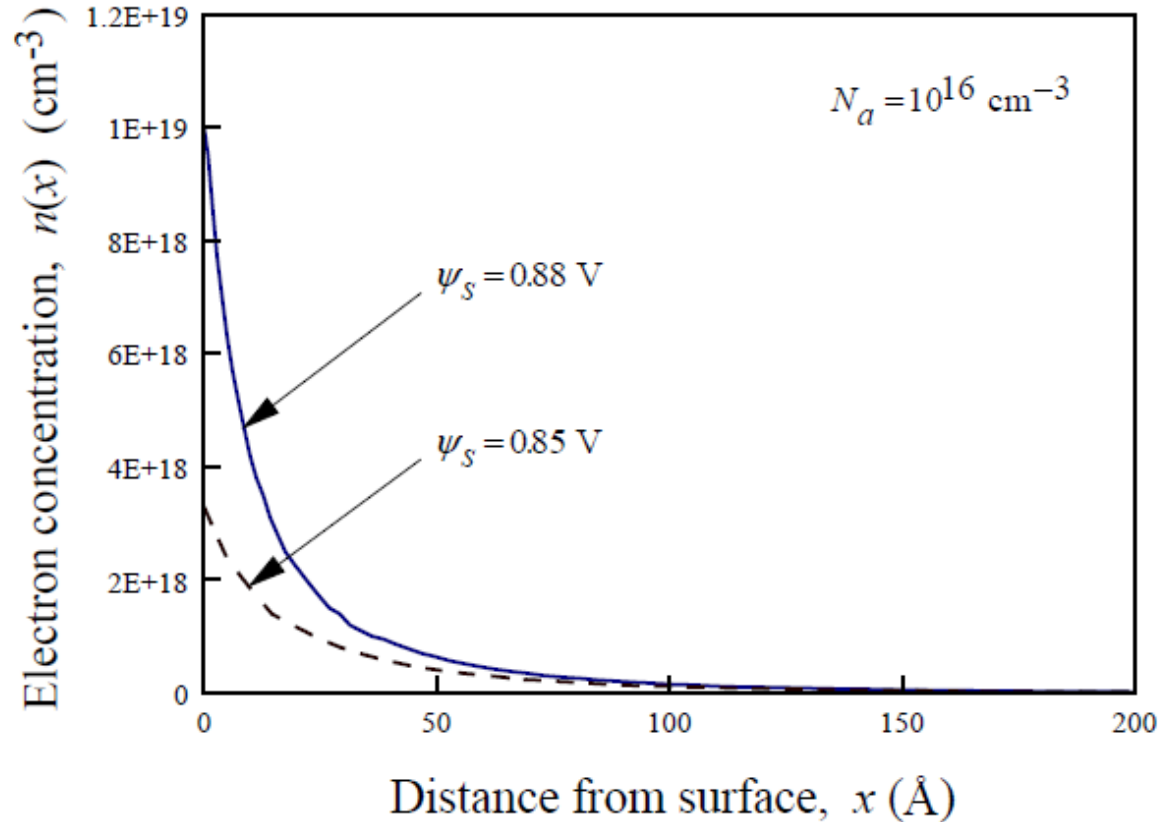
$$W_{dm} = \sqrt{\frac{4\epsilon_{si}kT\ln(N_a/n_i)}{q^2N_a}}$$



This defines the threshold condition of a MOSFET. W_{dm} also plays a key role in the short-channel scaling of a MOSFET, namely, $L_{min} \propto W_{dm}$.

Strong inversion

$$\frac{d\psi}{dx} = -\sqrt{\frac{2kTN_a}{\epsilon_{si}} \left(\frac{q\psi}{kT} + \frac{n_i^2}{N_a^2} e^{q\psi/kT} \right)}$$



Charge per area:

$$Q_i = -\sqrt{\frac{2\epsilon_{si}kTn_i^2}{N_a}} e^{q\psi_s/2kT}$$

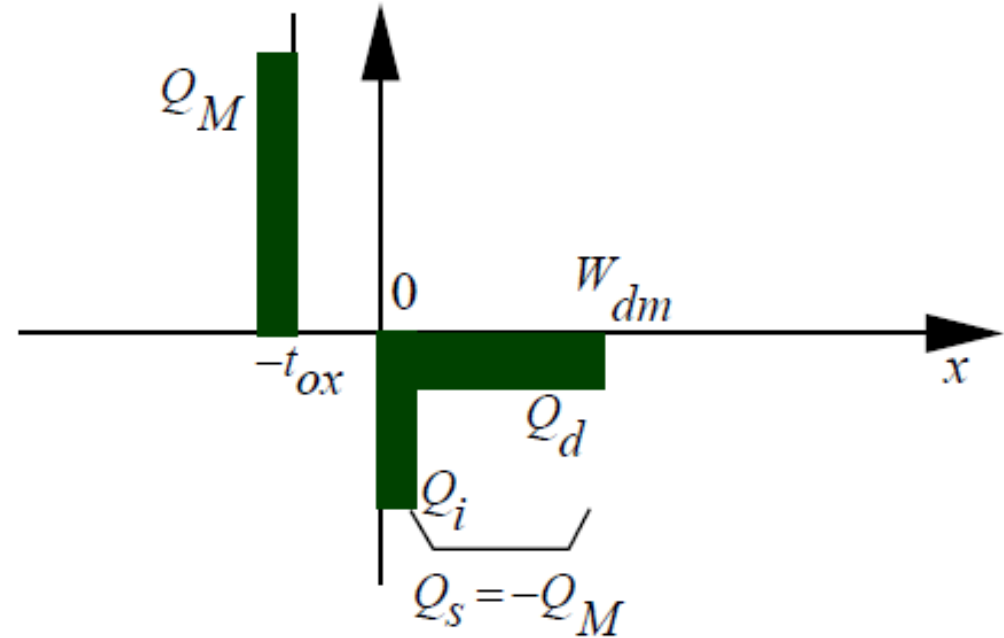
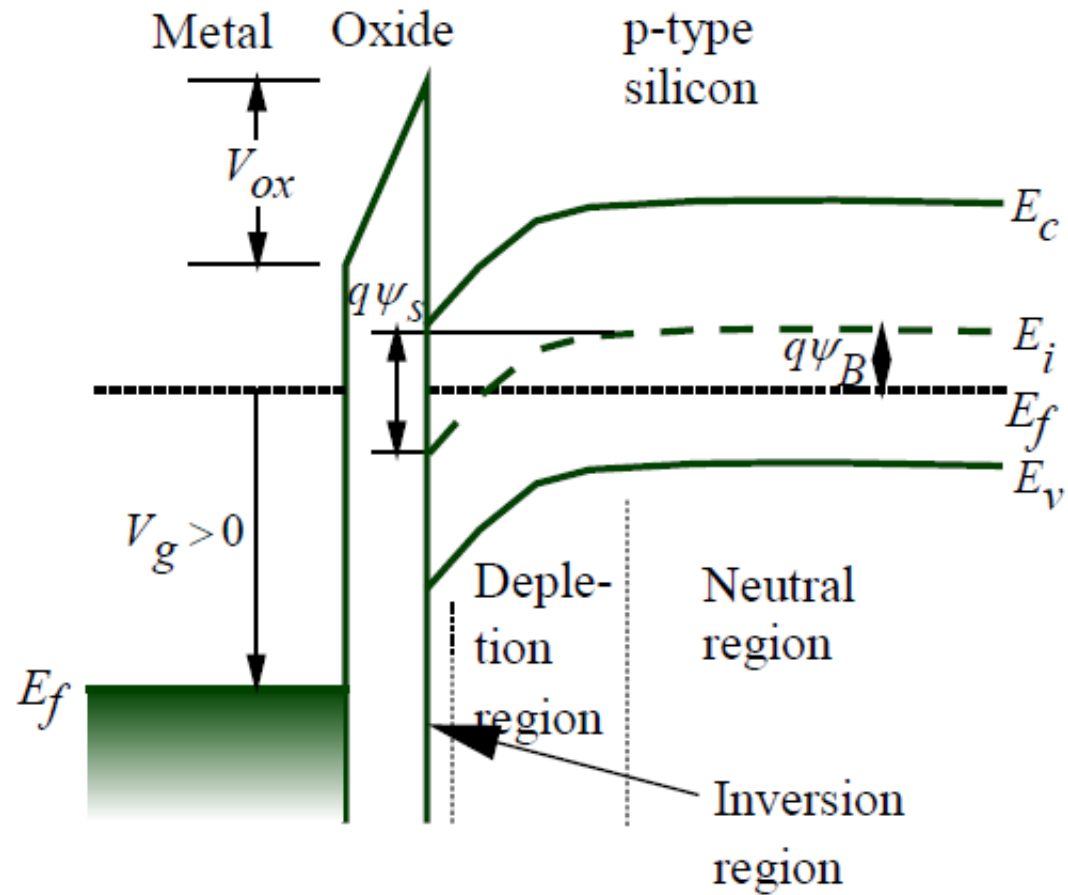
Electron conc. at surface:

$$n(0) = \frac{n_i^2}{N_a} e^{q\psi_s/kT}$$

Inversion layer thickness:

$$Q_i/qn(0) = 2\epsilon_{si}kT/qQ_i$$

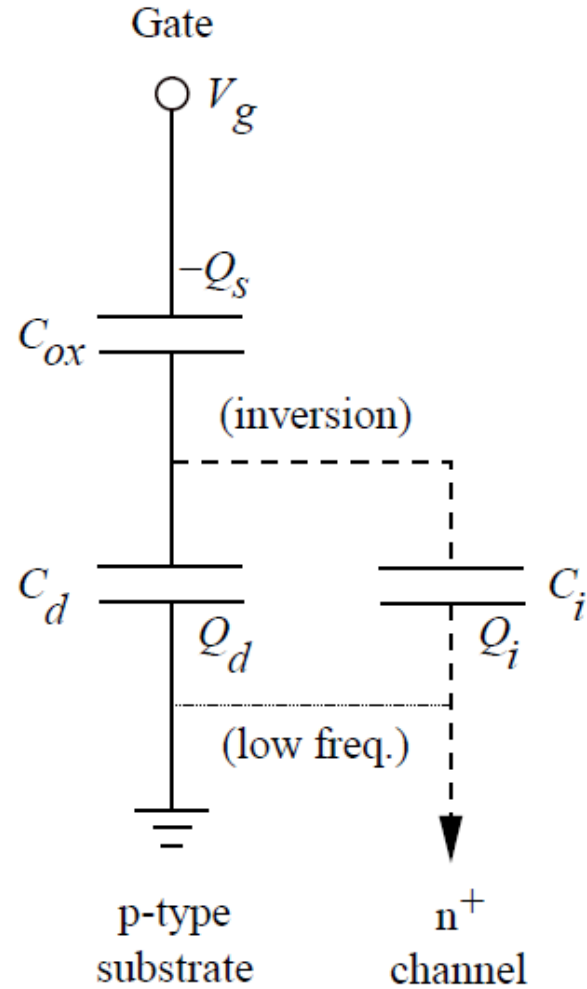
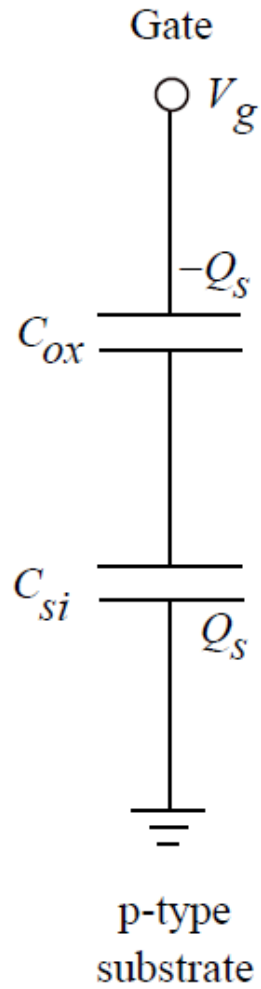
Χωρητικότητα στη δομή MIS/MOS



$$V_g = V_{ox} + \psi_s = -\frac{Q_s}{C_{ox}} + \psi_s$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

Χωρητικότητα στη δομή MIS/MOS



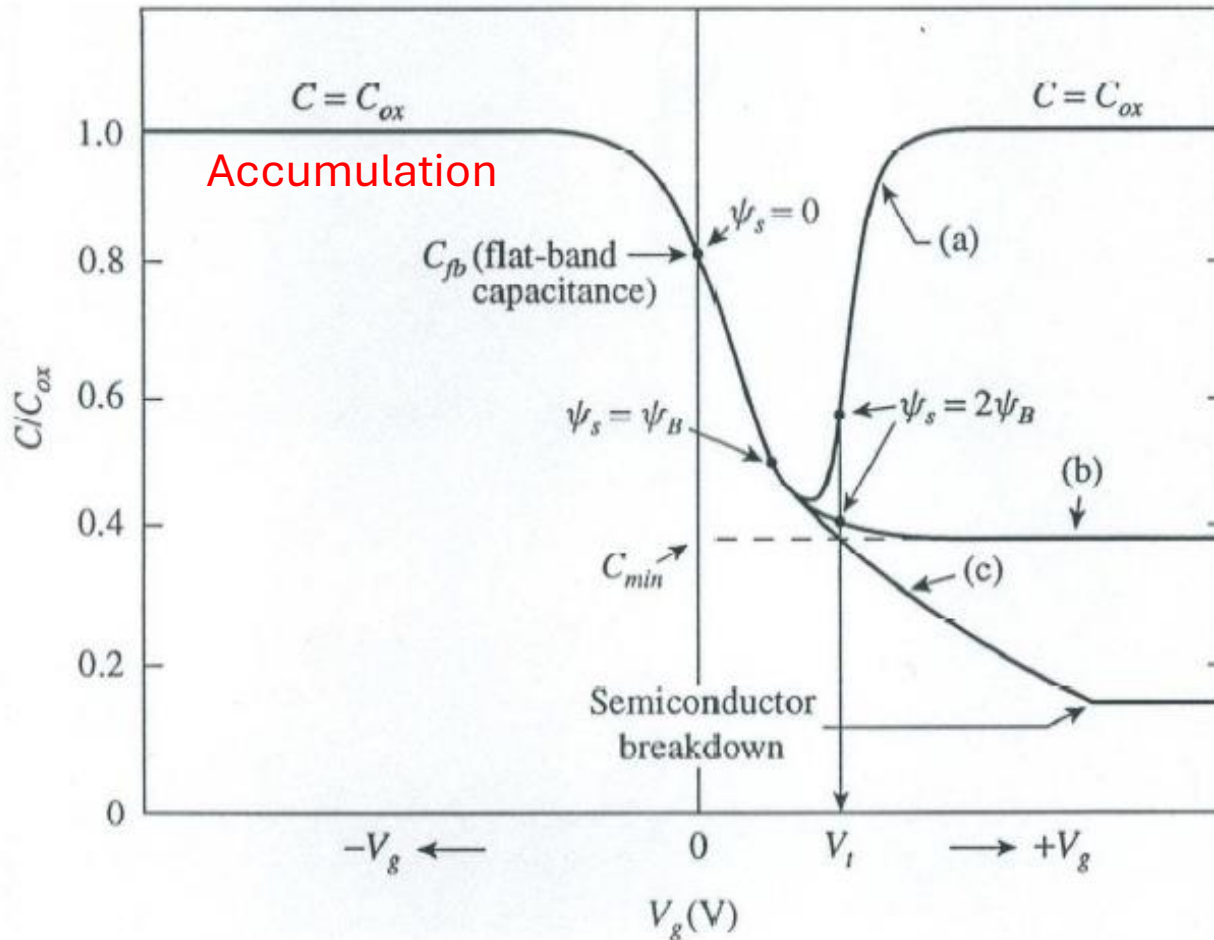
Small signal capacitance

$$C = \frac{d(-Q_s)}{dV_g}$$

$$C_{si} = \frac{d(-Q_s)}{d\psi_s}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{C} &= \frac{1}{C_{ox}} + \frac{d\psi_s}{d(-Q_s)} \\ &= \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{si}} \end{aligned}$$

Χωρητικότητα στη δομή MIS/MOS

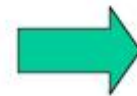


a) Low frequency or quasistatic

b) High frequency

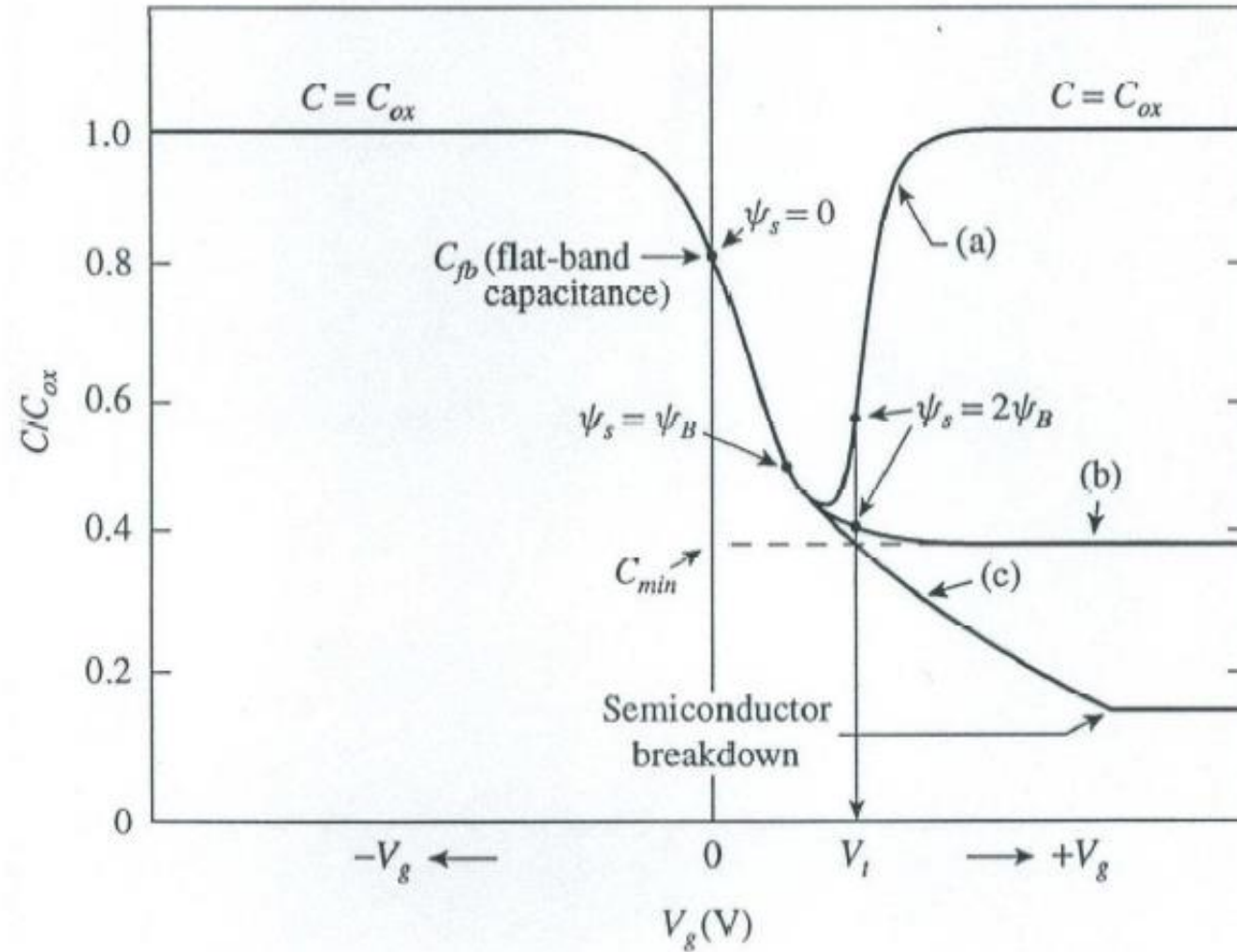
c) Deep depletion

■ In accumulation, $Q_s \propto \exp(-q\psi_s/2kT)$,
so $C_{si} = -dQ_s/d\psi_s = (q/2kT)Q_s$
 $= (q/2kT)C_{ox}|V_g - \psi_s|$.



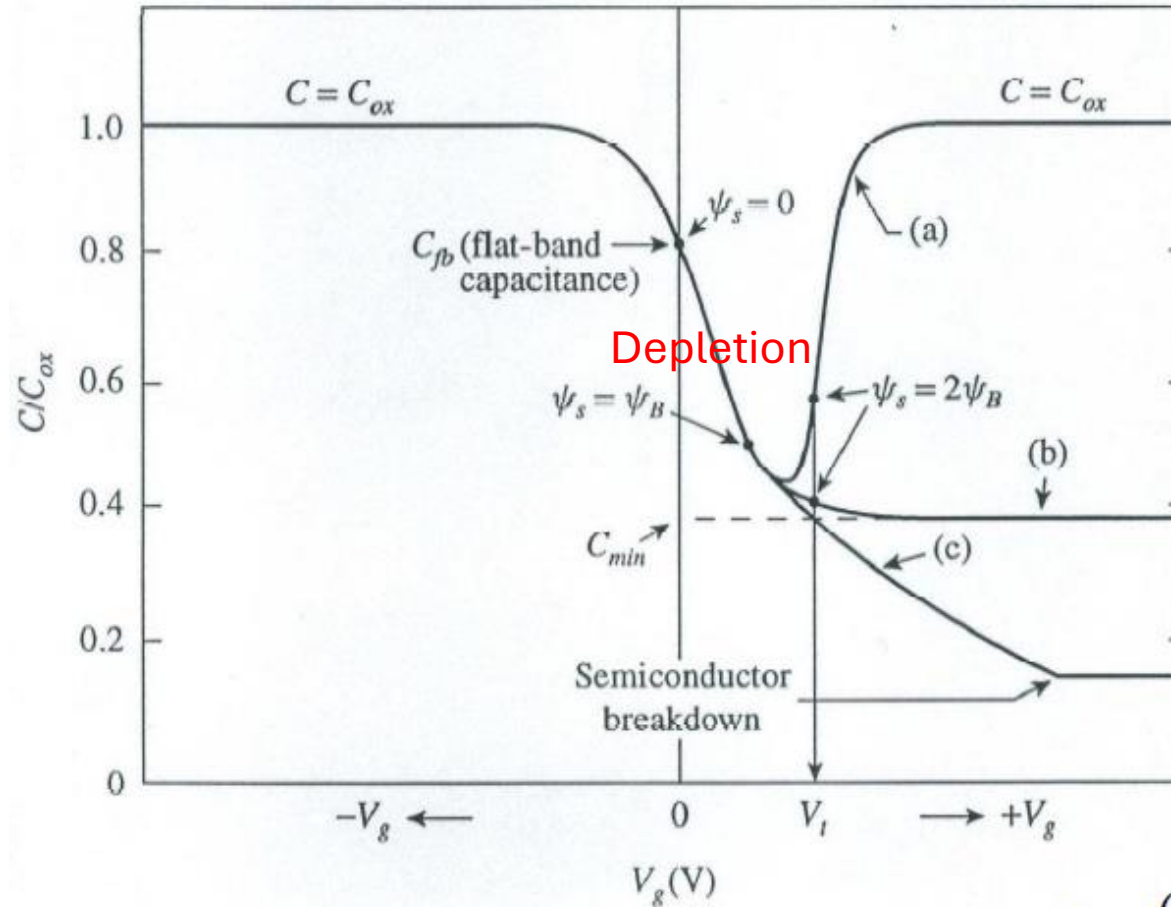
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} \left[1 + \frac{2kT/q}{|V_g - \psi_s|} \right]$$

Χωρητικότητα στη δομή MIS/MOS



- At flatband voltage, $q\psi_s/kT \ll 1$, therefore, $Q_s = -(\epsilon_{si}q^2N_a/kT)^{1/2}\psi_s$. $\rightarrow \frac{1}{C_{fb}} = \frac{1}{C_{ox}} + \sqrt{\frac{kT}{\epsilon_{si}q^2N_a}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{L_D}{\epsilon_{si}}$

Χωρητικότητα στη δομή MIS/MOS



■ In depletion,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_d}$$

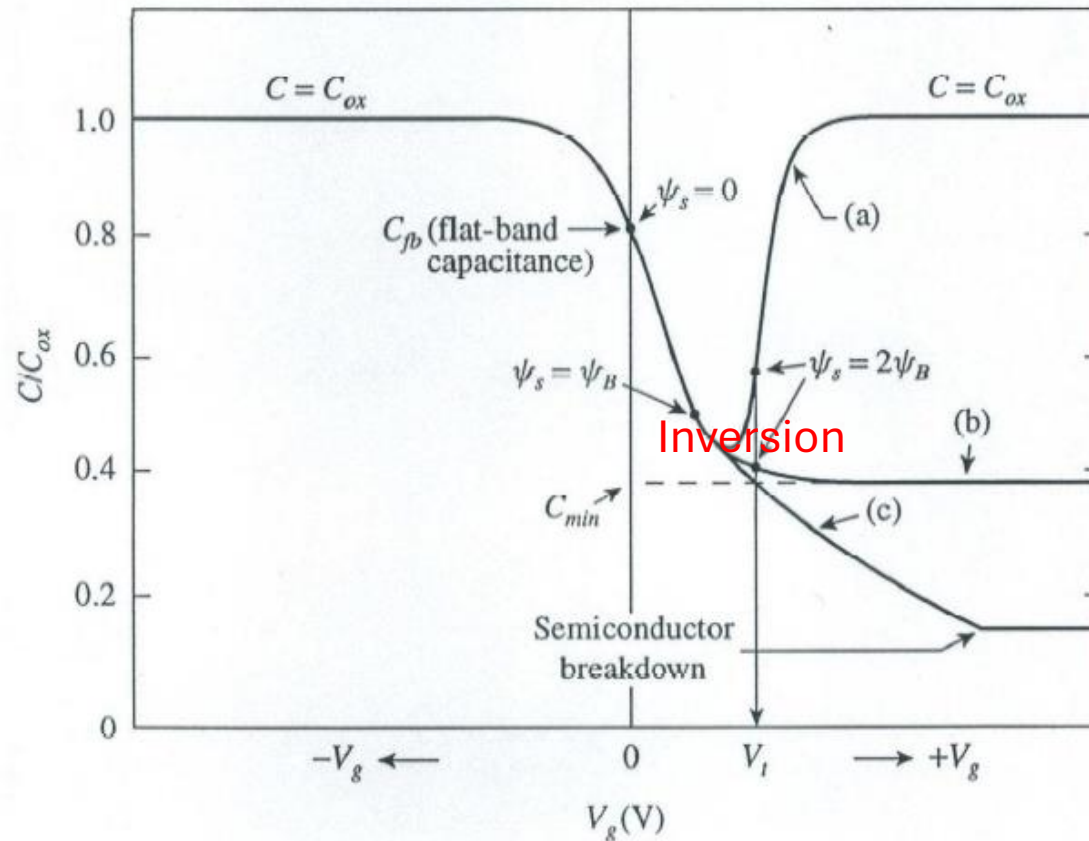
where

$$C_d = \frac{d(-Q_d)}{d\psi_s} = \sqrt{\frac{\epsilon_{si} q N_a}{2\psi_s}} = \frac{\epsilon_{si}}{W_d}$$

Note that

$$V_g = \frac{q N_a W_d}{C_{ox}} + \psi_s = \frac{\sqrt{2\epsilon_{si} q N_a \psi_s}}{C_{ox}} + \psi_s$$

Χωρητικότητα στη δομή MIS/MOS



Like accumulation,
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} \left[1 + \frac{2kT/q}{|V_g - \psi_s|} \right]$$

- Inversion, high freq.: Inversion charge cannot respond,

$$\frac{1}{C_{min}} = \frac{1}{C_{ox}} + \sqrt{\frac{4kT \ln(N_a / n_i)}{\epsilon_{si} q^2 N_a}}$$

- Inversion, low freq., or connected to a reservoir:

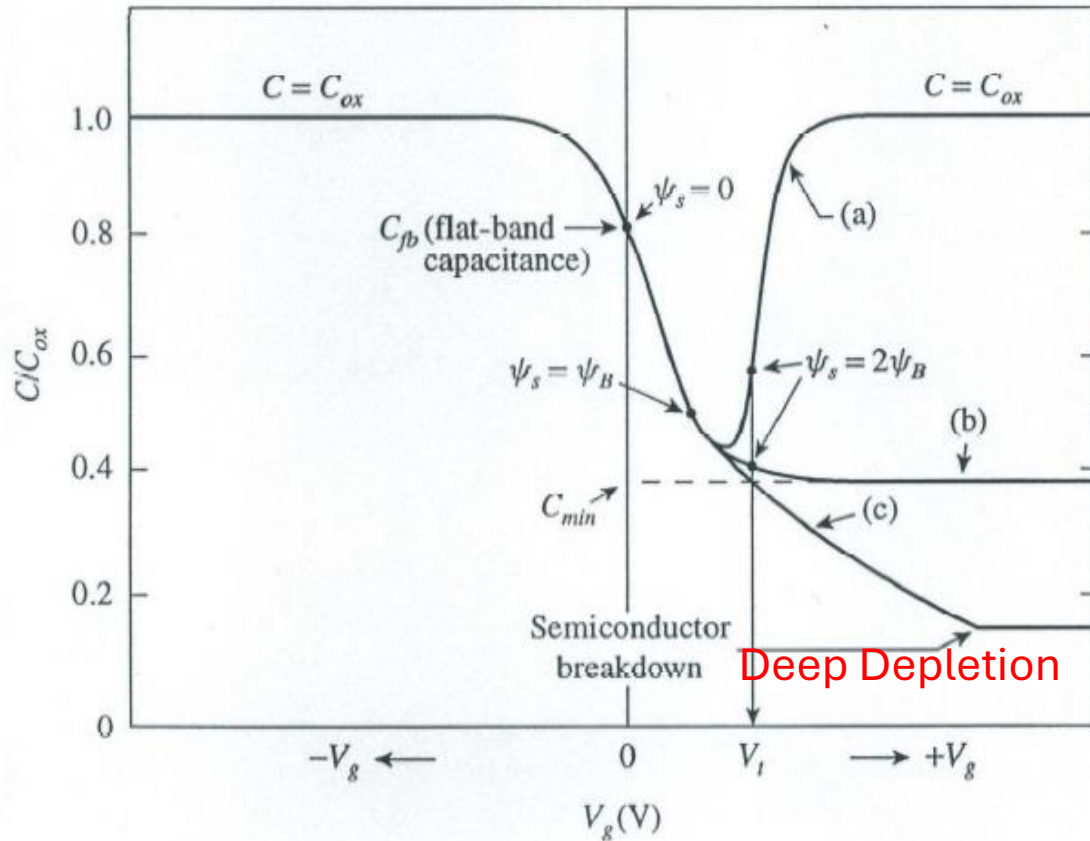
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_d + C_i}$$

where

$$C_i = \frac{d(-Q_i)}{d\psi_s} = \frac{|Q_i|}{2kT/q}$$

is the inv. layer cap.

Χωρητικότητα στη δομή MIS/MOS



Η καμπύλη CV υπολογίζεται εφαρμόζοντας μία εναλλασσόμενη τάση (ac) πάνω σε μία σταθερή τάση που αυξάνει γραμμικά (ramp)

Όταν ο ρυθμός μεταβολής της σταθερής τάσης είναι πιο γρήγορος (μικρότερος χρόνος) από το χρόνο αντίδρασης των φορέων μειονότητας τότε έχουμε deep depletion.

Η κατάσταση αυτή είναι ασταθής.