

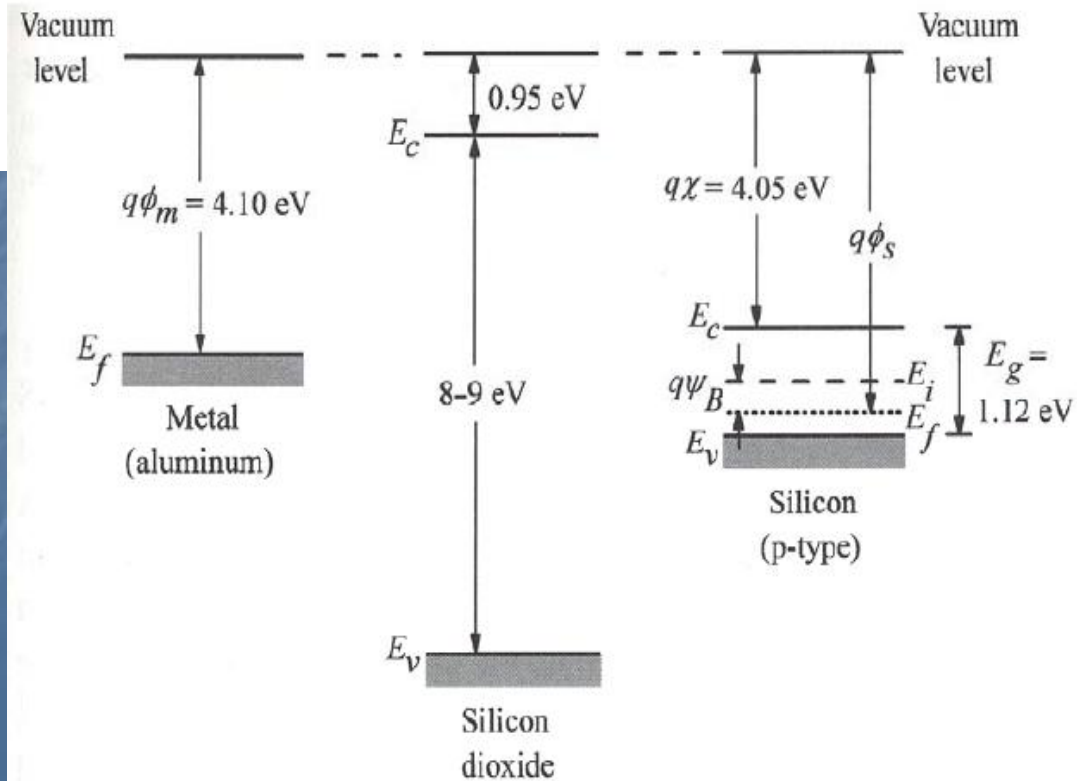
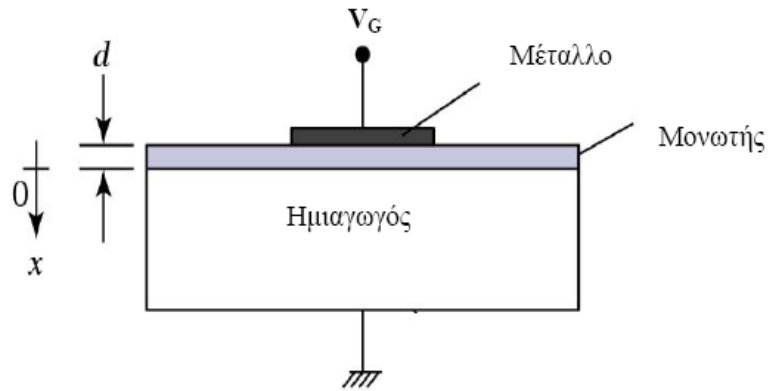


Η ΙΔΑΝΙΚΗ ΕΠΑΦΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥ/ ΜΟΝΩΤΗ / ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ ΚΑΙ ΤΟ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ MOSFET

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ
Αναπληρωτής Καθηγητής
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ



1. Δομή MIS





Πίνακας 9.1. Έργα εξόδου και ηλεκτροσυνάφειες υλικών της Μικροηλεκτρονικής.

Material	Work Function φ_m (eV)	Electron Affinity χ_s (eV)
Al	4.1	
Pt	5.7	
PtSi	5.4	
W	4.6	
WSi ₂	4.7	
Si		4.05
GaAs		4.07
Ge		4.0
SiO ₂		1
N ⁺ -Si	4.05	4.05
P ⁺ -Si	5.17	4.05



2. Ιδανική Επαφή MIS

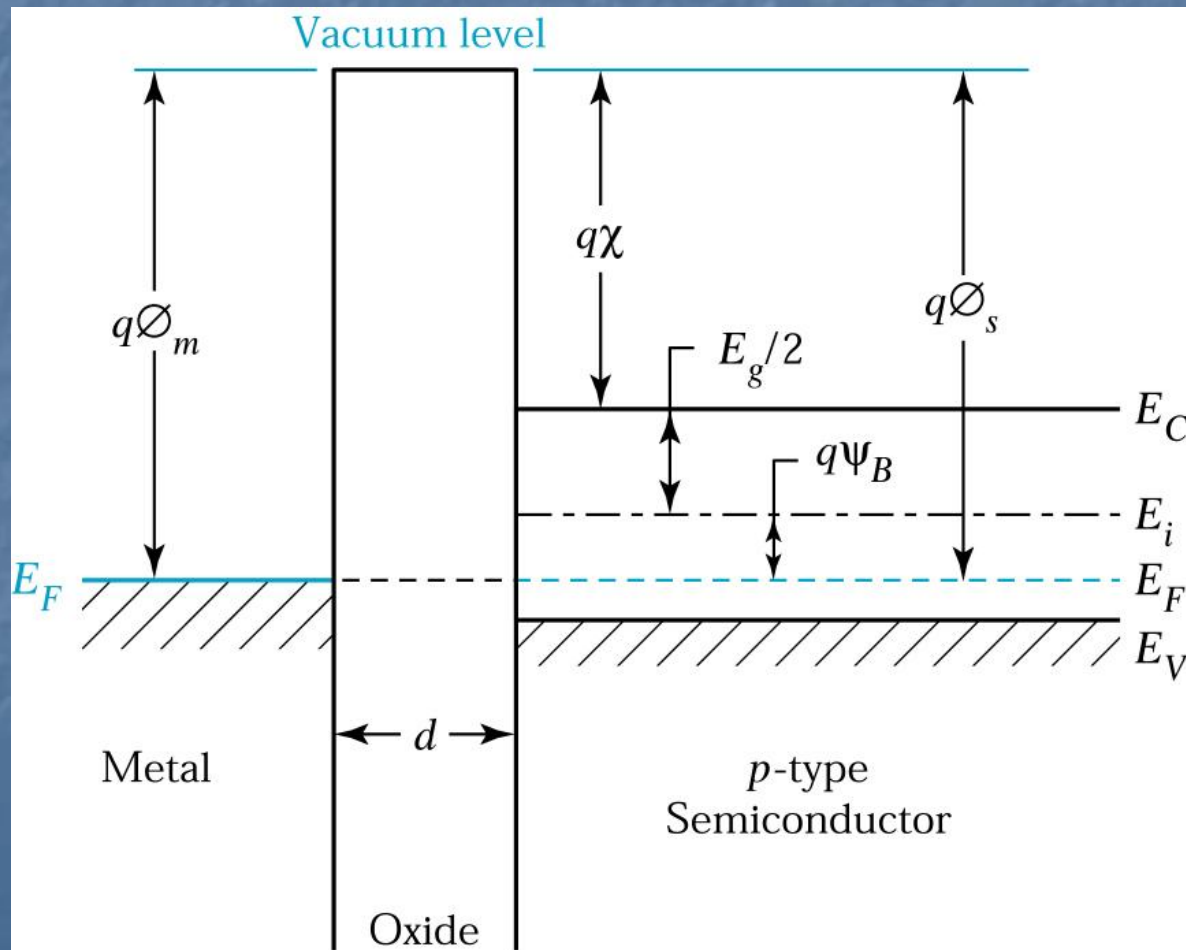
1^η συνθήκη υπάρξεως ιδανικής επαφής MIS. Δεν υπάρχει μεταφορά φορτίου διαμέσου του μονωτή υπό συνθήκες συνεχούς (dc) πόλωσης (ιδανικός μονωτής).

2^η συνθήκη υπάρξεως ιδανικής επαφής MIS. Υπό συνθήκες πόλωσης τα μόνα φορτία που εμφανίζονται στην επαφή βρίσκονται στην πλευρά του ημιαγωγού με ίσο και αντίθετο στο μέταλλο και στη διεπιφάνειά του με το μονωτή. Δηλαδή θεωρούμε ότι μέσα στον μονωτή δεν εμφανίζεται κανένα είδους φορτίου.



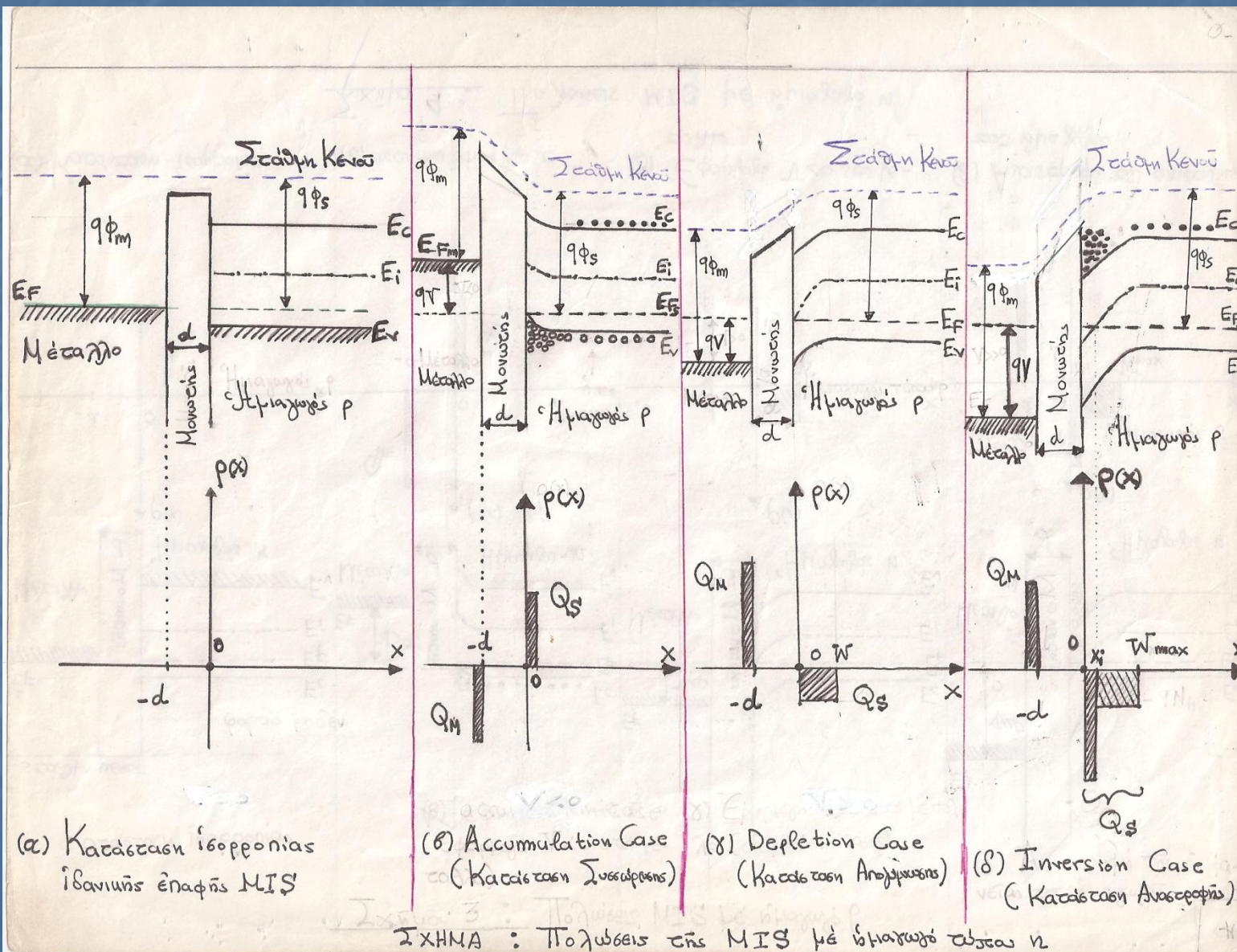
3^η συνθήκη υπάρξεως ιδανικής επαφής MIS για ημιαγωγό p-τύπου

$$|q_e|\phi_m - \left[|q_e|\chi + \frac{E_g}{2} + |q_e|\psi_B \right] = 0, \quad |q_e|\psi_B = E_i - E_{FS}$$



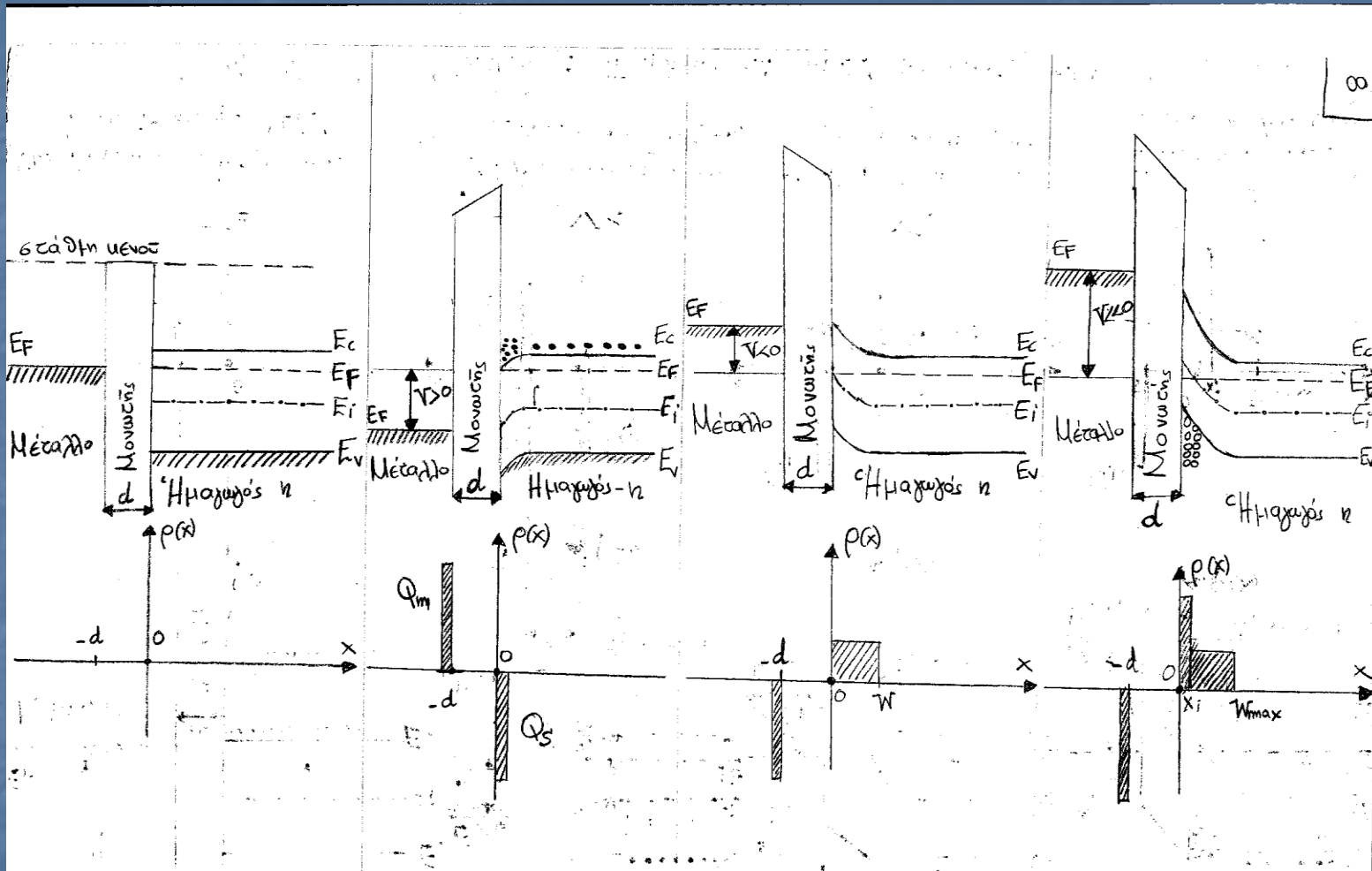


(β) Υπό πόλωση – Ημιαγωγός p





(γ) Υπό πόλωση – Ημιαγωγός n



(α) Κατάσταση ισορροπίας

(β) accumulation case

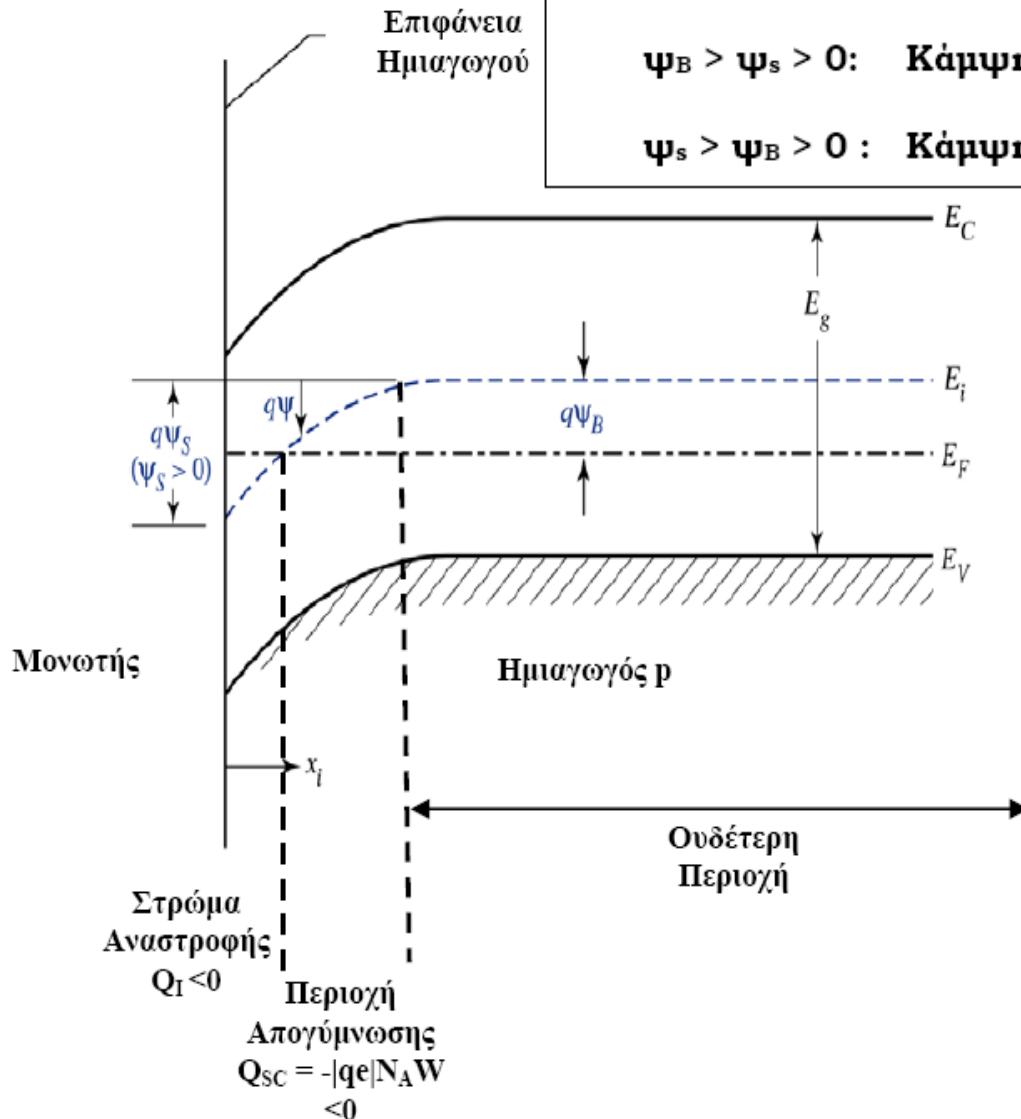
(γ) Έφαρση V_{co} στο μέταλλο

(δ) Αναστροφή επί επιφάνειας του ημιαγωγού

Σχήμα 4: Πόλωση MIS με ημιαγωγό n



- $\psi_s < 0$: Κάμψη των ζωνών προς τα πάνω (accumulation)
- $\psi_s = 0$: Συνθήκη επιπέδου ζωνών (flat-band)
- $\psi_B > \psi_s > 0$: Κάμψη των ζωνών προς τα κάτω (depletion)
- $\psi_s > \psi_B > 0$: Κάμψη των ζωνών προς τα κάτω (inversion)



3. Μαθηματική διαπραγμάτευση

$$\psi(x) = \frac{E_{i(\text{init})} - E_{i(\text{final})}}{|q_e|}$$

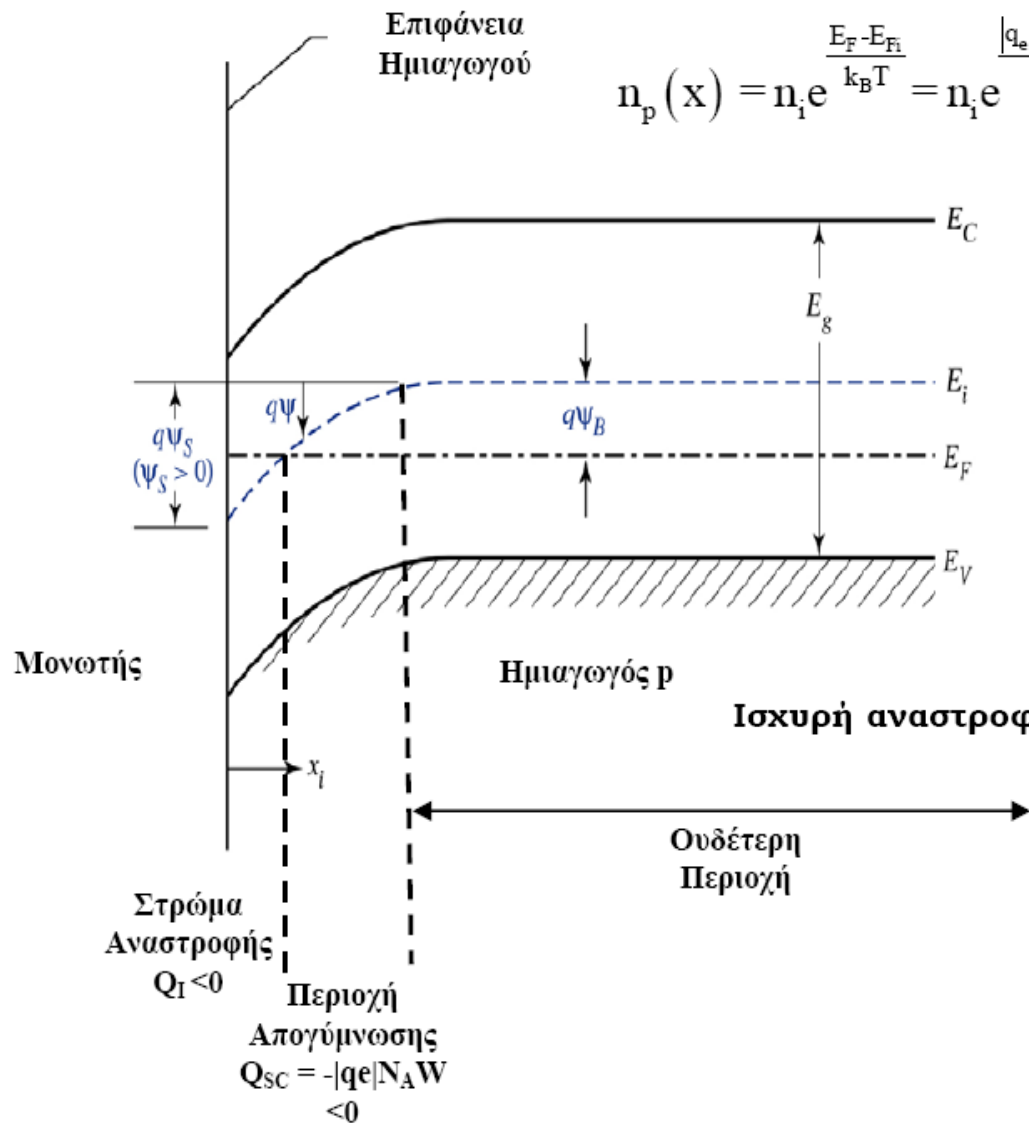
$$\psi_s(x) = \psi(x=0)$$



Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
 ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδικευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
 Φωτονική»

$$p_p(x) = n_i e^{\frac{E_{F_i} - E_F}{k_B T}} = n_i e^{\frac{|q_e|(\psi_B - \psi)}{k_B T}} = n_i e^{\frac{|q_e|\psi_B}{k_B T}} e^{-\frac{|q_e|\psi}{k_B T}} = N_A e^{-\frac{|q_e|\psi}{k_B T}} \quad (I)$$

$$n_p(x) = n_i e^{\frac{E_F - E_{F_i}}{k_B T}} = n_i e^{\frac{|q_e|(\psi - \psi_B)}{k_B T}} = n_i e^{\frac{|q_e|\psi_B}{k_B T}} e^{\frac{|q_e|\psi}{k_B T}} = \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{|q_e|\psi}{k_B T}} \quad (II)$$



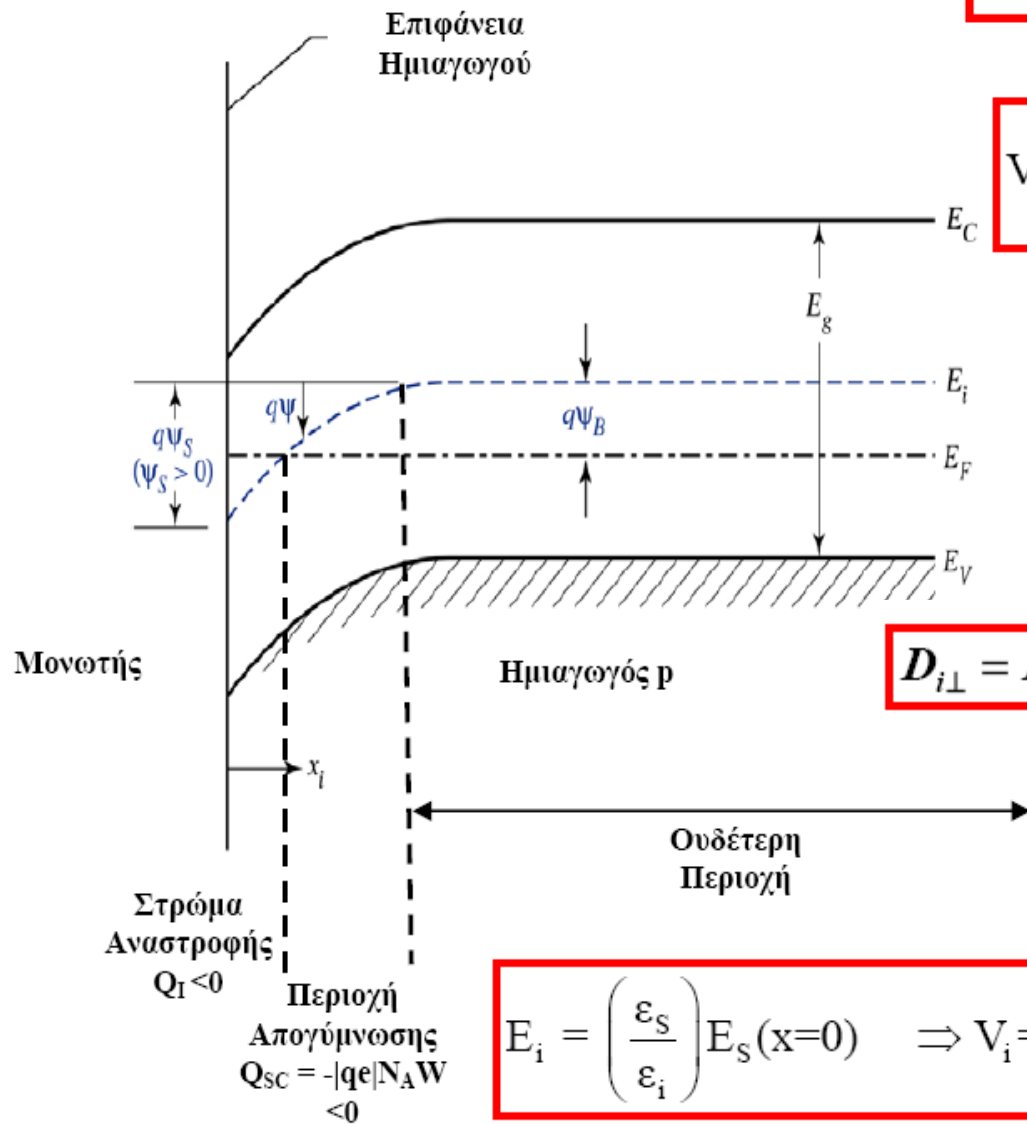
Ισχυρή αναστροφή $\Rightarrow n_{p_s} = n_p(x=0) = N_A \Rightarrow n_i e^{\frac{|q_e|[\psi_s(\text{inv}) - \psi_B]}{k_B T}} = n_i e^{\frac{|q_e|\psi_B}{k_B T}}$

$$\Rightarrow \psi_s(\text{inv}) \approx 2\psi_B = \frac{2k_B T}{|q_e|} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (III)$$



$$V_G = V_i + \psi_s \quad (IV)$$

$$V_i = - \int_{-d}^0 E_i dx = E_i d \quad (V)$$



$$D_{i\perp} = D_{s\perp} \Rightarrow \varepsilon_i E_i = \varepsilon_s E_s(x=0) \quad (VI)$$

$$E_i = \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_i} \right) E_s(x=0) \Rightarrow V_i = d \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_i} \right) E_s(x=0) = - \frac{Q_s}{\varepsilon_i} d = - \frac{Q_s}{C_i} \quad (VII)$$



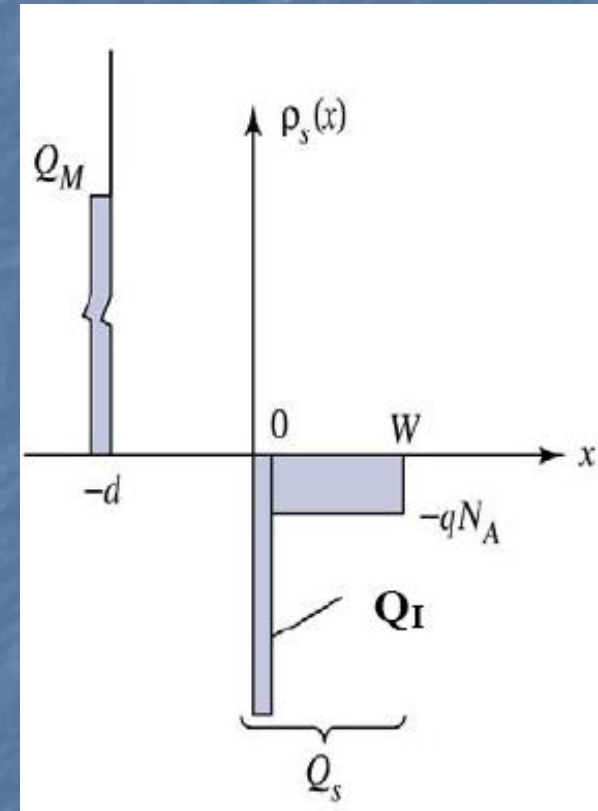
I. Depletion Approximation Model (Κατάσταση απογύμνωσης-Αναστροφής)

(A) Ως προς την περίπτωση απογύμνωσης :

1. Η περιοχή απογύμνωσης είναι περιοχή χωρίς ευκίνητα φορτία για τιμές της V_G κάτω από αυτές που προκαλούν αναστροφή.
2. Η περιοχή απογύμνωσης τερματίζεται απότομα σε απόσταση W από τη διεπιφάνεια μονωτή/ημιαγωγού, μετά την οποία ο ημιαγωγός βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας ($p_p = N_A$ και $np = n_i^2 / N_A$).

(B) Ως προς την περίπτωση αναστροφής :

1. Για να αρχίσει το φαινόμενο της αναστροφής θα πρέπει τουλάχιστον $\psi_s = 2\psi_B$
2. Κατά την αναστροφή η περιοχή απογύμνωσης εξακολουθεί να μην έχει ευκίνητα φορτία.
3. Όταν αρχίσει το φαινόμενο της αναστροφής η αύξηση του μήκους της περιοχής απογύμνωσης σταματά στην μέγιστη τιμή της W_{max} .
4. Από την στιγμή που η περιοχή απογύμνωσης σταματά να αυξάνεται, η κάμψη των ζωνών σταματά με περαιτέρω αύξηση της θετικής τάσης. Έτσι το ψ_s παραμένει πλέον αμετακίνητο από την τιμή που έχει κατά την έναρξη της αναστροφής $\psi_s = 2\psi_B$
5. Το στρώμα αναστροφής είναι αμελητέο σε σχέση με αυτό της απογύμνωσης και η παρουσία του δεν επηρεάζει την χωρική κατανομή του δυναμικού και του ηλεκτρικού πεδίου που καθορίζεται από την περιοχή απογύμνωσης.





Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»

ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδικευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών – Φωτονική»

Περίπτωση απογύμνωσης ($V_G > 0$). Ο υπολογισμός θα γίνει με την επίλυση της εξίσωσης Poisson στην περίπτωση απογύμνωσης :

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \frac{\rho_s(x)}{\epsilon_s} = \frac{-|q_e|N_A}{\epsilon_s} = \frac{|q_e|N_A}{\epsilon_s}, \text{ με οριακές συνθήκες } \begin{cases} \text{για } x=0 & \psi = \psi_s & \frac{d\psi}{dx} = 0 & (\alpha) \\ \text{για } x=W & \psi = 0 & \frac{d\psi}{dx} = 0 & (\beta) \end{cases}$$

$$\frac{d\psi}{dx} = \frac{|q_e|N_A}{\epsilon_s}(x-W) \quad (A1)$$



$$\psi(x) = \frac{|q_e|N_A}{2\epsilon_s}(x-W)^2 \quad (A2)$$

Το επιφανειακό δυναμικό του ημιαγωγού θα βρίσκεται από την παραπάνω έκφραση θέτοντας όπου $x = 0$. Άρα :

$$\psi_s = \frac{|q_e|N_A W^2}{2\epsilon_s}$$



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

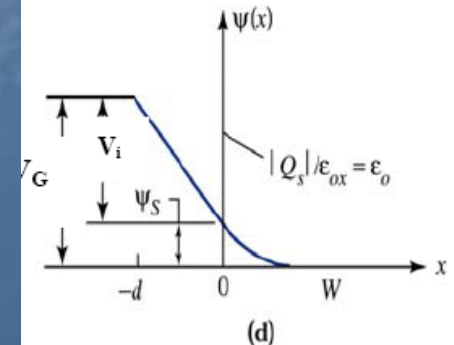
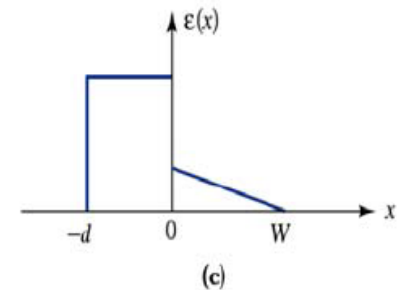
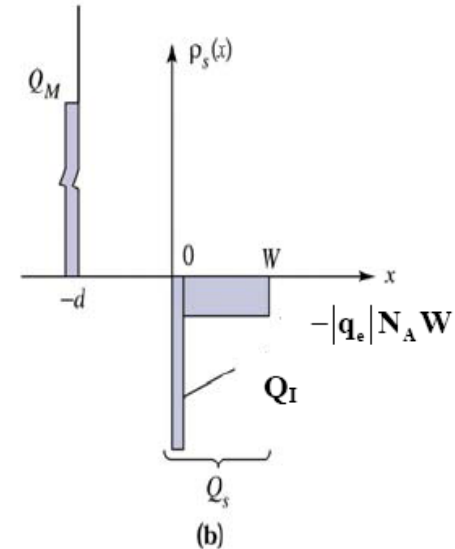


$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\psi_s}{|q_e|N_A}}$$

$$E(x) = \frac{|q_e|N_A}{\epsilon_s}(W-x) \quad (A5)$$

$$E_i = \frac{|Q_s|}{\epsilon_i}$$

$$V_i = E_i d = \frac{|Q_s|}{\epsilon_i} d \Rightarrow V_i = \frac{|Q_s|}{\epsilon_i} d = \frac{|q_e|N_A W}{C_i}$$



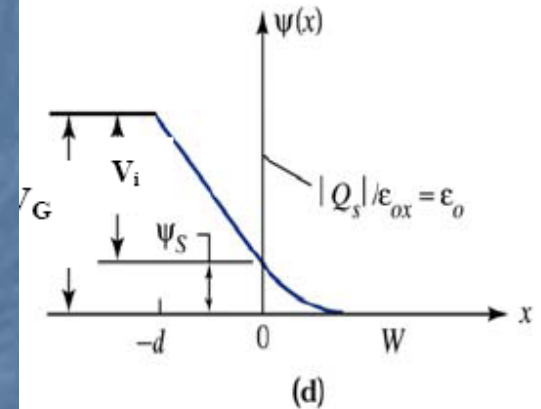
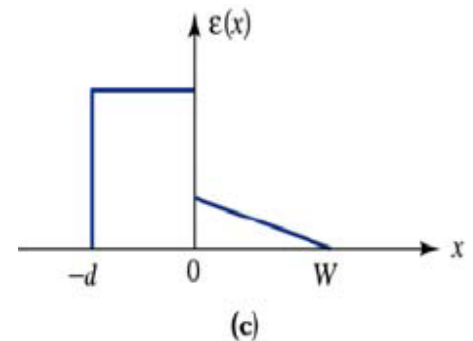


Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»

Η εφαρμοζόμενη εξωτερική τάση $V_G (>0)$ εμφανίζεται μερικώς κατά μήκος της περιοχής απογύμνωσης του ημιαγωγού, δηλαδή ισχύει ότι :

$$V_G = V_i + \psi_s$$

$$V_G = \psi_s + \frac{|q_e|N_A}{C_i} \sqrt{\frac{2\varepsilon_s|q_e|N_A}{C_i} \psi_s} = \psi_s + \eta \sqrt{\psi_s} \quad (\text{A10}), \quad \text{όπου } \eta = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s|q_e|N_A}}{C_i}$$



Λύνοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς ψ_s το υπολογίζουμε εάν γνωρίζουμε την εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση και κατόπιν υπολογίζουμε το W , από αυτό το Q_s και κατόπιν το $\psi(x)$. Στην κατάσταση απογύμνωσης δεν απαιτείται υπολογισμός συγκεντρώσεων ευκίνητων φορέων $n(x)$ και $p(x)$ μια και θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν.



Περίπτωση αναστροφής ($V_G \gg 0$). Στην περίπτωση της αναστροφής η περιοχή απογύμνωσης παίρνει τη μέγιστη τιμή της που είναι βάσει της σχέσεως (9.12) και της παραδοχής (B.1) :

$$W_{\max} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \psi_s(\text{inv})}{|q_e| N_A}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s (2\psi_B)}{|q_e| N_A}} = \sqrt{\frac{4\varepsilon_s \psi_B}{|q_e| N_A}} = \sqrt{\frac{4\varepsilon_s k_B T \ln(N_A/n_i)}{q_e^2 N_A}} \quad (\text{A11})$$

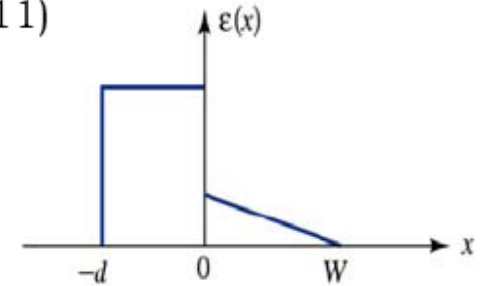
$$V_i = V_G - 2\psi_B$$

$$Q_S = Q_I + Q_{SC\max} \Rightarrow Q_I = Q_S - Q_{SC\max} = -V_i C_i - Q_{SC\max} = -[(V_G - 2\psi_B) C_i] + |q_e| N_A W_{\max}$$

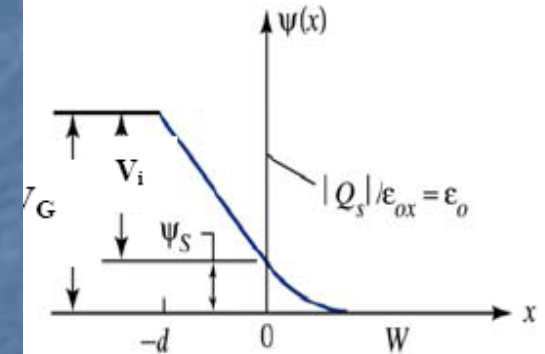
$$\Rightarrow Q_I = -[(V_G - 2\psi_B) C_i] + \sqrt{4\varepsilon_s \psi_B |q_e| N_A} \quad (\text{A12})$$

$$V_T = V_i + \psi_s(\text{inv}) = \frac{Q_S}{\varepsilon_i} d + 2\psi_B \Rightarrow V_T = \frac{|q_e| N_A W_{\max}}{\varepsilon_i} d + 2\psi_B \Rightarrow$$

$$V_T = \frac{\sqrt{4\varepsilon_s |q_e| N_A \psi_B}}{\varepsilon_i} d + 2\psi_B \quad (\text{A13})$$



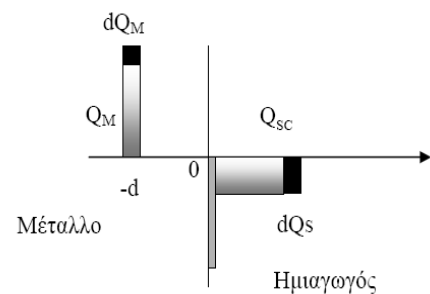
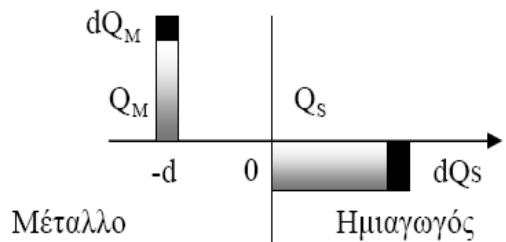
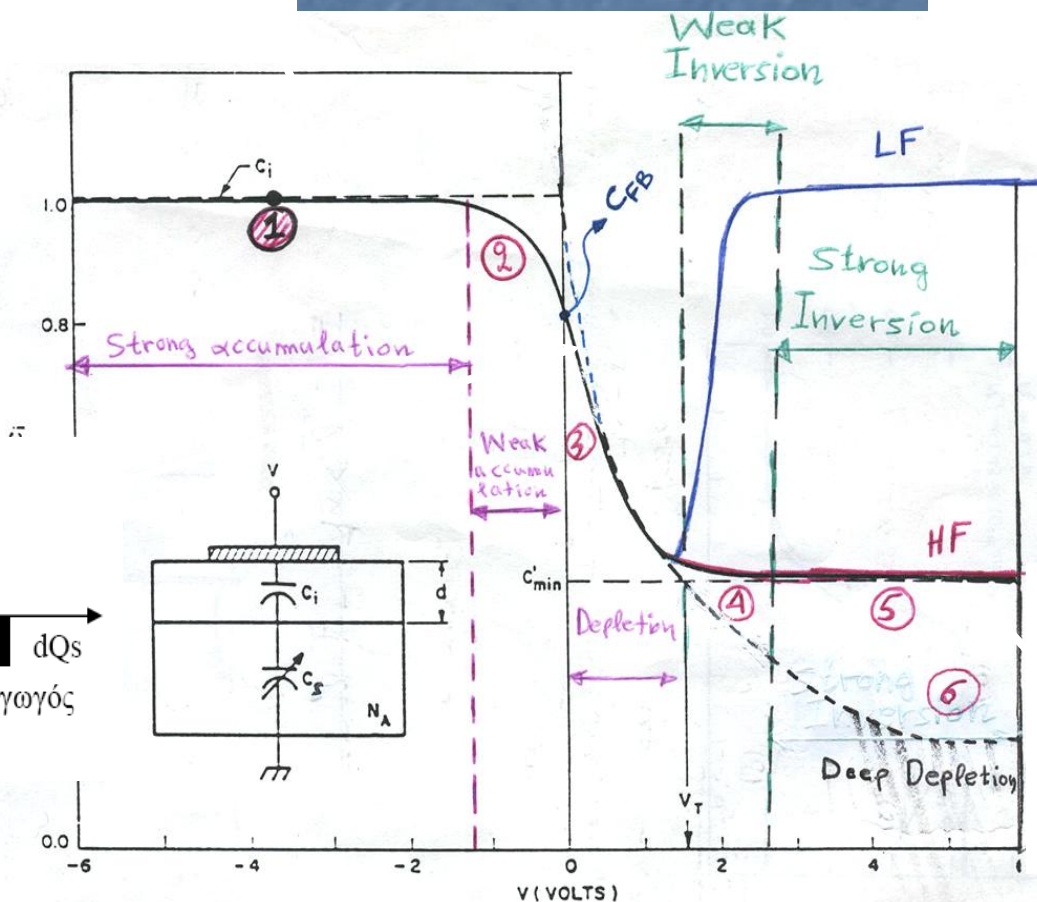
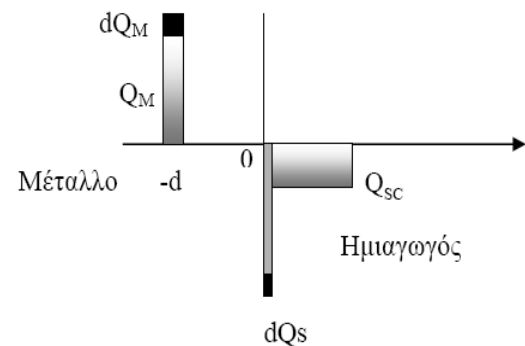
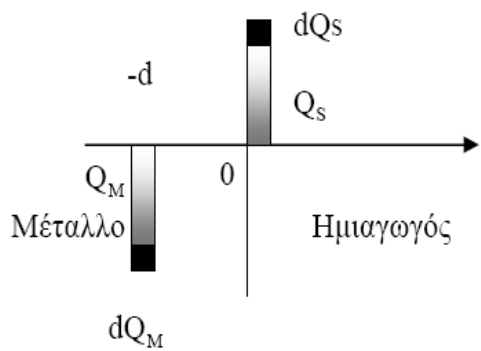
(c)



(d)

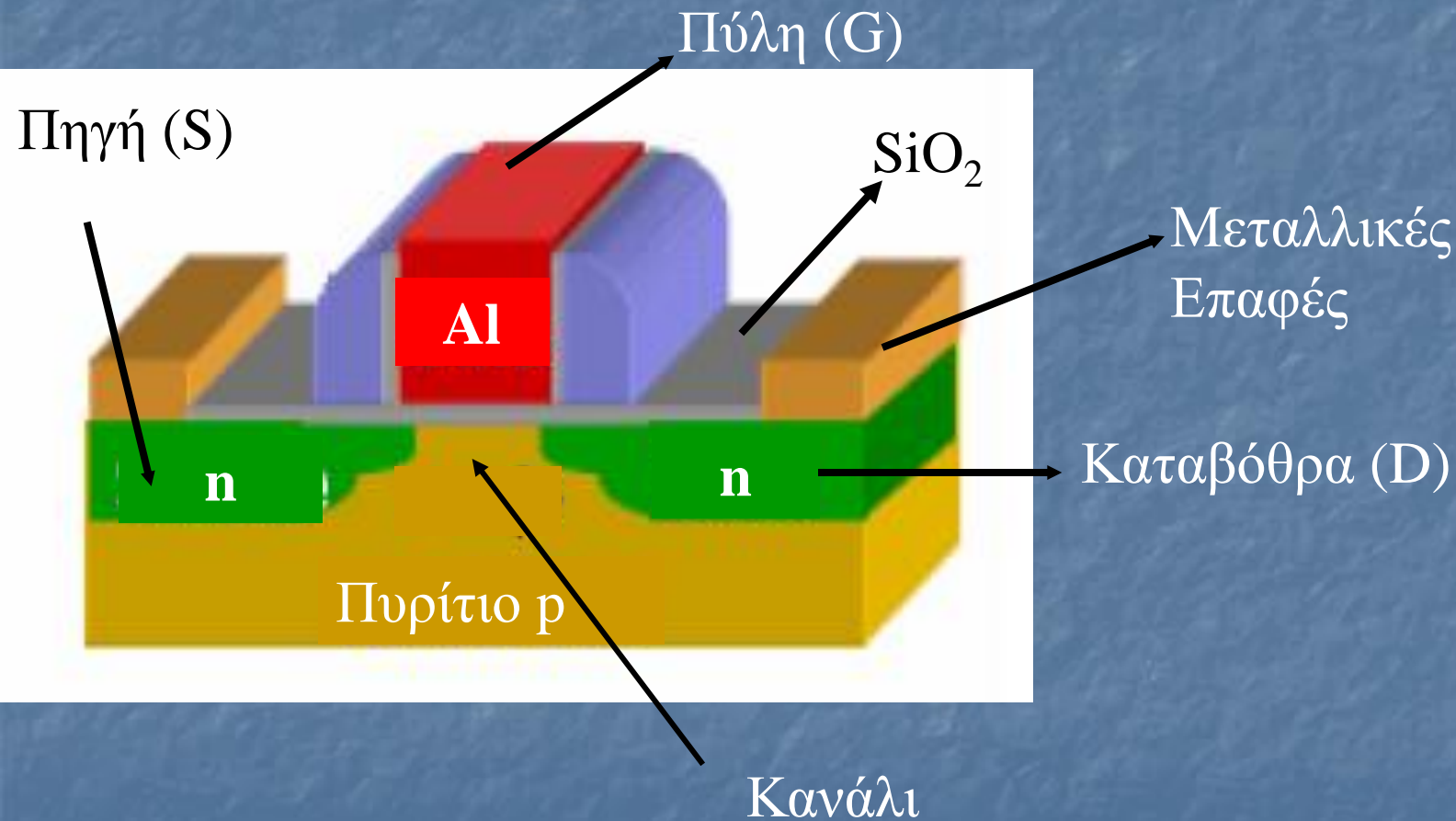


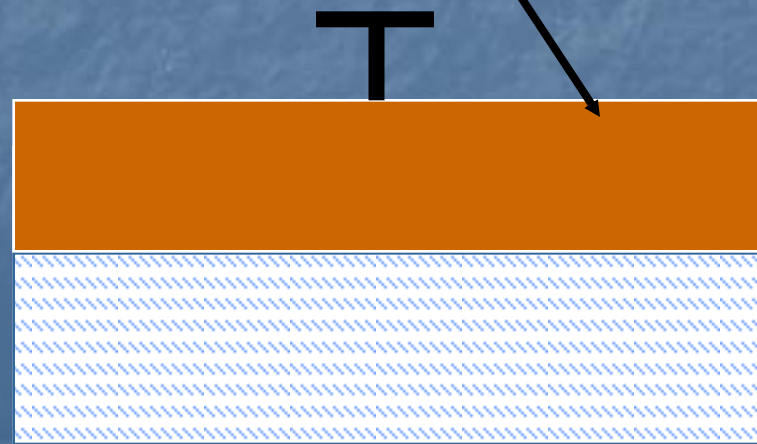
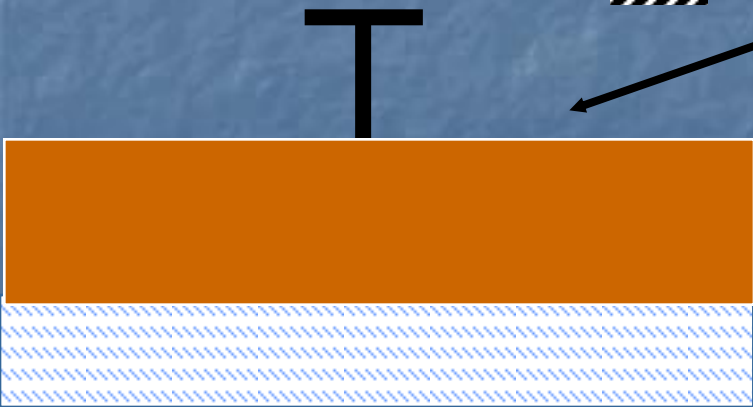
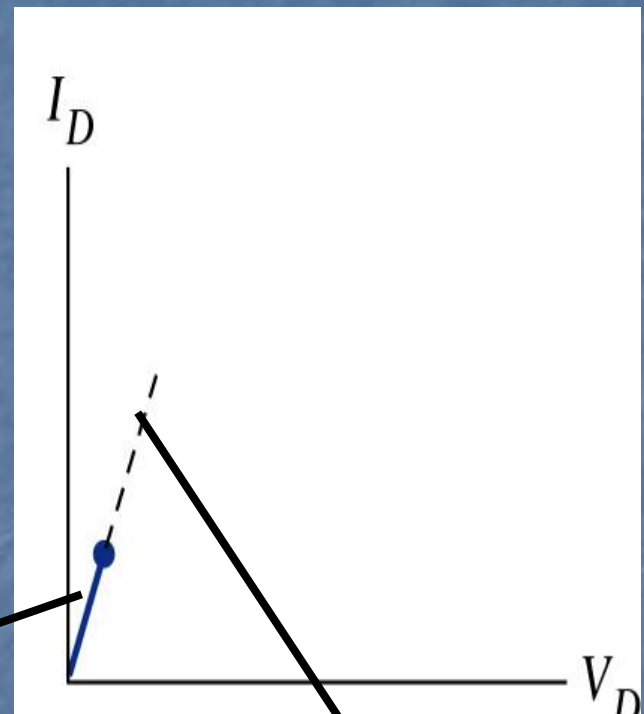
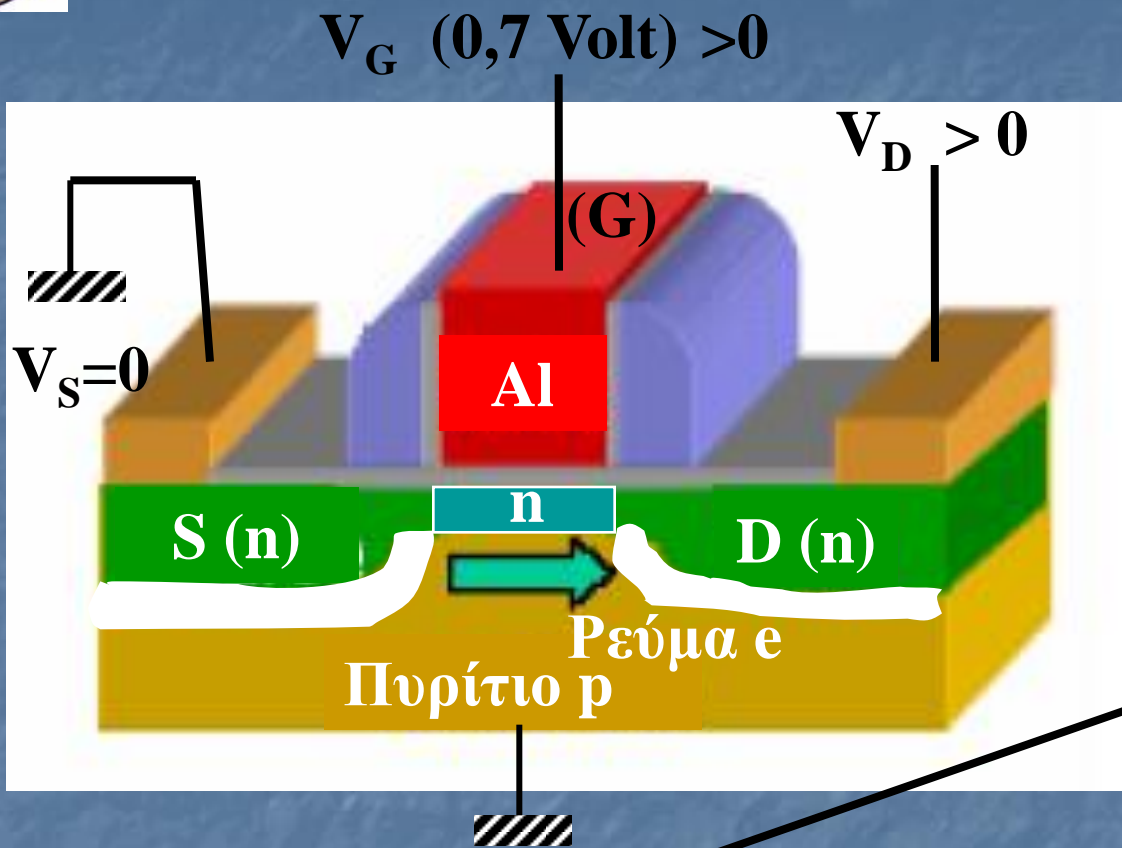
4. Χωρητικότητα ιδανικής επαφής MIS

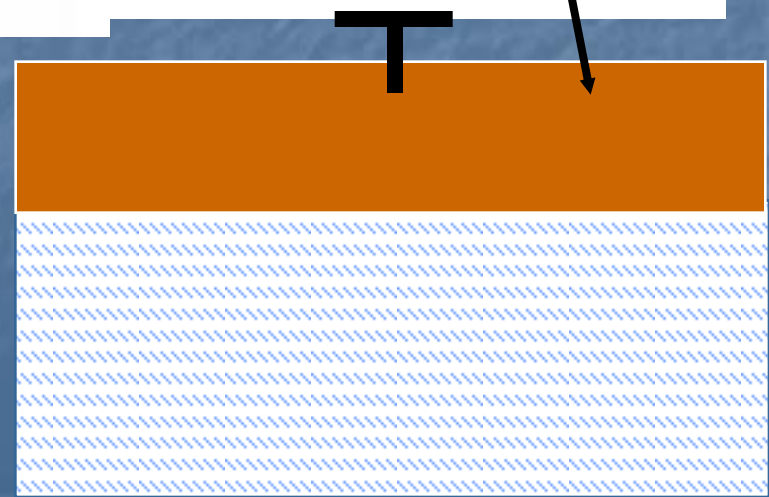
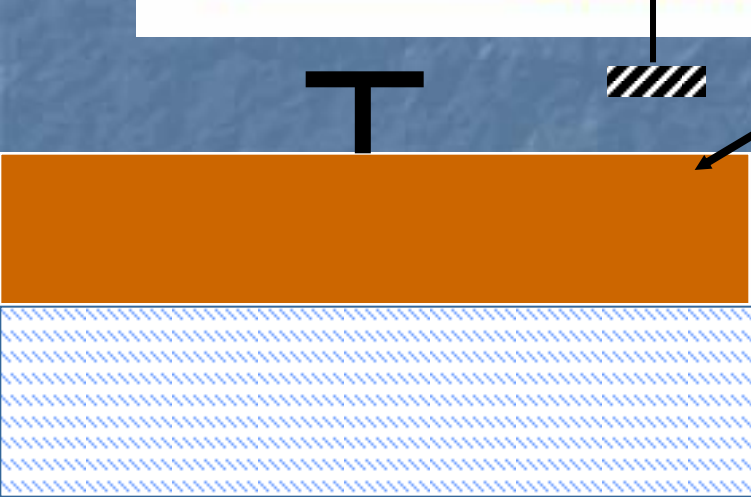
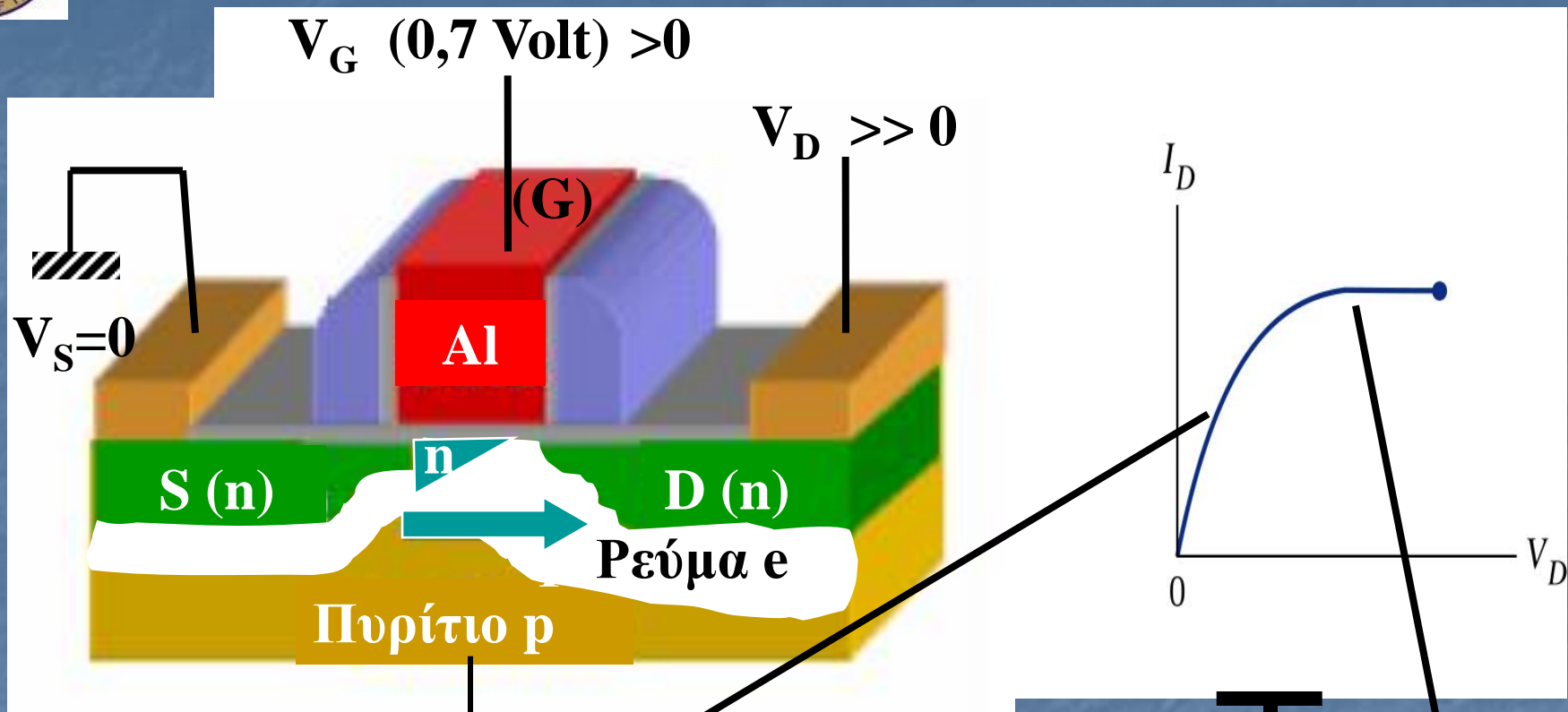




5. Το transistor MOSFET



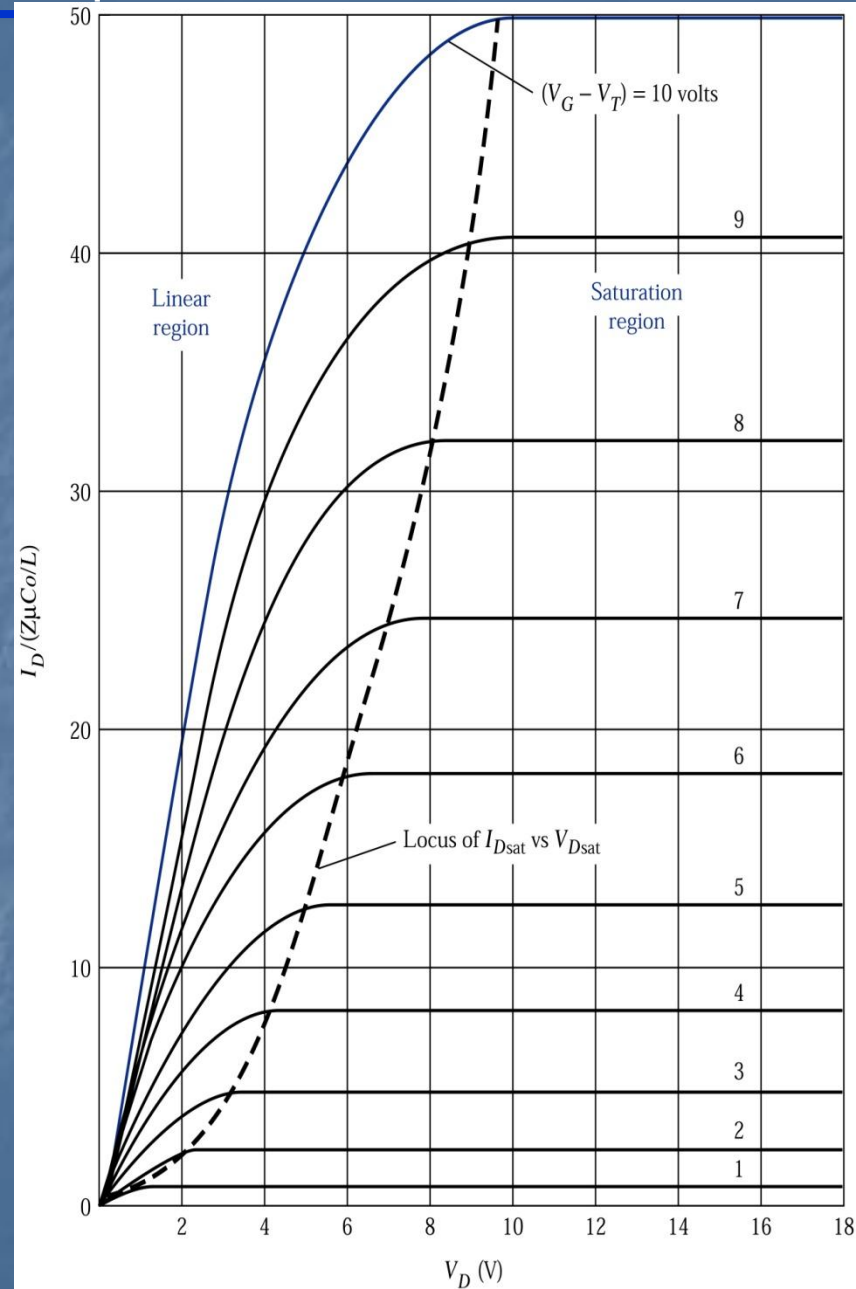
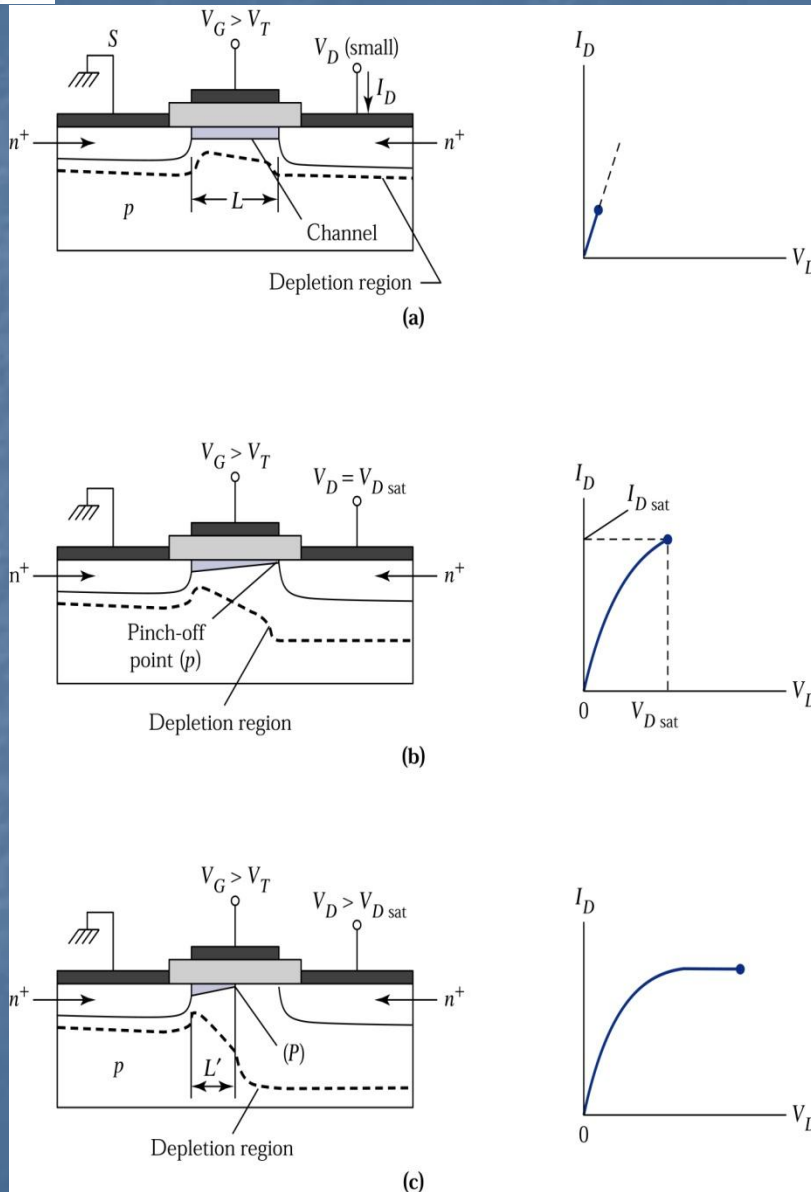






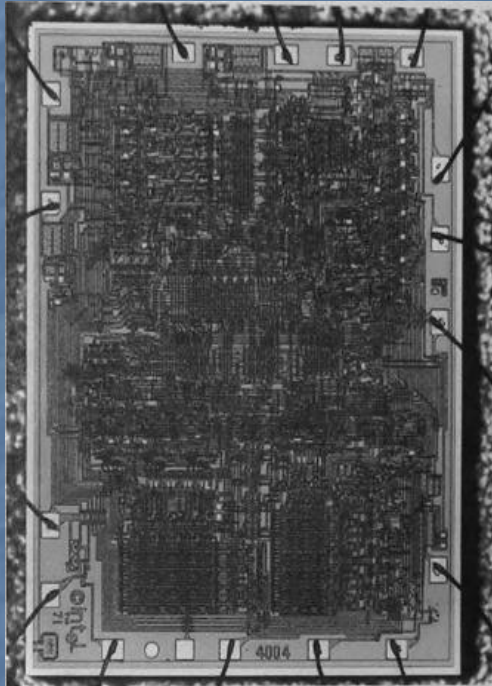
Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»

ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδικευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών – Φωτονική»





6. Τεχνολογία MOS



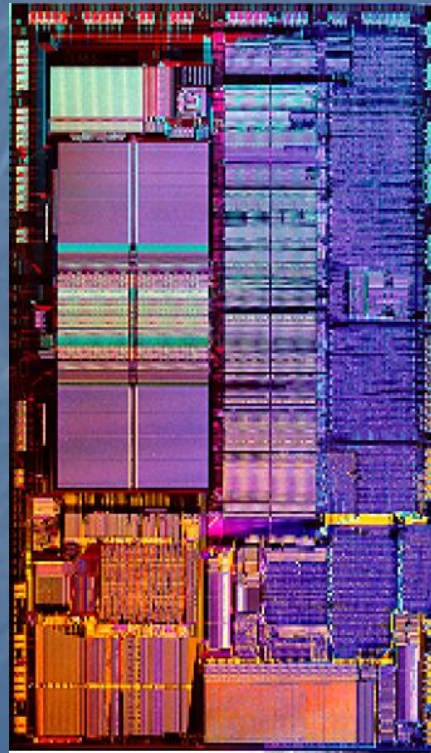
Intel 4004 (1971)

2300 MOSFET's

$L_g = 8 \mu\text{m}$

Chip : 3mm x 4 mm

> 300.000 ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ
ΕΡΓΑΣΙΕΣ



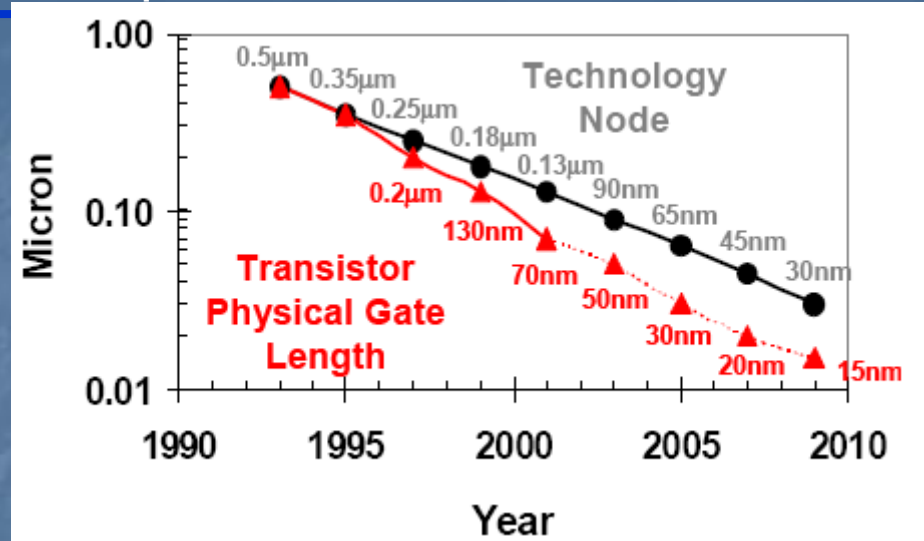
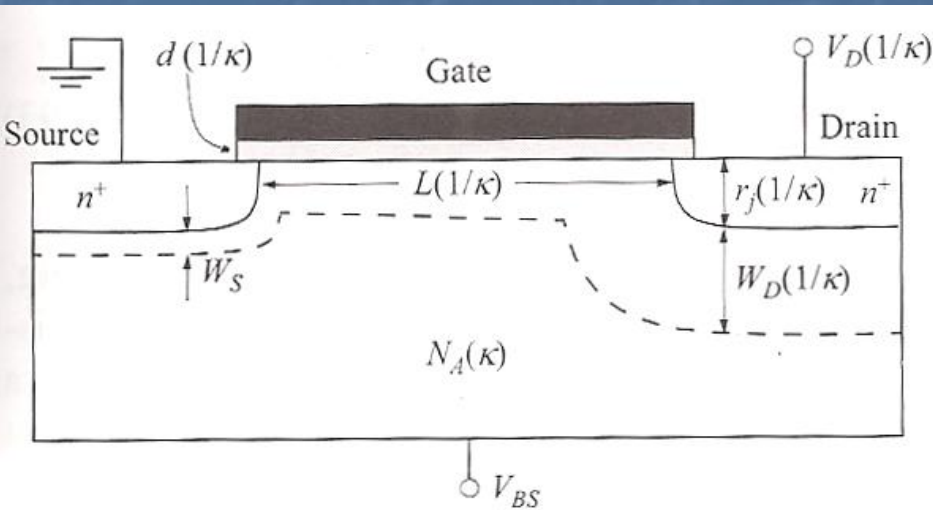
1990



Intel Pentium
Dual Core (2007)

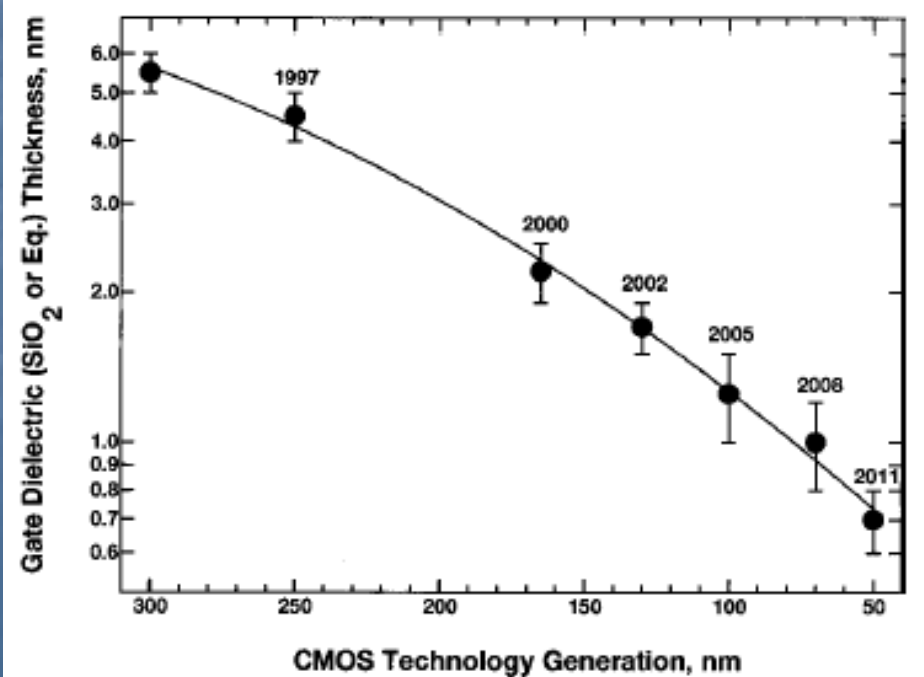


Κανόνες Σμύκρυνσης



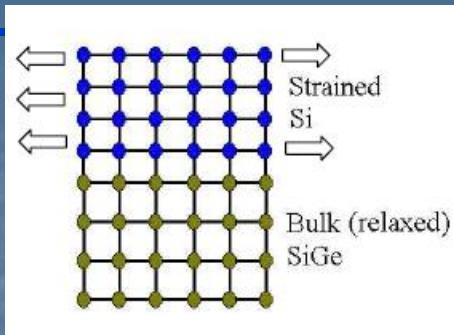
Parameter	Constant- \mathcal{E}	Constant-V	Quasi-constant-V	Actual	Limitation
L	$1/\kappa$	$1/\kappa$	$1/\kappa$	$1/\kappa$	
\mathcal{E}	1	> 1	> 1	> 1	
d	$1/\kappa$	$1/\kappa'$	$1/\kappa$	$> 1/\kappa$	Tunneling, defects
r_j	$1/\kappa$	$> 1/\kappa$	$> 1/\kappa$	$> 1/\kappa$	Resistance
V_T	$1/\kappa$	1	$1/\kappa'$	$\gg 1/\kappa$	Off current
V_D	$1/\kappa$	1	$1/\kappa'$	$\gg 1/\kappa$	System and V_T
N_A	κ	κ	κ	$< \kappa$	Junction breakdown

In ideal constant-field scaling parameters are scaled by the same factor. In reality the scaling factors are limited by other reasons and skewed. $1 < \kappa' < \kappa$.





Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
 ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών – Φωτονική»



$$EOT = d_{SiO_2} = d_{Ox} \frac{\epsilon_{rSiO_2}}{\epsilon_{rOx}}$$

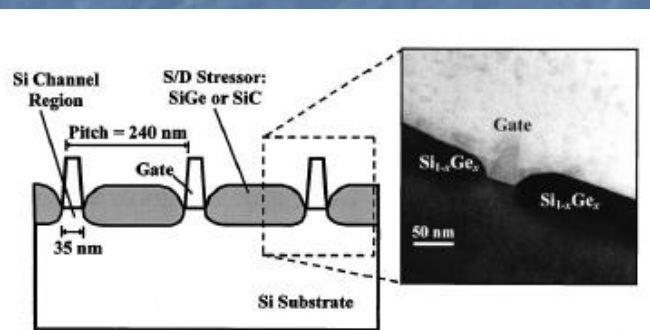
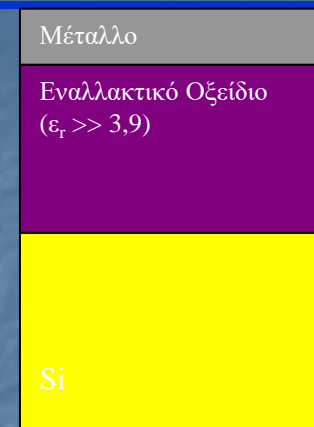
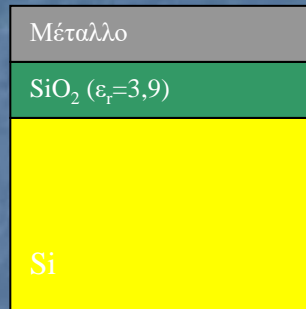
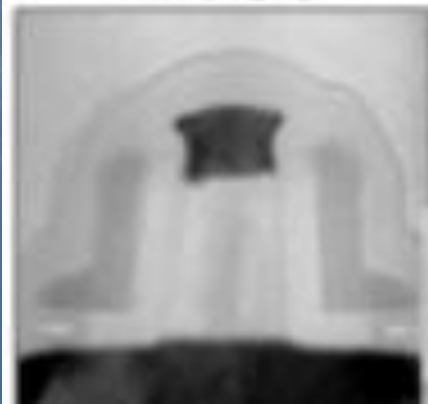


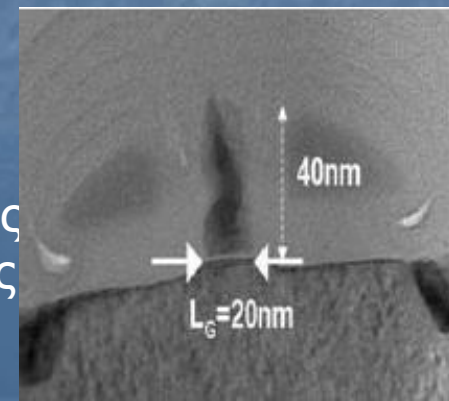
TABLE IX. Some candidate high-κ simple metal oxides.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	HfO ₂	TiO ₂	Ta ₂ O ₅
Dielectric constant	3.9	9.5	22	20	80	25
Band gap, eV	9	8.8	4	4.5	3	5
Free energy of reaction: Si+MO _x →M+SiO ₂ at 727 °C, kcal/mole of MO _x		63.4	42.3	47.6	7.5	-52.5
Stability of amorphous phase	high	high	low	low	high	low
Silicide phase formation possible?		no	yes	yes	yes	yes
Oxygen diffusivity at 950 °C, cm ² /s	2×10 ⁻¹⁴	5×10 ⁻²⁵	10 ⁻¹²	?	10 ⁻¹³	?

90 nm
2003



Σταθμός 2:
Αντικατάσταση του SiO₂ με οξείδιο υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς με βάση το Hf



Σταθμός 1: Η τεχνολογία Πυριτίου υπό μηχανική τάση (Strained-Si)



Όμως.....

- ◇ Υλικά υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς μπορούν να εναποτεθούν με ποικιλία τεχνικών (CVD, sputtering, MBE, ALD) σε υπόστρωμα Γερμανίου ή σύνθετου ημιαγωγού όντας μη υδατοδιαλυτά και σταθερά σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες.
- ◇ Το πρόβλημα διηλεκτρικού πύλης για εφαρμογές σε τεχνολογία MOS φαίνεται να έχει λύση.
- ◇ «Ανάσταση» του Γερμανίου και των σύνθετων ημιαγωγών!!!