

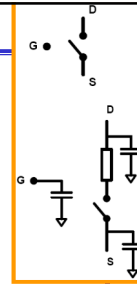
## Μάθημα 8:

### Παρασιτικά μεγέθη MOSFET

Λευτέρης Καπετανάκης

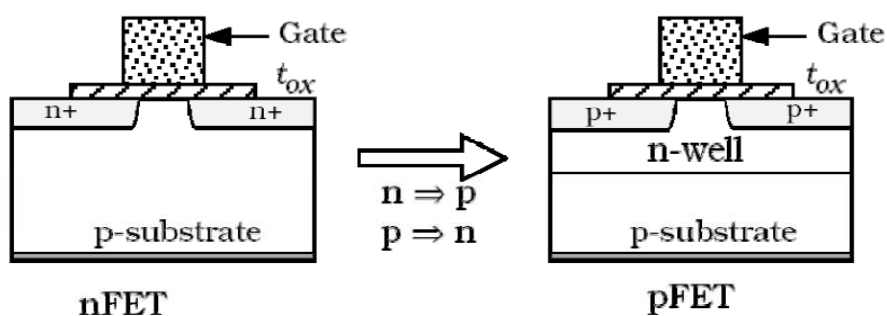


Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο  
Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών  
2021-2022



**ΣΗΜΕΙΩΣΗ:** Στις διαφάνειες των διαλέξεων χρησιμοποιείται διδακτικό υλικό το οποίο έχει δανειστεί από διάφορα εκπαιδευτικά βιβλία και διαδικτυακές σελίδες. Ο εισηγητής δεν έχει καμιά αξίωση κατοχής του υλικού αυτού και το χρησιμοποιεί μόνο για λόγους διδασκαλίας εντός της τάξης. Οι εικόνες και οι πίνακες είναι κτήμα διαφόρων συγγραφέων και παρέχονται στον αντίστοιχο δικτυότόπό τους.

## nMOS & pMOS



ΤΛ 5017- 2010

L8: Παρασιτικά μεγέθη MOSFET

Slide 3

## Εξισώσεις pMOS

• η ανάλυση για το nMOS εφαρμόζεται στο pMOS με τις ακόλουθες τροποποιήσεις

- φυσικές

- αλλαγή όλων των περιοχών n-τύπου με p-τύπου
- αλλαγή όλων των περιοχών p-τύπου με n-τύπου
  - το υπόστρωμα είναι n-τύπου (n-Πηγάδι)
- το φορτίο στο κανάλι είναι θετικό (οπές) και (+) φορτισμένα ιόντα

- εξισώσεις

- αλλαγή  $V_{GS}$  σε  $V_{SG}$  ( $V_{SG}$  τυπικά =  $V_{DD} - V_G$ )
- αλλαγή  $V_{DS}$  σε  $V_{SD}$  ( $V_{SD}$  τυπικά =  $V_{DD} - V_D$ )
- αλλαγή  $V_{tn}$  σε  $|V_{tp}|$

- η τάση κατωφλίου του pMOS είναι αρνητική, σχεδόν η ίδια σε μέτρο με αυτή του nMOS

- άλλα χαρακτηριστικά

- μικρότερη ευκινησία επιφάνειας, τυπική τιμή,  $\mu_p = 220 \text{ cm}^2/\text{V-sec}$
- επίδραση σώματος, αλλαγή  $V_{SB}$  σε  $V_{BS}$

ΤΛ 5017- 2010

L8: Παρασιτικά μεγέθη MOSFET

Slide 4

## Συμμετρία των τρανζίστορ MOS

- Τα τρανζίστορ MOS είναι συμμετρικά
- Ισχυρή αντιστροφή στην πηγή αν  $V_{GS} > V_T$
- Ισχυρή αντιστροφή στην υποδοχή αν  $V_{GD} > V_T$  } **Ανεξάρτητα!**
- **Εσείς** θα πρέπει να ελέγχετε τις σχέσεις των ρευμάτων όταν εναλλάσσετε την υποδοχή με την πηγή
- Η αναγνώριση της πηγής και της υποδοχής είναι θέμα σύμβασης
- Καθορίζεται από το περιβάλλον του κυκλώματος

	NMOS	PMOS	Γενικά
Πηγή	$V_{SS}$ -μεριά	$V_{DD}$ -μεριά	Πιο ισχυρή αντιστροφή
Υποδοχή	$V_{DD}$ -μεριά	$V_{SS}$ -μεριά	Πιο ασθενής αντιστροφή

$V_{SS}$ : χαμηλή παροχή τάσης,  $V_{DD}$  = υψηλή παροχή τάσης

ΤΛ 5017– 2010

L8: Παρασιτικά μεγέθη MOSFET

Slide 5

## Άσκηση

	$\beta$	$V_{T0}$	$\lambda$
nMOS	$115\mu\text{A}/\text{V}^2$	0.43V	$0.06\text{V}^{-1}$
pMOS	$-30\mu\text{A}/\text{V}^2$	-0.4V	$-0.1\text{V}^{-1}$

- Δεδομένων 2 τρανζίστορ με χαρακτηριστικά που φαίνονται στον πίνακα πάνω, καθορίστε για κάθε μια από τις περιπτώσεις (a), (b) και (c) του πίνακα στα αριστερά, την **κατάσταση λειτουργίας** (ωμική, κόρος, αποκοπή)

	nMOS		pMOS	
	$V_{GS}$ [V]	$V_{DS}$ [V]	$V_{GS}$ [V]	$V_{DS}$ [V]
(a)	2.5	2.5	-0.5	-1.25
(b)	3.3	2.2	-2.5	-1.8
(c)	0.6	0.1	-2.5	-0.7

και το ρεύμα υποδοχής  $I_D$

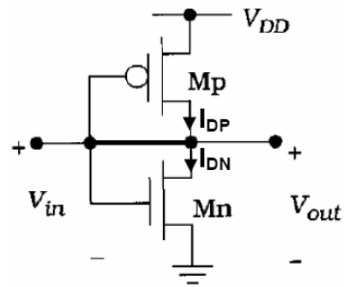
ΤΛ 5017– 2010

L8: Παρασιτικά μεγέθη MOSFET

Slide 6

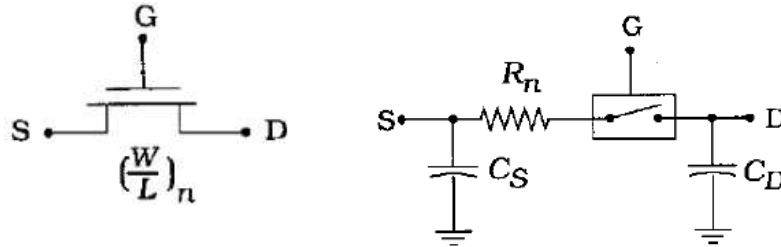
#### Πρόβλημα 4 (20 μονάδες)

Ο αντιστροφέας που δείχνεται δίπλα έχει βραχυκυκλωμένη την έξοδό του στην είσοδο. Βρείτε την τιμή του λόγου  $(W/L)_p$  που απαιτείται για να θέσουμε  $V_{out} = 1V$  αν  $(W/L)_n = 1$ . Θεωρείστε:  $V_{DD} = 3V$ ,  $k'_N = 120\mu A/V^2$ ,  $k'_P = 40\mu A/V^2$ ,  $V_{TN} = 0.5V$ ,  $V_{TP} = -0.5V$  (Υπόδειξη: Σημειώστε ότι  $I_{DP} = I_{DN}$ )



## MOSFETs – Παρασιτικά Φαινόμενα

## Μοντέλο RC του τρανζίστορ MOS



Χαρακτηριστική σταθερά χρόνου στην υποδοχή,  $\tau_D$ :

$$\tau_D = C_D R_n$$

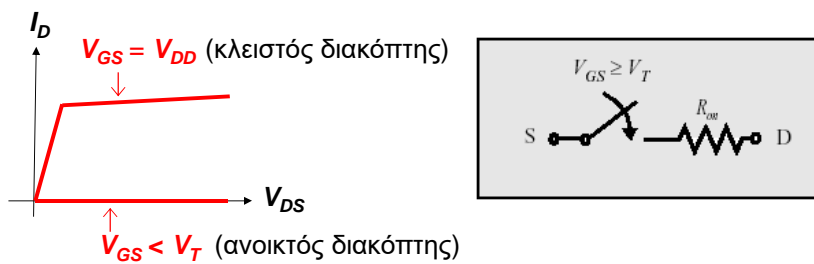
ΤΛ 5017– 2010

L8: Παρασιτικά μεγέθη MOSFET

Slide 9

## Το MOSFET σαν ωμικός διακόπτης

- Για εφαρμογές ψηφιακών κυκλωμάτων, το MOSFET είναι ή OFF ( $V_{GS} < V_T$ ) ή ON ( $V_{GS} = V_{DD}$ ). Έτσι, χρειάζεται να θεωρήσουμε μόνο δύο καμπύλες ρεύματος  $I_D - V_{DS}$ :
  1. Την καμπύλη για  $V_{GS} < V_T$
  2. Την καμπύλη για  $V_{GS} = V_{DD}$



ΤΛ 5017– 2010

L8: Παρασιτικά μεγέθη MOSFET

Slide 10

## Μοντέλο αντίστασης διακόπτη $R_{on}$ (Εμπειρικό)

Εμείς θα χρησιμοποιούμε

$$R_n = \frac{1}{\beta_n(V_{GS} - V_T)}$$

$$R_n = \frac{L}{W} \frac{1}{k'_n(V_{GS} - V_T)}$$

$$= \frac{L}{W} R_{eq}$$

Ισοδύναμη oh-αντίσταση,  $R_{eq}$ , για τετράγωνο τρανζίστορ ( $W=L$ )

Εξαρτάται από την τεχνολογία ( $V_{GS}$  συνήθως =  $V_{DD}$ )

Εξαρτάται από τον σχεδιαστή, γεωμετρία διάταξης

ΤΛ 5017- 2010

Λ8: Παρασιτικά μεγέθη MOSFET

Slide 11

## Χωρητικότητες Μοντέλου RC

-Χωρητικότητα Πηγής

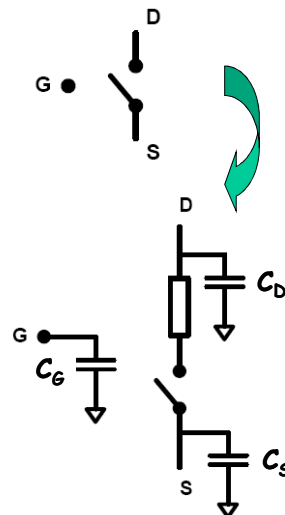
$$\bullet C_S = C_{GS} + C_{SB}$$

-Χωρητικότητα Υποδοχής

$$\bullet C_D = C_{GD} + C_{DB}$$

-Χωρητικότητα Πύλης

$$\bullet C_G = C_{OX}$$



ΤΛ 5017- 2010

Λ8: Παρασιτικά μεγέθη MOSFET

Slide 12

## Χωρητικότητες Μοντέλου RC

- Γιατί μας ενδιαφέρουν;
  - οι χωρητικότητες καθορίζουν την ταχύτητα μεταφοράς των σημάτων
- Σημαντικές παρατηρήσεις
  - τα μοντέλα αφορούν την περιοχή κόρου
  - τα μοντέλα που παρουσιάζονται είναι απλοποιημένα (όχι λεπτομερή)

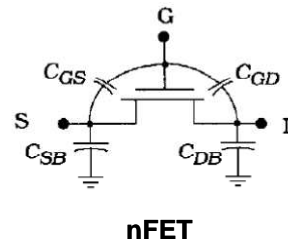
### Χωρητικότητες μοντέλου RC

- Χωρητικότητα πηγής
  - μοντελοποιεί τη χωρητικότητα στον κόμβο της πηγής

$$C_S = C_{GS} + C_{SB}$$

- Χωρητικότητα υποδοχής
  - μοντελοποιεί τη χωρητικότητα στον κόμβο της υποδοχής

$$C_D = C_{GD} + C_{DB}$$

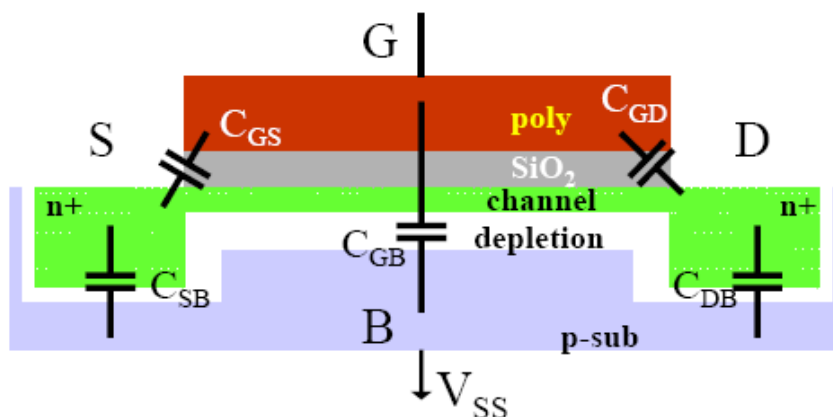


nFET

Ποιες είναι οι  $C_{GS}$ ,  $C_{GD}$ ,  $C_{SB}$ , και  $C_{DB}$ ;

ΤΛ 5017- 2010

## Βασικές Παρασιτικές Χωρητικότητες MOS



**ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ:** Όταν σχηματιστεί το αγώγιμο στρώμα αντιστροφής ανάμεσα στην πηγή και την υποδοχή, το κανάλι θωρακίζει το ηλεκτρόδιο της πύλης από το υπόστρωμα  
οπότε:

$$C_{BG} = 0$$

ΤΛ 5017- 2010

L8: Παρασιτικά μεγέθη MOSFET

Slide 14

## Παρασιτικές Χωρητικότητες MOS

### Χωρητικότητα πύλης

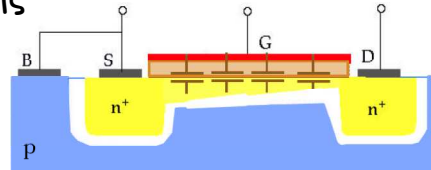
- μοντελοποιεί τη χωρητική σύζευξη Πύλης - Καναλιού

$$C_G = C_{ox} W L$$

- εκτιμά ότι η  $C_G$  μοιράζεται 50/50 μεταξύ Πηγής και Υποδοχής

$$C_{GS} = \frac{1}{2} C_G$$

$$C_{GD} = \frac{1}{2} C_G$$



- Υποθέτει ότι η χωρητικότητα Πύλης-Υποστρώματος είναι αμελητέα

• μοντελοποιεί τη χωρητική σύζευξη στην περιοχή επικάλυψης της πύλης με το υπόστρωμα έξω από την ενεργή περιοχή του τρανζίστορ

$$C_{GB} = 0$$

L8: Παρασιτικά μεγέθη MOSFET

Slide 15

## Παρασιτικές Χωρητικότητες MOS (συν.)

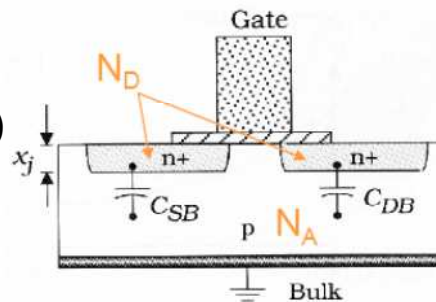
### Χωρητικότητα Υποστρώματος

-  $C_{SB}$  (Πηγή-Υπόστρωμα)

&

-  $C_{DB}$  (Υποδοχή-Υπόστρωμα)

• χωρητικότητες επαφής pn



• Χωρητικότητα / επιφάνεια για επαφή pn

$$C_j = C_{j0} / \left( 1 + \frac{V_R}{\Psi_0} \right)^{m_j}$$

$m_j =$  τυπικά 1/3

$$C_{j0} = \left[ \frac{q \epsilon N_A}{2 \Psi_0} \right]^{1/2}$$

υποθέτει  $N_D(n+ S/D) \gg N_A(p \text{ υποσ/μα.})$

$$\Psi_0 = V_T \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

TL 5017- 2010

L8: Παρασιτικά μεγέθη MOSFET

Slide 16



## • Χωρητικότητα επαφής S/D

- χωρητικότητα μηδενικής πόλωσης

• όταν  $V_R = 0 \Rightarrow$  η μεγαλύτερη χωρητικότητα, υποθέστε αυτή την τιμή για εκτίμηση της χειρότερης περίπτωσης

•  $C_j = C_{j0} \Rightarrow$  Σταθερά

-  $C_{S/Dj} = C_{j0} A_{S/D}$ ,  $A_{S/D}$  = επιφάνεια Πηγής/Υποδοχής

• Ποια είναι η  $A_{S/D}$  :

• περίπλοκη τρισδιάστατη γεωμετρία

- περιοχή βάσης και πλευρικών τοιχωμάτων

-  $C_{S/Dj} = C_{bot} + C_{sw}$

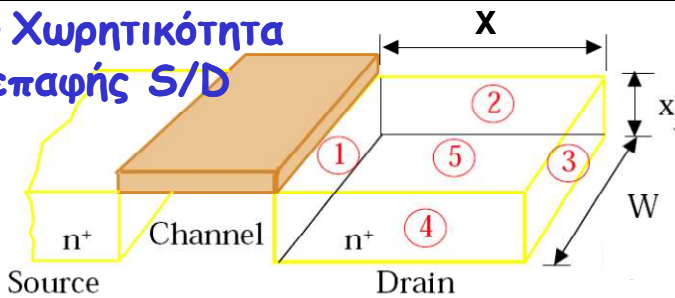
• χωρητικότητες βάσης και πλευρικών τοιχωμάτων

ΤΛ 5017- 2010

L8: Παρασιτικά μεγέθη MOSFET

Slide 17

## • Χωρητικότητα επαφής S/D



Junction	Area	Type
①	$W x_j$	$n^+/p$
②	$X x_j$	$n^+/p^+$
③	$W x_j$	$n^+/p^+$
④	$X x_j$	$n^+/p^+$
⑤	$WX$	$n^+/p$

- χωρητικότητα βάσης (5)

$$C_{bot} = C_j A_{bot}$$

$$\cdot A_{bot} = X W$$

- χωρητικότητα πλευρών (1+2+3+4)

$$- C_{sw} = C_{jsw} P_{sw}$$

$$\cdot C_{jsw} = C_j x_j [F/cm]$$

-  $x_j$  = βάθος επαφής

•  $P_{sw}$  = Περίμετρος πλευρών

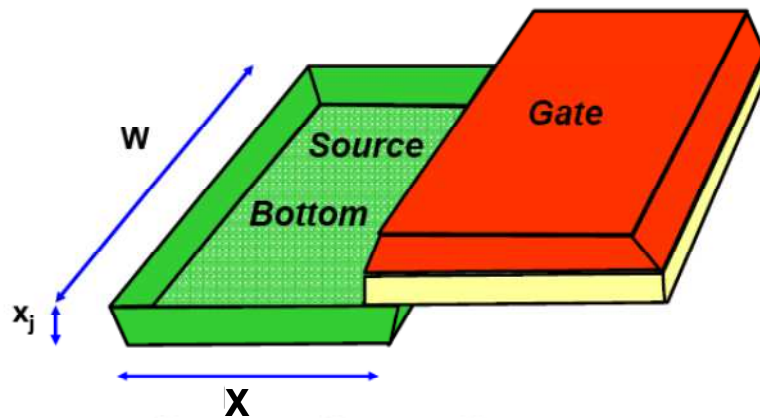
$$- P_{sw} = 2 (W + X)$$

ΤΛ 5017- 2010

L8: Παρασιτικά μεγέθη MOSFET

Slide 18

## Χωρητικότητες MOS S/D



$$\begin{aligned}
 - C_{S/Dj} &= C_{bot} + C_{sw} \\
 &= C_j \times \text{AREA} + C_{jsw} \times \text{PERIMETER} \\
 &= C_j X W + C_{jsw} 2(X + W)
 \end{aligned}$$

ΤΛ 5017- 2010

L8: Παρασιτικά μεγέθη MOSFET

Slide 19

## Επιφάνεια επαφής S/D

- **Παρατήρηση:** οι υπολογισμοί θεωρούν τους παρακάτω κανόνες σχεδίασης

- μέγεθος poly,  $L = 2\lambda$
- απόσταση μεταξύ poly,  $2\lambda$
- απόσταση poly από επαφή,  $2\lambda$
- μέγεθος επαφής,  $2\lambda$
- απόσταση επαφής από ενεργή περιοχή,  $1\lambda$

$$\Rightarrow \begin{aligned}
 W &= 4\lambda \\
 X1 &= 5\lambda, X2 = 2\lambda, X3 = 6\lambda
 \end{aligned}$$

- Ξεχωριστή Περιοχή S/D με Επαφή

- Επιφάνεια:  $X1 W = (5)(4) \lambda^2 = 20\lambda^2$
- Περίμετρος:  $2(X1 + W) = 18\lambda$

- Κοινή Περιοχή S/D χωρίς Επαφή

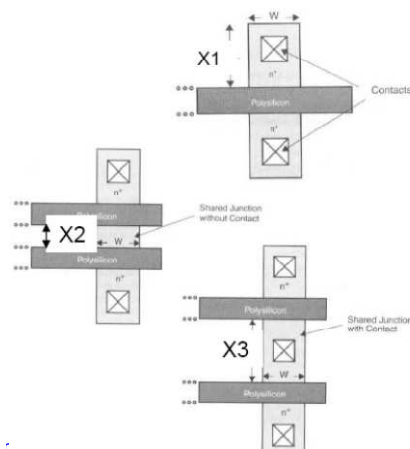
- Επιφάνεια:  $X2 W = (2)(4) \lambda^2 = 8\lambda^2$
- Περίμετρος:  $2(X2 + W) = 12\lambda$

- **πολύ μικρότερη!**

- Κοινή Περιοχή S/D με Επαφή

- Επιφάνεια:  $X3 W = (6)(4) \lambda^2 = 24\lambda^2$
- Περίμετρος:  $2(X3 + W) = 20\lambda$

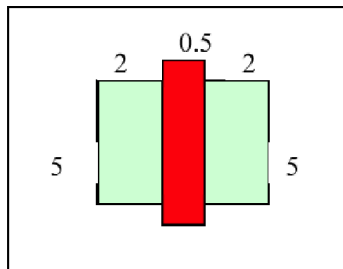
- **η μεγαλύτερη επιφάνεια!**



## Άσκηση

Οι διαστάσεις οι οποίες απεικονίζονται στο κάτω σχήμα (σε  $\mu m$ ) αναφέρονται στις πραγματικές (και όχι στις φυσικές εκ σχεδίασης) διαστάσεις ενός τρανζίστορ nMOS με  $k'n = 150 \mu A/V^2$ ,  $V_{tn} = 0,5V$ ,  $C_{ox} = 3fF/\mu m^2$ ,  $C_j = 1fF/\mu m^2$  και  $C_{jsw} = 0,3 fF/\mu m$ . Υποθέτοντας  $V_{GS} = 3V$  υπολογίστε:

- α) Τη χωρητικότητα πύλης,  $C_G$
- β) Τη χωρητικότητα πύλης-υποδοχής,  $C_{GD}$
- γ) Τη χωρητικότητα υποδοχής-υποστρώματος,  $C_{DB}$
- δ) Την ολική χωρητικότητα στον κόμβο της υποδοχής,  $C_D$
- ε) Την αντίσταση καναλιού,  $R_n$
- στ) Τη σταθερά χρόνου RC στον κόμβο της υποδοχής.



ΤΛ 5017- 2010

Slide 21

## Λύση

$$\alpha) C_G = C_{ox} (WL) = (3fF/\mu m^2) (5\mu m) (0.5\mu m) = \boxed{7.5fF}$$

$$\beta) C_{GD} = \frac{1}{2} C_G = \frac{1}{2} 7.5 = \boxed{3.75fF}$$

$$\gamma) C_{DB} = C_j A_{(Dbot)} + C_{jsw} P_{DSW}$$

$$A_{(Dbot)} = 2\mu m \times 5\mu m = 10\mu m^2$$

$$P_{DSW} = 2 (2\mu m + 5\mu m) = 14\mu m$$

$$C_{DB} = C_j A_{(Dbot)} + C_{jsw} P_{DSW} = 1 (10) + 0.3 (14) = \boxed{14.2fF}$$

δ) Η ολική χωρητικότητα στον κόμβο της υποδοχής είναι:

$$C_D = C_{GD} + C_{DB} = 3.75 + 14.2 = \boxed{17.95fF}$$

$$\epsilon) \tau = R_n C_D = 266 (17.95) = \boxed{4.77 psec}$$

ΤΛ 5017- 2010

Λ8: Παρασιτικά μεγέθη MOSFET

Slide 22