

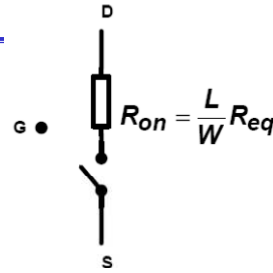
Μάθημα 6:

Μοντέλο Διακόπτη MOS Ανάλυση Καθυστέρησης Ενέργεια αλλαγής κατάστασης

Λευτέρης Καπετανάκης



Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο
Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών
2021-2022

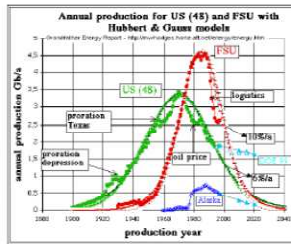


ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Στις διαφάνειες των διαλέξεων χρησιμοποιείται διδακτικό υλικό το οποίο έχει δανειστεί από διάφορα εκπαιδευτικά βιβλία και διαδικτυακές σελίδες. Ο εισηγητής δεν έχει καμιά αξίωση κατοχής του υλικού αυτού και το χρησιμοποιεί μόνο για λόγους διδασκαλίας εντός της τάξης. Οι εικόνες και οι πίνακες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

Ξυπνήστε! Μοντέλα μπροστά!



TL 503



Observed and Modeled Average Annual Temperature

Observed 1961-1990 Average

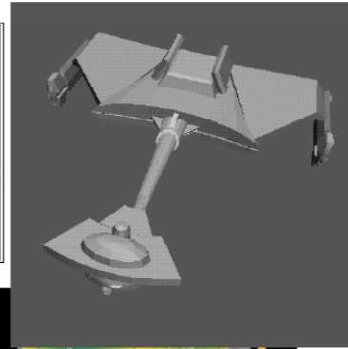


Hadley Model 1961-1990 Average



The observed temperature averages for 1961-1990 are similar to the temperatures simulated by the Canadian and Hadley models for the same time period. These are the two primary models used to develop climate change scenarios for this Assessment.

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

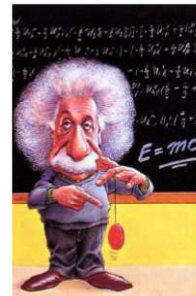


Slide 3

Μοντέλο

- Μια αφηρημένη έννοια σε κάτι (ιδιότητες) η οποία βοηθά την κατανόηση και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του
- Ειδικά πεδία: καιρός, κλίμα, οικονομία, χρηματιστήριο, ...
- Διαφορετικά μοντέλα για την απάντηση διαφορετικών ερωτήσεων
- Διαφορά ανάμεσα σε ένα μοντέλο Μαύρου-Κουτιού και σε ένα μοντέλο Βασισμένο στη Φυσική (παρατήρηση, πείραμα)

Ένα μοντέλο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν απλό, αλλά όχι πιο απλό από όσο γίνεται

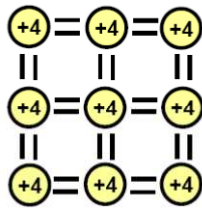


TL 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 4

Φυσική Ημιαγωγού



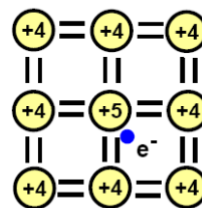
- καθαρό Si
- Ιδανική κρυσταλλική δομή
- 4 ηλεκτρόνια σθένους
- σχεδόν καθόλου ελεύθεροι φορείς
- σχεδόν καθόλου αγωγή

$$[n] = [p] = n_i = 1,5 \cdot 10^{10} / \text{cm}^3$$

στους 300 K για το Si

TL 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

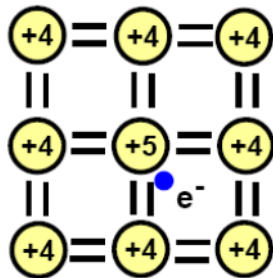


- η νόθευση με άτομα που έχουν 5 ηλεκτρόνια σθένους (Φώσφορος, Αρσενικό) δημιουργεί «χαλαρά ηλεκτρόνια»
- δότες ηλεκτρονίου
- η αγωγιμότητα εξαρτάται από το επίπεδο νόθευσης

$$n \cdot p = n_i^2 \text{ (στην ισορροπία)}$$

Slide 5

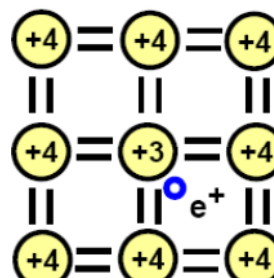
Φυσική Ημιαγωγού



- η νόθευση με άτομα που έχουν 5 ηλεκτρόνια σθένους (Φώσφορος, Αρσενικό) δημιουργεί «χαλαρά ηλεκτρόνια»
- δότες ηλεκτρονίου
- η αγωγιμότητα εξαρτάται από το επίπεδο νόθευσης

TL 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια



- η νόθευση με άτομα που έχουν 3 ηλεκτρόνια σθένους (Βόριο) δημιουργεί «χαλαρές οπές»
- αποδέκτες ηλεκτρονίου
- η αγωγιμότητα των οπών είναι μικρότερη από την αγωγιμότητα των ηλεκτρονίων

Slide 6

Φυσική Ημιαγωγού

Si σε Θερμική Ισορροπία: $n \cdot p = n_i^2 = 2.25 \times 10^{20}$ σε 300K
καθαρό Si : $n = p = n_i$

$$N_D \gg N_A$$

Δότες ηλεκτρονίου: As, P

n-τύπου Si

$$n \approx N_D, p = n_i^2 / n$$

Ηλεκτρόνια: φορείς **πλειονότητας**

Οπές: φορείς **μειονότητας**

Ωμικό υλικό

Αγωγιμότητα: εξαρτάται από το N_D

$$N_A \gg N_D$$

Αποδέκτες ηλεκτρονίου: B

p-τύπου Si

$$p \approx N_A, n = n_i^2 / p$$

Οπές: φορείς πλειονότητας

Ηλεκτρόνια: φορείς μειονότητας

Η αγωγιμότητα των οπών είναι χαμηλότερη από την αγωγιμότητα των ηλεκτρονίων

ΤΛ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 7

Thermal Motion

$$\text{Average electron or hole kinetic energy} = \frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}mv_{th}^2$$

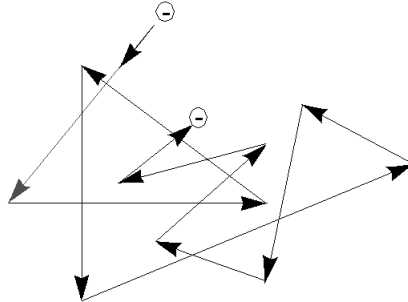
$$v_{th} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{eff}}} = \sqrt{\frac{3 \times 1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1} \times 300 \text{ K}}{0.26 \times 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}}}$$

$$= 2.3 \times 10^5 \text{ m/s} = 2.3 \times 10^7 \text{ cm/s}$$

Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits (C. Hu)

Slide 2-8

Thermal Motion



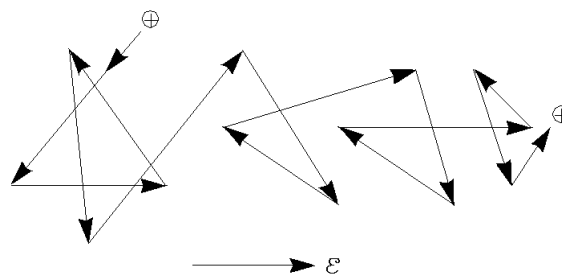
- Zig-zag motion is due to collisions or scattering with imperfections in the crystal.
- Net thermal velocity is zero.
- Mean time between collisions is $\tau_m \sim 0.1\text{ps}$

Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits (C. Hu)

Slide 2-9

Drift

Electron and Hole Mobilities



- **Drift** is the motion caused by an electric field.

Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits (C. Hu)

Slide 2-10

Αγωγιμότητα του Si

- το καθαρό Si είναι κακός αγωγός, επειδή έχει πολύ λίγους ελεύθερους φορείς
- Η αγωγιμότητα μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη προσμίξεων δότη (n-τύπου) ή προσμίξεων αποδέκτη (p-τύπου)
- Η Αγωγιμότητα (σ) εξαρτάται από
- τη συγκέντρωση των ελεύθερων φορέων (n και p)
- $\sigma = q (\mu_n n + \mu_p p)$

- **Ευκινησία:** πόσο εύκολα κινείται ένας φορέας εξαιτίας της εφαρμογής ενός ηλεκτρικού πεδίου
- **ταχύτητα:** επιτυγχάνεται κάτω από καθορισμένη ένταση πεδίου
- **Μονάδες:** ταχύτητα / πεδίο = (m/s) / (V/m) = m²/Vs
- Τυπικά Νούμερα: $\mu_n = 1360 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_p = 480 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
- **Μικρότερη η ευκινησία των οπών**, 'επειδή οι οπές είναι μεγαλύτερες'

TL 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 11

Electron and Hole Mobilities

$$m_p v = q \mathbf{E} \tau_{mp}$$

$$v = \frac{q \mathbf{E} \tau_{mp}}{m_p}$$

$$v = \mu_p \mathbf{E}$$

$$\mu_p = \frac{q \tau_{mp}}{m_p}$$

$$v = -\mu_n \mathbf{E}$$

$$\mu_n = \frac{q \tau_{mn}}{m_n}$$

- μ_p is the hole mobility and μ_n is the electron mobility

Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits (C. Hu)

Slide 2-12

Electron and Hole Mobilities

$$v = \mu \mathbf{E}; \quad \mu \text{ has the dimensions of } v/\mathbf{E} \left[\frac{\text{cm/s}}{\text{V/cm}} = \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}} \right].$$

Electron and hole mobilities of selected semiconductors

	Si	Ge	GaAs	InAs
μ_n (cm ² /V·s)	1400	3900	8500	30000
μ_p (cm ² /V·s)	470	1900	400	500

Based on the above table alone, which semiconductor and which carriers (electrons or holes) are attractive for applications in high-speed devices?

Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits (C. Hu)

Slide 2-13

Drift Velocity, Mean Free Time, Mean Free Path

EXAMPLE: Given $\mu_p = 470 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, what is the hole drift velocity at $\mathbf{E} = 10^3 \text{ V/cm}$? What is τ_{mp} and what is the distance traveled between collisions (called the **mean free path**)? Hint: When in doubt, use the MKS system of units.

Solution: $v = \mu_p \mathbf{E} = 470 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s} \times 10^3 \text{ V/cm} = 4.7 \times 10^5 \text{ cm/s}$

$$\begin{aligned} \tau_{mp} &= \mu_p m_p / q = 470 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s} \times 0.39 \times 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} / 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \\ &= 0.047 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s} \times 2.2 \times 10^{-12} \text{ kg/C} = 1 \times 10^{-13} \text{ s} = 0.1 \text{ ps} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{mean free path} &= \tau_{mh} v_{th} \sim 1 \times 10^{-13} \text{ s} \times 2.2 \times 10^7 \text{ cm/s} \\ &= 2.2 \times 10^{-6} \text{ cm} = 220 \text{ \AA} = 22 \text{ nm} \end{aligned}$$

This is smaller than the typical dimensions of devices, but getting close.

Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits (C. Hu)

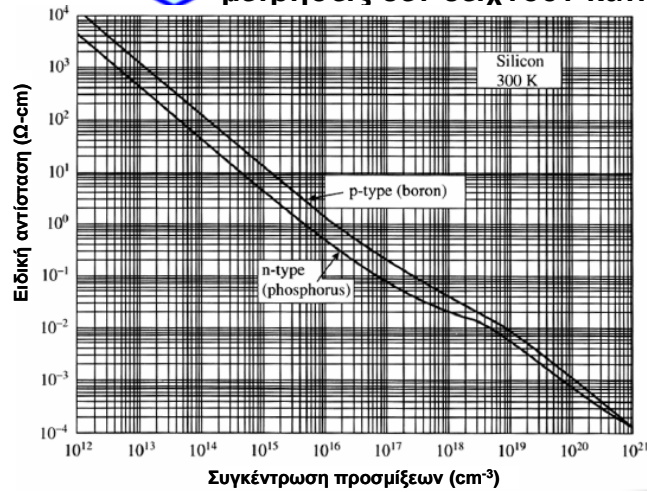
Slide 2-14

Ειδική αντίσταση σαν συνάρτηση της νόθευσης

$$\rho = 1/\sigma = 1 / (q (\mu_n n + \mu_p p))$$



Περιμέναμε μια ευθεία γραμμή, αλλά οι μετρήσεις δεν δείχνουν κάτι τέτοιο



ΤΛ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 15

Mechanisms of Carrier Scattering

There are two main causes of carrier scattering:

1. Phonon Scattering
2. Ionized-Impurity (Coulombic) Scattering

Phonon scattering mobility decreases when temperature rises:

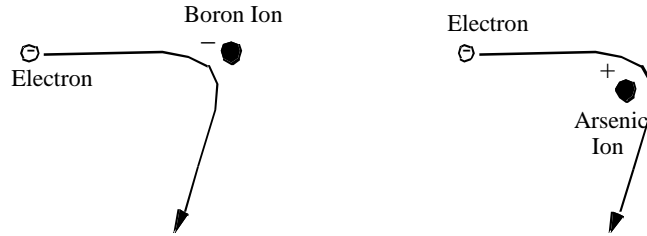
$$\mu_{\text{phonon}} \propto \tau_{\text{phonon}} \propto \frac{1}{\text{phonon density} \times \text{carrier thermal velocity}} \propto \frac{1}{T \times T^{1/2}} \propto T^{-3/2}$$

$\mu = q\tau/m$ $\propto T$ $v_{th} \propto T^{1/2}$

Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits (C. Hu)

Slide 2-16

Impurity (Dopant)-Ion Scattering or Coulombic Scattering



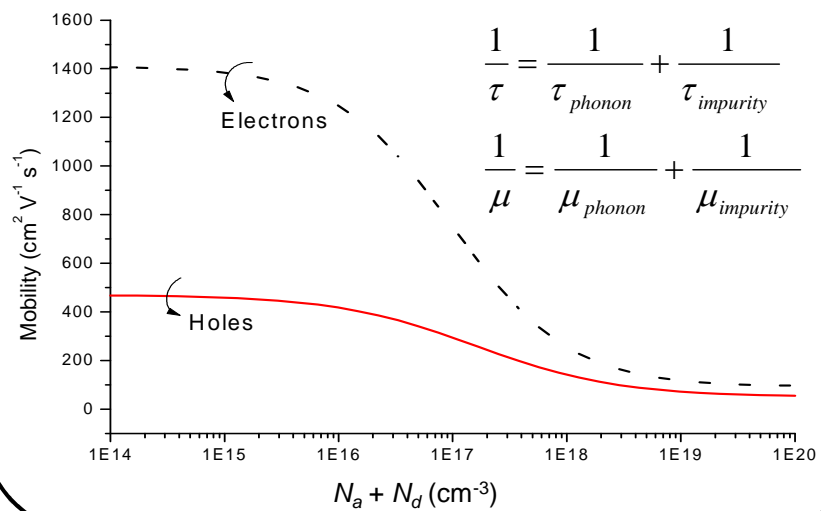
There is less change in the direction of travel if the electron zips by the ion at a higher speed.

$$\mu_{impurity} \propto \frac{v_{th}^3}{N_a + N_d} \propto \frac{T^{3/2}}{N_a + N_d}$$

Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits (C. Hu)

Slide 2-17

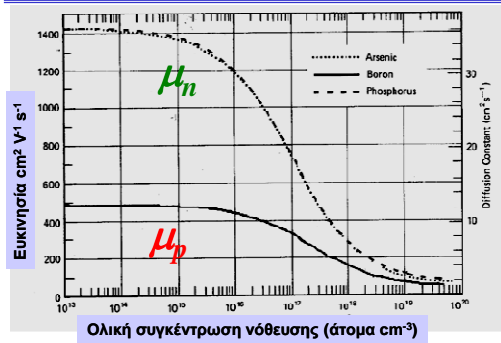
Total Mobility



Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits (C. Hu)

Slide 2-18

Ευκινησία σαν συνάρτηση της Νόθευσης



■ Η ευκινησία των φορέων εξαρτάται από τη συνολική συγκέντρωση νόθευσης ($N_D + N_A$)!

■ μεγαλύτερη νόθευση σημαίνει περισσότερες διαταραχές στο πλέγμα \Rightarrow χαμηλότερη ευκινησία, μ

■ Εμπειρικό μοντέλο πρώτης τάξης, με προσαρμοσμένες τιμές των σταθερών:

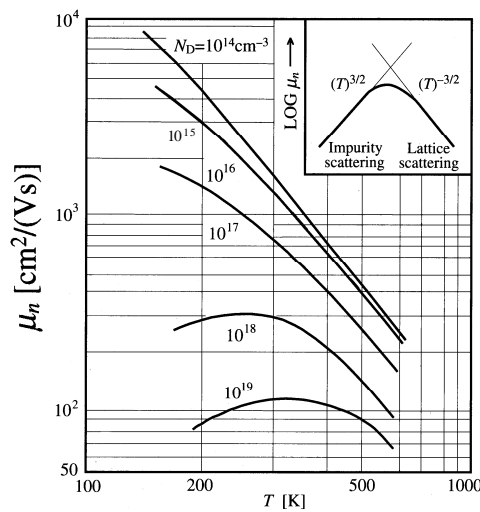
$$\mu = \mu_1 + \frac{\mu_2 - \mu_1}{1 + \left(\frac{N}{N_{ref}}\right)^\alpha}$$

μ_1 : υψηλή ασύμπτωτος
 μ_2 : χαμηλή ασύμπτωτος
 $\alpha \approx 1$
 N_{ref} } Παράμετροι προσαρμογής

TL 5

Slide 19

Temperature Effect on Mobility



Question:
 What N_d will make $d\mu_n/dT = 0$ at room temperature?

Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits (C. Hu)

Slide 2-20

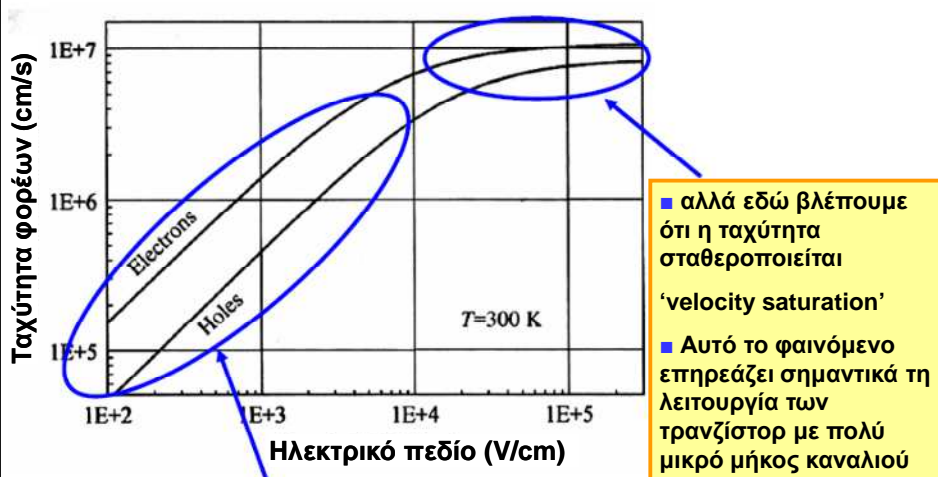
Velocity Saturation

- When the kinetic energy of a carrier exceeds a critical value, it generates an optical phonon and loses the kinetic energy.
- Therefore, the kinetic energy is capped at large E , and the velocity does not rise above a saturation velocity, v_{sat} .
- **Velocity saturation** has a large and deleterious effect on the I_{on} of MOSFETs.

Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits (C. Hu)

Slide 2-21

Ταχύτητα σαν συνάρτηση της Ευκινησίας



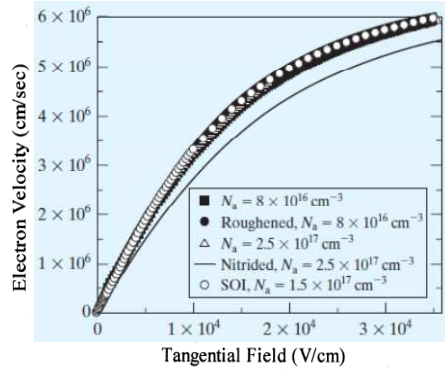
Σε αυτή την περιοχή πράγματι έχουμε $v \sim E$

ΤΛ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 22

Velocity Saturation



$$v = \frac{\mu_{ns} E}{1 + \frac{E}{E_{sat}}}$$

$$E \ll E_{sat} : v = \mu_{ns} E$$

$$E \gg E_{sat} : v = \mu_{ns} E_{sat}$$

Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits (C. Hu)

Slide 6-23

Παραδείγματα Αγωγιμότητας

■ Παράδειγμα 1: καθαρό Si:

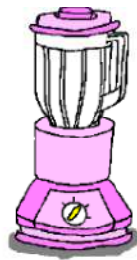
$$n_p = n_i = 1.45 \times 10^{10} / \text{cm}^3$$

$$\sigma = q (\mu_n n + \mu_p p)$$

$$\mu_n = 1360 \text{ cm}^2 / \text{Vs},$$

$$\mu_p = 480 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$$

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$



$$\sigma = 4.27 \times 10^{-6} [\Omega \text{cm}]^{-1}$$

■ Παράδειγμα 1: p-τύπου Si με τυπική νόθευση

$$N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3} :$$

$$\sigma = 0.072 [\Omega \text{cm}]^{-1}$$

ΤΛ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 24

MOSFETs – Λειτουργία και αναλυτικά μοντέλα

ΤΛ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 25

Μήκος καναλιού

■ Εξαιτίας της διάχυσης των ατόμων νόθευσης κάτω από την πύλη κατά τη διάρκεια της κατεργασίας σε υψηλή θερμοκρασία, το πραγματικό μήκος του καναλιού του τρανζίστορ είναι πιο μικρό από το σχεδιαζόμενο πλάτος L της γραμμής πολυπυριτίου.

Labels in diagram: πύλη, διοξειδίο πυριτίου, υποδοχή, πηγή, πραγματικό, L , L_{eff} , μάσκα, L_0 , Active, Poly, W , μάσκα.

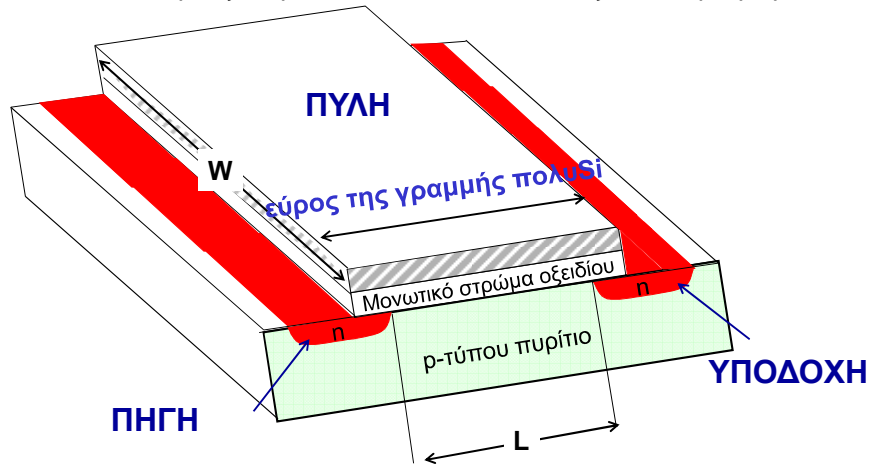
ΤΛ 5017

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 26

MOSFET

- **NMOS:** τρανζίστορ N-καναλιού Μετάλλου-Οξειδίου-Ημιαγωγού



- **W** = πλάτος καναλιού τρανζίστορ

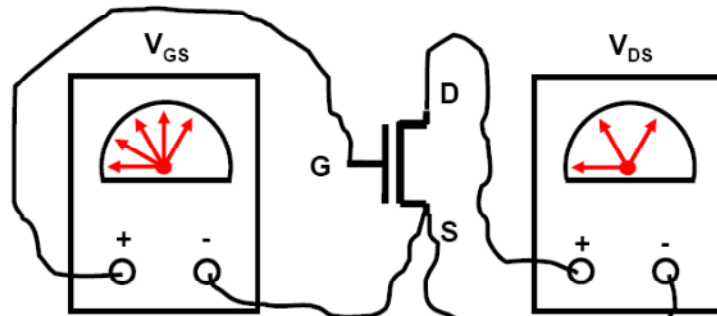
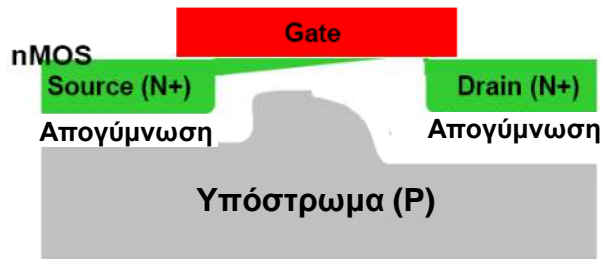
- **L** = πραγματικό μήκος καναλιού

ΤΛ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

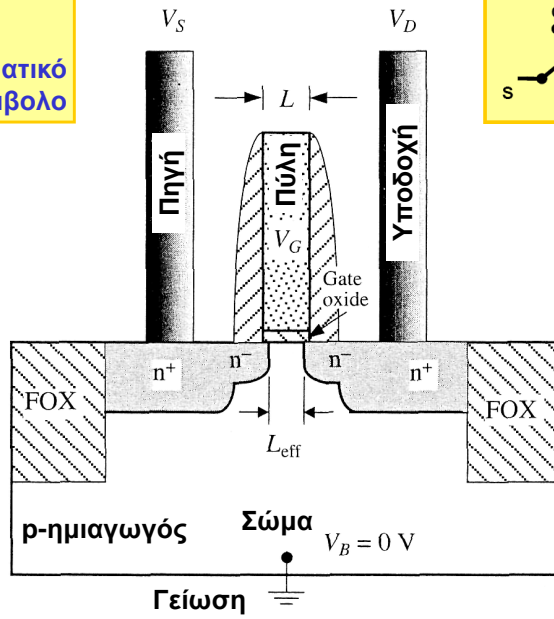
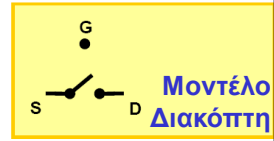
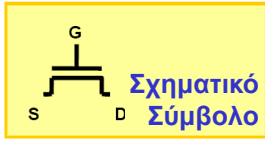
Slide 27

Λειτουργία τρανζίστορ nMOS



Slide 28

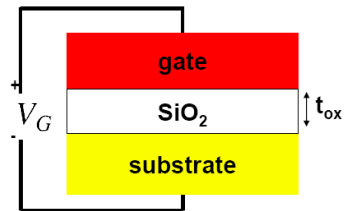
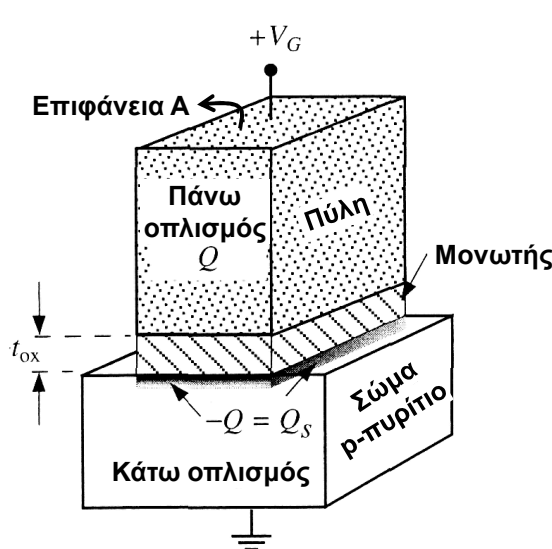
Λειτουργία τρανζίστορ nMOS



ΤΛ 503

Slide 29

Η πύλη του MOSFET ως πυκνωτής



$$C_G = \frac{\epsilon_{ins} A}{t_{ox}}$$

$$\epsilon_{ins} = \epsilon_{ox} = 3.9 \epsilon_0$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$$

ΤΛ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 30

Φορτίο πυκνωτή MOSFET

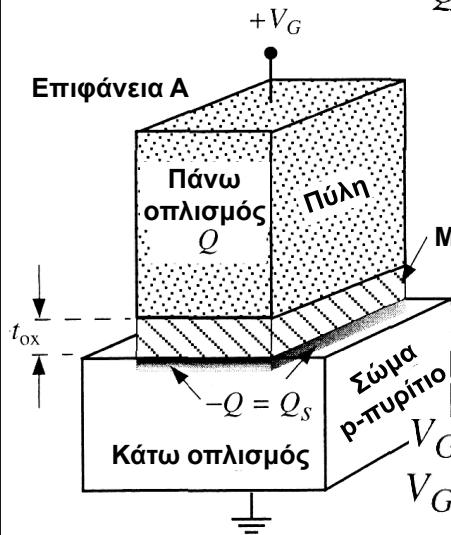
- Η χωρητικότητα πύλης βοηθά να καθορίσουμε το φορτίο στο κανάλι το οποίο σχηματίζει το **στρώμα αντιστροφής**.

$$Q = CV \Rightarrow Q = C_G V_G$$

$$Q_s = Q_B + Q_n$$

ιονισμένα ακίνητα άτομα νόθευσης

ελεύθερα ηλεκτρόνια



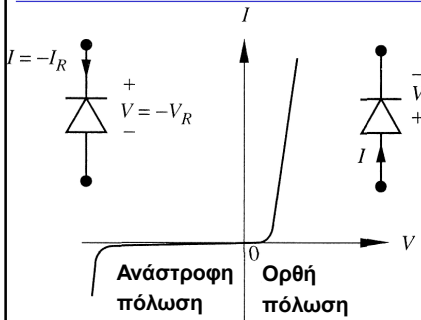
Μία θετική τάση πύλης απαιτείται για τη δημιουργία του φορτίου Q_s , αλλά αυτή πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για να προκαλέσει το σχηματισμό ενός στρώματος ελεύθερων ηλεκτρονίων στο p-πυρίτιο.

$$V_G \leq V_{Tn}: Q_n = 0$$

$$V_G > V_{Tn}: \text{Σχηματισμός στρώματος } Q_n$$

Slide 31

Επαφές pn και σχηματισμός του καναλιού

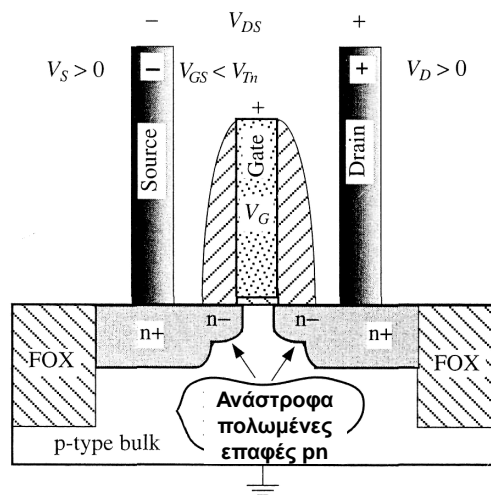


$$I = I_S (e^{V/V_{th}} - 1)$$

$$I = -I_R = -I_S$$

$$V_{th} = 26 \text{ mV σε } 300 \text{ K}$$

Οι επαφές pn του MOSFET



TL 503

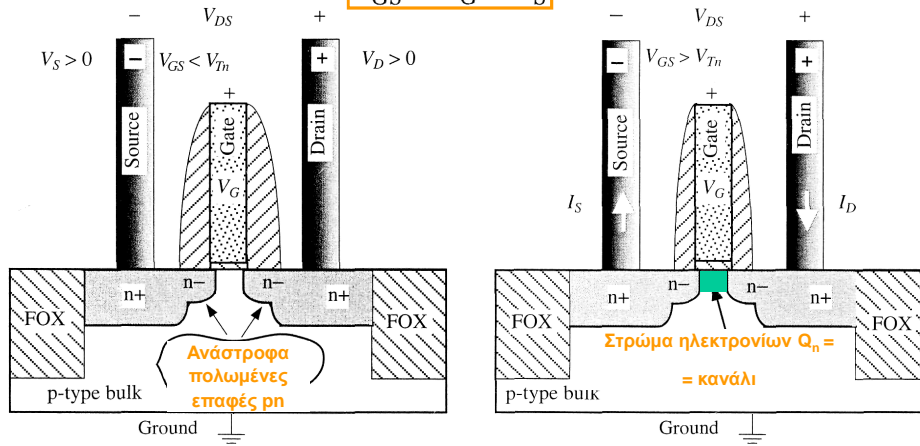
L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 32

Σχηματισμός του n-καναλιού

$$V_{DS} = V_D - V_S > 0$$

$$V_{GS} = V_G - V_S$$



$$I_D = 0 \quad \text{Για } (V_{GS} < V_{Tn})$$

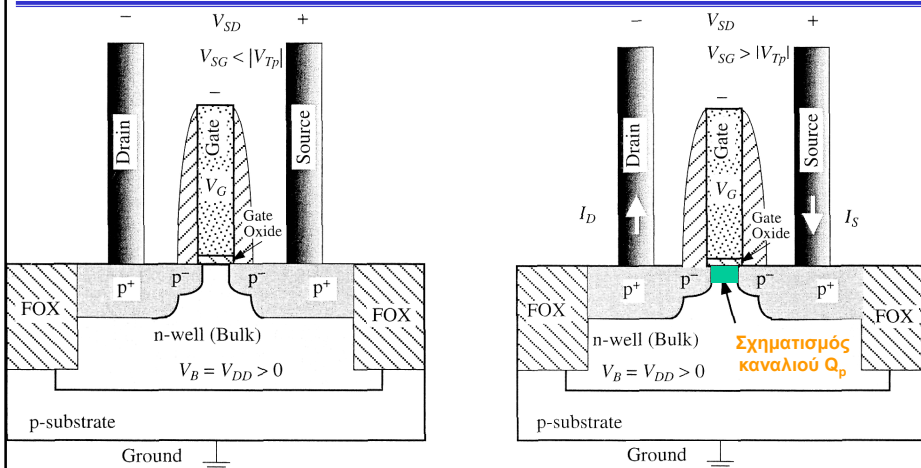
I_D Μπορεί να ρέει Για $(V_{GS} \geq V_{Tn})$ και $(V_{DS} > 0)$

ΤΛ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 33

Σχηματισμός του p-καναλιού



$$I_D = 0 \quad \text{Για } (V_{SG} < |V_{Tp}|)$$

I_D Μπορεί να ρέει Για $(V_{SG} \geq |V_{Tp}|)$ και $(V_{SD} > 0)$

ΤΛ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 34

Ρεύμα nFET & Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Παρατήρηση: Στα μοντέλα ρεύματος πρέπει να χρησιμοποιηθεί το πραγματικό μήκος καναλιού: $L_{eff} < L$

Κιούμα Υποδοχής-Πηγής: $I_{DS} = \frac{|Q_n|}{\tau_t}$

Κινούμενο φορτίο στο κανάλι: $Q_n = -C_G(V_{GS} - V_{Tn})$

Χωρητικότητα πύλης: $C_G = WLC_{ox}$

Χρόνος μεταφοράς: $\tau_t = \frac{L}{v}$

$C_G = \frac{\epsilon_{ins} A}{t_{ox}}$

$A = WL$

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

Χωρητικότητα οξειδίου (μονάδες F/cm²)

$I_{DS} \approx vC_{ox}W(V_{GS} - V_{Tn})$

$v = \mu_n E = \mu_n \frac{V_{DS}}{L}$

$I_{DS} \approx \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Tn}) V_{DS}$

Slide 35

nFET

$I_{DS} \approx \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Tn}) V_{DS}$

pFET ($V_{DS}, V_{GS}, I_D, V_T < 0$)

$I_{SD} \approx \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{SG} - |V_{Tp}|) V_{SD}$

- Το ρεύμα υπολογίζεται σαν να ήταν nMOS χρησιμοποιώντας απόλυτες τιμές

Ρεύμα FET

nFET

$$I_{DS} \approx \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Tn}) V_{DS}$$

pFET

$$I_{SD} \approx \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{SG} - |V_{Tp}|) V_{SD}$$

- το πιο απλό (πρώτης τάξης) μοντέλο για το ρεύμα του τρανζίστορ MOS
- Στη συνέχεια θα δούμε πιο ακριβή μοντέλα
- μ_n (μ_p), C_{ox} , V_{Tn} (V_{Tp}): δίνονται από την αντίστοιχη τεχνολογία, ο σχεδιαστής δεν μπορεί να αλλάξει τις τιμές τους
- V_{GS} (V_{SG}), V_{DS} (V_{SD}), I_{DS} (I_{SD}): Εξαρτώνται από το κύκλωμα
- W, L : μπορούν να καθοριστούν από τον σχεδιαστή

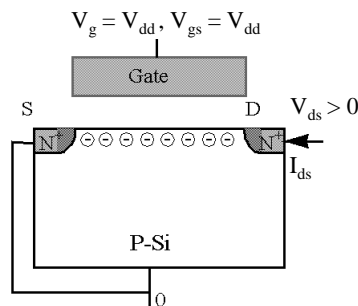
ΤΛ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 37

Surface Mobilities and High-Mobility FETs

Surface Mobilities



How to measure the surface mobility:

$$I_{ds} = W \times Q_{inv} \times v = W Q_{inv} \mu_{ns} E = W Q_{inv} \mu_{ns} V_{ds} / L$$

$$= W C_{oxe} (V_{gs} - V_t) \mu_{ns} V_{ds} / L$$

Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits (C. Hu)

Slide 6-38

Mobility is a function of the average of the fields at the bottom and the top of the inversion charge layer, E_b and E_t .

From Gauss's Law,

$$E_b = -Q_{dep}/\epsilon_s$$

$$V_t = V_{fb} + \phi_{st} - Q_{dep}/C_{oxe}$$

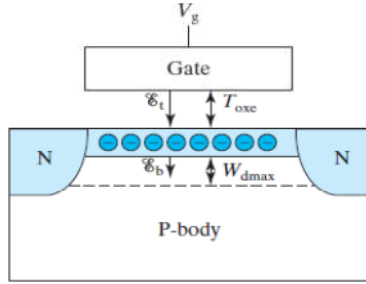
Therefore,

$$E_b = \frac{C_{oxe}}{\epsilon_s} (V_t - V_{fb} - \phi_{st})$$

$$E_t = -(Q_{dep} + Q_{inv})/\epsilon_s$$

$$= E_b - Q_{inv}/\epsilon_s = E_b + \frac{C_{oxe}}{\epsilon_s} (V_{gs} - V_t)$$

$$= \frac{C_{oxe}}{\epsilon_s} (V_{gs} - V_{fb} - \phi_{st})$$



$$\therefore \frac{1}{2} (E_b + E_t) = \frac{C_{oxe}}{2\epsilon_s} (V_{gs} + V_t - 2V_{fb} - 2\phi_{st})$$

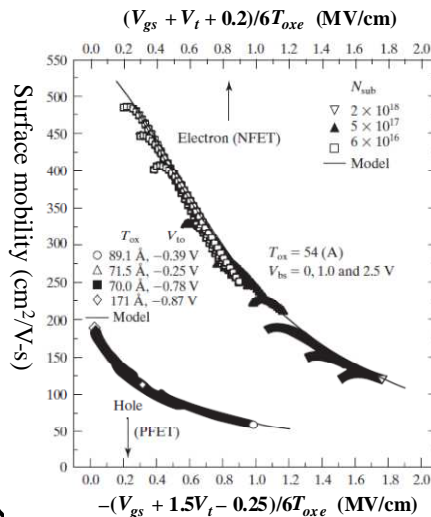
$$\approx \frac{C_{oxe}}{2\epsilon_s} (V_{gs} + V_t + 0.2 V)$$

$$= \frac{V_{gs} + V_t + 0.2 V}{6T_{oxe}}$$

Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits (C. Hu)

Slide 6-39

Universal Surface Mobilities



• Surface roughness scattering is stronger (mobility is lower) at higher V_g , higher V_t , and thinner T_{oxe} .

$$\mu_{ns} = \frac{540 \text{ cm}^2/\text{Vs}}{1 + \left(\frac{V_{gs} + V_t + 0.2 \text{ V}}{5.4 T_{oxe}} \right)^{1.85}}$$

$$\mu_{ps} = \frac{185 \text{ cm}^2/\text{Vs}}{1 - \left(\frac{V_{gs} + 1.5V_t - 0.25 \text{ V}}{3.38 T_{oxe}} \right)}$$

Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits (C. Hu)

Slide 6-40

EXAMPLE: What is the surface mobility at $V_{gs}=1$ V in an N-channel MOSFET with $V_t=0.3$ V and $T_{oxe}=2$ nm?

Solution:

$$\begin{aligned} & (V_{gs} + V_t + 0.2) / 6T_{oxe} \\ & = 1.5 \text{ V} / 12 \times 10^{-7} \text{ cm} \\ & = 1.25 \text{ MV/cm} \end{aligned}$$

1 MV is a megavolt (10^6 V). From the mobility figure, $\mu_{ns}=190$ cm²/Vs, which is several times smaller than the bulk mobility.

$$I_{DS} \approx \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Tn}) V_{DS}$$

$= \beta_n$

$$I_{SD} \approx \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} (V_{SG} - |V_{Tp}|) V_{SD}$$

$= \beta_p$

Μονάδες $\Rightarrow [AV^2]$

$k'_n = \mu_n C_{ox}$

Διαγωγιμότητα διατάξης

Διαγωγιμότητα διαδικασίας

$k'_p = \mu_p C_{ox}$

nFET $I_{DS} \approx k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Tn}) V_{DS} = \beta_n (V_{GS} - V_{Tn}) V_{DS}$

pFET $I_{SD} \approx k'_p \frac{W}{L} (V_{SG} - |V_{Tp}|) V_{SD} = \beta_p (V_{SG} - |V_{Tp}|) V_{SD}$

ΤΑ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 42

Διαφορές μεταξύ nFET και pFET

$$\frac{k'_n}{k'_p} = \frac{\mu_n C_{ox}}{\mu_p C_{ox}} = \frac{\mu_n}{\mu_p} = r \sim (2 - 3)$$

- για nfets: $\mu_n = 500$
cm²/V-sec
- για pfets: $\mu_p = 180$
cm²/V-sec

$$\frac{\beta_n}{\beta_p} = \frac{k'_n \left(\frac{W}{L}\right)_n}{k'_p \left(\frac{W}{L}\right)_p} = r \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_n}{\left(\frac{W}{L}\right)_p}$$

- Ο λόγος αυτός μπορεί να ρυθμιστεί μεταβάλλοντας τις τιμές του πλάτους καναλιού W_n ή W_p .

- Κατά τον σχεδιασμό των κυκλωμάτων CMOS, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην επιλογή του κατάλληλου λόγου των διαστάσεων (W/L) για κάθε τρανζίστορ, ώστε να διασφαλιστούν τα αναγκαία επίπεδα ρεύματος για τη δεδομένη λειτουργία.

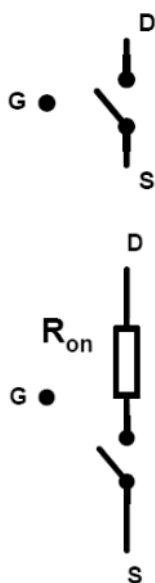
nFET

$$I_{DS} \approx k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{Tn}) V_{DS} = \beta_n (V_{GS} - V_{Tn}) V_{DS}$$

- Για δοσμένο V_{GS} : το I_{DS} είναι ανάλογο του V_{DS} : **ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΧΕΣΗ**
- Το τρανζίστορ MOS συμπεριφέρεται σαν ωμικός αντιστάτης

$$R_n = \frac{V_{DS}}{I_{DS}} = \frac{1}{\beta_n (V_{GS} - V_{Tn})}$$

Βελτιωμένο μοντέλο του διακόπτη MOS



Η θέση του διακόπτη εξαρτάται από την τάση πύλης-πηγής

V_{GS}	nMOS	pMOS
hi	κλειστός	ανοιχτός
lo	ανοιχτός	κλειστός

Ένα πιο λεπτομερές μοντέλο περιλαμβάνει και την R_{on}

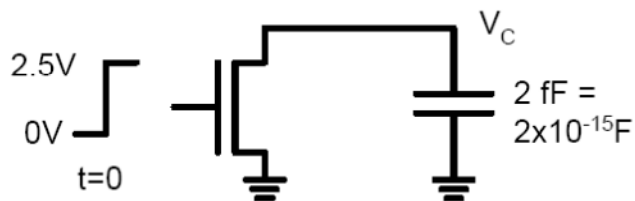
- Το μοντέλο με την R_{on} είναι πιο ακριβές από το απλό μοντέλο του διακόπτη (μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της καθυστέρησης διάδοσης ενός κυκλώματος)

ΤΛ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 45

Πρόβλημα: καθυστέρηση nMOS



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

Για $t = 0$, η τάση V_{GS} του nMOS αλλάζει απότομα από 0 σε 2.5 V. $V_C(0) = 2.5V$.

Έστω $V_{Tn} = 0.5 V$, $\beta_n = 200 \mu A/V^2$

Υπολογίστε το χρόνο t έτσι ώστε

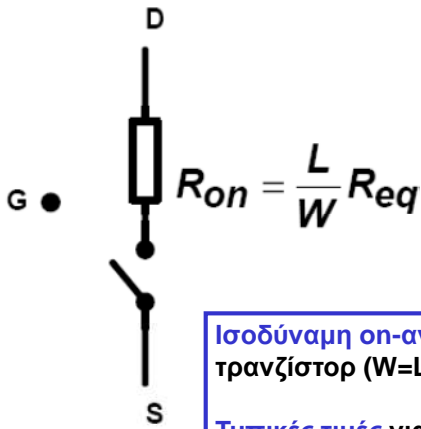
$$V_C = 0.25V.$$

ΤΛ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

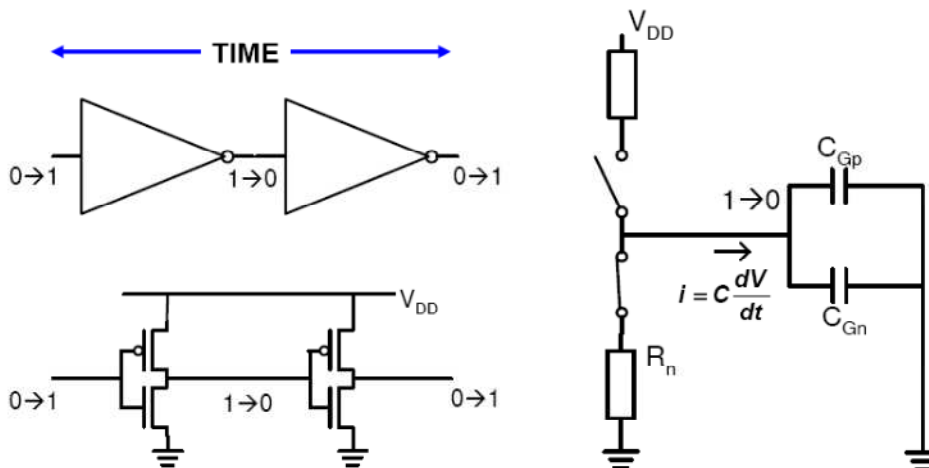
Slide 46

Μοντέλο αντίστασης διακόπτη R_{on} (Εμπειρικό)



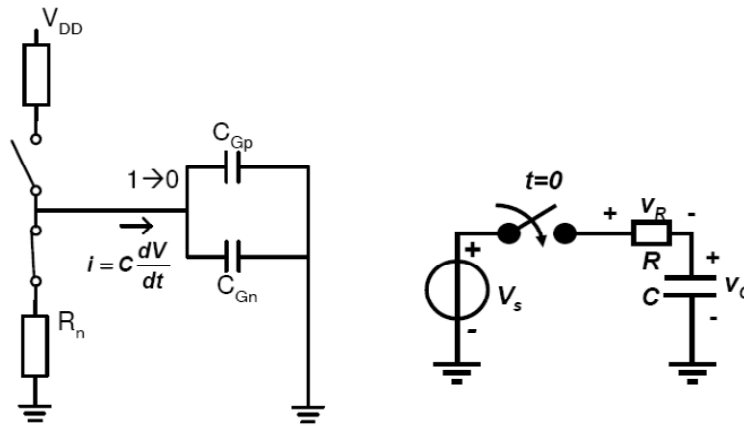
V_{DD} (V)	1	1.5	2	2.5
NMOS (k Ω)	35	19	15	13
PMOS (k Ω)	115	55	38	31

Ανάλυση καθυστέρησης



- Το ρεύμα του τρανζίστορ περιορίζεται λόγω της αντίστασής του
- Η καθυστέρηση προέρχεται από τη χωρητικότητα πύλης
- Επίσης, από τις ιδιότητες της γραμμής διασύνδεσης

Εκτίμηση καθυστέρησης



- $W=1\mu\text{m}$, $L=0.25\mu\text{m}$, $t_{\text{ox}}=10\text{nm}$
- $R \approx 1\text{k}\Omega$
- $C=W*L*\epsilon_0*\epsilon_r/t_{\text{ox}} \approx 1\text{fF}$
- $\tau \approx 1\text{ps}$

Σχετικά χοντροκομμένος υπολογισμός

ΤΛ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 49

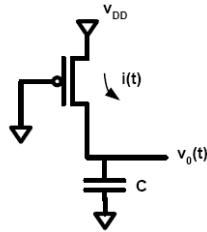
Ενέργεια αλλαγής λογικής κατάστασης

ΤΛ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 50

Ενέργεια μετάβασης Low-to-High

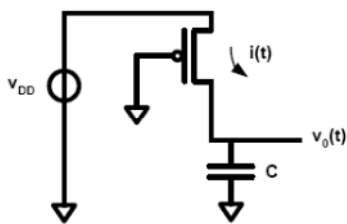


Ισοδύναμο Κύκλωμα για
μετάβαση low-to-high

E_C – Ενέργεια που αποθηκεύεται στον πυκνωτή C

$$\begin{aligned}
 E_C &= \int_0^{\infty} i v_0 dt & v_0 &= v_0(t) & i &= i(t) = C \frac{dv_0}{dt} \\
 &= \int_0^{\infty} C v_0 \frac{dv_0}{dt} dt \\
 &= \int_0^{V_{DD}} C v_0 dv_0 = \frac{1}{2} C v_0^2 \Big|_0^{V_{DD}} = \frac{1}{2} C V_{DD}^2
 \end{aligned}$$

Ενέργεια μετάβασης Low-to-High



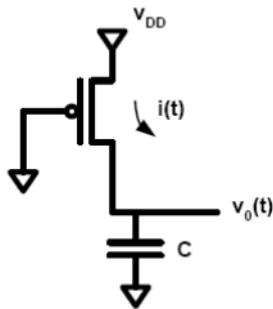
$E_{V_{DD}}$ = Ενέργεια που δίνεται
από την παροχή τάσης V_{DD}

$$E_{V_{DD}} = \int_0^{\infty} i(t) V_{DD} dt = \int_0^{V_{DD}} C V_{DD} \frac{dv_0}{dt} dt = C V_{DD}^2$$

$$E_{V_{DD}} = C V_{DD}^2 \quad E_C = \frac{1}{2} C V_{DD}^2$$

**Ερωτ: που είναι η υπόλοιπη;
Καταναλώθηκε από το τρανζίστορ!**

Ενέργεια μετάβασης Low-to-High



E_{diss} Ενέργεια που καταναλώνεται στο τρανζίστορ

$$\begin{aligned} E_{diss} &= \int_0^{\infty} i(V_{DD} - v_o) dt \\ &= \int_0^{\infty} iV_{DD} dt - \int_0^{\infty} iv_o dt \\ &= E_{V_{DD}} - E_c \end{aligned}$$



ΤΛ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 53

Περίληψη

- ❑ Οι καθυστερήσεις είναι αναπόφευκτες.
- ❑ Αυτές οφείλονται στα φυσικά χαρακτηριστικά των τρανζίστορ και στα καλώδια διασύνδεσης
- ❑ Κάθε γεγονός αλλαγής λογικού επιπέδου απαιτεί τη μεταφορά ενέργειας στο κύκλωμα.
- ❑ Αυτό υπονοεί κατανάλωση ισχύος

ΤΛ 503

L6: Καθυστέρηση-Ενέργεια

Slide 54