



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Σχεδίαση CMOS Ψηφιακών Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων

Ενότητα 2: Τεχνολογία CMOS

Αγγελική Αραπογιάννη

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

Πυρίτιο

- Η βάση για τα σύγχρονα ημιαγωγικά κυκλώματα είναι το πυρίτιο
- Ένας κρύσταλλος καθαρού πυριτίου συμπεριφέρεται σαν μονωτής
- Εάν προσθέσουμε προσμίξεις (impurities) τότε αλλάζουμε την αγωγιμότητα



Κατηγορίες προσμίξεων

- Donors : Δίνουν ελεύθερα ηλεκτρόνια (Δότες)
- Acceptors : Δίνουν ελεύθερες οπές (Αποδέκτες) (οι οπές δημιουργούνται με δέσμευση ηλεκτρονίων)



Wafers

- Ξεκινώντας με «σπέρμα» παράγουμε κύλινδρο κρυσταλλικού πυριτίου
- Ο κύλινδρος κόβεται σε λεπτές φέτες
- Η μία πλευρά κάθε φέτας γυαλίζεται και χρησιμοποιείται για κατασκευή ολοκληρωμένων



Οξείδωση (Παραγωγή SiO_2)

- Υγρή οξείδωση (με υδρατμούς 900°C – 1000°C), είναι γρήγορη
- Ξηρή οξείδωση (καθαρό οξυγόνο 1200°C), αργή, καλύτερος έλεγχος πάχους

Σήμερα αντί για οξείδιο του πυριτίου χρησιμοποιούνται νιτρίδια μεταξύ της πύλης του τρανζίστορ και του καναλιού



Διάχυση – Εμφύτευση Ιόντων

- Diffusion (Διάχυση)
 - Ατμοί προσμίξεων πάνω στην επιφάνεια του κρυστάλλου (θα διεισδύσουν στον κρύσταλλο)
- Ion Implantation (Εμφύτευση Ιόντων)
 - Προσμίξεις με υψηλή ενέργεια εκτοξεύονται στον κρύσταλλο



Δημιουργία σχημάτων (Patterning)

- Μπορούμε να ελέγξουμε σε ποία περιοχή του κρυστάλλου εφαρμόζουμε τις προηγούμενες διαδικασίες
- Ο έλεγχος γίνεται με επικάλυψη του κρυστάλλου στις περιοχές που δεν θέλουμε να έχουμε επίδραση



Φωτοαντιιστατικά

- Αρχικά καλύπτουμε το κρύσταλλο με κάποιο χημικό (φωτοαντιιστατικό)
- Κατόπιν έχουμε έκθεση φωτός πάνω στον κρύσταλλο
- Οι περιοχές στις οποίες έχουμε έκθεση φωτός καθορίζονται από μία μάσκα (mask)



Γραφή με φως- Lithography (1 από 2)

- Γίνεται σε μηχανήματα υψηλού κόστους
- Οι masks (μάσκες) έχουν επίσης υψηλό κόστος κατασκευής
- Εναλλακτικά δέσμη ηλεκτρονίων (e-beam)



Γραφή με φως- Lithography (2 από 2)

- Με την έκθεση στο φώς αλλάζουν οι χημικές ιδιότητες του υλικού επικάλυψης
- Με χημικές διεργασίες απομακρύνεται το υλικό επικάλυψης στις περιοχές οι οποίες εκτέθηκαν στο φως
- Εναλλακτικά απομακρύνεται το υλικό από τις περιοχές οι οποίες δεν εκτέθηκαν στο φως.

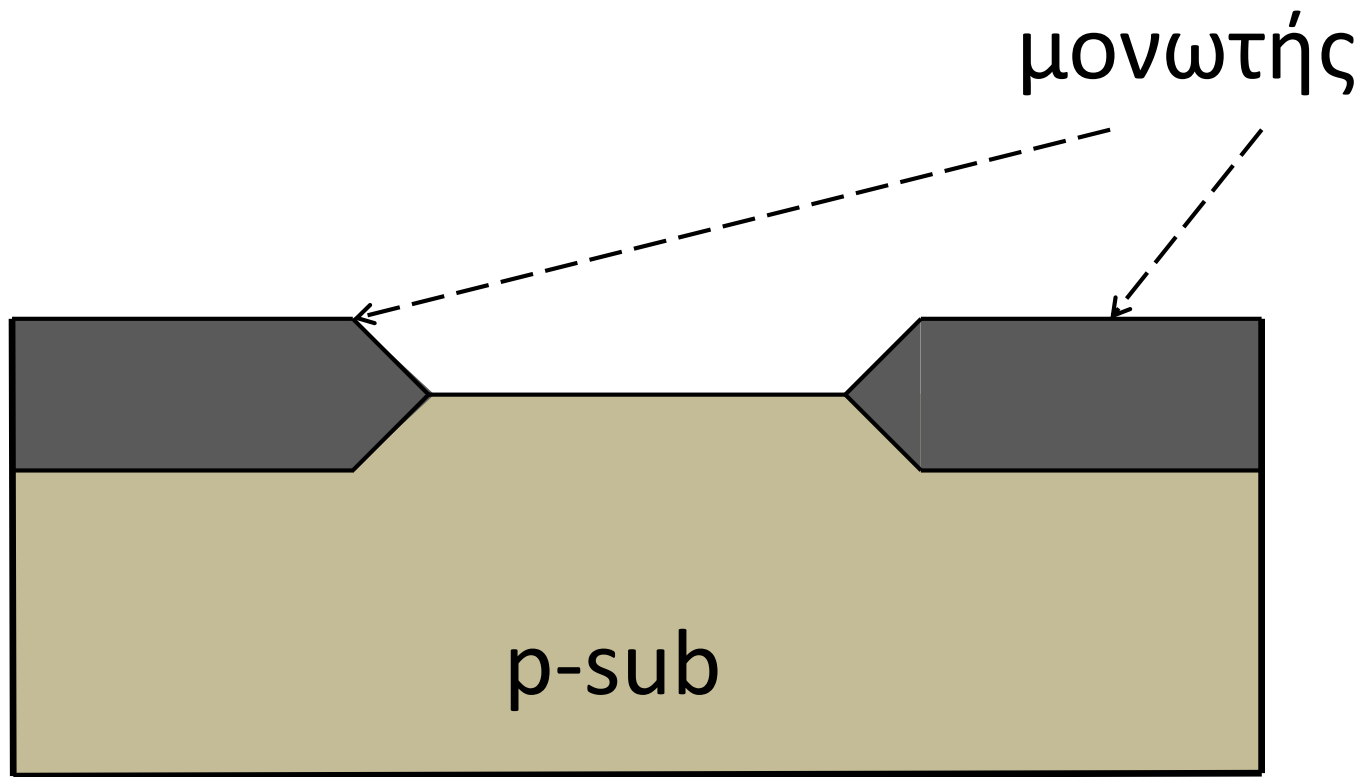


Υλοποίηση n-MOS Τρανζίστορ

- Το n-MOS τρανζίστορ έχει υπόστρωμα τύπου p
 - Άρα ξεκινάμε με υπόστρωμα τύπου p
 - Εναλλακτικά δημιουργούμε «πηγάδι» τύπου p σε υπόστρωμα τύπου n
- Τις περιοχές που δεν θα χρησιμοποιήσουμε για το τρανζίστορ θα τις απομονώσουμε ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν από πάνω τους γραμμές χωρίς να τις επηρεάζουν

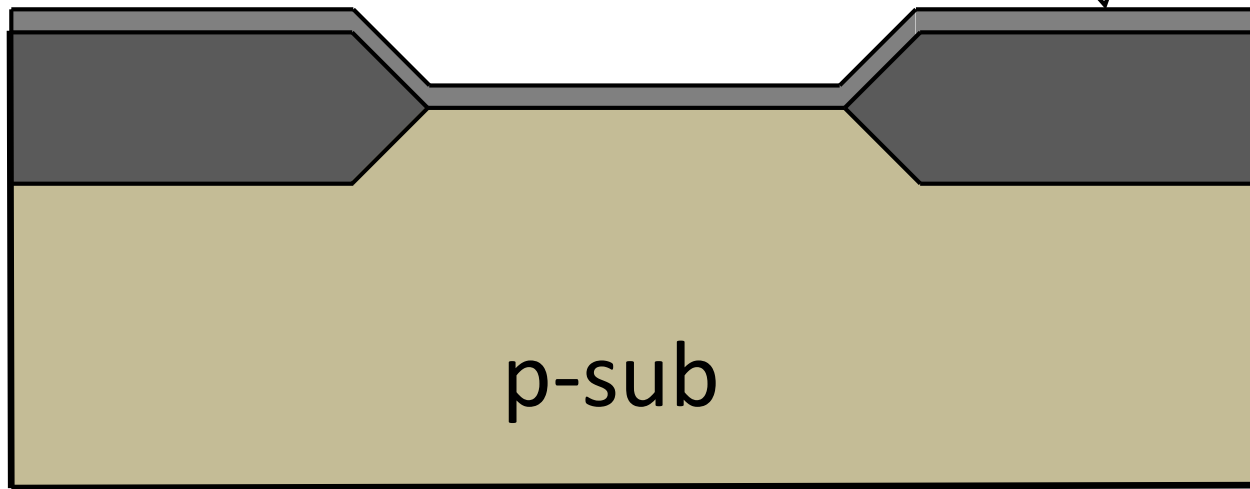


Υπόστρωμα με μονωτή

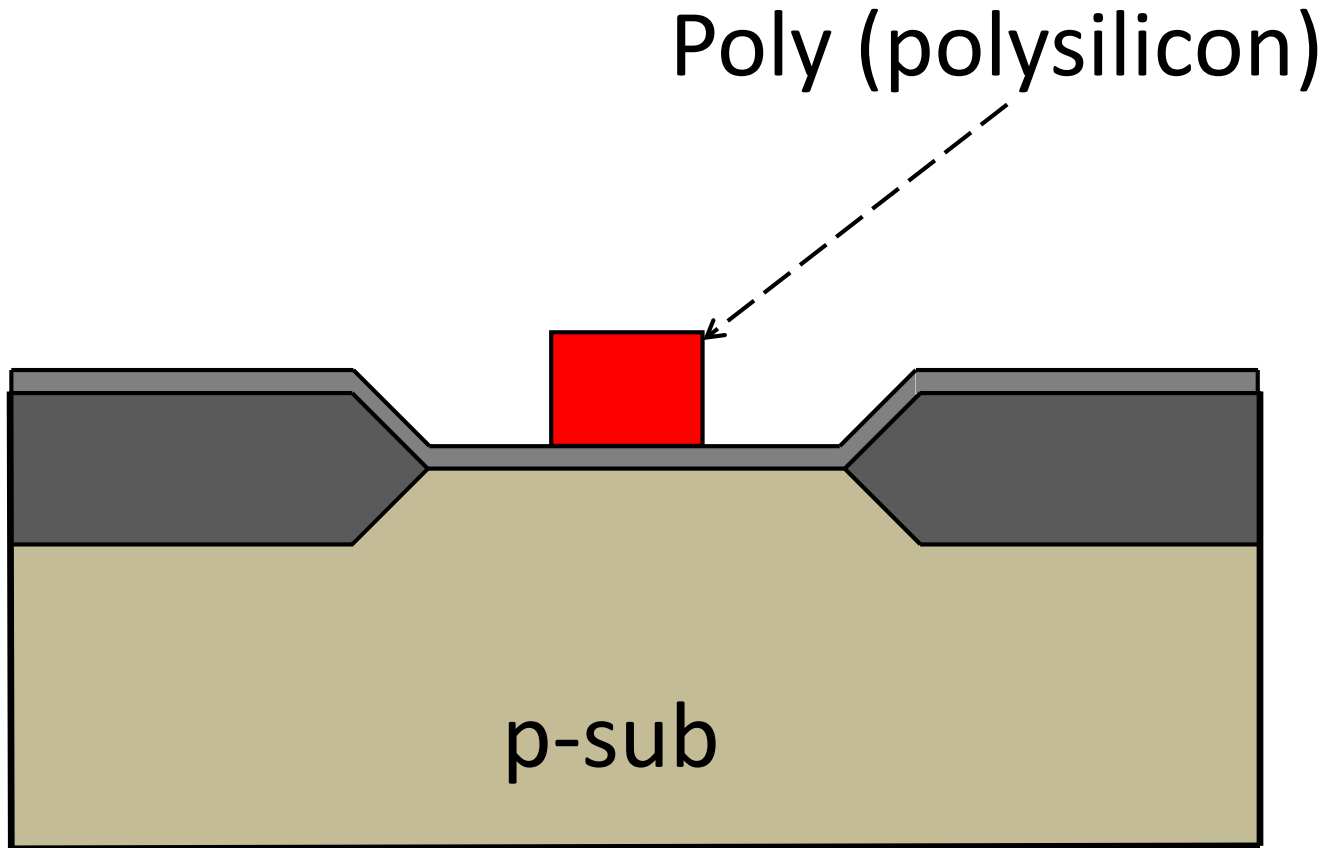


Προσθήκη μονωτή Πύλης

Λεπτός μονωτής

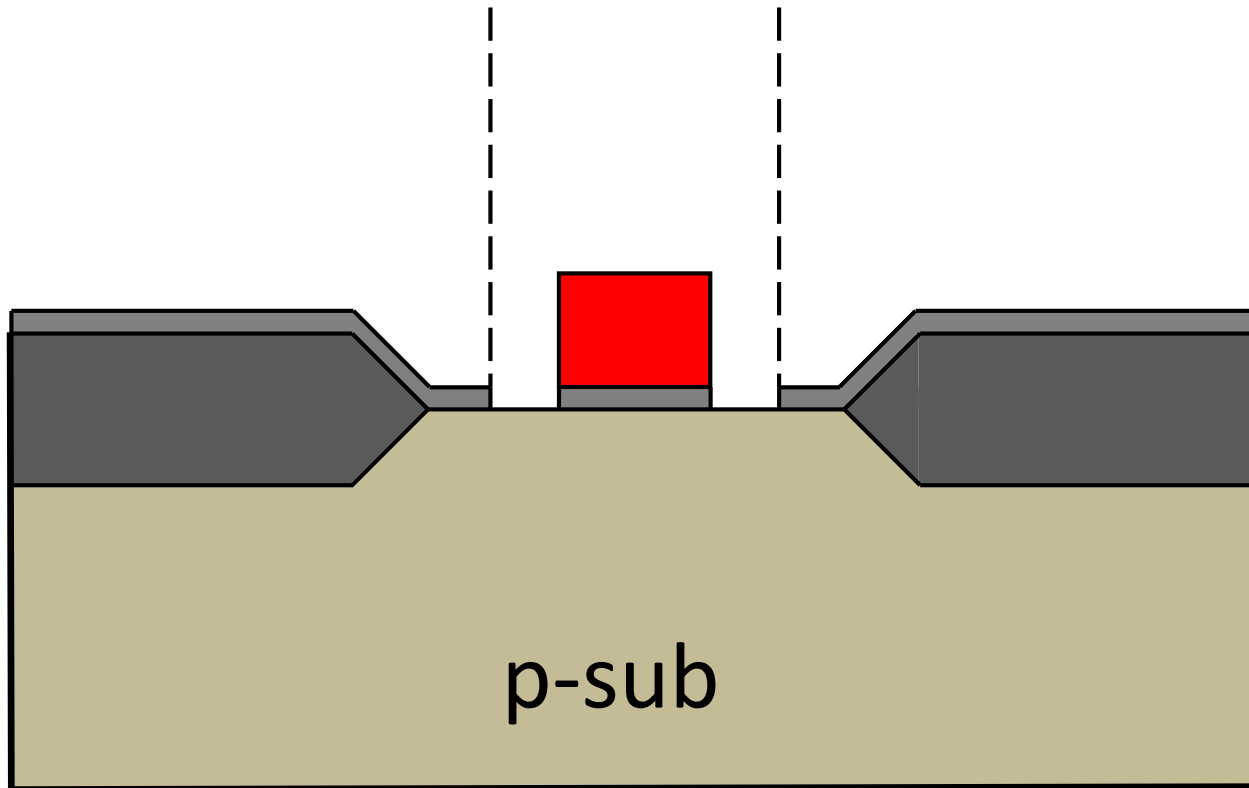


Προσθήκη Πύλης

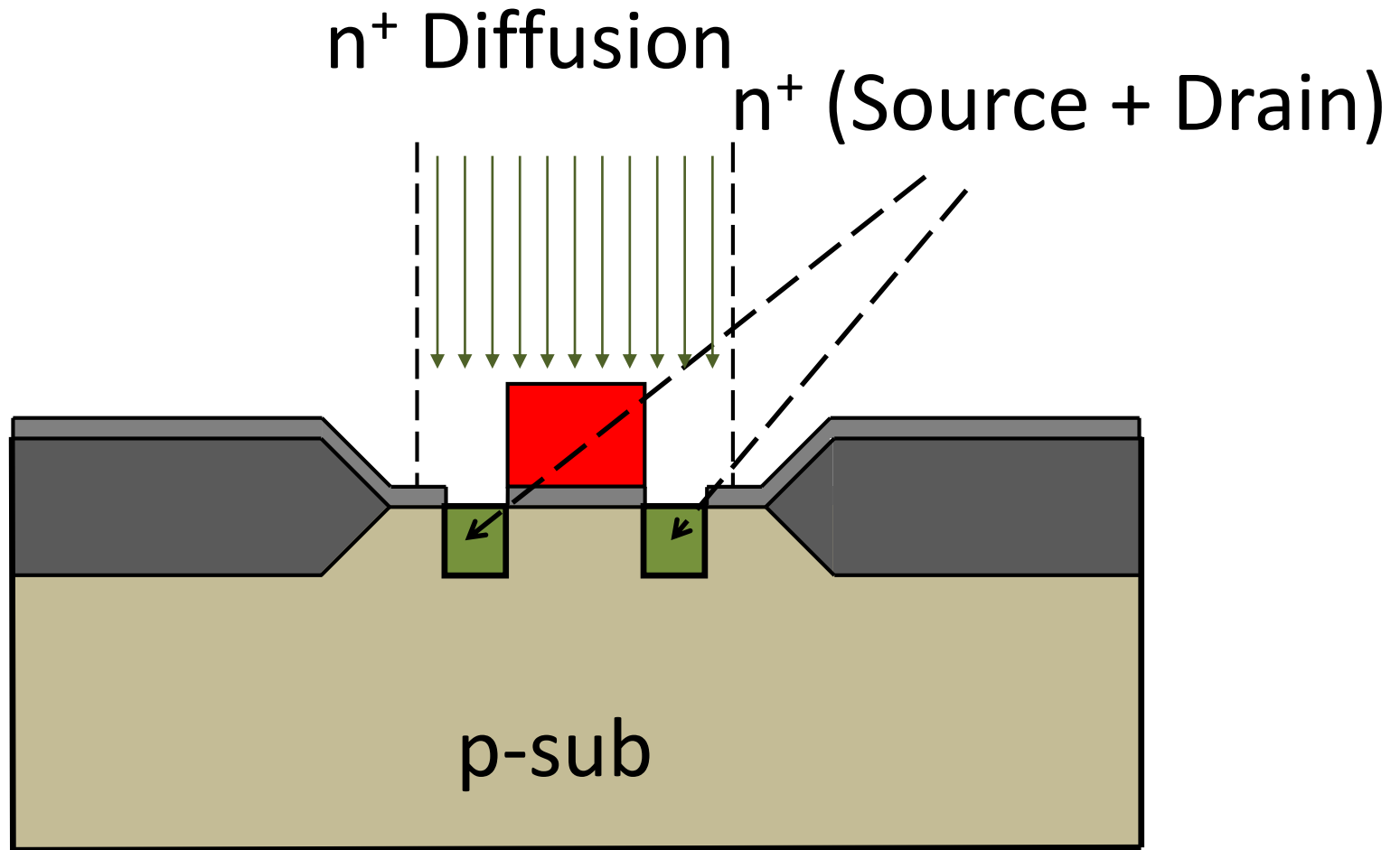


Ενεργός Περιοχή

Ενεργός Περιοχή (Active)



Δημιουργία Πηγής και Απαγωγού

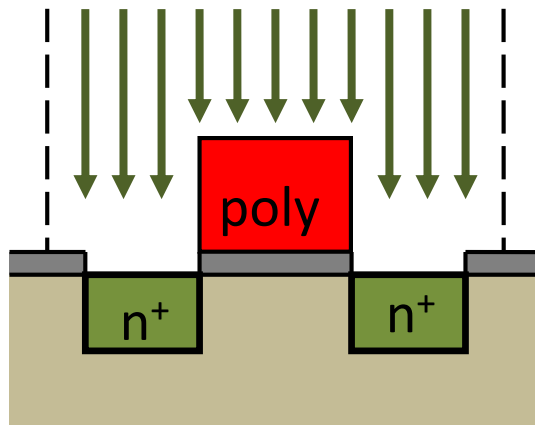


Self-Alingment

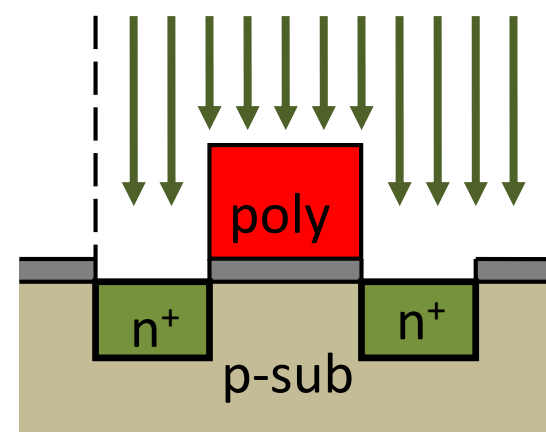
- Η μάσκα για το n^+ diff (n^+ diffusion) υπερκαλύπτει το poly
 - Δεν μπορούμε να τοποθετήσουμε μάσκες με απόλυτη ακρίβεια
 - Με υπερκάλυψη και καθώς το n^+ diff δεν μπορεί να περάσει το μονωτή δεν δημιουργείται πρόβλημα με την ακρίβεια στην τοποθέτηση μάσκας



Με Self-Alignment

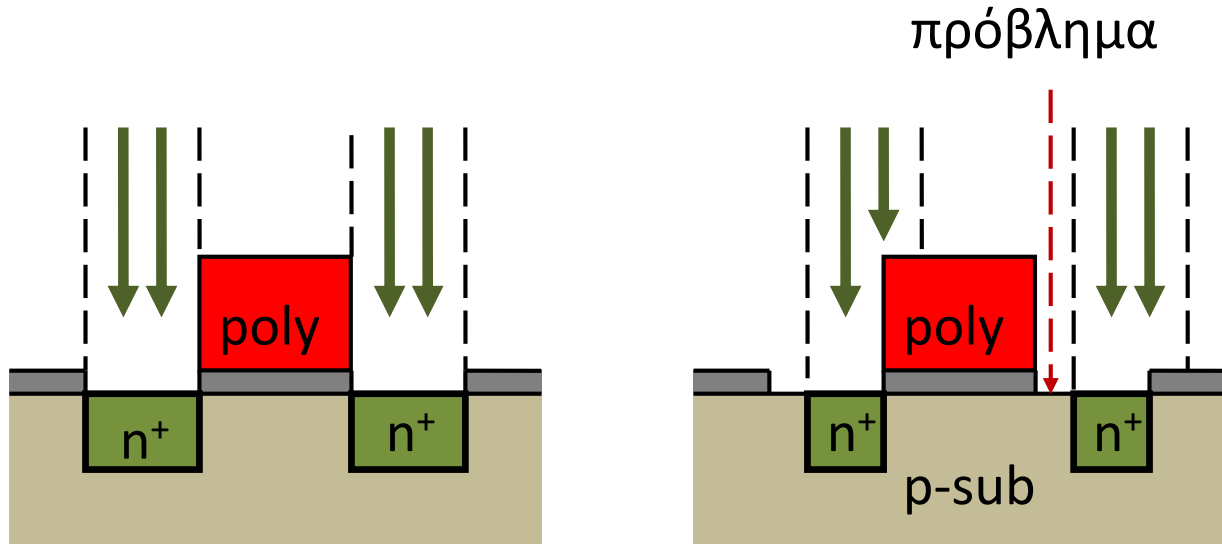


Ιδανική Περίπτωση με
Self-Alignment



Δεξιά ολίσθηση με
Self-Alignment

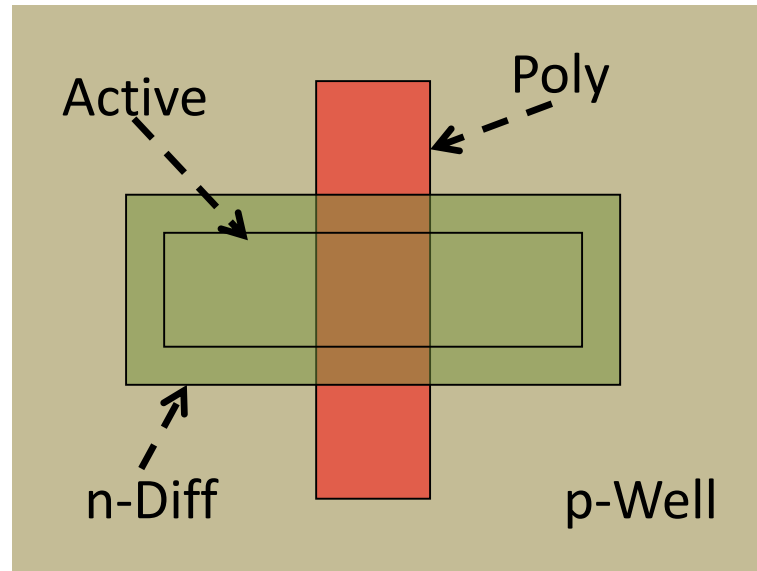
Χωρίς Self-Alignment



Ιδανική Περίπτωση χωρίς
Self-Alignment

Δεξιά ολίσθηση χωρίς
Self-Alignment

Κάτοψη Τρανζίστορ



- Υπερκαλύψεις για αποφυγή κατασκευαστικών ατελειών



Παραλλαγές

- n-Well
- p-Well
- Triple Well
- Twin-tub
- SOI
- Spacers (Low Doping-High Doping)
- Κ.τ.λ.



Συνδέσεις (1 από 4)

- Το metal1 συνδέεται:
 - Με contact με n^+ , p^+ , poly
 - Με via1 με metal2
- Το metal2 συνδέεται:
 - Με via1 με metal1
 - Με via2 με metal3



Συνδέσεις (2 από 4)

- Γενικά το metal x συνδέεται:
 - Με via($x-1$) με metal($x-1$)
 - Με via x με metal($x+1$)
- Για σύνδεση του metal2 με poly
 - metal2-metal1 με via1
 - Metal1-poly με contact

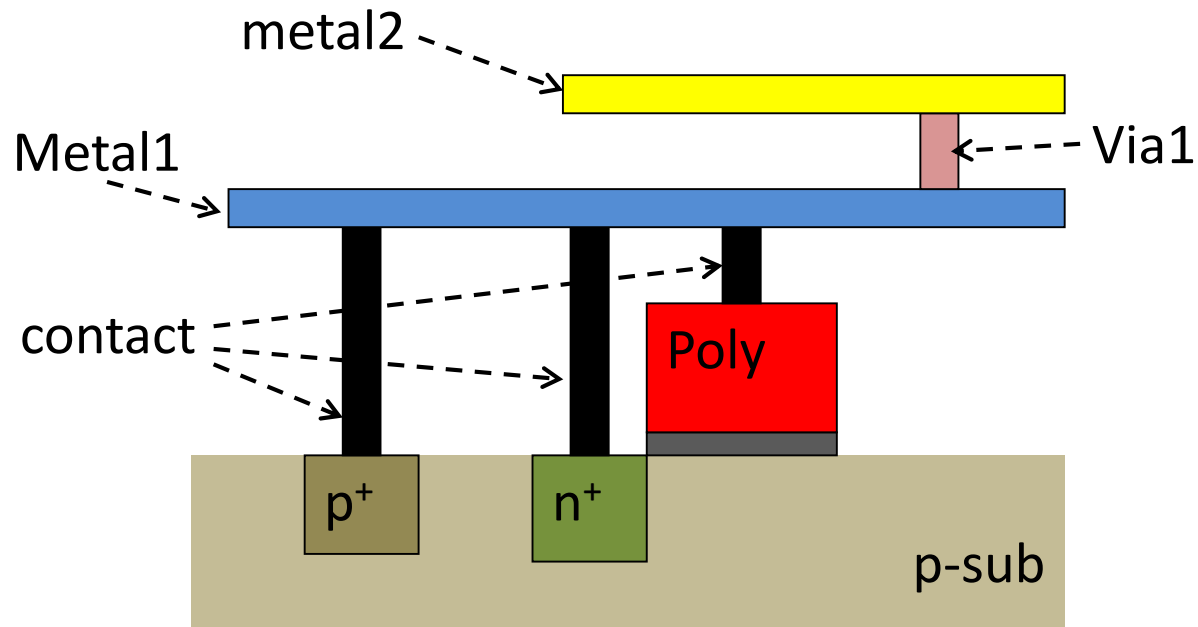


Συνδέσεις (3 από 4)

- Το sub (υπόστρωμα) ή το well πρέπει να συνδέονται σε κατάλληλη τάση
 - n-sub, n-well μέσω n^+ ,
 - p-sub, p-well μέσω p^+ ,
- Εάν η έκταση μεγάλη, περισσότερες από μία συνδέσεις (αποφυγή latch-up)



Συνδέσεις (4 από 4)

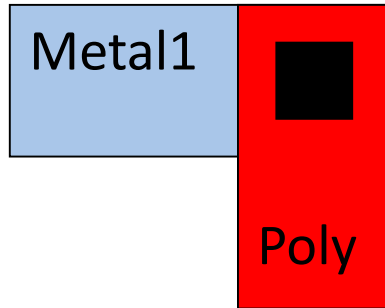


Συνδέσεις - Κατασκευή

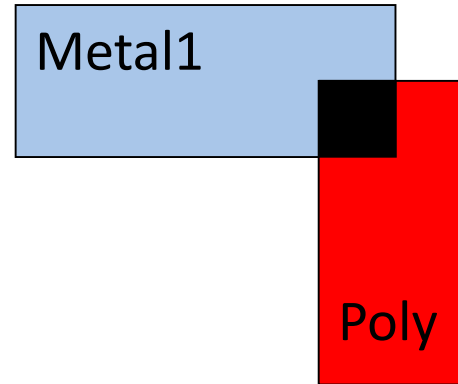
- Υπάρχει επικάλυψη για αντιμετώπιση κατασκευαστικών ατελειών
- Οι contact, via έχουν πεπερασμένο μέγεθος
- Οι via και contact μπορούν να είναι ακριβώς η μία πάνω από την άλλη μόνο εάν το επιτρέπει η τεχνολογία



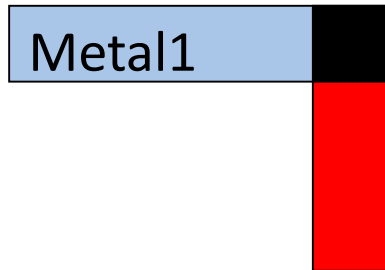
Επικαλύψεις



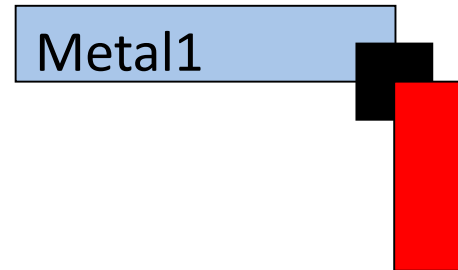
Ιδανικό με επικάλυψη



Ολίσθηση με επικάλυψη



Ιδανικό χωρίς επικάλυψη



Ολίσθηση χωρίς επικάλυψη



Layout Rules (1 από 3)

- Κανόνες σχεδίασης για αντιμετώπιση κατασκευαστικών ατελειών
- Κανόνες υπάρχουν για στοιχεία του ίδιου επιπέδου
 - Ελάχιστο πλάτος γραμμών (minimum width)
 - Ελάχιστη απόσταση (minimum spacing)



Layout Rules (2 από 3)

- Στοιχεία διαφορετικών επιπέδων
 - Επικαλύψεις
- Υπάρχουν περιορισμοί για τον τρόπο σχεδίασης
 - Design Grid
 - Orientation (orthogonal κ.τ.λ.)



Layout Rules (3 από 3)

- Συμβιβασμός μεταξύ
 - απόδοσης συστήματος (ταχύτητα, μέγεθος ολοκληρωμένου) – “performance” (επιδώσεις)
 - Ποσοστού ολοκληρωμένων ελεύθερων σφαλμάτων
- Με συντηρητικούς κανόνες
 - Μεγάλο “yield”
- Σε αντίθετη περίπτωση
 - Επιδώσεις



Σχεδίαση με λ ή μm

- Οι κανόνες μπορούν να εκφραστούν σε λ ή μm
- Για συγκεκριμένη τεχνολογία το λ αντιστοιχεί σε κάποια τιμή σε μm .
- Παράδειγμα, εάν $\lambda=0.5\mu\text{m}$, τότε $2\lambda=1\mu\text{m}$, $3\lambda=1.5\mu\text{m}$, κ.τ.λ.



Παράδειγμα με λ

- Ας θεωρήσουμε τους εξής περιορισμούς
 - Spacing metal1 $1.8 \mu\text{m}$
 - Width metal1 $1.2 \mu\text{m}$
- Χρησιμοποιώ $\lambda=0.6 \mu\text{m}$ και οι περιορισμοί μου γίνονται
 - Spacing metal1 3λ
 - Width metal1 2λ



Επαναχρησιμοποίηση σχεδίου

- Έστω νέα τεχνολογία με
 - Spacing metal1 1.5 μm
 - Width metal1 1.0 μm
- Με αλλαγή του λ από 0.6 μm σε 0.5 μm οι περιορισμοί παραμένουν οι ίδιοι
 - Spacing metal1 3λ
 - Width metal1 2λ
- Το σχέδιο μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί



Πιθανό πρόβλημα

- Έστω τεχνολογία με
 - Spacing metal1 $1.5 \mu\text{m}$
 - Width metal1 $0.9 \mu\text{m}$
- Τώρα τα λ είναι διαφορετικά
 - Για Spacing με περιορισμό 3λ έχω $\lambda=0.5 \mu\text{m}$
 - Για Width με περιορισμό 2λ έχω $\lambda=0.45 \mu\text{m}$
 - Επειδή πρέπει να ικανοποιούνται και οι δύο περιορισμοί θα επιλέξω το μέγιστο



Μη βέλτιστη λύση

- Μπορώ να επαναχρησιμοποιήσω σχέδιο με περιορισμούς
 - Spacing metal1 3λ
 - Width metal1 2λ
 - $\lambda=0.5 \mu\text{m}$
- Τότε οι περιορισμοί μου γίνονται
 - Spacing metal1 1.5 μm
 - Width metal1 1.0m
- Το πλάτος δεν είναι το ελάχιστο δυνατό

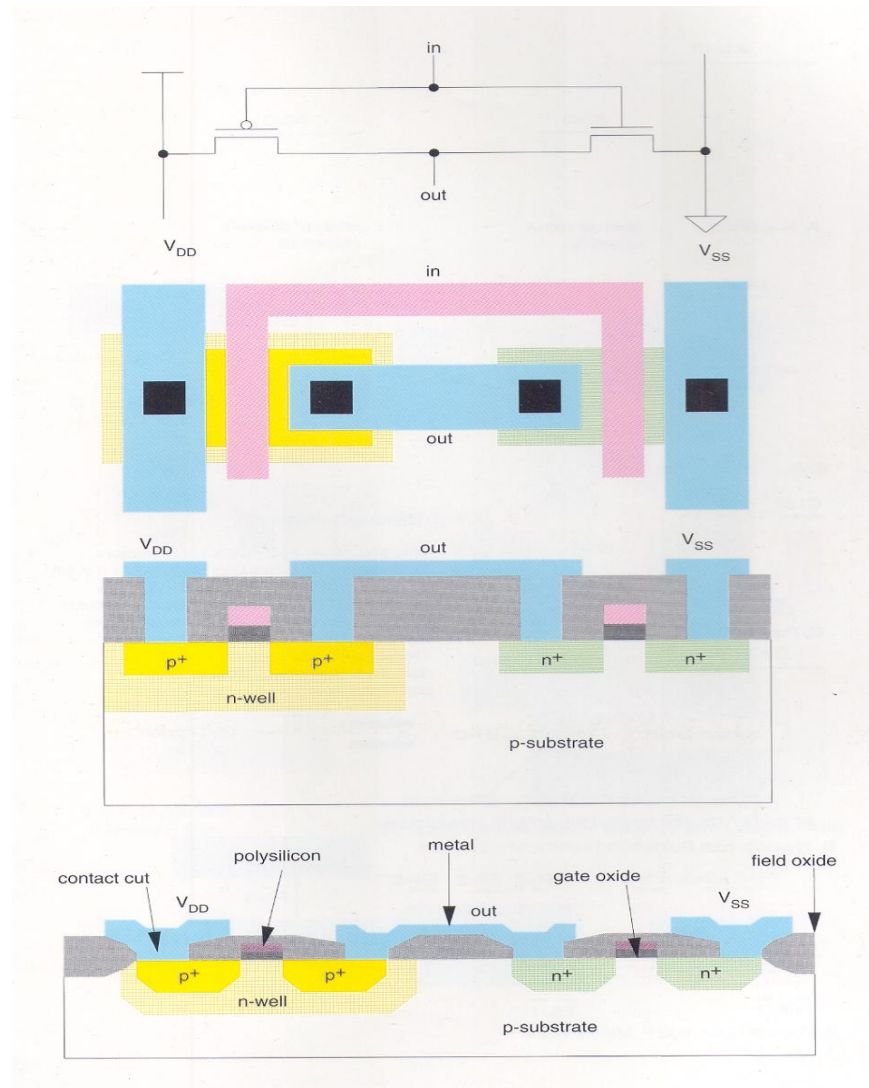


Stick-Diagrams (1 από 4)

- Γραμμές χωρίς μέγεθος
- Contacts, vias με μικρό μαύρο κουτί
- Μπορούμε να σημειώσουμε μέγεθος τρανζίστορ
- Εύκολη σχεδίαση στο χέρι
- Είναι “προσχέδιο” για κανονικό layout
- Συνδέσεις σε υποστρώματα, wells, κ.τ.λ. συνήθως δεν περιλαμβάνονται



Stick-Diagrams (2 από 4)



Stick-Diagrams (3 από 4)

- Τα τρανζίστορ σε σειρά εάν τοποθετηθούν μαζί μπορούν να υλοποιηθούν σε ενιαίο τμήμα diffusion (n-diff για n-MOS, p-diff για p-MOS)
- Όταν σχεδιάζουμε προσπαθούμε να αποφύγουμε επιπλέον κόμβους που αυξάνουν την χωρητικότητα
- Προσπαθούμε τυχόν χωρητικότητα να είναι συγκεντρωμένη στις τροφοδοσίες (VDD, GND) και όχι προς την έξοδο

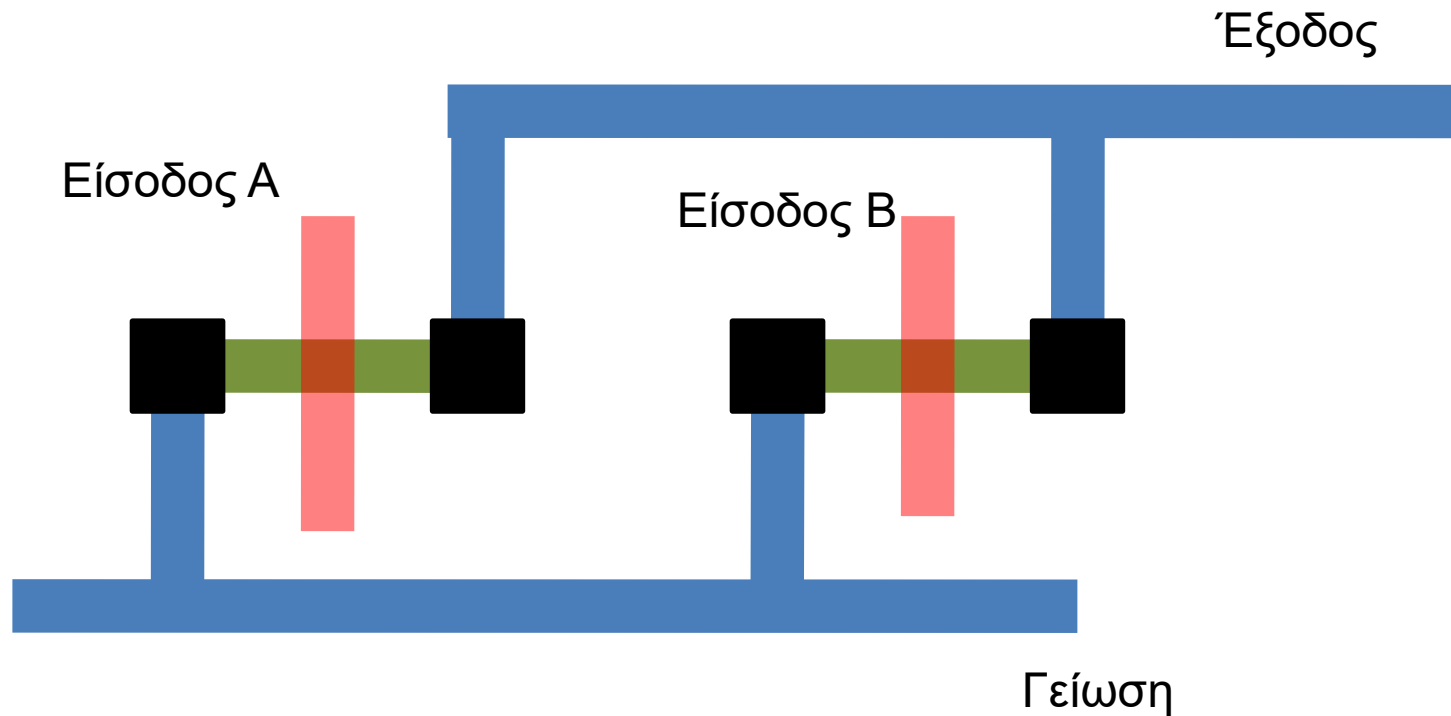


Stick-Diagrams (4 από 4)

- Ελαχιστοποιούμε το μήκος των diffusion
 - Μεγάλη αντίσταση
 - Σχετικά μεγάλη χωρητικότητα
- Καλό είναι το μήκος των poly να είναι μειωμένο
 - Μέτρια αντίσταση
 - Σχετικά μεγάλη χωρητικότητα
- Τα μέταλλα έχουν μικρή χωρητικότητα και αντίσταση

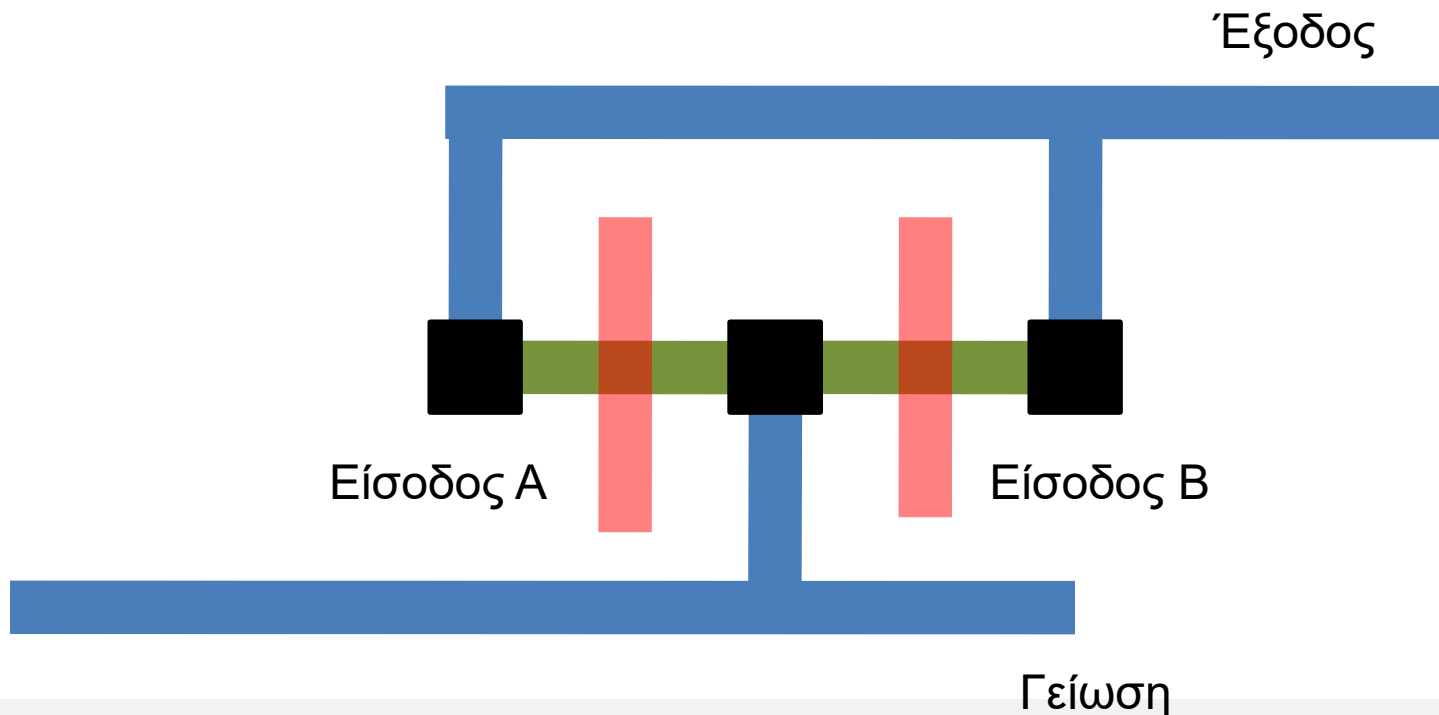


n-MOS δικτύωμα NOR Πύλης (1 από 3)



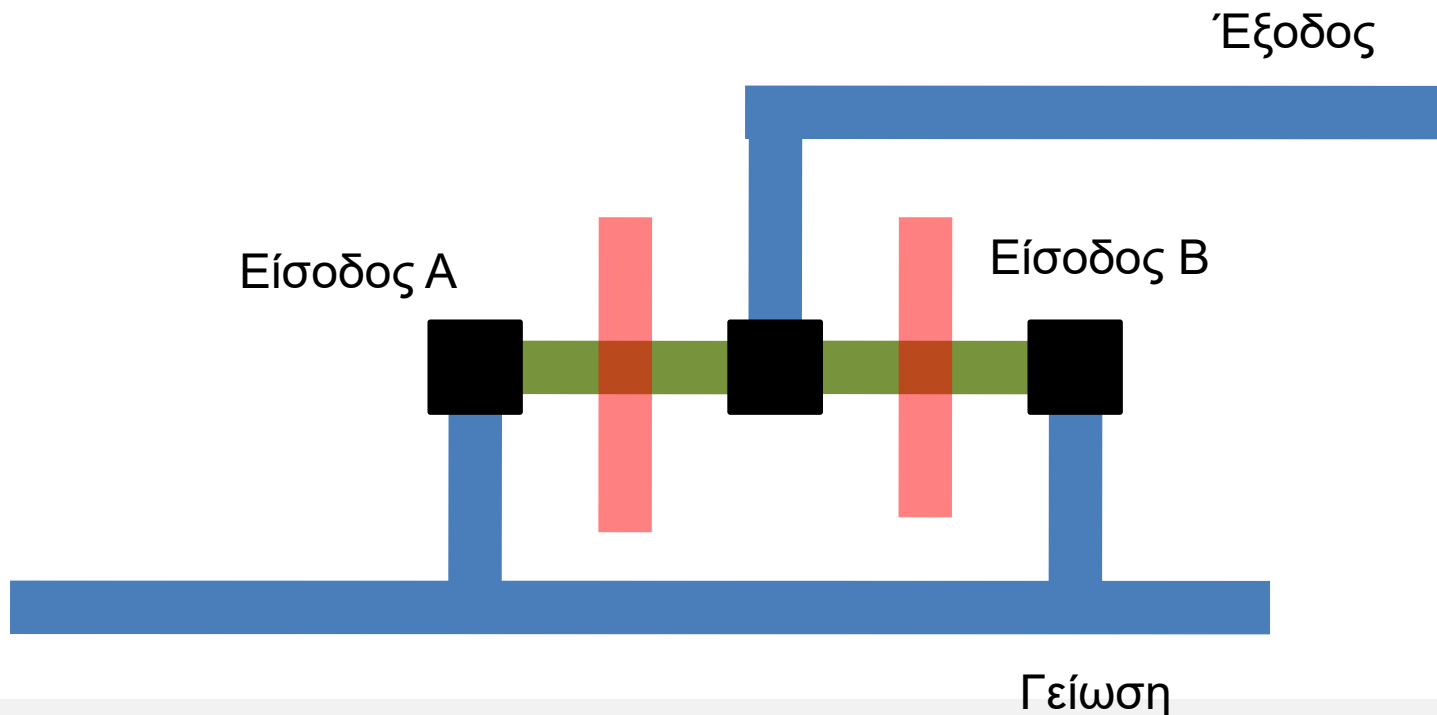
n-MOS δικτύωμα NOR Πύλης (2από3)

- Κοινός κόμβος για γείωση
 - Η χωρητικότητα μειωμένη στην γείωση



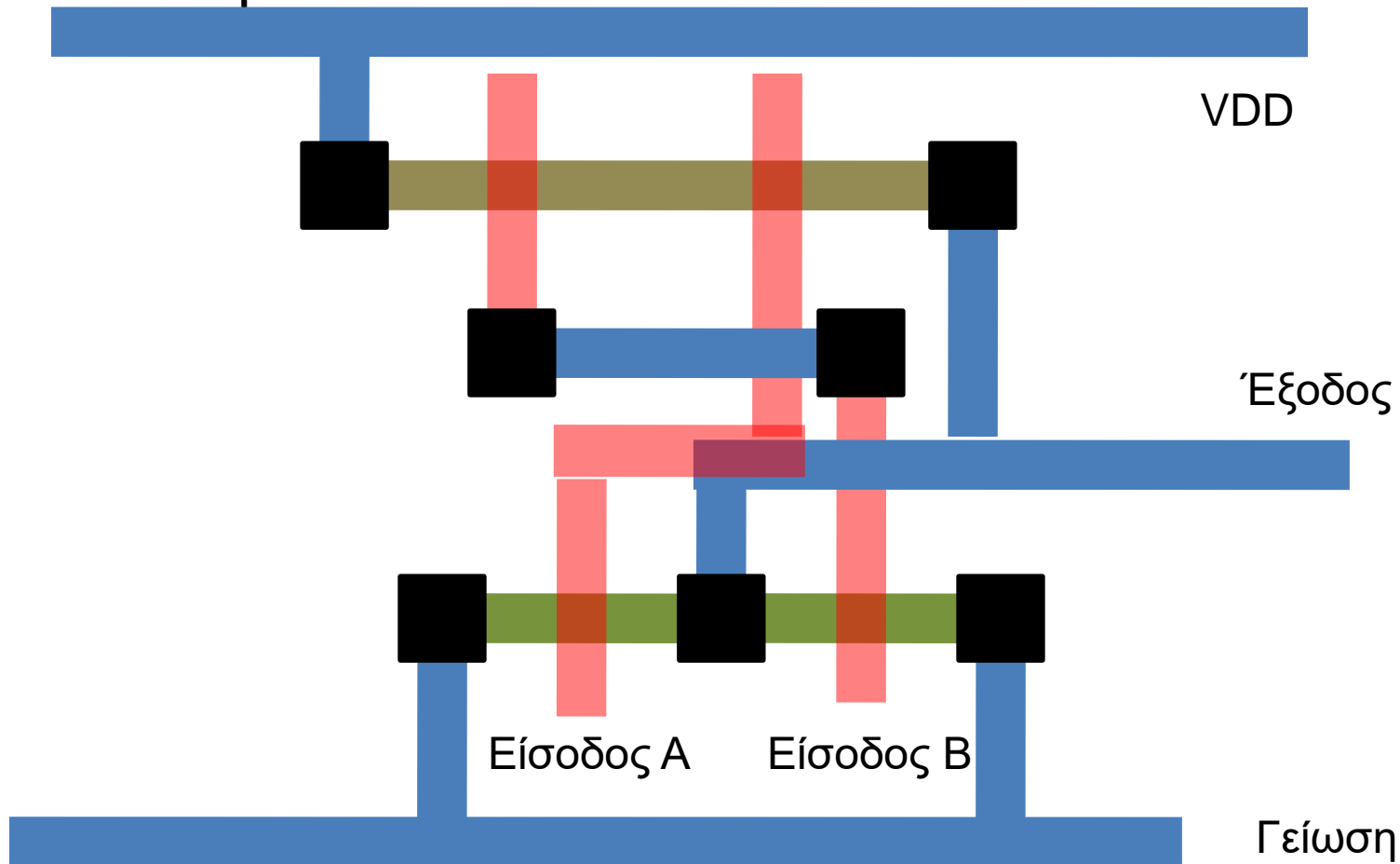
n-MOS δικτύωμα NOR Πύλης (3από3)

- Κοινός κόμβος στην έξοδο
 - Μειωμένη χωρητικότητα στη έξοδο – Επιθυμητό αποτέλεσμα



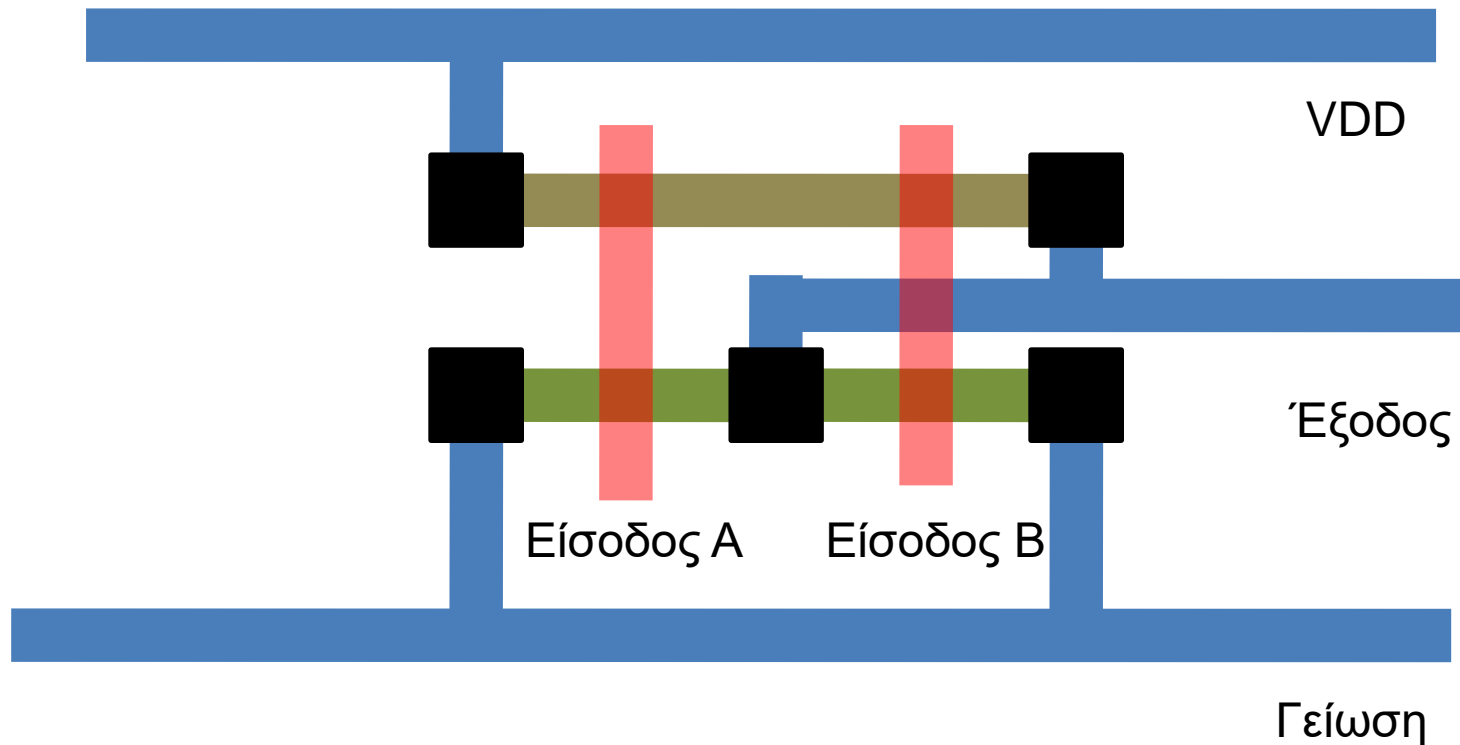
Πύλη NOR (1από2)

- Τα τρανζίστορ δεν είναι με την ίδια σειρά στα δικτυώματα

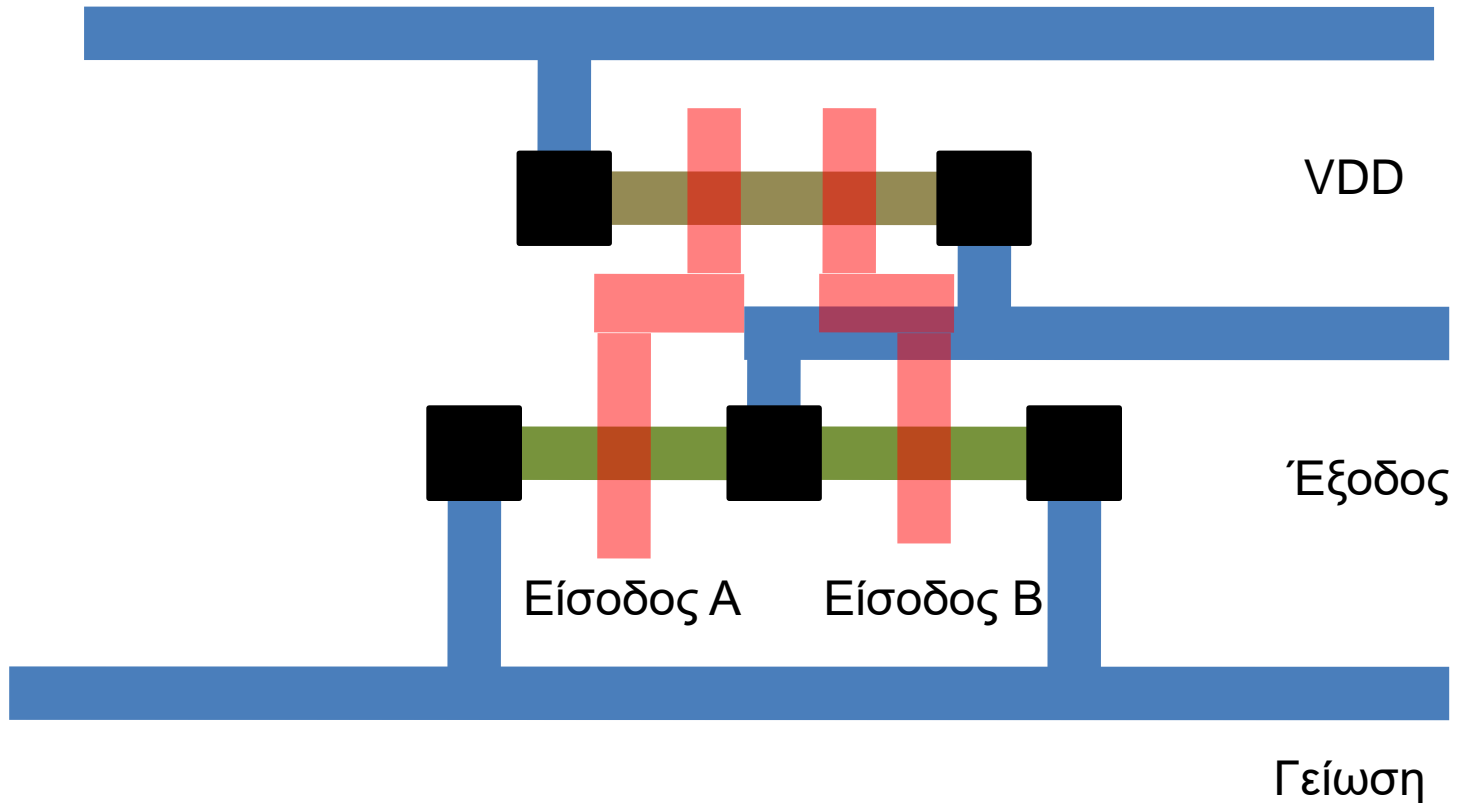


Πύλη NOR (2από2)

- Τα τρανζίστορ με «σωστή» σειρά στα δικτυώματα



Μείωση του μήκους των diff

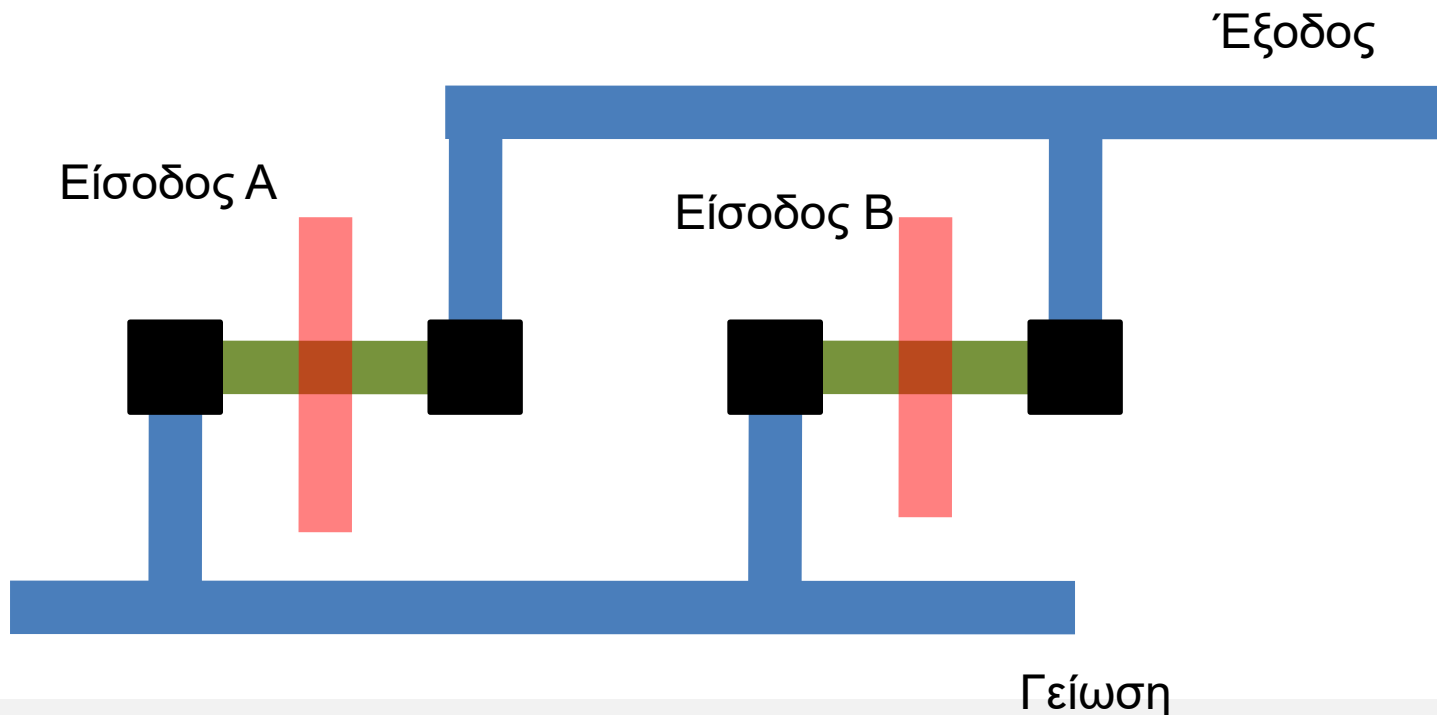
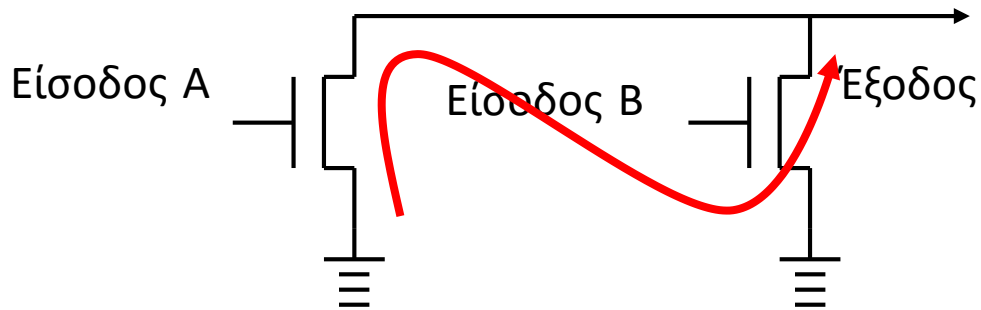


Euler path

- Συνεχές μονοπάτι που διασχίζει μία φορά τον κάθε κλάδο του σχηματικού
- Πρέπει να περνάει με την ίδια σειρά τα τρανζίστορ στα n-MOS και στα p-MOS δικτυώματα
- Εάν συνεχίζει σε τρανζίστορ στον ίδιο κόμβο αυτός μπορεί να είναι κοινός.

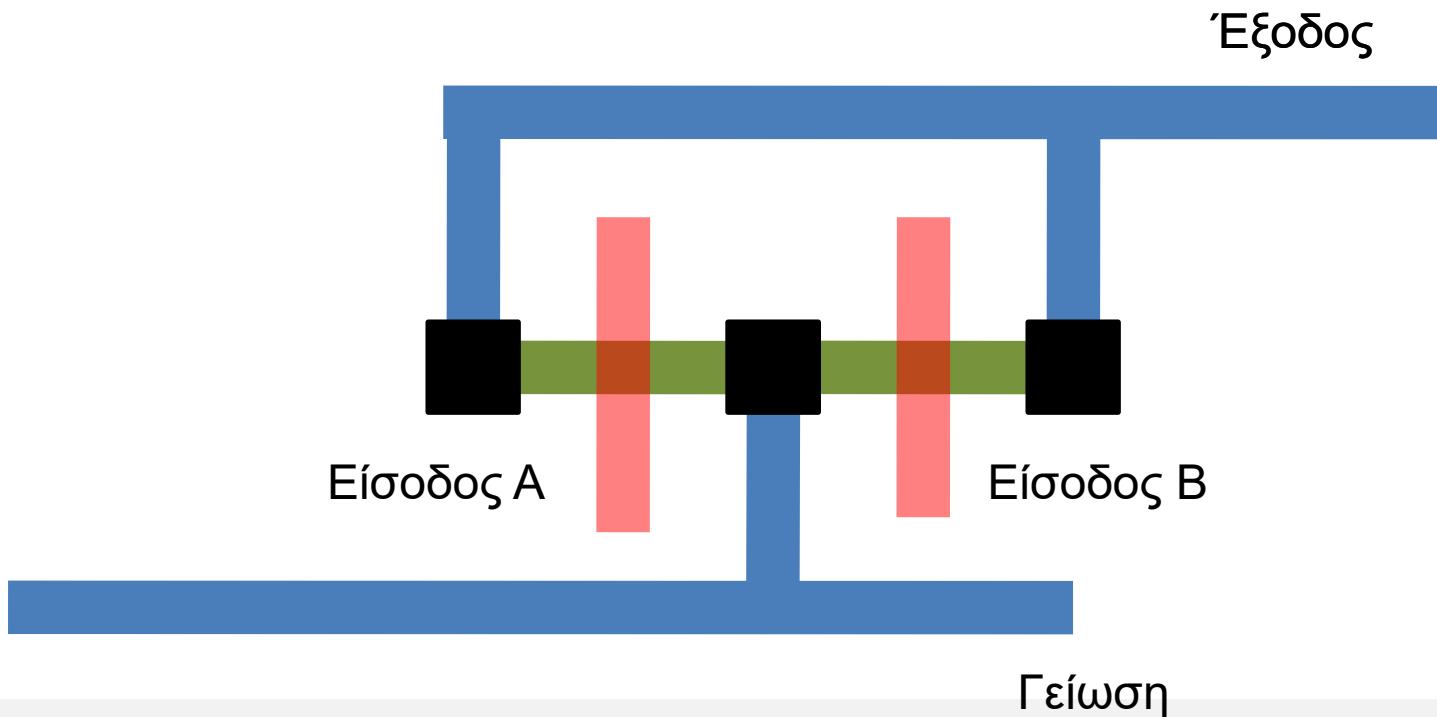
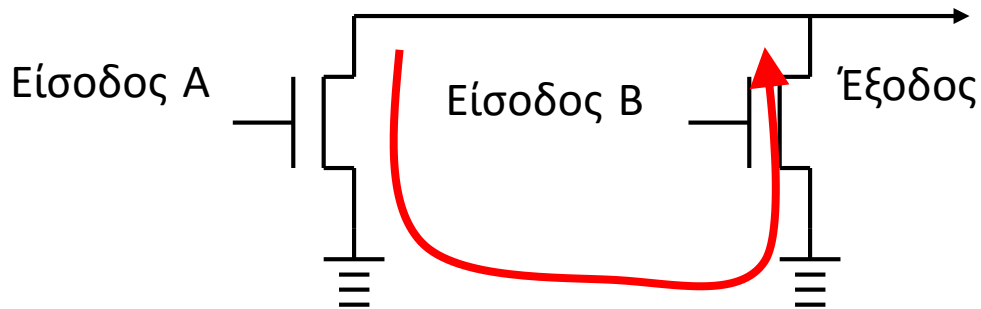


Παράδειγμα (1από5)

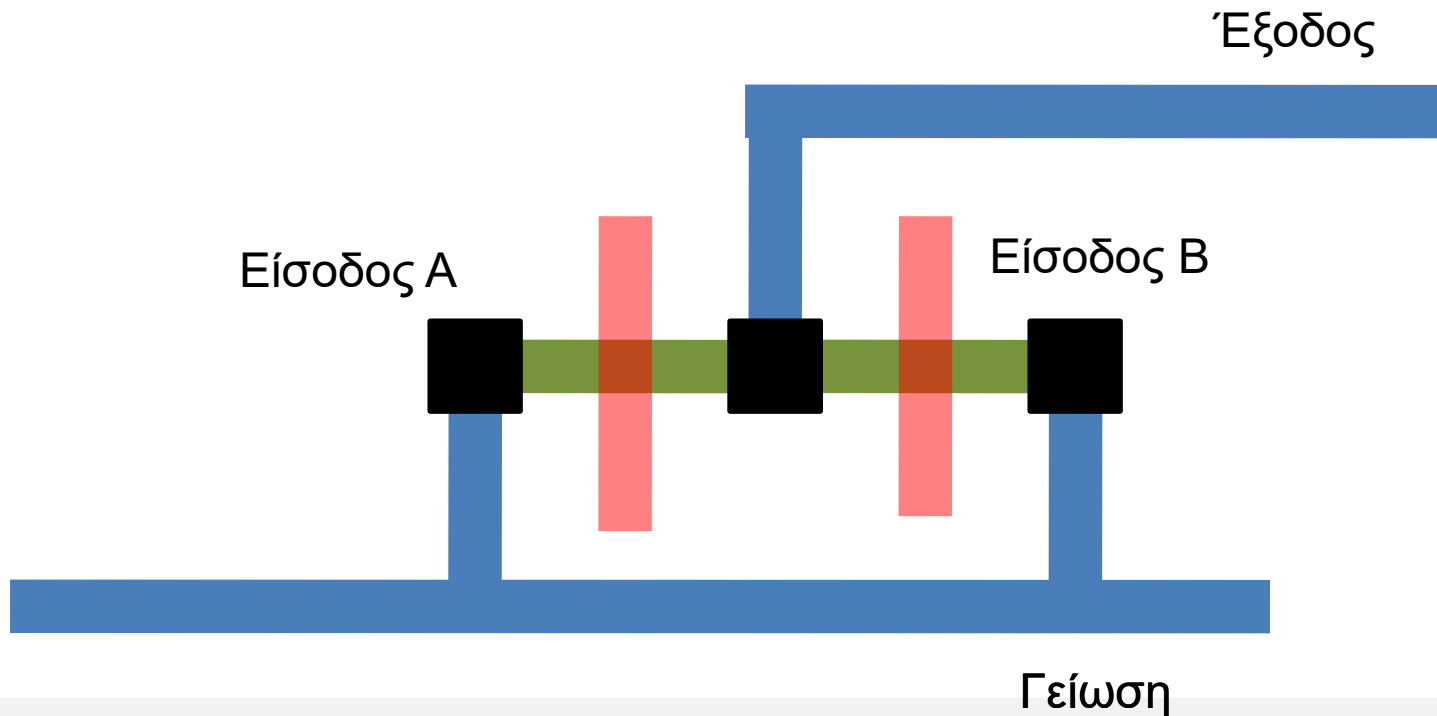
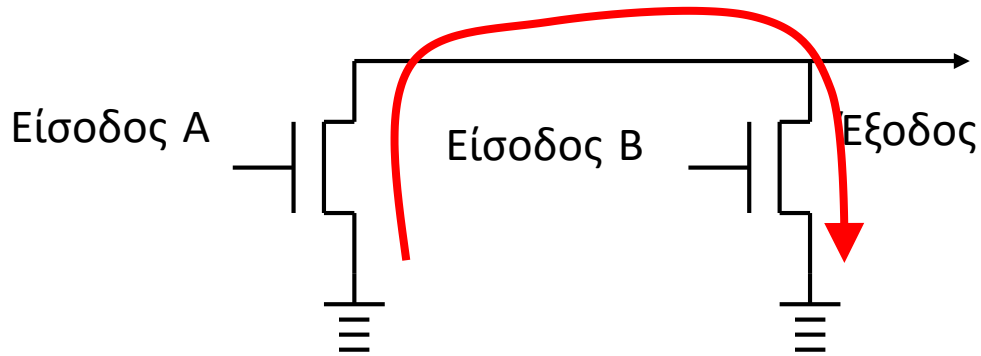


Γείωση

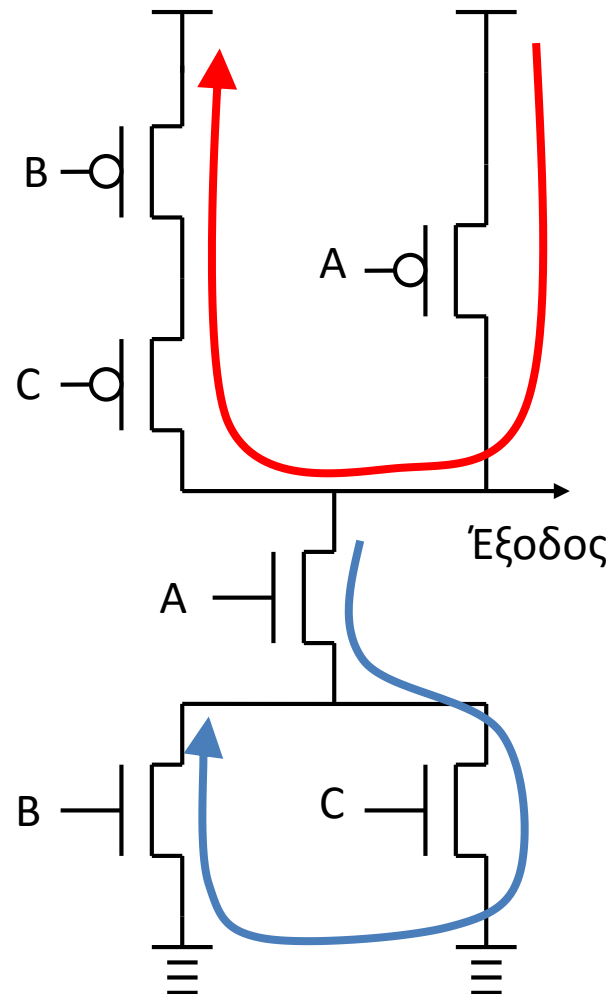
Παράδειγμα (2από5)



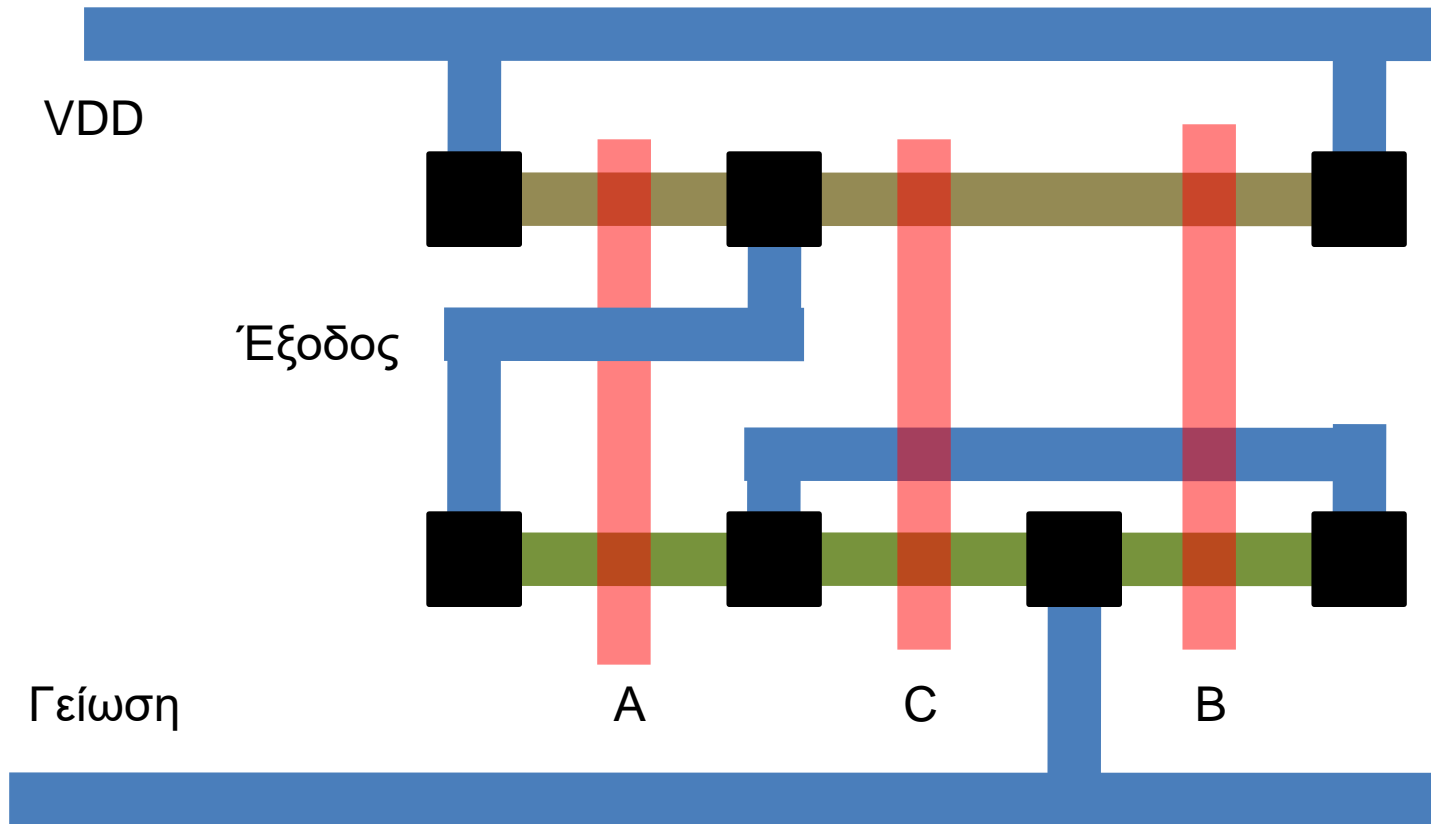
Παράδειγμα (3από5)



Παράδειγμα (4από5)



Παράδειγμα (5από5)



ΑΟΙ Πύλες

- AND – OR – Inverter
- Στο πρώτο επίπεδο AND πύλες (πύλη)
- Οι κύριες είσοδοι οδηγούν είτε
 - AND πύλες του πρώτου επιπέδου
 - Κατευθείαν την OR πύλη
- Οι έξοδοι των AND πυλών οδηγούν την OR
- Η OR πύλη οδηγεί τον Inverter



Ονοματολογία

- Λίστα αριθμών με τους μεγαλύτερους αριθμούς πρώτα
- Για κάθε AND πύλη προστίθεται στην λίστα των αριθμών ο αριθμός των εισόδων της
- Για κάθε κύρια είσοδο που οδηγεί κατευθείαν την OR προσθέτουμε στην λίστα τον αριθμό 1.
- Για παράδειγμα η $F = [(A \cdot B \cdot C) + (D \cdot E) + (F \cdot G) + H + I]$ είναι η AOI-32211



ΟΑΙ Πύλες

- OR –AND– Inverter
- Αντίστοιχες με τις ΑΟΙ πύλες μόνο που οι ρόλοι των πυλών AND και OR αντεστραμμένοι
- Ονοματολογία αντίστοιχη με την περίπτωση των ΑΟΙ
- Παράδειγμα η $F=[A \cdot (B+C)]'$ είναι η ΟΑΙ-21



Υπολογισμός Αντίστασης (1 από 5)

- Η αντίσταση ενός αγωγού εξαρτάται από
 - Το υλικό κατασκευής
 - ρ : ειδική αντίσταση
 - Το σχήμα του αγωγού
 - l/S
 - l το μήκος του αγωγού
 - S η επιφάνεια της διατομής του για αγωγό σταθερής διατομής



Υπολογισμός Αντίστασης (2 από 5)

- Στην περίπτωση των αγωγών σε ολοκληρωμένα κυκλώματα θα θεωρούμε διατομή $S = t \cdot w$
 - t : το πάχος του αγωγού
 - w : το πλάτος του αγωγού
- Η αντίσταση θα είναι

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot \frac{l}{t \cdot w}$$



Υπολογισμός Αντίστασης (3 από 5)

- Οι παράμετροι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες
- Δεν αλλάζουν από τον σχεδιαστή του μικροηλεκτρονικού αναπτύγματος layout
 - ρ (ειδική αντίσταση) και t (πάχος αγωγού)
- Καθορίζονται από τον σχεδιαστή του μικροηλεκτρονικού αναπτύγματος layout
 - w (πλάτος αγωγού) και l (μήκος αγωγού)



Υπολογισμός Αντίστασης (4 από 5)

- Η αντίσταση θα είναι

$$R = \left(\frac{\rho}{t} \right) \cdot \left(\frac{l}{w} \right) = R_s \cdot \left(\frac{l}{w} \right)$$

Όπου R_s : η αντίσταση φύλλου (sheet resistance) που περιλαμβάνει τους όρους που εξαρτούνται από την τεχνολογία (όχι από τον σχεδιαστή)



Υπολογισμός Αντίστασης (5 από 5)

- Η R_S δίνεται σε Ω /τετράγωνο, Ohms/ \square ,
 - Για $w=l$ (τετράγωνο) η αντίσταση είναι ίση με την R_S , και δεν εξαρτάται από το μέγεθος του τετραγώνου
- Γενικότερα η αντίσταση δεν εξαρτάται από το απόλυτο μέγεθος αλλά από την μορφή του σχήματος
- Παράδειγμα δυο γραμμές (ορθογώνιας κάτοψης) με ίδιο λόγο l/w έχουν τον ίδιο αριθμό τετραγώνων που είναι l/w .



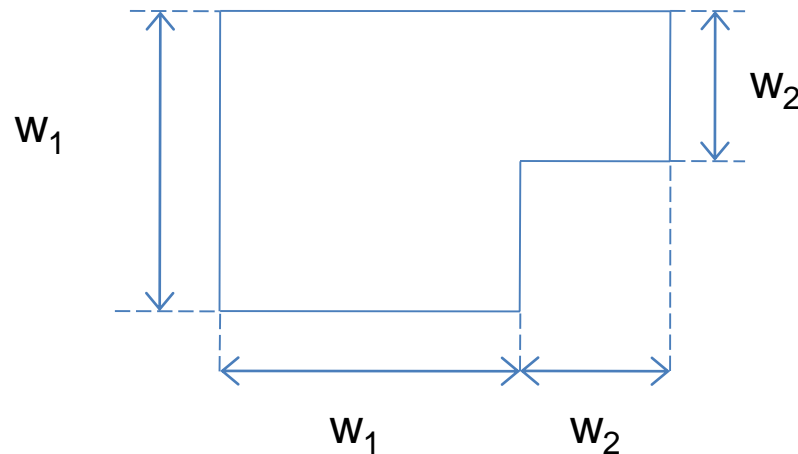
Ειδικά σχήματα

- Για μη ορθογώνιες κατόψεις χρησιμοποιούμε πίνακες που μας δίνουν το αριθμό τετραγώνων
- Προσοχή για την εύρεση της αντίστασης αφού υπολογίσουμε τον αριθμό τετραγώνων θα πρέπει να πολλαπλασιάσουμε με την αντίσταση φύλλου.



Παράδειγμα 2

- Για το ακόλουθο σχήμα εάν ο λόγος w_1/w_2 είναι γνωστός ο αριθμός τετραγώνων δίνεται από το πίνακα



w_1/w_2	Αντίσταση (σε \square)
1.5	2.1
2	2.25
3	2.5
4	2.65



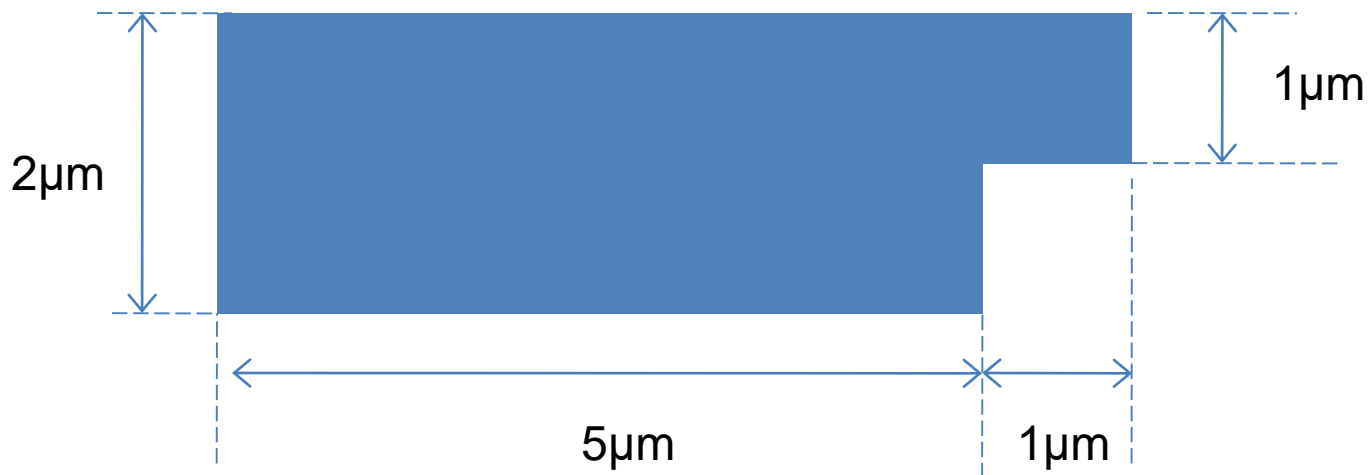
Προσοχή

- Ο πίνακας ισχύει για δεδομένη κατεύθυνση του ρεύματος (στη προηγούμενη περίπτωση) για ρεύμα ανάμεσα στην δεξιά και την αριστερή πλευρά του σχήματος.
- Εάν το ρεύμα ήταν π.χ. μεταξύ της κάτω πλευράς και της αριστερής θα ίσχυε άλλος πίνακας
- Η φορά του ρεύματος δεν έχει σημασία (π.χ. για την αρχική περίπτωση, είτε από δεξιά προς αριστερά είτε από αριστερά προς δεξιά έχουμε την ίδια αντίσταση



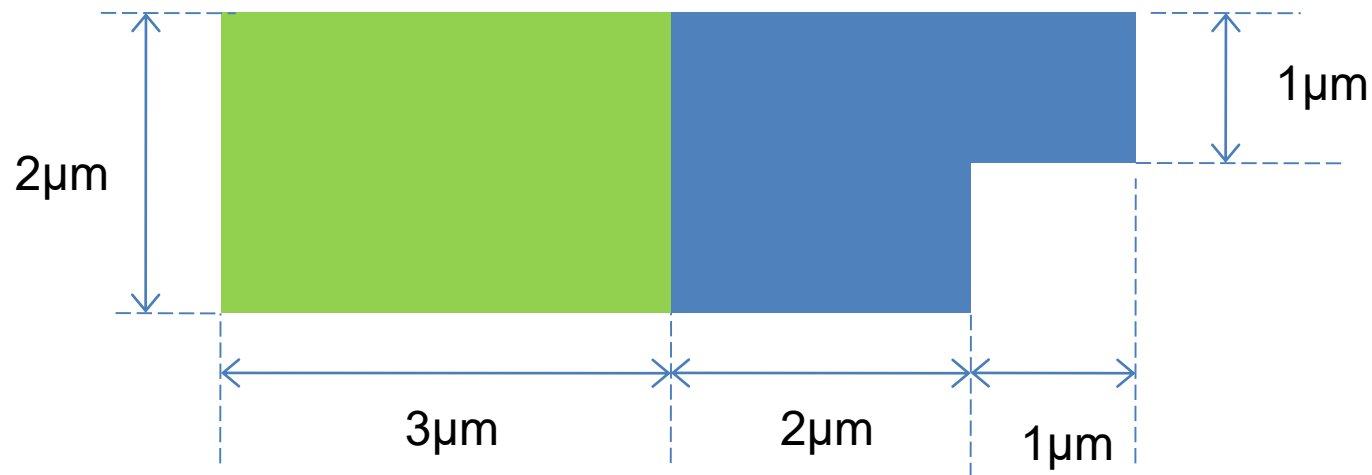
Υπολογισμός Τετραγώνων (1από3)

- Έστω το ακόλουθο σχήμα με ρεύμα που συνδέει την αριστερή με την δεξιά πλευρά



Υπολογισμός Τετραγώνων (2από3)

- Χωρίζω το σχήμα σε δύο επιμέρους
 - Τμήμα A (ορθογώνιο)
 - Τμήμα B (Υπολογίζεται από τον πίνακα που έχει δοθεί)



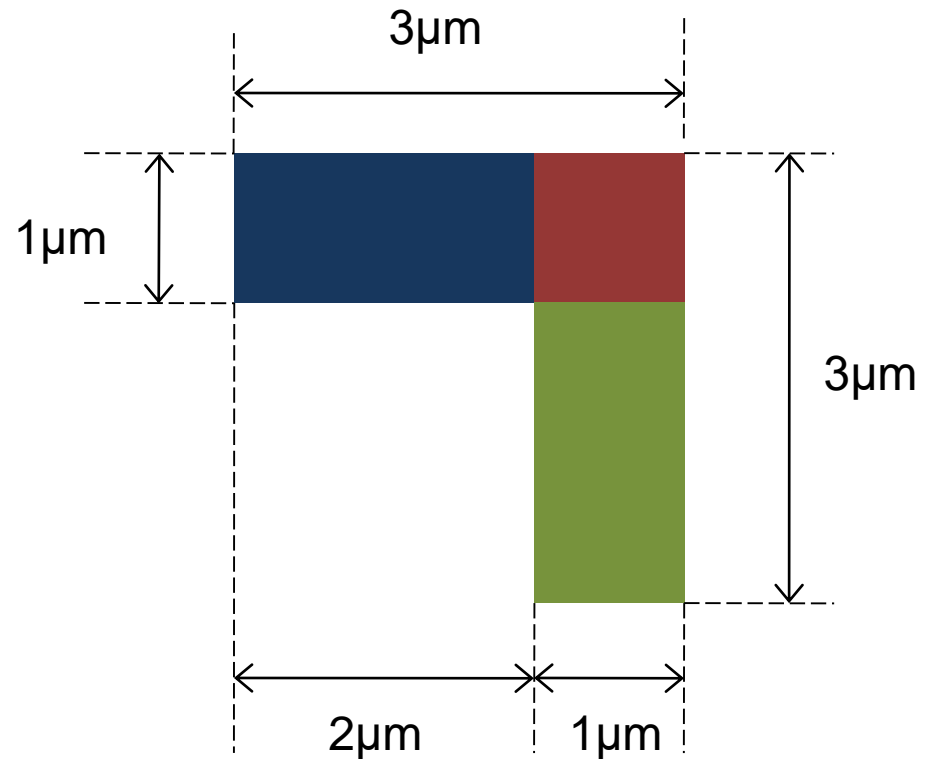
Υπολογισμός Τετραγώνων (3από3)

- Τμήμα A
 - Ο αριθμός των τετραγώνων είναι l/w άρα το τμήμα A έχει $(3\mu\text{m}/2\mu\text{m}) \square = 1.5 \square$
- Τμήμα B
 - $w_1/w_2 = 2\mu\text{m}/1\mu\text{m} = 2$
 - Από πίνακα για $w_1/w_2 = 2$ έχω αριθμό τετραγώνων $2.25 \square$
- Τελικά έχω σύνολο $1.5 \square + 2.25 \square = 3.75 \square$
- Για υπολογισμό της αντίστασης πολλαπλασιάζω με την αντίσταση φύλλου.



Ειδική Περίπτωση

- Η τετράγωνη γωνία έχει $0.5 \square$
- Τμήμα A $2 \square$
- Τμήμα A $0.5 \square$
- Τμήμα A $2 \square$
- Σύνολο $4.5 \square$
(μεταξύ των πλευρών $1 \mu\text{m}$)



Υπολογισμός χωρητικότητας

- Βρίσκω το εμβαδό και την περίμετρο του σχήματος
- Πολλαπλασιάζω το εμβαδό με την χωρητικότητα επαφής (plate capacitance) που δίνεται F ανά $(\mu\text{m})^2$
- Πολλαπλασιάζω την περίμετρο με την χωρητικότητα περιφέρειας (fringe capacitance) που δίνεται F ανά μm
- Αθροίζω της δύο χωρητικότητες και βρίσκω την συνολική



Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Αραπογιάννη Αγγελική 2015. «Σχεδίαση CMOS Ψηφιακών Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων. Τεχνολογία CMOS.» Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/DI102/>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

Οι εικόνες και τα διαγράμματα που χρησιμοποιούνται είναι από το βιβλίο:

Sung-Mo Kang, Yusuf Leblebici. 1996. *CMOS Digital Integrated Circuits* (1 ed.). McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA © 1996.

