



# Τεχνολογία CMOS

# Πυρίτιο

- Η βάση για τα σύγχρονα ημιαγωγικά κυκλώματα είναι το πυρίτιο
- Ένας κρύσταλλος καθαρού πυριτίου συμπεριφέρεται σαν μονωτής
- Εάν προσθέσουμε προσμόξεις (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  $\text{SiO}_2$ )

- Υγρή οξείδωση (με υδρατμούς  $900^\circ\text{C} - 1000^\circ\text{C}$ ), είναι γρήγορη
  - Ξηρή οξείδωση (καθαρό οξυγόνο  $1200^\circ\text{C}$ ), αργή, καλύτερος έλεγχος πάχους
- 
- Σήμερα αντί για οξείδιο του πυριτίου χρησιμοποιούνται νιτρίδια μεταξύ της πύλης του τρανζίστορ και του καναλιού



- 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

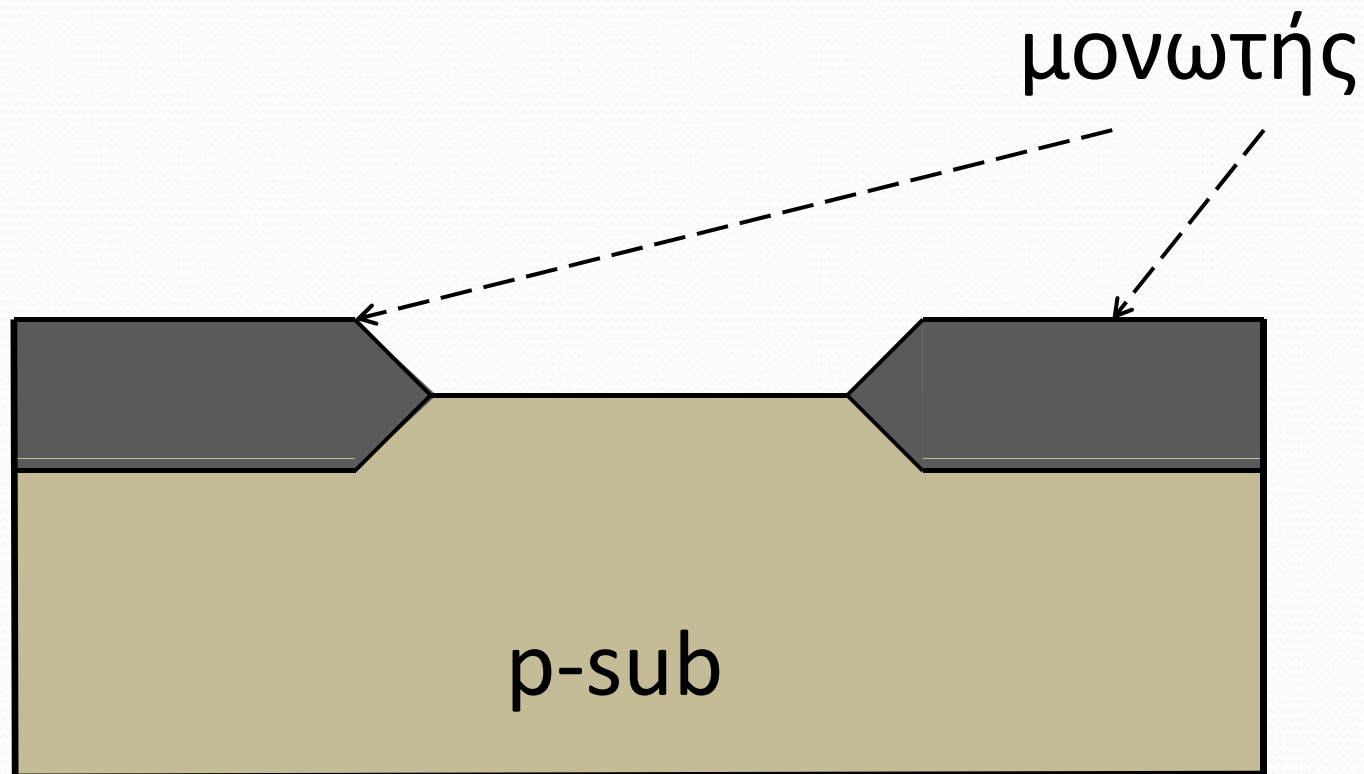
- Γίνεται σε μηχανήματα υψηλού κόστους
- Οι masks (μάσκες) έχουν επίσης υψηλό κόστος κατασκευής
- Εναλλακτικά δέσμη ηλεκτρονίων (e-beam)

- Με την έκθεση στο φως 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

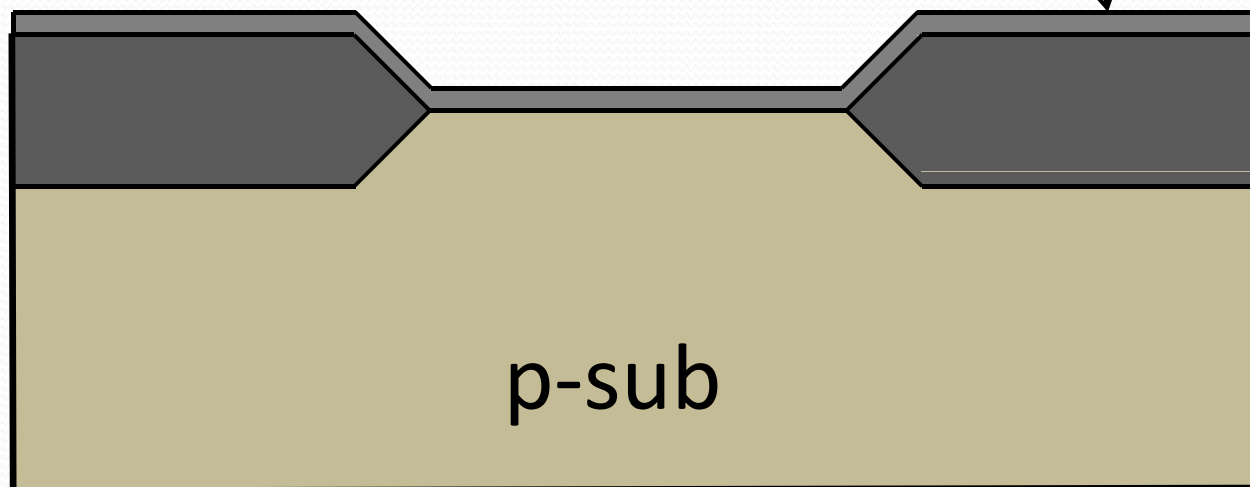
- Το n-MOS τρανζίστορ έχει υπόστρωμα τύπου p
  - Άρα ξεκινάμε με υπόστρωμα τύπου p
  - Εναλλακτικά δημιουργούμε «πηγάδι» τύπου p σε υπόστρωμα τύπου n
- Τις περιοχές που δεν θα χρησιμοποιήσουμε για το τρανζίστορ θα τις απομονώσουμε ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν από πάνω τους γραμμές χωρίς να τις επηρεάζουν

# Υπόστρωμα με μονωτή



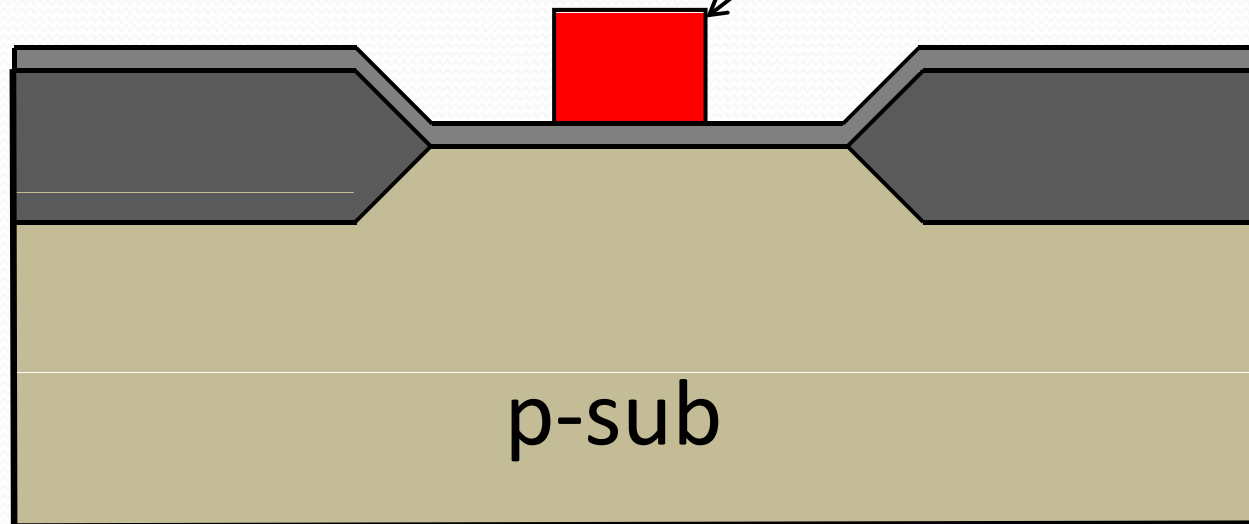
# Προσθήκη μονωτή Πύλης

Λεπτός μονωτής



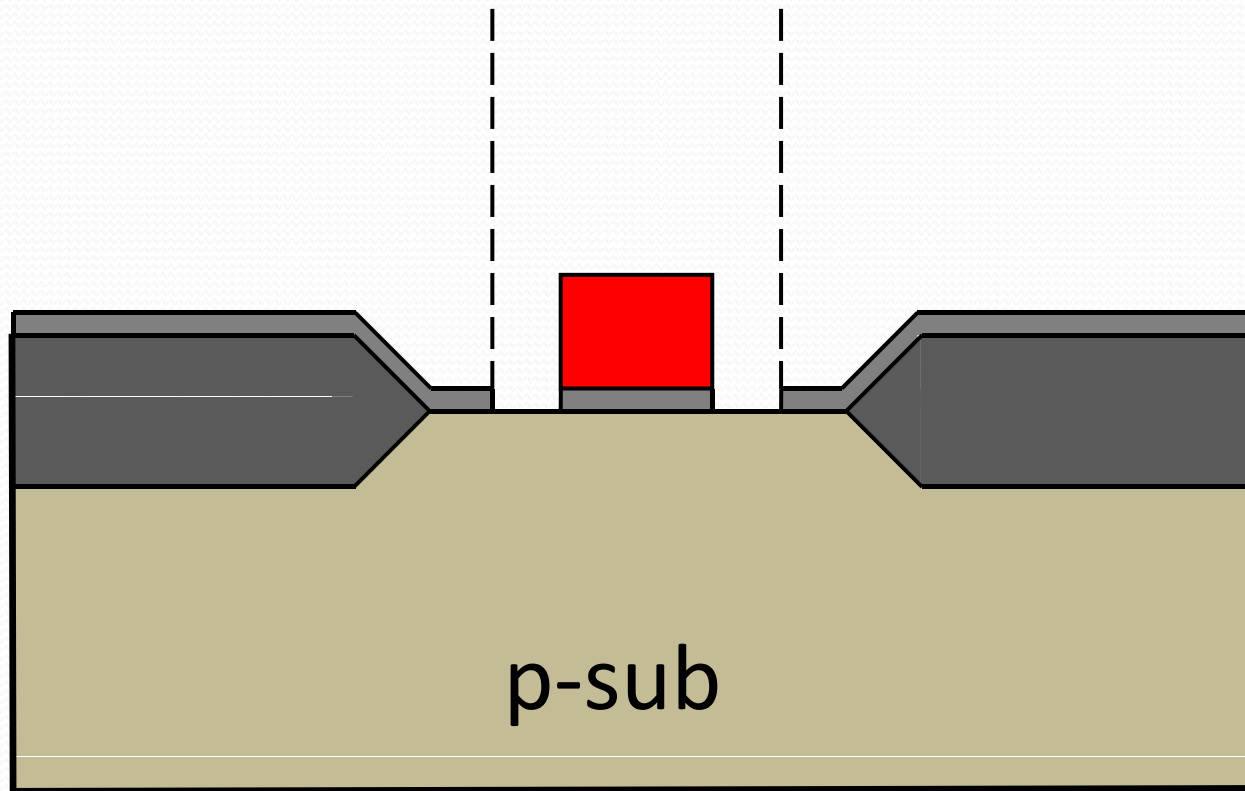
# Προσθήκη Πύλης

Poly (polysilicon)

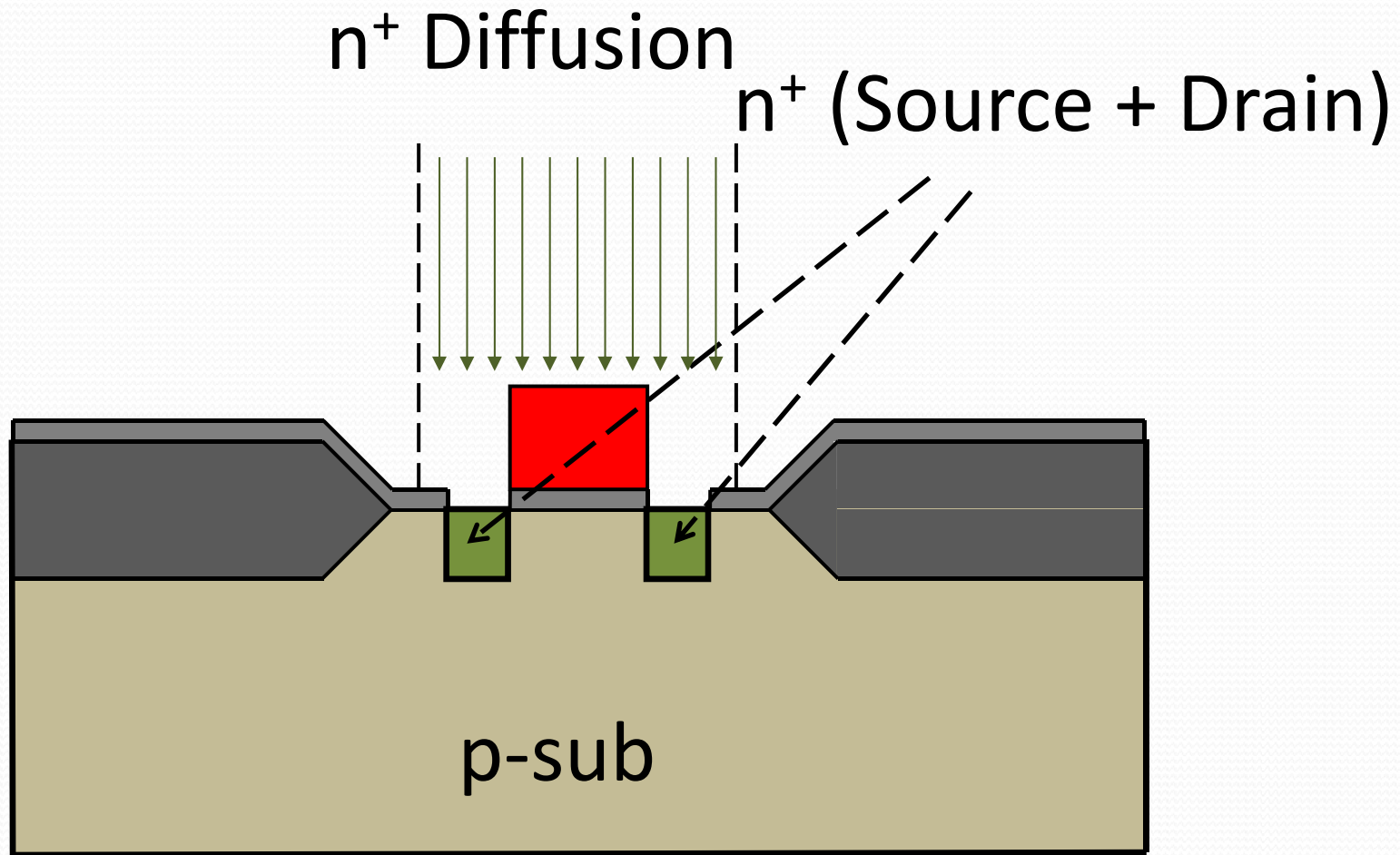


# Ενεργός Περιοχή

Ενεργός Περιοχή (Active)



# Δημιουργία Πηγής και Απαγωγού

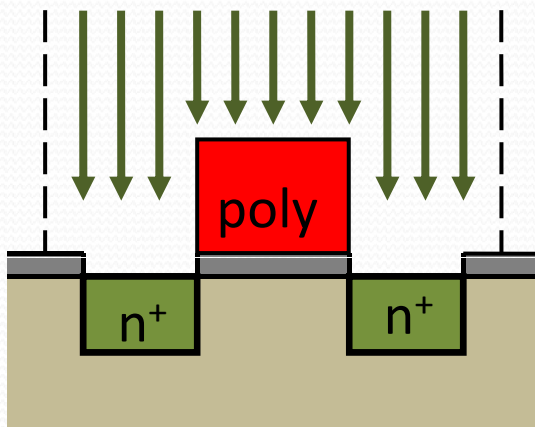




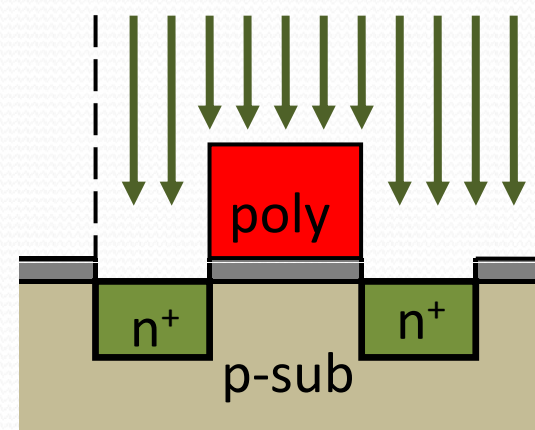
# Self-Alingment

- 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

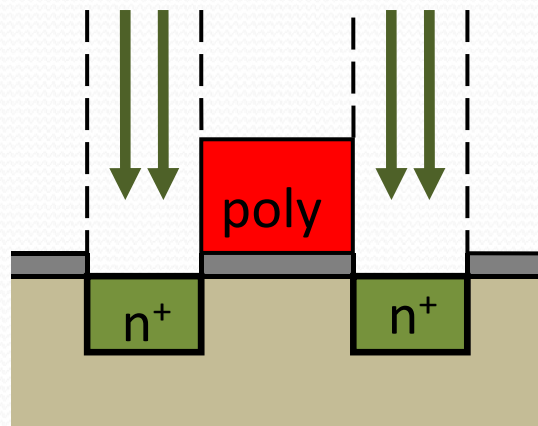


Ιδανική Περίπτωση με  
Self-Alignment

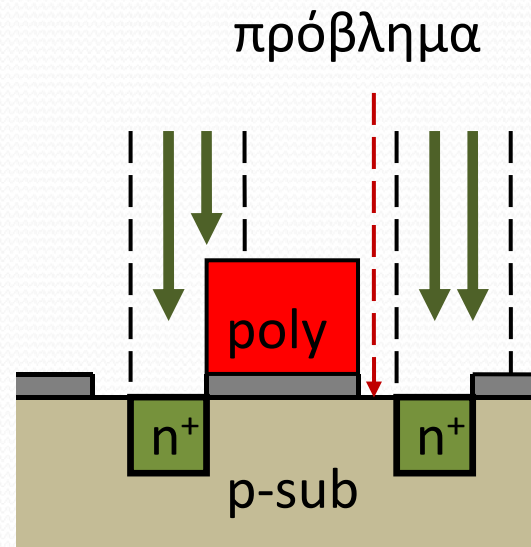


Δεξιά ολίσθηση με  
Self-Alignment

# Χωρίς Self-Alignment

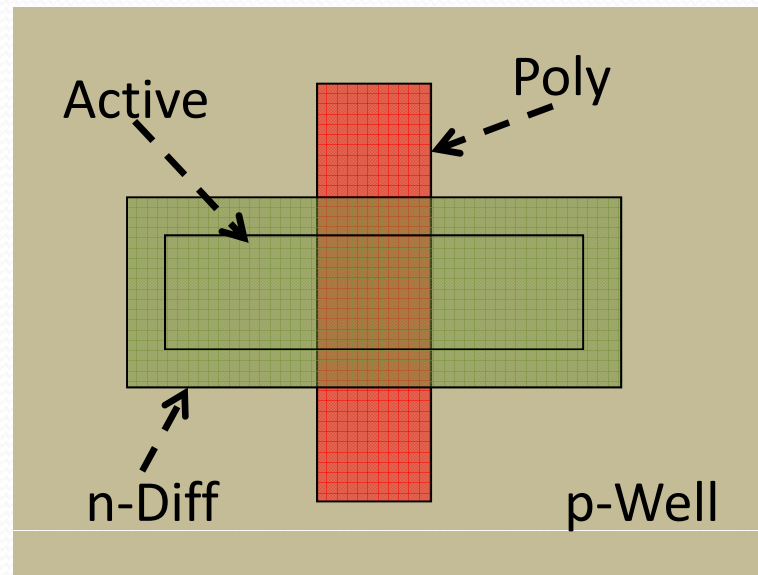


Ιδανική Περίπτωση χωρίς  
Self-Alignment



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.

# ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

- Το metal<sub>1</sub> συνδέεται:
  - Με contact με n<sup>+</sup>, p<sup>+</sup>, poly
  - Με via<sub>1</sub> με metal<sub>2</sub>
- Το metal<sub>2</sub> συνδέεται:
  - Με via<sub>1</sub> με metal<sub>1</sub>
  - Με via<sub>2</sub> με metal<sub>3</sub>

# Συνδέσεις (συνέχεια)

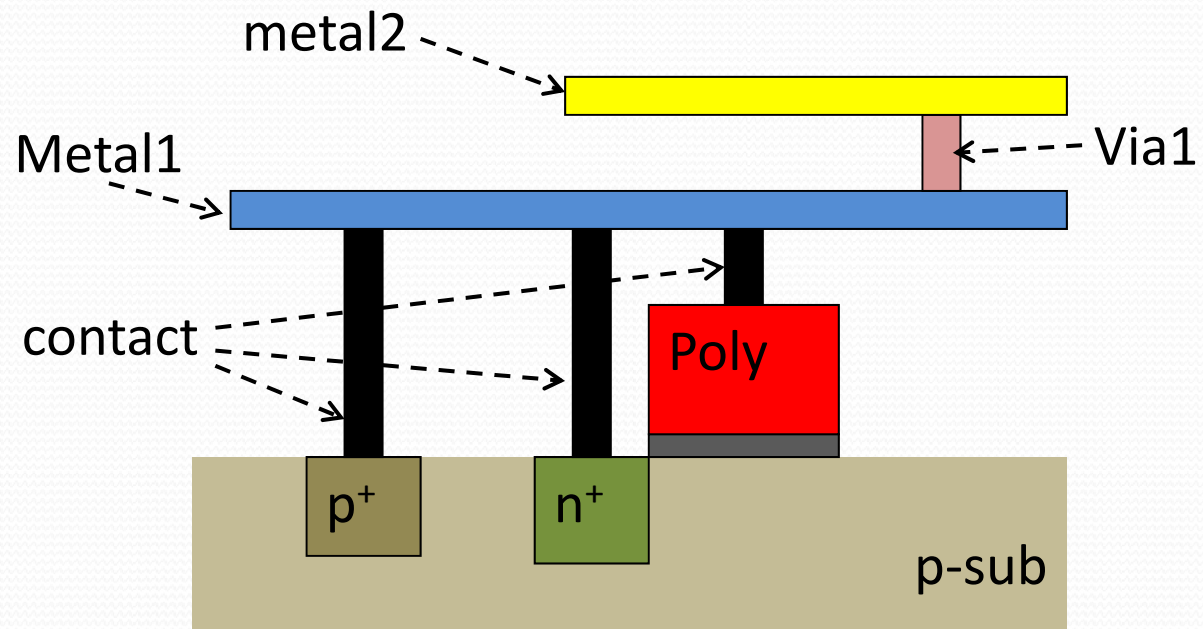
- Γενικά το metal $x$  συνδέεται:
  - Με via( $x-1$ ) με metal( $x-1$ )
  - Με via $x$  με metal( $x+1$ )
- Για σύνδεση του metal $2$  με poly
  - metal $2$ -metal $1$  με via $1$
  - Metal $1$ -poly με contact

# Συνδέσεις (συνέχεια)

- 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)



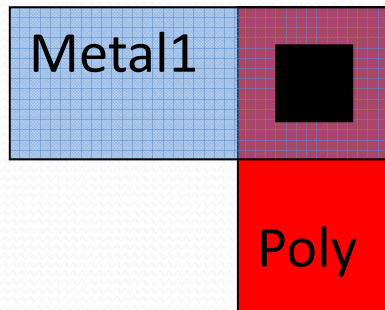
# Συνδέσεις (συνέχεια)



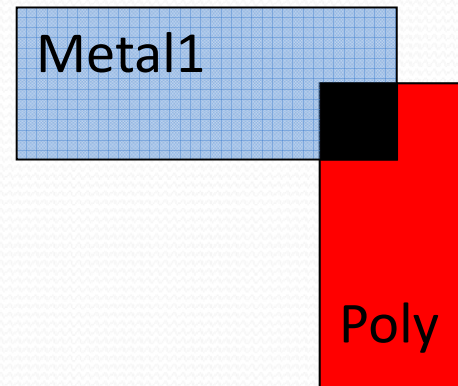
# Συνδέσεις - Κατασκευή

- 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

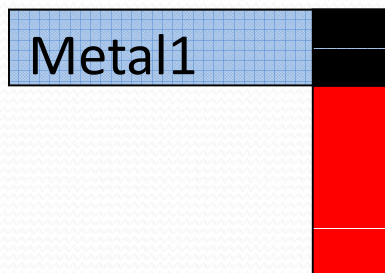
# Επικαλύψεις



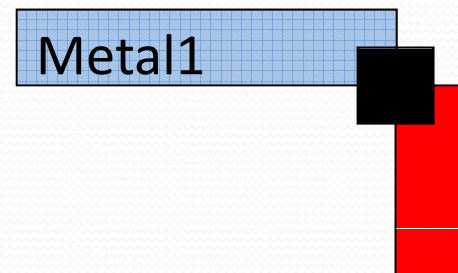
Ιδανικό με επικάλυψη



Ολίσθηση με επικάλυψη



Ιδανικό χωρίς επικάλυψη



Ολίσθηση χωρίς επικάλυψη



# Layout Rules

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




- Στοιχεία διαφορετικών επιπέδων

- Επικαλύψεις

- Υπάρχουν περιορισμοί για τον τρόπο σχεδίασης

- Design Grid

- Orientation (orthogonal κ.τ.λ.)

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

# Σχεδίαση με $\lambda$ ή $\mu\text{m}$

- Οι κανόνες μπορούν να εκφραστούν σε  $\lambda$  ή  $\mu\text{m}$
- Για συγκεκριμένη τεχνολογία το  $\lambda$  αντιστοιχεί σε κάποια τιμή σε  $\mu\text{m}$ .
- 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 $\lambda$

- 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  $3\lambda$
  - Width metal1  $2\lambda$



# Επαναχρησιμοποίηση σχεδίου

- Έστω νέα τεχνολογία με
  - Spacing metal 1.5  $\mu\text{m}$
  - Width metal 1.0  $\mu\text{m}$
- Με αλλαγή του  $\lambda$  από 0.6  $\mu\text{m}$  σε 0.5  $\mu\text{m}$  οι περιορισμοί παραμένουν οι ίδιοι
  - Spacing metal 3 $\lambda$
  - Width metal 2 $\lambda$
- Το σχέδιο μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί

# Πιθανό πρόβλημα

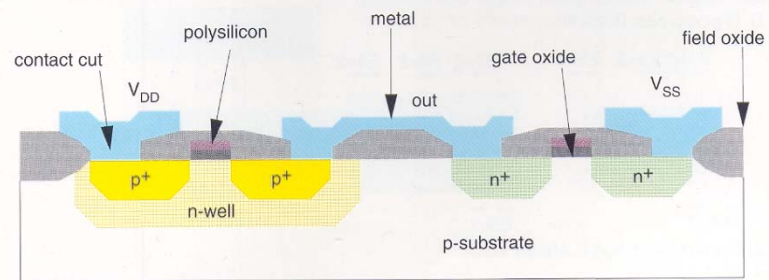
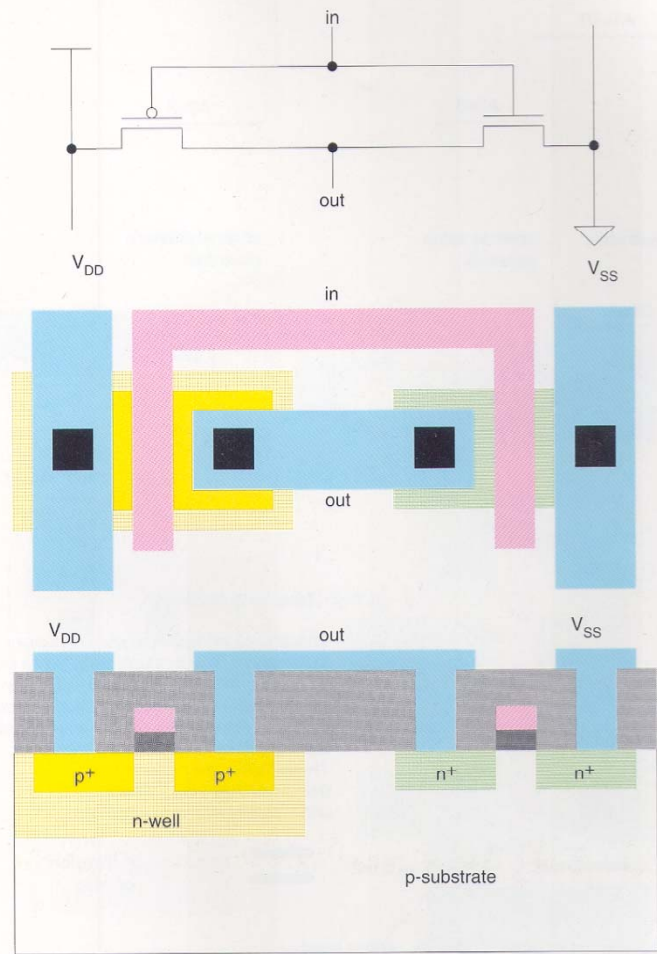
- Έστω τεχνολογία με
  - Spacing metal  $1.5 \mu\text{m}$
  - Width metal  $0.9 \mu\text{m}$
- Τώρα τα  $\lambda$  είναι διαφορετικά
  - Για Spacing με περιορισμό  $3\lambda$  έχω  $\lambda=0.5 \mu\text{m}$
  - Για Width με περιορισμό  $2\lambda$  έχω  $\lambda=0.45 \mu\text{m}$
  - Επειδή πρέπει να 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  $\mu\text{m}$
  - Width metal1 1.0m
- Το πλάτος δεν είναι το ελάχιστο δυνατό

# Stick-Diagrams

- 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

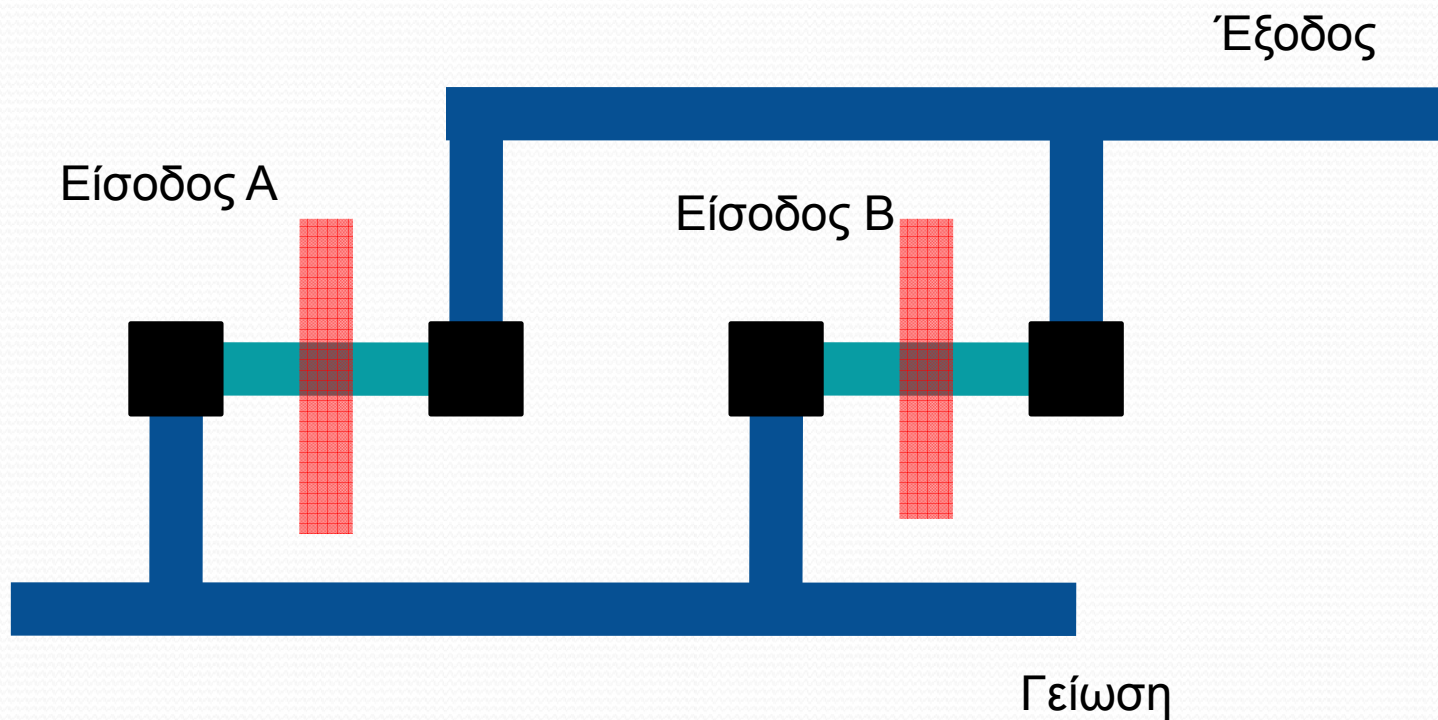


- Τα τρανζίστορ σε σειρά εάν τοποθετηθούν μαζί μπορούν να υλοποιηθούν σε ενιαίο τμήμα diffusion (n-diff για n-MOS, p-diff για p-MOS)
- Όταν σχεδιάζουμε προσπαθούμε να αποφύγουμε επιπλέον κόμβους που αυξάνουν την χωρητικότητα
- Προσπαθούμε τυχόν χωρητικότητα να είναι συγκεντρωμένη στις τροφοδοσίες ( $V_{DD}$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

## • 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

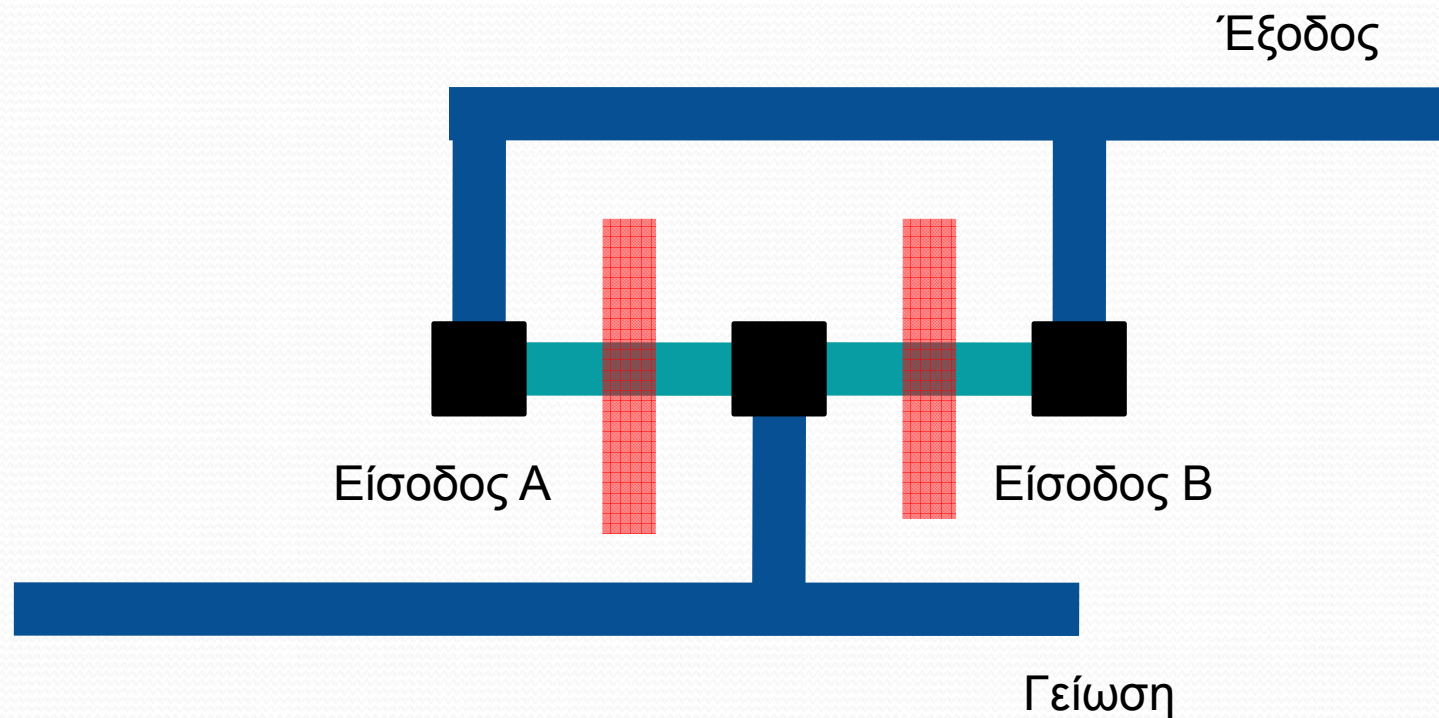
# n-MOS δικτύωμα NOR Πύλης





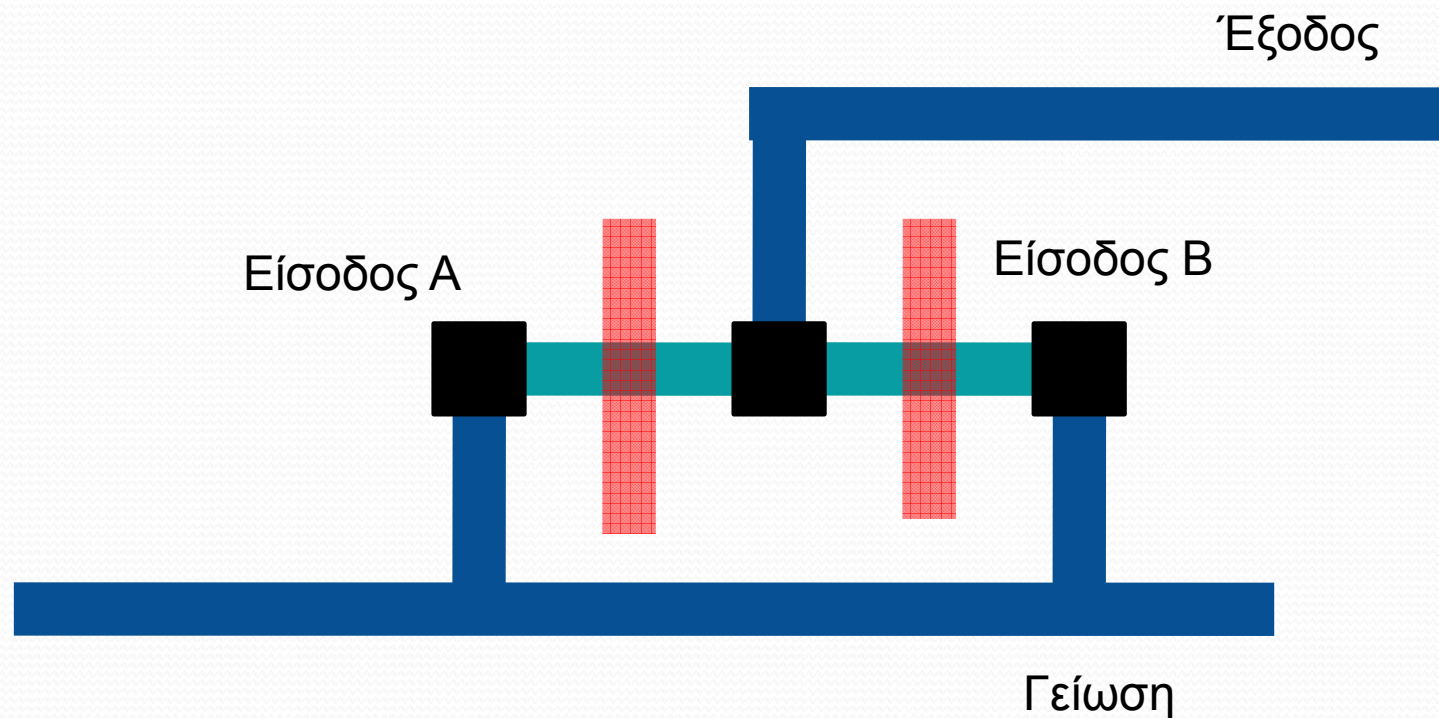
# η-MOS δικτύωμα NOR Πύλης

- Κοινός κόμβος για γείωση
  - Η χωρητικότητα μειωμένη στην γείωση



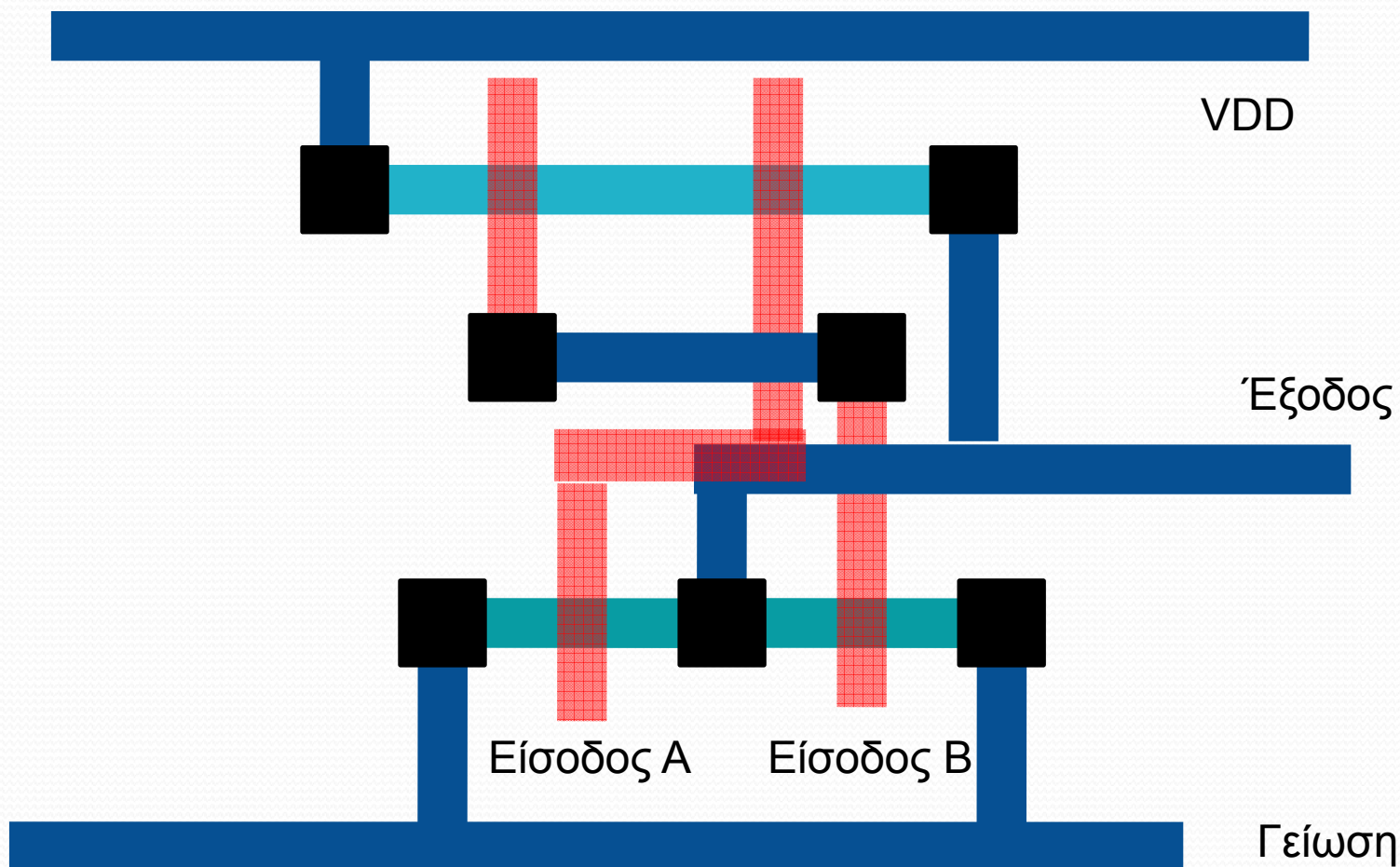
# n-MOS δικτύωμα NOR Πύλης

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



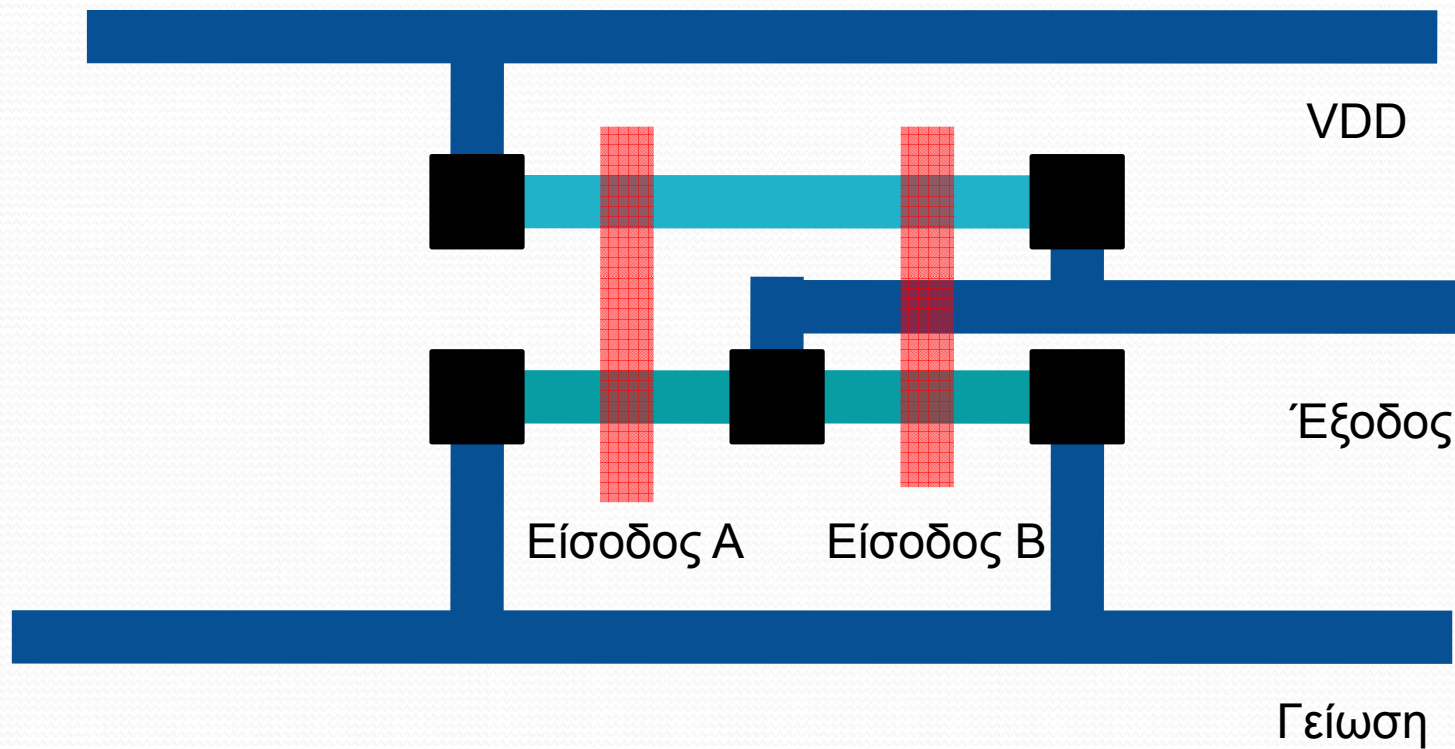
# Πύλη NOR

- Τα τρανζίστορ δεν είναι με την ίδια σειρά στα δικτυώματα

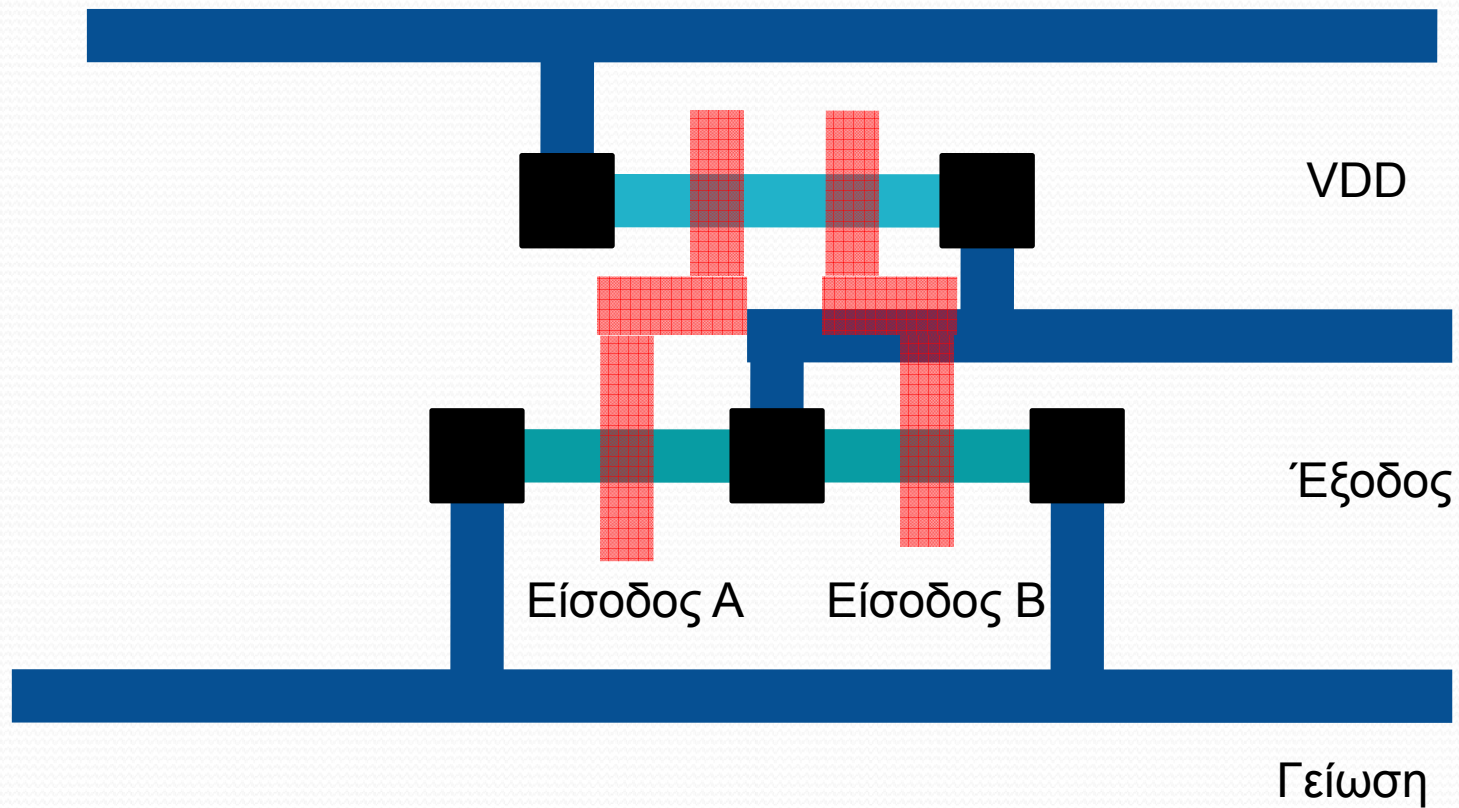


# Πύλη NOR

- Τα τρανζίστορ με «σωστή» σειρά στα δικτυώματα



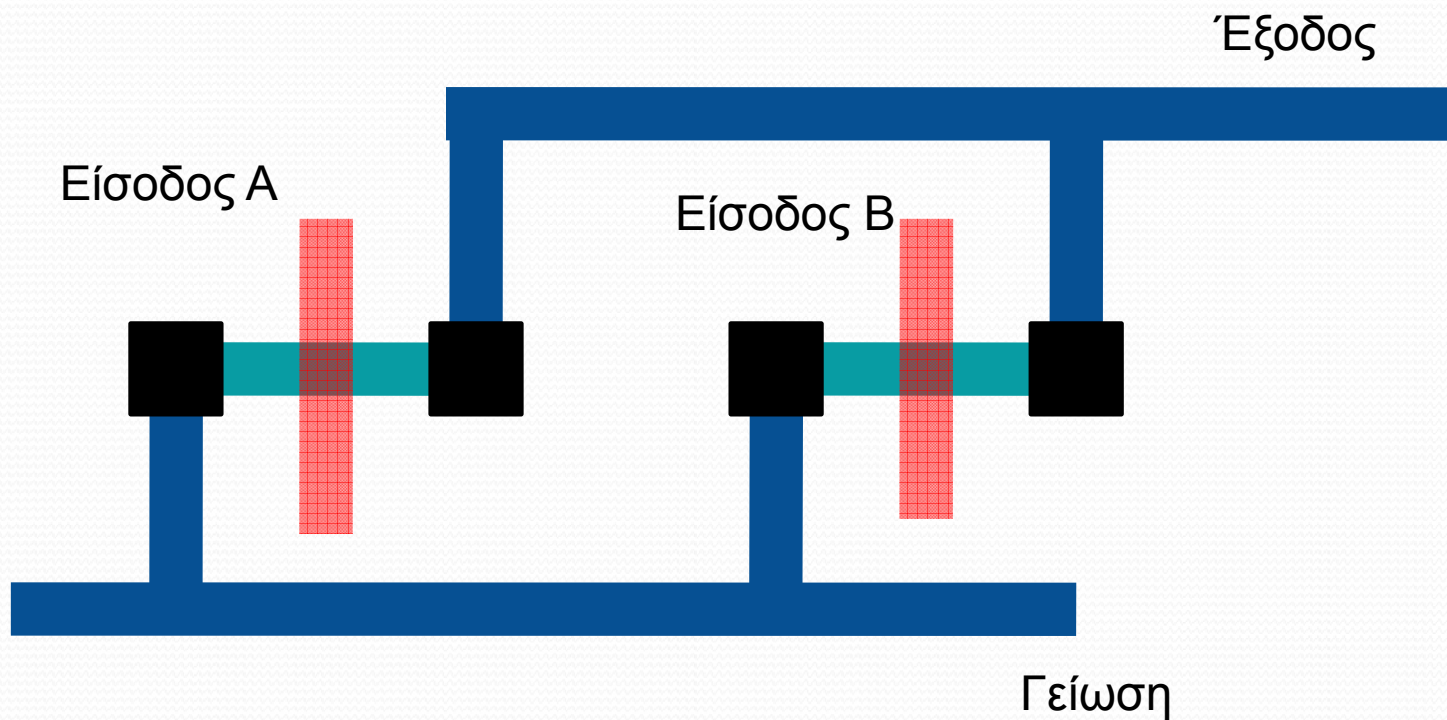
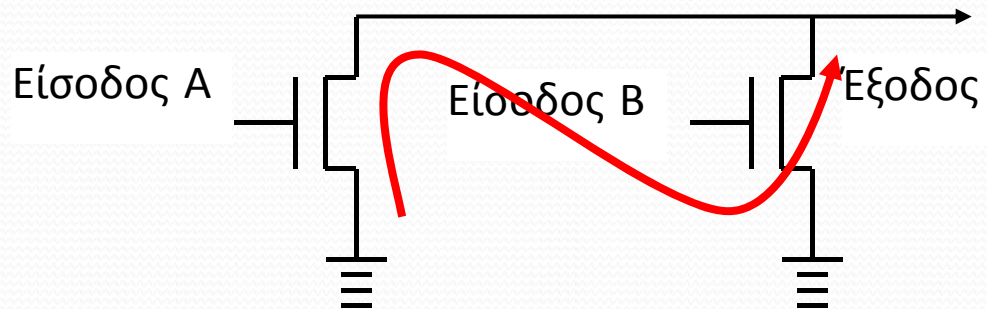
# Μείωση του μήκους των diff



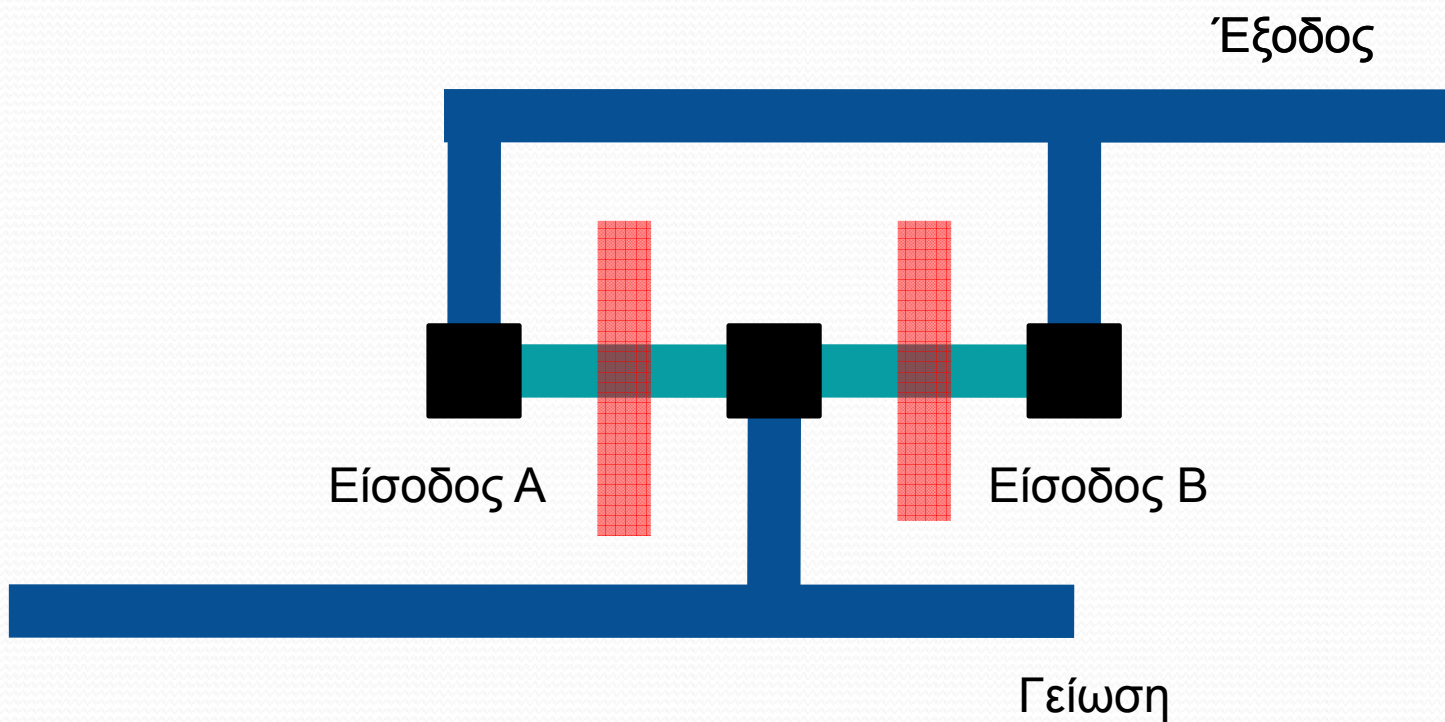
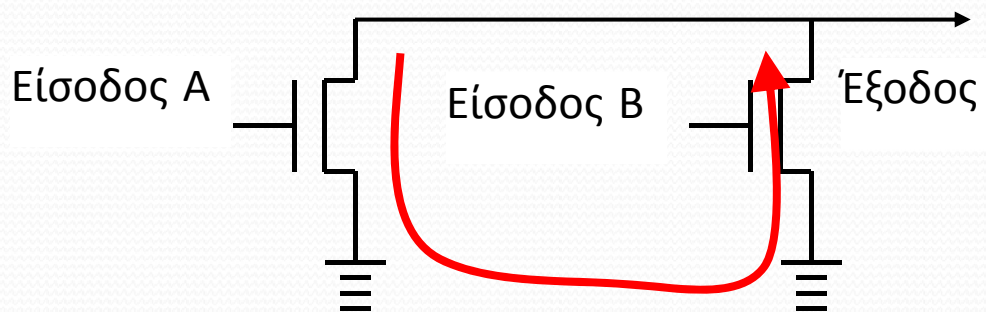
# Euler path

- 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

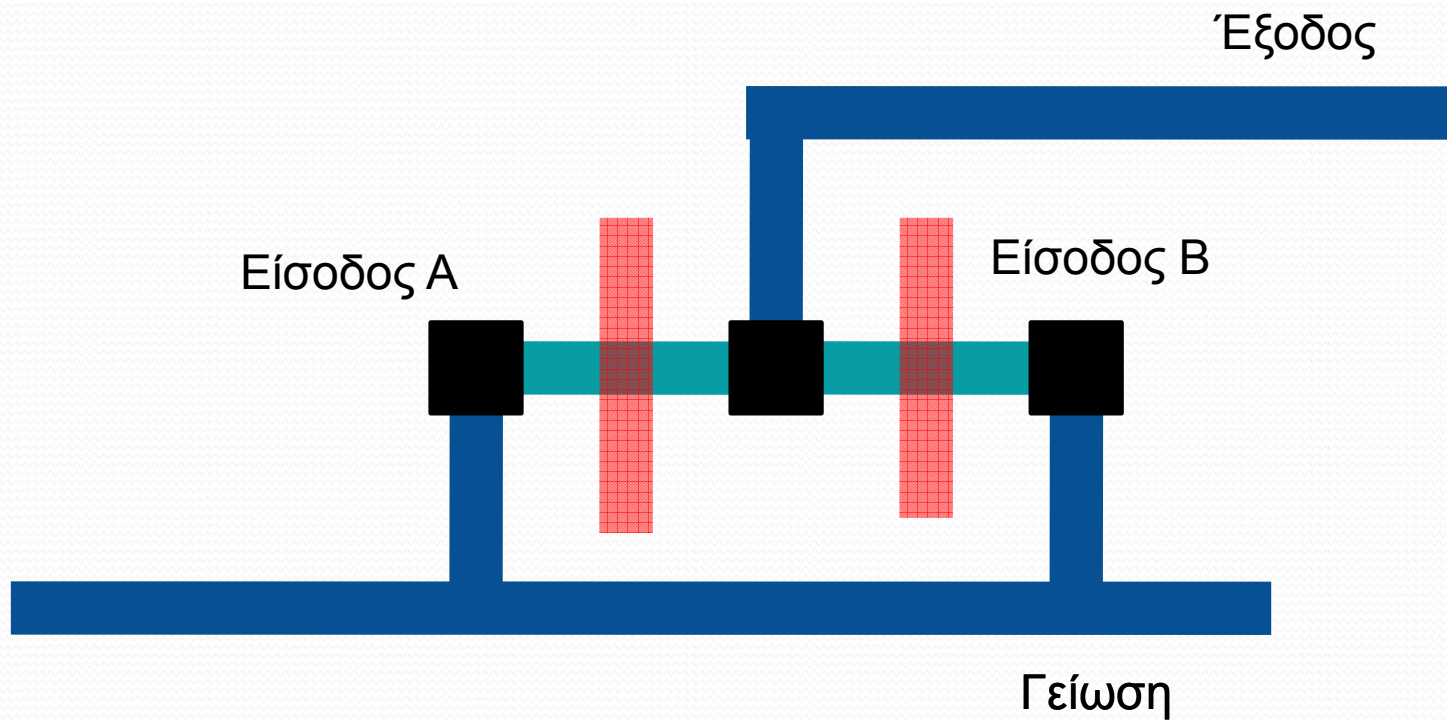
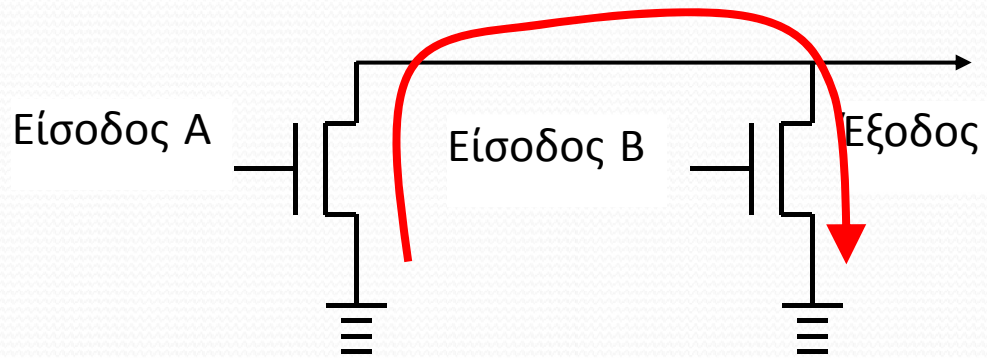


# Παράδειγμα

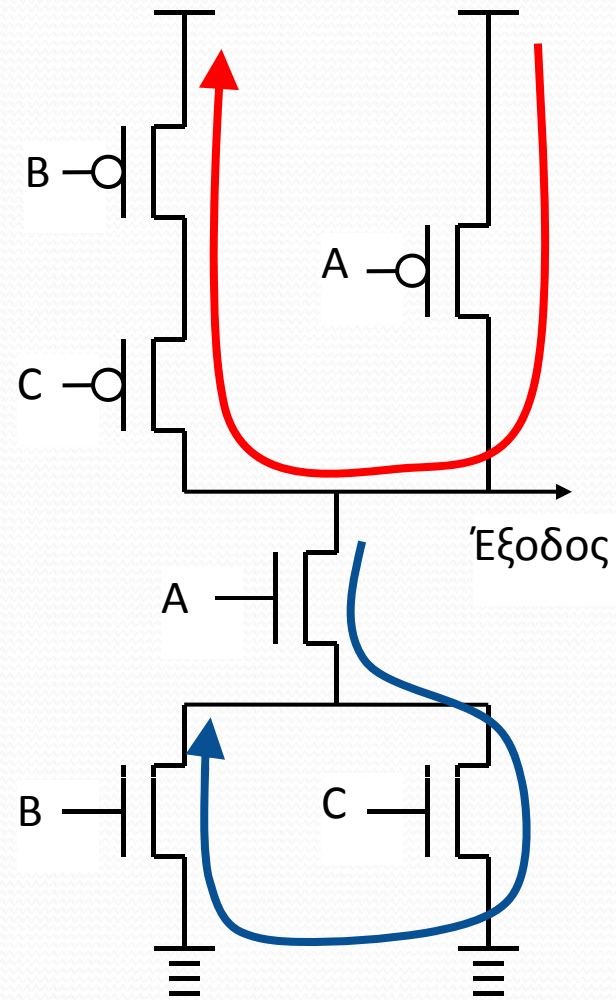




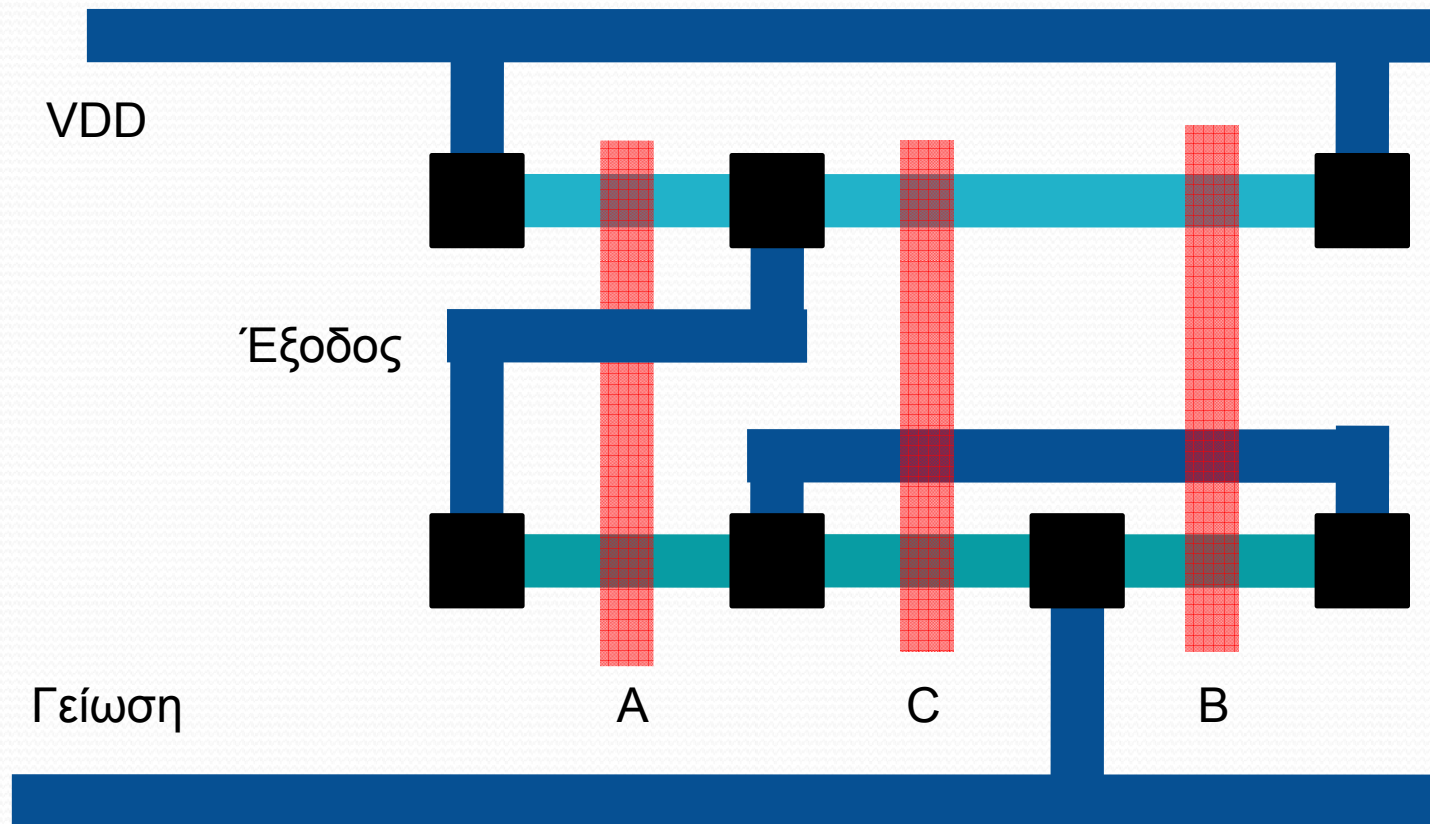
# Παράδειγμα



# Παράδειγμα



# Παράδειγμα



# 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

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

# Αντίσταση(συνέχεια)

- 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

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



# Αντίσταση(συνέχεια)

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

# Αντίσταση(συνέχεια)

- 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)

# Αντίσταση(συνέχεια)

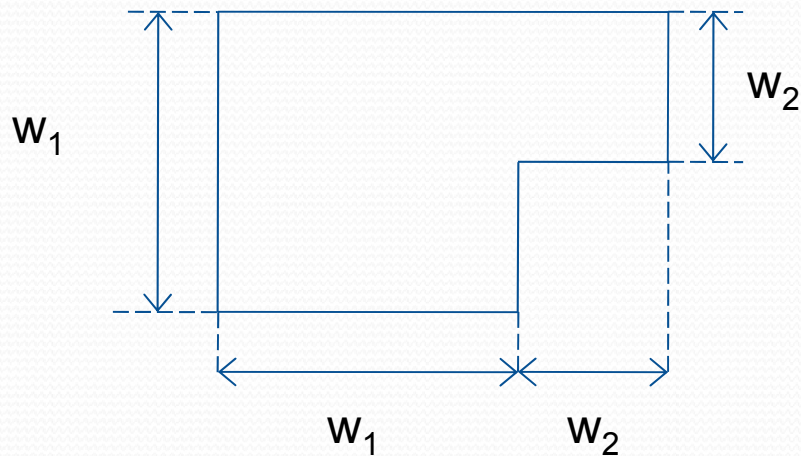
- Η  $R_S$  δίνεται σε  $\Omega/\text{τετράγωνο}$ ,  $\text{Ohms}/\square$ ,
  - Για  $w=1$  (τετράγωνο) η αντίσταση είναι ίση με την  $R_S$ , και δεν εξαρτάται από το μέγεθος του τετραγώνου
- Γενικότερα η αντίσταση δεν εξαρτάται από το απόλυτο μέγεθος αλλά από την μορφή του σχήματος
- Παράδειγμα δυο 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

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



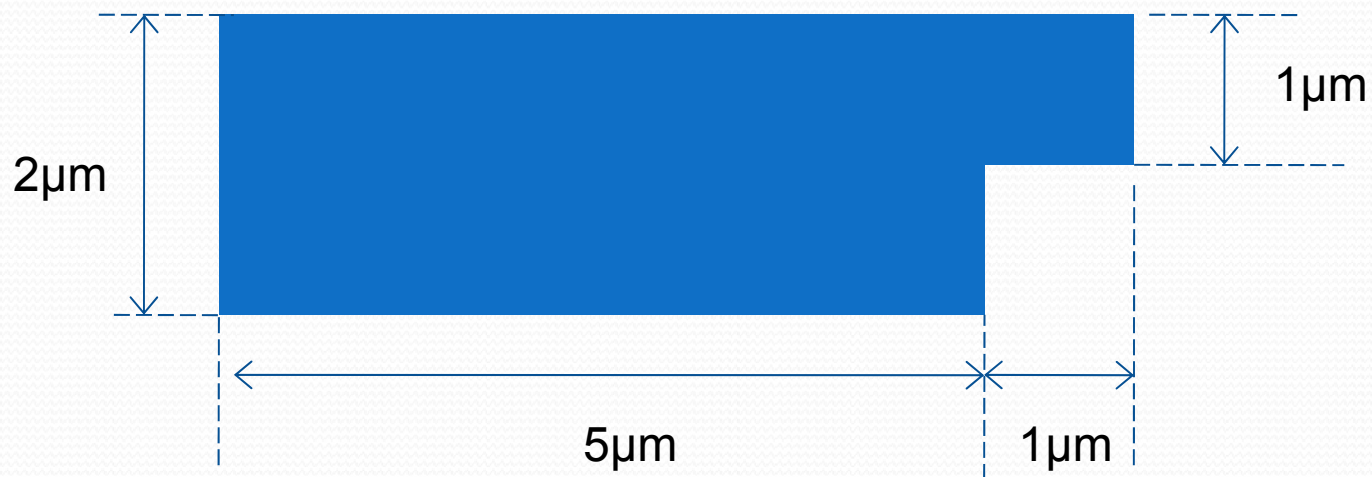
$w_1/w_2$	Αντίσταση (σε $\square$ )
1.5	2.1
2	2.25
3	2.5
4	2.65

# 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

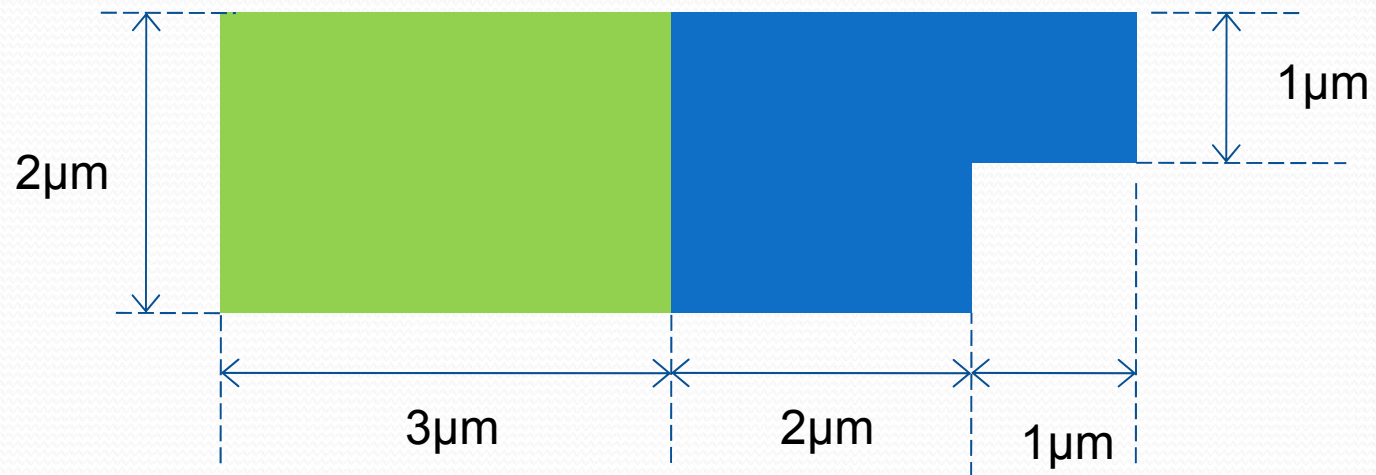
# Υπολογισμός Τετραγώνων

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



Χωρίζω το σχήμα σε δύο επιμέρους

- Τμήμα Α (ορθογώνιο)
- Τμήμα Β (Υπολογίζεται από τον πίνακα που έχει δοθεί)





## • Τμήμα Α

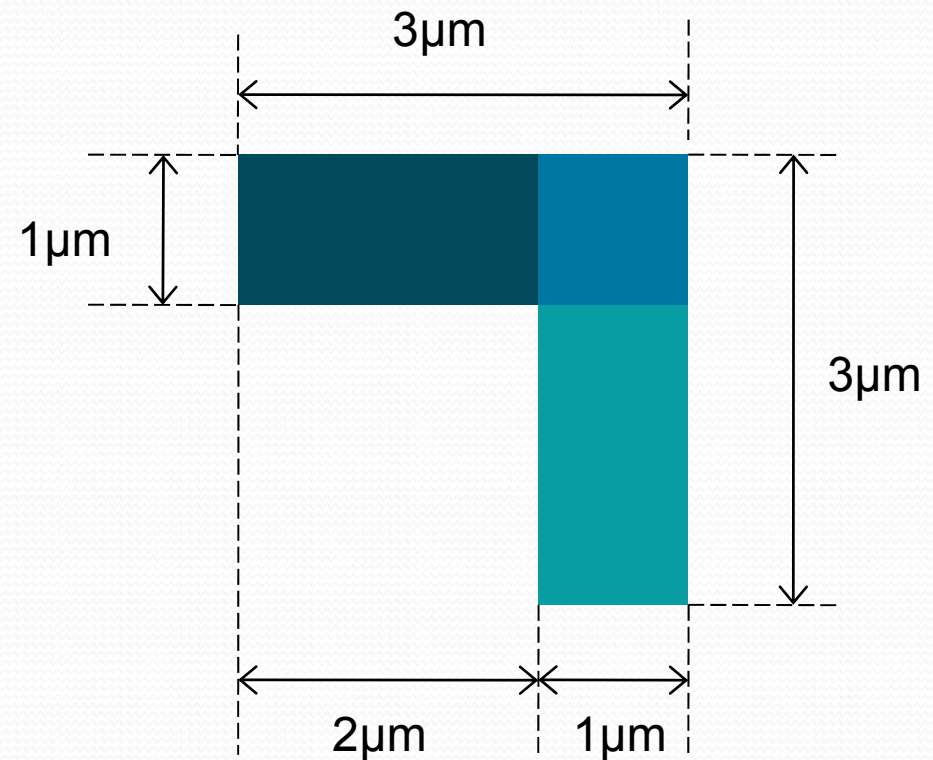
- Ο αριθμός των τετραγώνων είναι  $l/w$  άρα το τμήμα Α έχει  $(3\mu\text{m}/2\mu\text{m}) \square = 1.5 \square$

## • Τμήμα Β

- $w_1/w_2 = 2\mu\text{m}/1\mu\text{m} = 2$
- 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  $\mu\text{m}$
- Αθροίζω της δύο χωρητικότητες και βρίσκω την συνολική