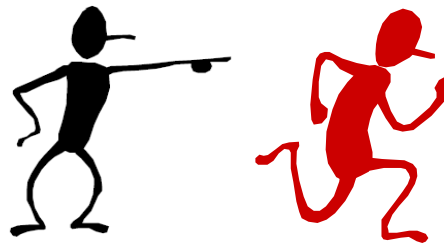


2^η ενότητα:

ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ



Περιεχόμενα 2^{ης} ενότητας

- Κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων CMOS
- Ράβδος και δισκίο πυριτίου
- Φωτολιθογραφία
- Βήματα διεργασίας κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων CMOS
- Σχεδιασμός και κατασκευή αντιστροφέα CMOS
- Κανόνες σχεδιασμού ολοκληρωμένων κυκλωμάτων
- Προηγμένες τεχνικές διεργασιών κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων
- Συσκευασία (packaging) ολοκληρωμένων κυκλωμάτων
- Τοποθέτηση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε κάρτα
- Μονάδες πολλαπλών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (multi-chip modules, MCMs)
- Σύστημα σε μία συσκευασία (system-in-a-package)
- Συμπεράσματα

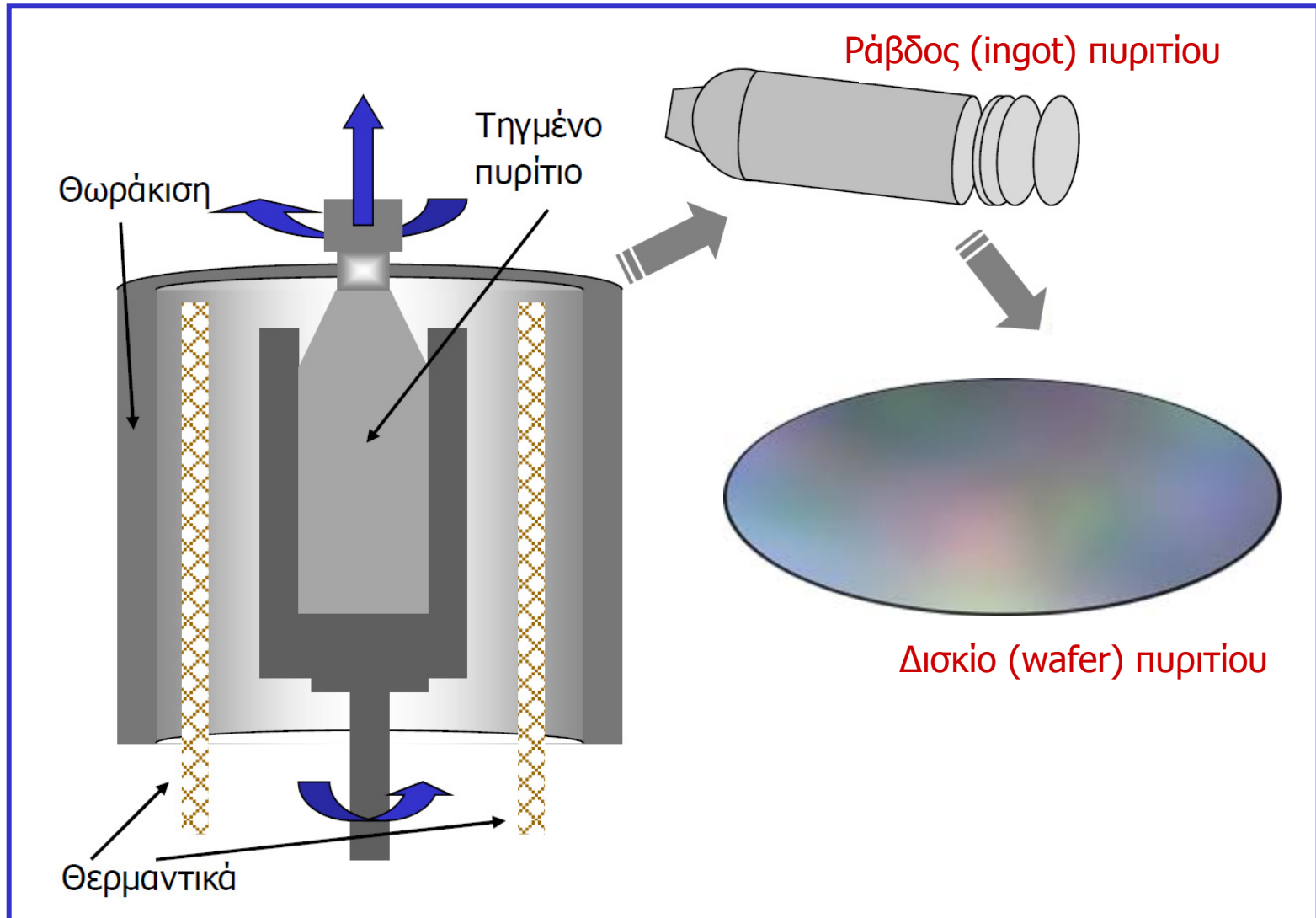
Κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Οι περισσότεροι σχεδιαστές δεν έρχονται σχεδόν ποτέ αντιμέτωποι με τις λεπτομέρειες της διεργασίας κατασκευής των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.
- Ωστόσο, η βασική γνώση των βημάτων που οδηγούν σε ένα λειτουργικό ολοκληρωμένο κύκλωμα πυριτίου είναι αρκετά χρήσιμη για την κατανόηση των φυσικών περιορισμών, και της επίδρασης της διεργασίας κατασκευής στο κόστος.
- Η διασύνδεση μεταξύ της διεργασίας κατασκευής και του σχεδιασμού ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι οι **οπτικές μάσκες**.
- Οι μάσκες αντιστοιχούν στις διαφορετικές στρώσεις του ημιαγωγίμο υλικού που τυπώνονται και σχηματίζουν τα διάφορα ηλεκτρονικά στοιχεία και τις γραμμές διασύνδεσης του ολοκληρωμένου κυκλώματος.
- Κατά τον σχεδιασμό των μασκών πρέπει να τηρούνται περιορισμοί (**κανόνες σχεδιασμού, design rules**) που αφορούν το ελάχιστο πλάτος τους και την απόσταση μεταξύ τους, ώστε το κύκλωμα που προκύπτει να λειτουργεί σωστά.
- Το **ημιαγωγίμο υλικό** βάσης στο οποίο κατασκευάζονται τα ολοκληρωμένα κυκλώματα CMOS είναι το μονοκρυσταλλικό **πυρίτιο (silicon)**.
- Η αγωγιμότητα του πυριτίου μπορεί να μεταβληθεί με την πρόσμιξη ατόμων κατάλληλων υλικών στο κρυσταλλικό πλέγμα του, τα οποία νοθεύουν τον ημιαγωγό παρέχοντάς του **ηλεκτρόνια** ή **οπές**.

Κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Τα υλικά προσμίξεων που δέχονται ηλεκτρόνια από το πυρίτιο και αφήνουν σε αυτό κενές θέσεις (οπές), λέγονται **αποδέκτες (acceptors)**.
- Τα υλικά προσμίξεων που παρέχουν **ηλεκτρόνια** στο πυρίτιο, λέγονται **δότες (donors)**.
- Όταν το πυρίτιο περιέχει πλειονότητα δοτών χαρακτηρίζεται ως **τύπου n**, ενώ αντίθετα όταν περιέχει πλειονότητα αποδεκτών χαρακτηρίζεται ως **τύπου p**.
- Κατά τη σύνδεση περιοχών πυριτίου τύπου n και p, η περιοχή όπου το υλικό αλλάζει από τύπου n σε τύπου p, σχηματίζει μια **επαφή (junction)**.
- Χρησιμοποιώντας δομές περιοχών τύπου n και p, τοποθετώντας κατάλληλα τις επαφές και δημιουργώντας συνδυασμούς με άλλες δομές, είναι δυνατή η υλοποίηση ημιαγωγικών στοιχείων που συνθέτουν τα ολοκληρωμένα κυκλώματα.
- Το βασικό υλικό κατασκευής είναι το **δισκίο (wafer)** μονοκρυσταλλικού πυριτίου, με διάμετρο από 10 έως 30 cm και πάχος μικρότερο από 1 mm.
- Τα δισκία προέρχονται από τον τεμαχισμό **κυλινδρικών ράβδων μονοκρυσταλλικού πυριτίου** (μήκος 1 – 2 m) που παράγονται από μια χοάνη τήξης, στην οποία λιώνεται καθαρό πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (μέθοδος Czochralski).
- Στο υλικό προστίθενται **ελεγχόμενες ποσότητες προσμείξεων**, ώστε να αποκτήσει τις απαιτούμενες ηλεκτρικές ιδιότητες.

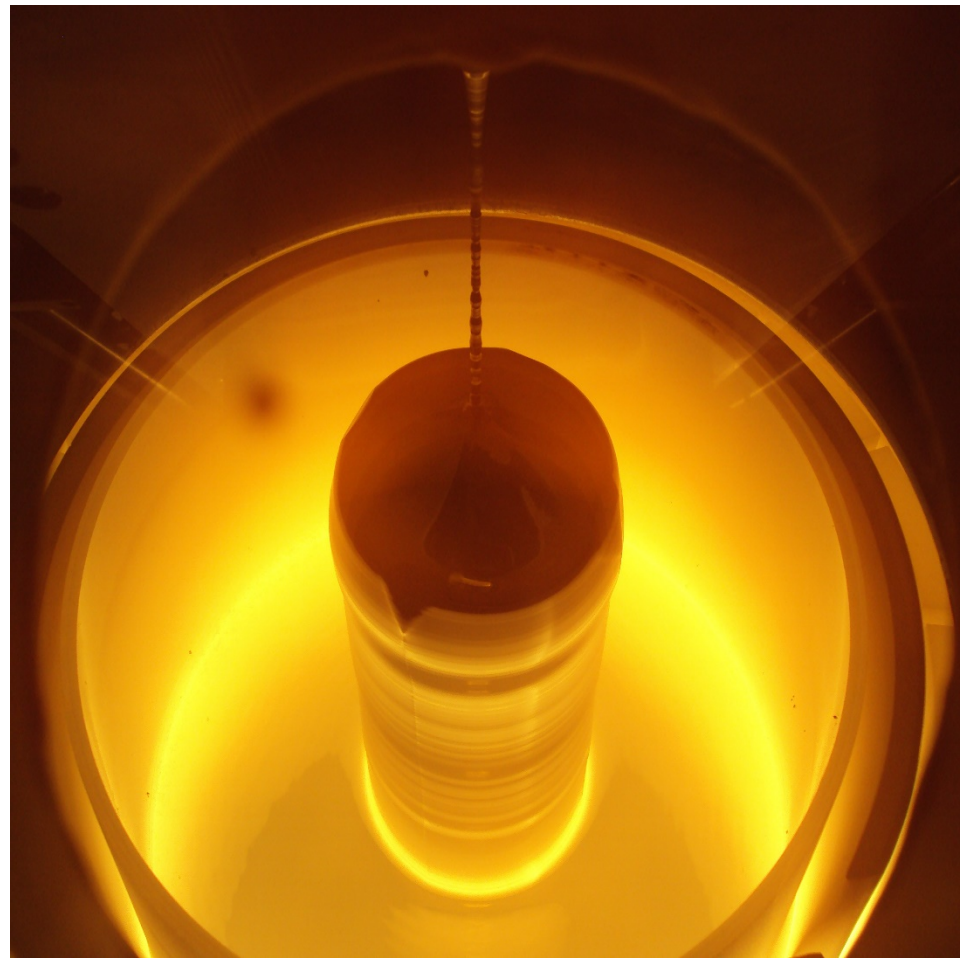
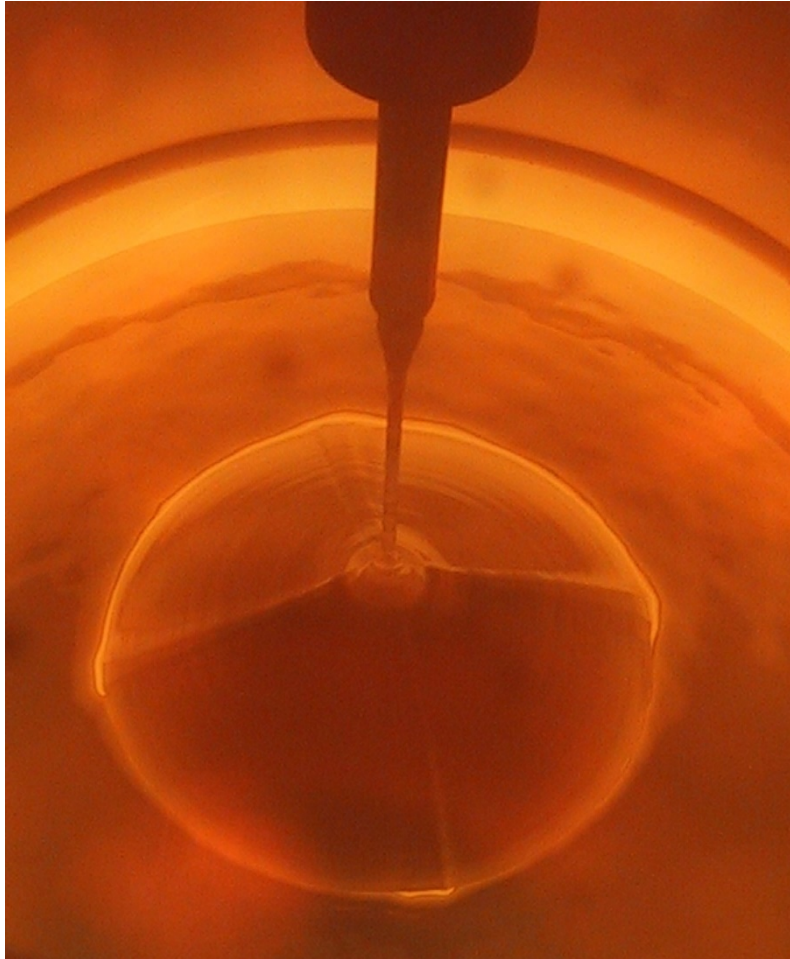
Ράβδος και δισκίο πυριτίου



Ράβδος και δισκίο πυριτίου



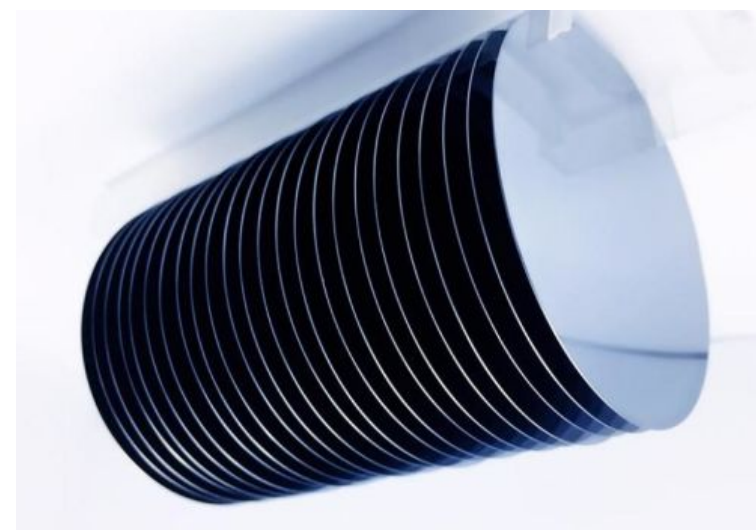
Ράβδος και δισκίο πυριτίου



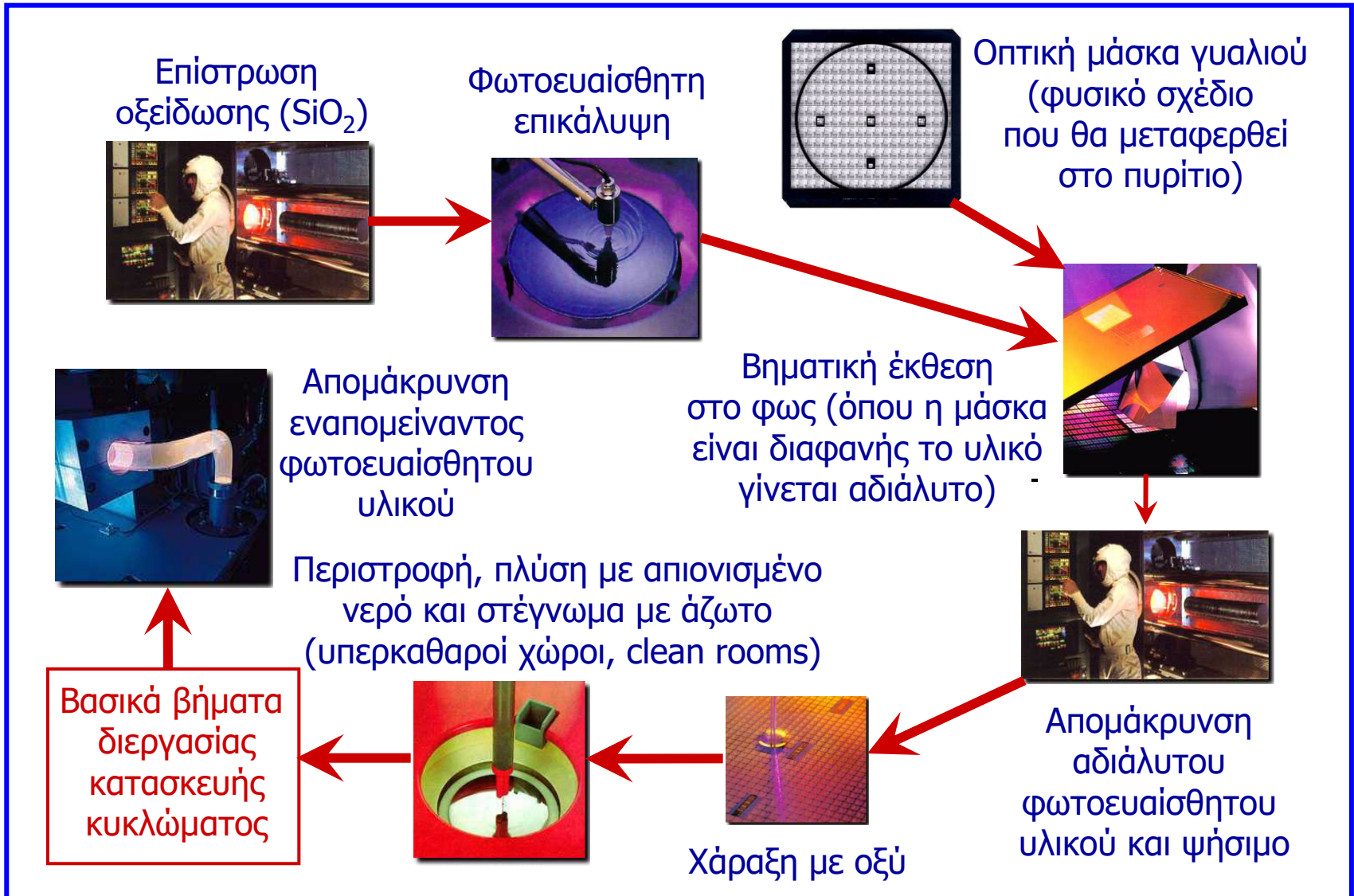
Ράβδος και δισκίο πυριτίου



Ράβδος και δίσκο πυριτίου



Φωτολιθογραφία



Βασικά βήματα διεργασίας κατασκευής CMOS

- Τα βασικά βήματα της διεργασίας κατασκευής ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος, ξεκινούν με τον καθορισμό των ενεργών περιοχών (περιοχές όπου θα κατασκευαστούν τα **τρανζίστορ**).
- Όλες οι άλλες περιοχές της ψηφίδας θα καλυφθούν με ένα αδιαπέραστο στρώμα από SiO_2 , που αναφέρεται ως **οξειδίο πεδίου (field oxide)** και λειτουργεί ως απομονωτής μεταξύ γειτονικών στοιχείων.
- Κατόπιν, σχηματίζονται ελαφρώς νοθευμένα **πηγάδια τύπου p και n** με εμφύτευση ιόντων.
- Για την κατασκευή ενός τρανζίστορ NMOS σε ένα πηγάδι τύπου p, εμφυτεύονται (ή διαχέονται) υψηλής νόθευσης **περιοχές πηγής και υποδοχής** τύπου n σε ένα ελαφρώς νοθευμένο υπόστρωμα τύπου p.
- Μία λεπτή στρώση SiO_2 (**οξειδίο πύλης, gate oxide**) απομονώνει την περιοχή μεταξύ πηγής και υποδοχής και καλύπτεται από **αγώγιμο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (polysilicon)**.
- Το αγώγιμο υλικό σχηματίζει την **πύλη** του τρανζίστορ.
- Τα τρανζίστορ PMOS κατασκευάζονται σε πηγάδι τύπου n με παρόμοιο τρόπο (αντιστρέφοντας n και p).
- Πολλαπλές **στρώσεις μετάλλου** (βολφράμιο, αλουμίνιο, χαλκός) εναποτίθενται πάνω από τα στοιχεία ώστε να σχηματίσουν τις αναγκαίες **διασυνδέσεις** μεταξύ των τρανζίστορ.

Βασικά βήματα διεργασίας κατασκευής CMOS



**Καθορισμός των ενεργών περιοχών
και χάραξη, γέμισμα των μη ενεργών με SiO_2**

Εμφύτευση περιοχών πηγαδιού

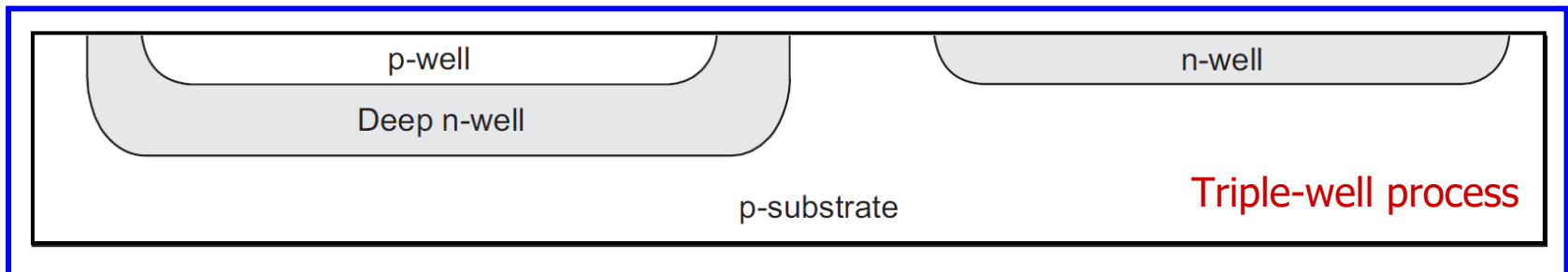
**Εναπόθεση και σχηματισμός στρώσεων
πολυκρυσταλλικού πυριτίου**

**Εμφύτευση περιοχών πηγής και υποδοχής
των τρανζίστορ**

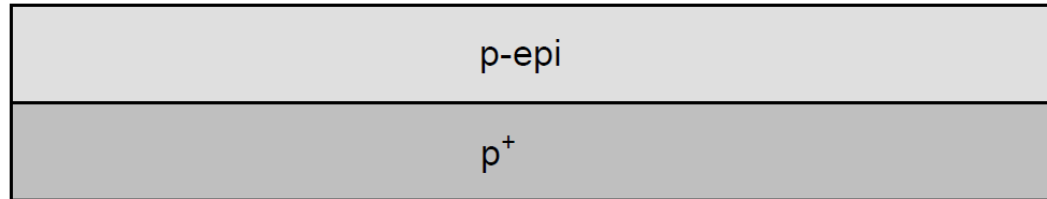
**Δημιουργία επαφών (οπών) και περασμάτων
(vias) και εναπόθεση στρώσεων μετάλλου**

Βασικά βήματα διεργασίας κατασκευής CMOS

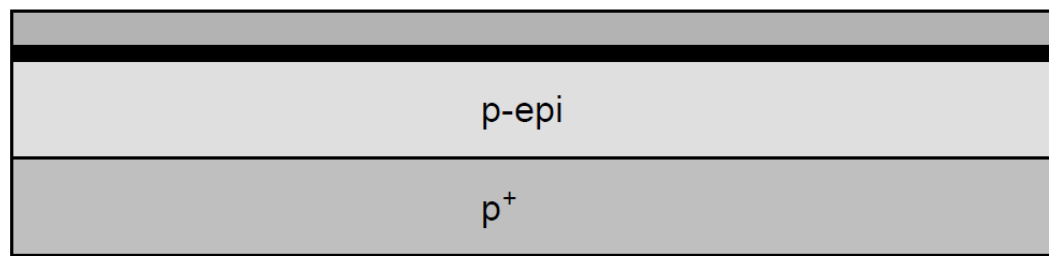
- Οι συνηθέστερες διεργασίες CMOS είναι αυτή που χρησιμοποιούν **έναν τύπο πηγαδιού (single-well processes)**.
- Η πιο διαδεδομένη διεργασία είναι αυτή που χρησιμοποιεί **μόνο πηγάδια τύπου n (n-well process)** στα οποία αναπτύσσονται τα τρανζίστορ PMOS, ενώ τα τρανζίστορ NMOS αναπτύσσονται στο υπόστρωμα τύπου p.
- Οι διεργασίες που χρησιμοποιούν μόνο πηγάδια τύπου p λειτουργούν με αντίστοιχο τρόπο.
- Οι διεργασίες που χρησιμοποιούν και τους **δύο τύπους πηγαδιού (twin-well processes)** πλεονεκτούν στο ότι καθιστούν δυνατή την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού κάθε τύπου τρανζίστορ χωριστά.
- Υπάρχουν και οι διεργασίες **τριπλού πηγαδιού (triple-well processes)**, όπου επιπλέον πηγάδια χρησιμοποιούνται για την απομόνωση ψηφιακών και αναλογικών κυκλωμάτων που αναπτύσσονται στην ίδια ψηφίδα (**mixed-signals chips**).



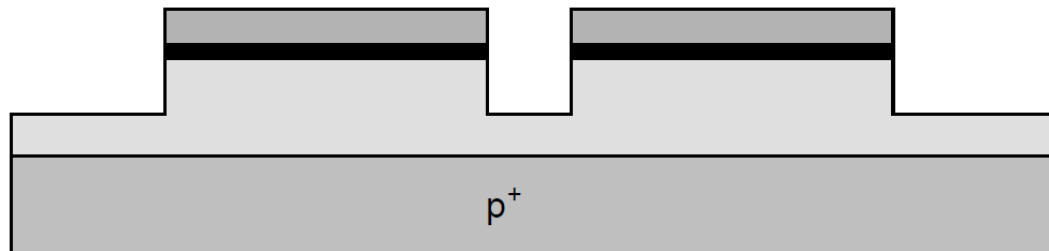
Αναλυτικά βήματα διεργασίας κατασκευής CMOS



Υλικό βάσης: υπόστρωμα τύπου p+ με στρώση επίταξης

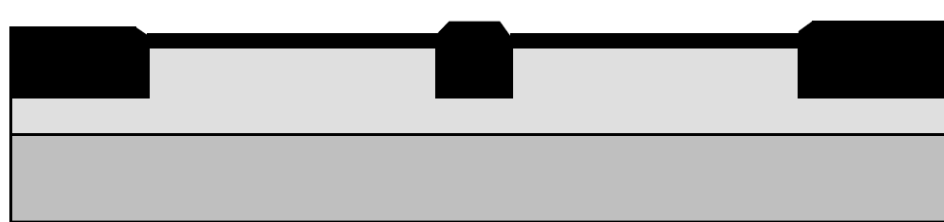


Εναπόθεση οξειδίου πύλης και νιτριδίου ως στρώση απομόνωσης

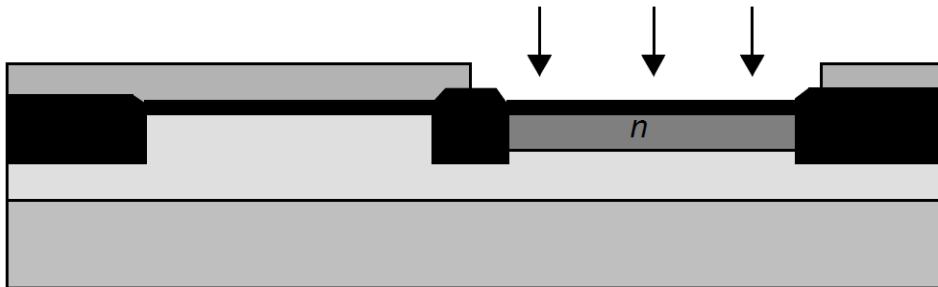


Χάραξη των περιοχών που απομονώνουν τις ενεργές περιοχές

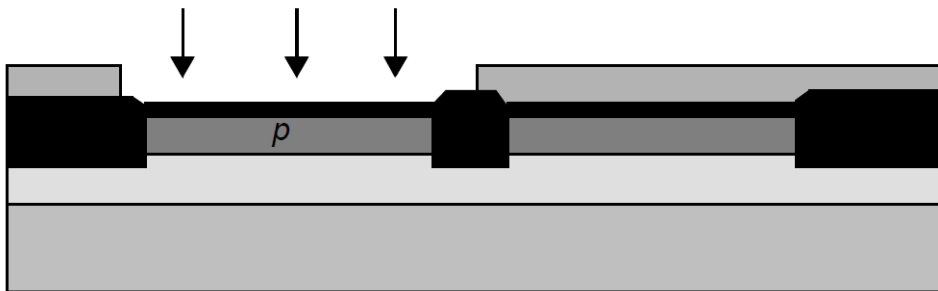
Αναλυτικά βήματα διεργασίας κατασκευής CMOS



SiO₂ Γέμισμα των μη ενεργών περιοχών με SiO₂ λείανση και απομάκρυνση του νιτριδίου

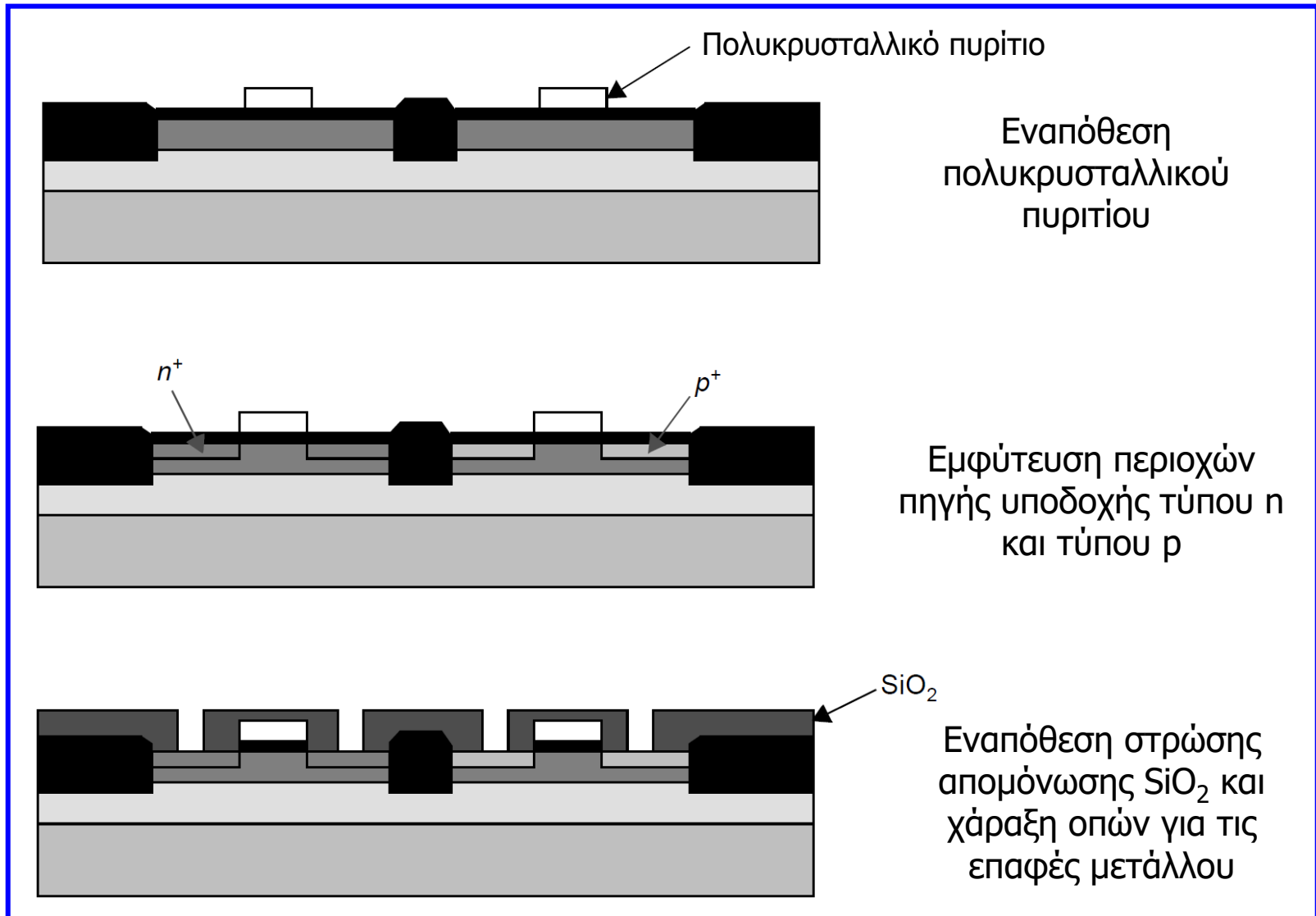


Εμφύτευση του πηγαδιού τύπου n

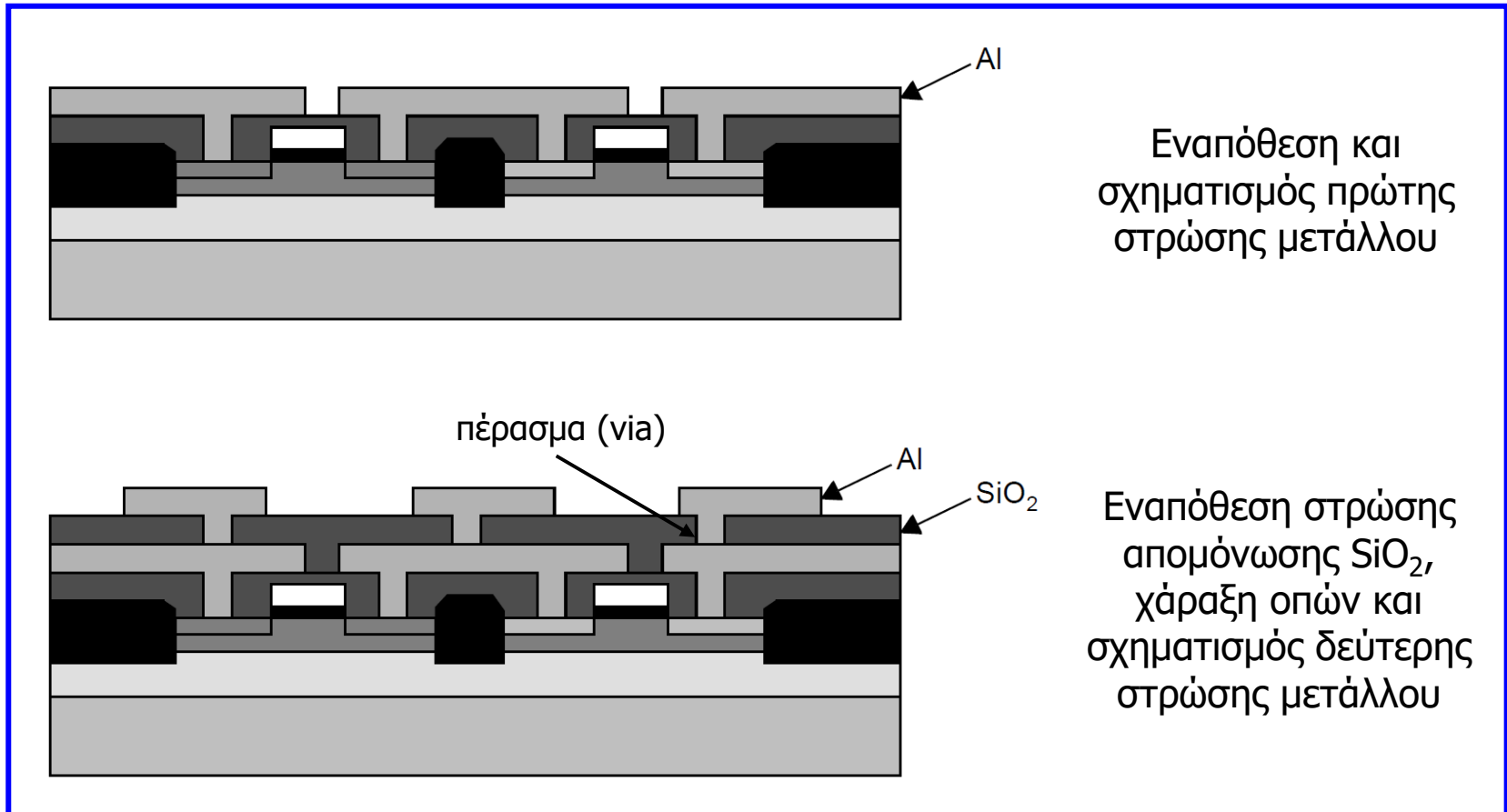


Εμφύτευση του πηγαδιού τύπου p

Αναλυτικά βήματα διεργασίας κατασκευής CMOS



Αναλυτικά βήματα διεργασίας κατασκευής CMOS

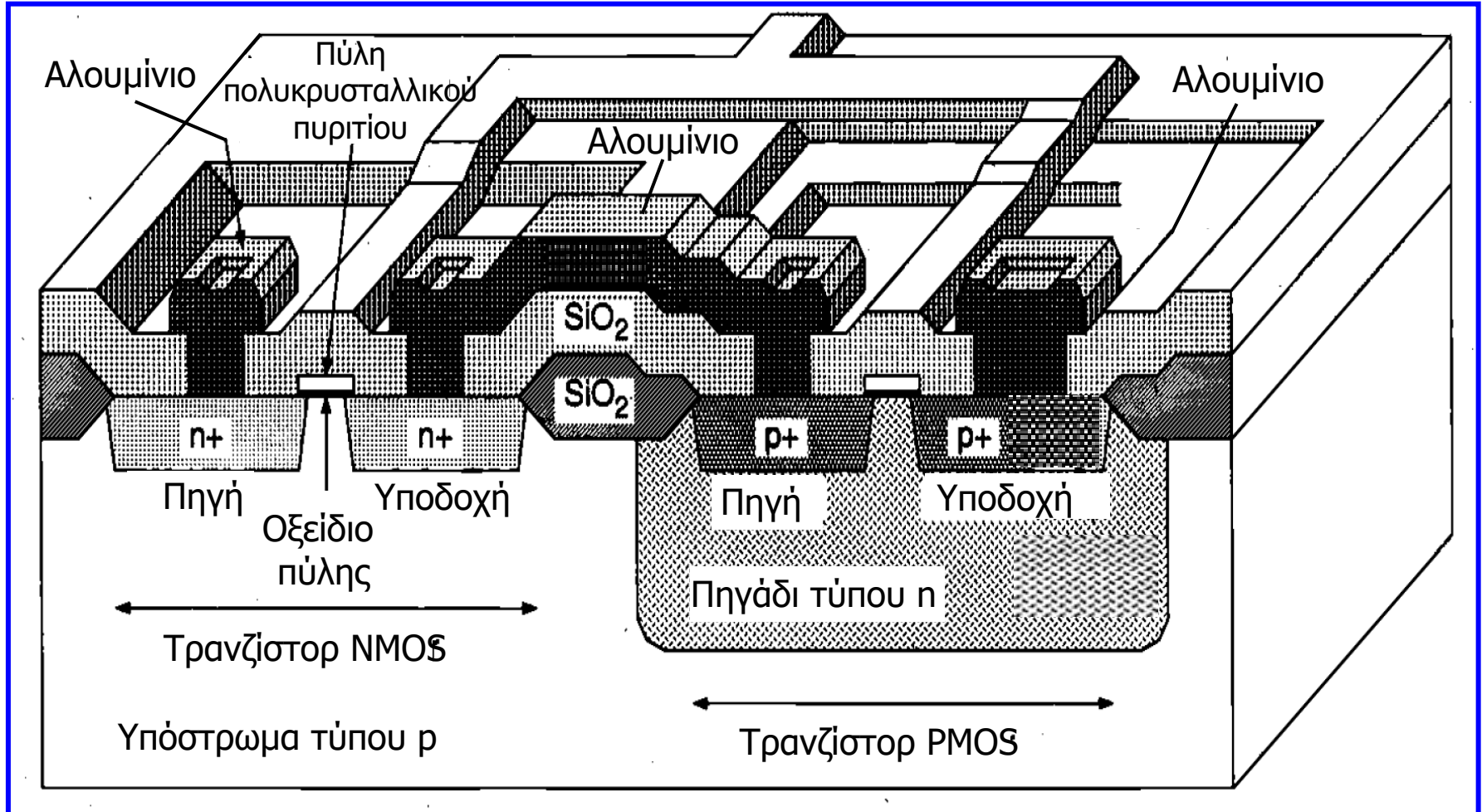


Εναπόθεση και σχηματισμός πρώτης στρώσης μετάλλου

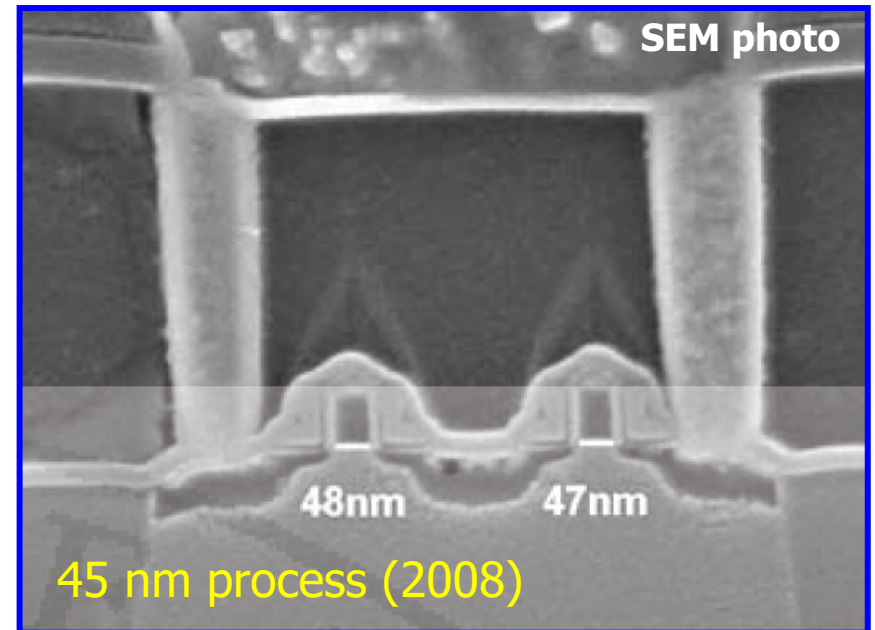
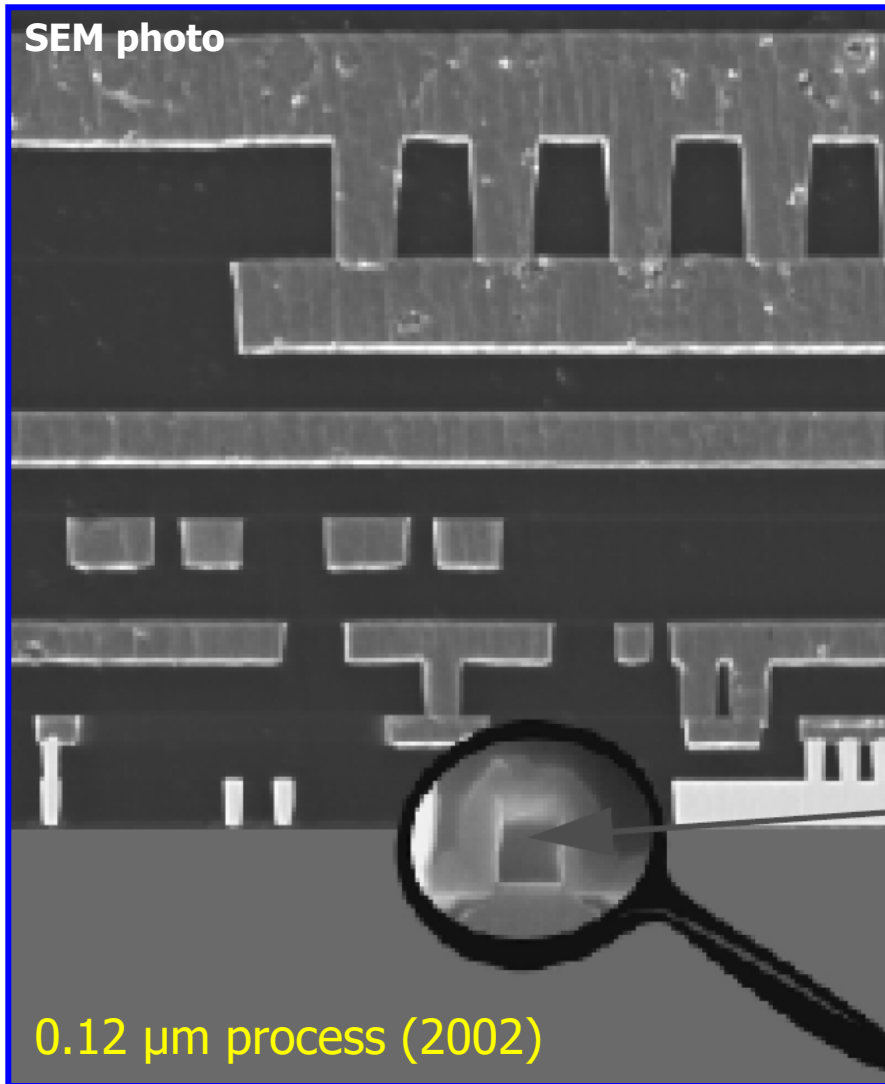
Εναπόθεση στρώσης απομόνωσης SiO₂, χάραξη οπών και σχηματισμός δεύτερης στρώσης μετάλλου

Τρισδιάστατη προοπτική

Διεργασία απλού πηγαδιού, μετά την εναπόθεση της πρώτης στρώσης μετάλλου

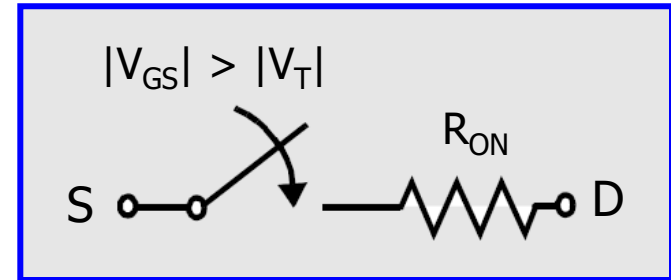


Διεργασίες CMOS

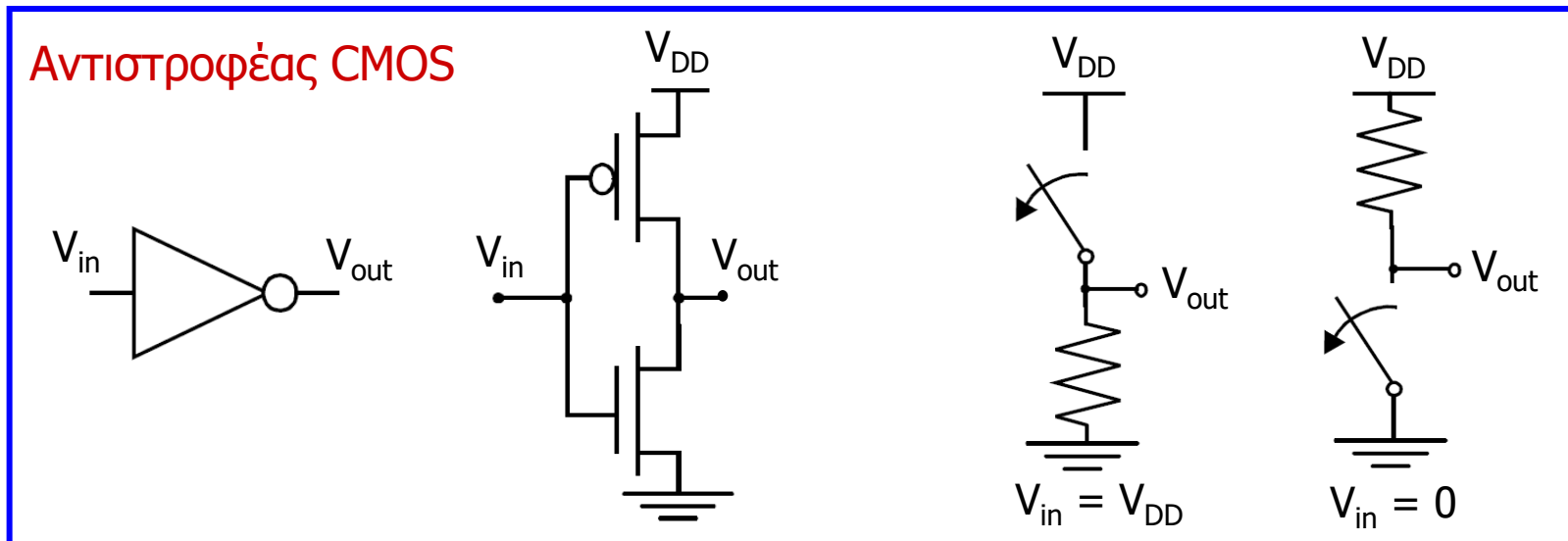


Σχεδιασμός και κατασκευή αντιστροφέα CMOS

- Σύμφωνα με ένα απλό μοντέλο περιγραφής της λειτουργίας ενός τρανζίστορ MOS το **τρανζίστορ** είναι **διακόπτης** με άπειρη αντίσταση αποκοπής (για $|V_{GS}| < |V_T|$) και πεπερασμένη αντίσταση αγωγής (για $|V_{GS}| > |V_T|$), όπου V_T η τάση κατωφλίου.

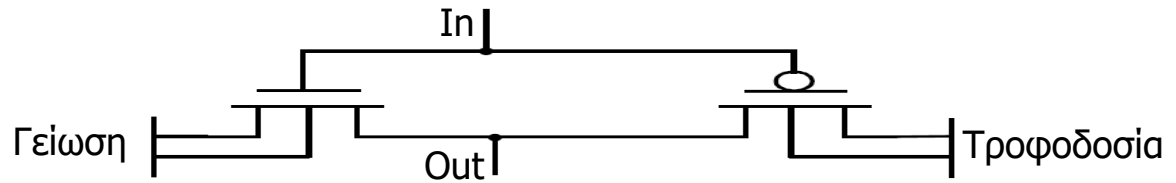


- Όταν $V_{in} = V_{DD}$ (τάση τροφοδοσίας), το NMOS άγει και το PMOS είναι σε αποκοπή, με αποτέλεσμα μία αγωγή διαδρομή μεταξύ V_{out} γείωσης που οδηγεί την V_{out} σε τιμή 0.
- Όταν $V_{in} = 0$, το NMOS είναι σε αποκοπή και το PMOS άγει, με αποτέλεσμα μία αγωγή διαδρομή μεταξύ V_{DD} και V_{out} , που οδηγεί την V_{out} στην υψηλή στάθμη (V_{DD}).

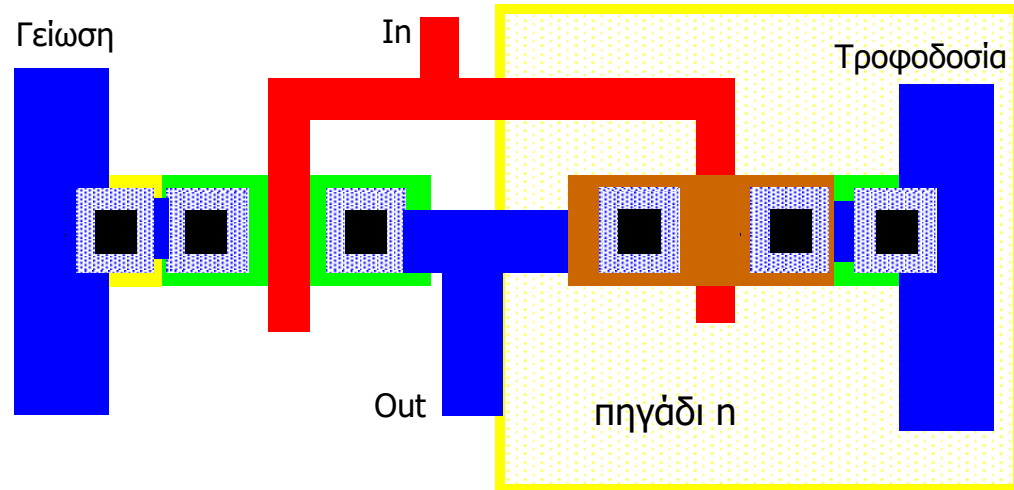


Σχεδιασμός και κατασκευή αντιστροφέα CMOS

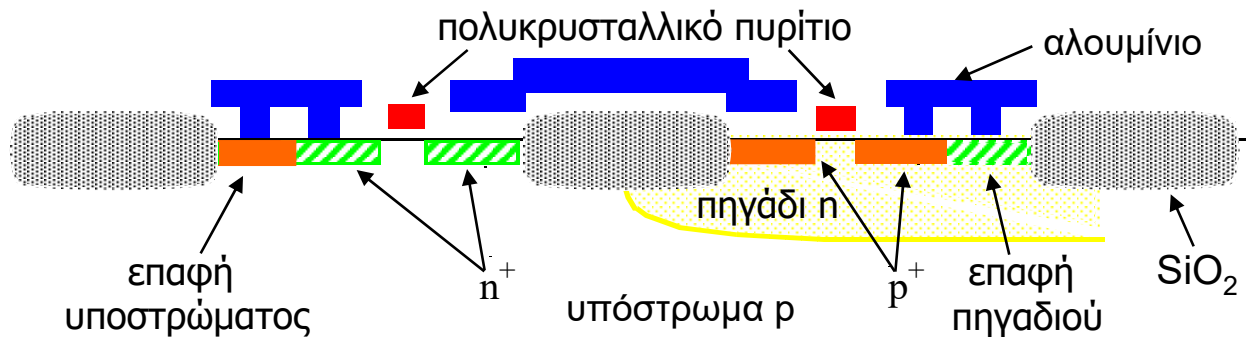
Κυκλωματικό
διάγραμμα



Φυσικός
σχεδιασμός



Κατασκευή

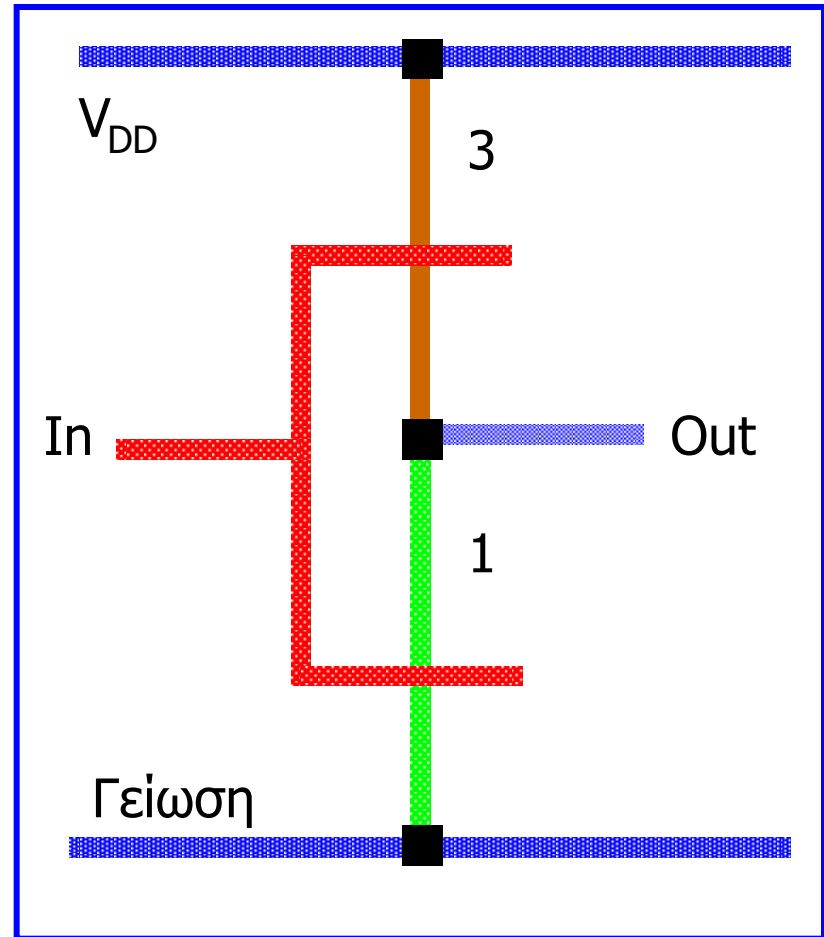


Σχεδιασμός και κατασκευή αντιστροφέα CMOS

Συμβολικό διάγραμμα ή ραβδοδιάγραμμα (sticks diagram) ή διάγραμμα γραμμών:

Αδιάστατο φυσικό σχέδιο, στο οποίο υποδεικνύεται μόνο η τοπολογία (θέσεις) στοιχείων και γραμμών και συνήθως οι λόγοι διαστάσεων (πλάτος / μήκος) του καναλιού των τρανζίστορ.

Το εργαλείο του **συμπιεστή (layout compactor)** λαμβάνει ως είσοδο το συμβολικό διάγραμμα, μεταφράζει τους κανόνες σχεδιασμού, διευθετεί αυτόματα τα στοιχεία του κυκλώματος και ελαχιστοποιεί την καταλαμβανόμενη επιφάνεια.



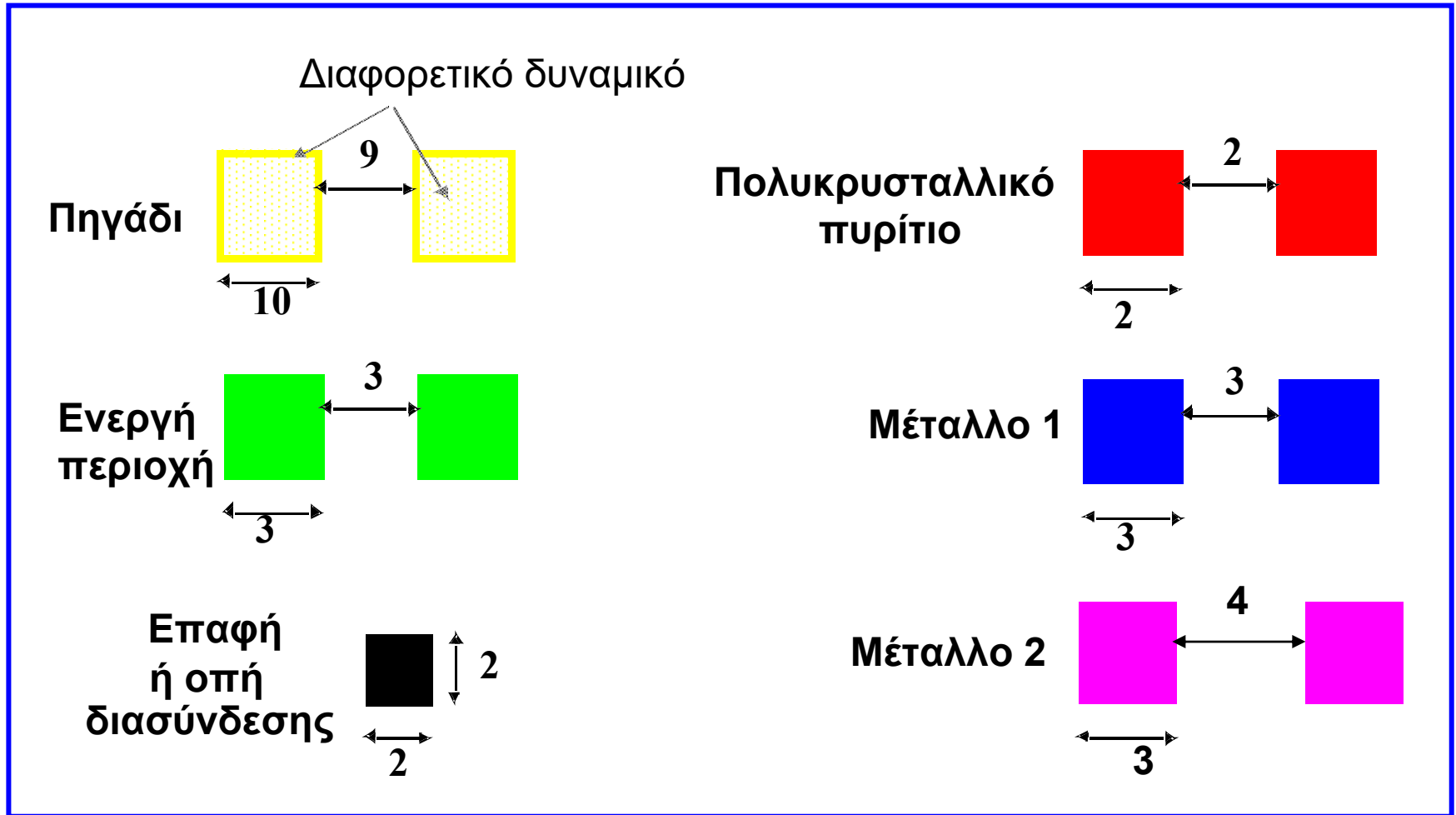
Κανόνες σχεδιασμού ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Σκοπός του καθορισμού ενός συνόλου κανόνων σχεδιασμού είναι η ακριβής μετατροπή ενός κυκλώματος σε πραγματική γεωμετρία στην επιφάνεια του πυριτίου.
- Οι κανόνες φυσικού σχεδιασμού είναι το μέσο επικοινωνίας μεταξύ του σχεδιαστή κυκλωμάτων και του μηχανικού διεργασίας κατασκευής.
- Οι κανόνες σχεδιασμού είναι ένα σύνολο οδηγιών για την κατασκευή των διάφορων μασκών που απαιτούνται στη διαδικασία της παραγωγής των κυκλωμάτων στην επιφάνεια του πυριτίου.
- Είναι **προκαθορισμένοι γεωμετρικοί κανόνες σχεδίασης** που αφορούν **ελάχιστα πλάτη** των διάφορων γραμμών και **ελάχιστη απόσταση** μεταξύ γραμμών της ίδιας στρώσης ή διαφορετικών στρώσεων.
- Το **ελάχιστο πλάτος γραμμής** είναι η ελάχιστη διάσταση μάσκας που μπορεί να μεταφερθεί με ασφάλεια στο ημιαγωγικό υλικό κατά την κατασκευή.
- Συχνά χρησιμοποιούνται **κλιμακωτοί κανόνες σχεδιασμού**, οι οποίοι δίνονται ως συνάρτησης μίας **παραμέτρου λ**.
- Αυτό είναι χρήσιμο όταν ένας σχεδιασμός μεταφέρεται μεταξύ διαφορετικών διεργασιών, αφού η κλιμάκωση των διαστάσεων και αποστάσεων των γραμμών επιτυγχάνεται εύκολα με αλλαγή της τιμής της παραμέτρου λ.
- Το ελάχιστο πλάτος γραμμής ορίζεται ίσο με 2λ . Για παράδειγμα, για μία διεργασία $0.12 \mu\text{m}$ (ελάχιστο πλάτος γραμμής $0.12 \mu\text{m}$), το λ ισούται με $0.06 \mu\text{m}$.

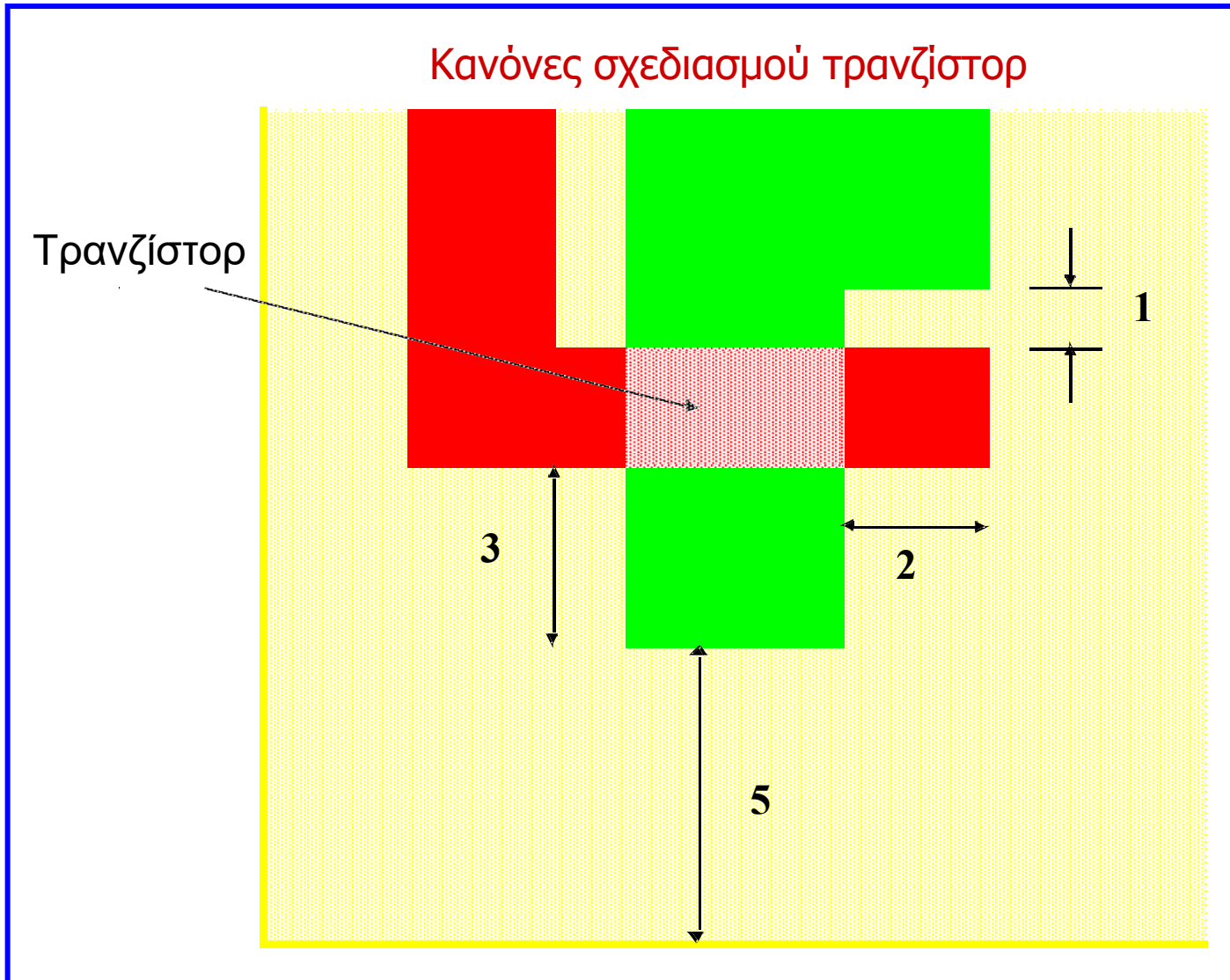
Κανόνες σχεδιασμού ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

Στρώση	Σύνηθες χρώμα	
Πηγάδι (p,n)	Κίτρινο	
Ενεργή περιοχή (n+	Πράσινο	
Ενεργή περιοχή (p+)	Καφέ	
Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο	Κόκκινο	
Μέταλλο1	Μπλε	
Μέταλλο2	Φούξια	
Επαφή σε πολυκρ. πυρίτιο	Μαύρο	
Επαφή σε διάχυση	Μαύρο	
Οπή διασύνδεσης	Μαύρο	

Κανόνες σχεδιασμού ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

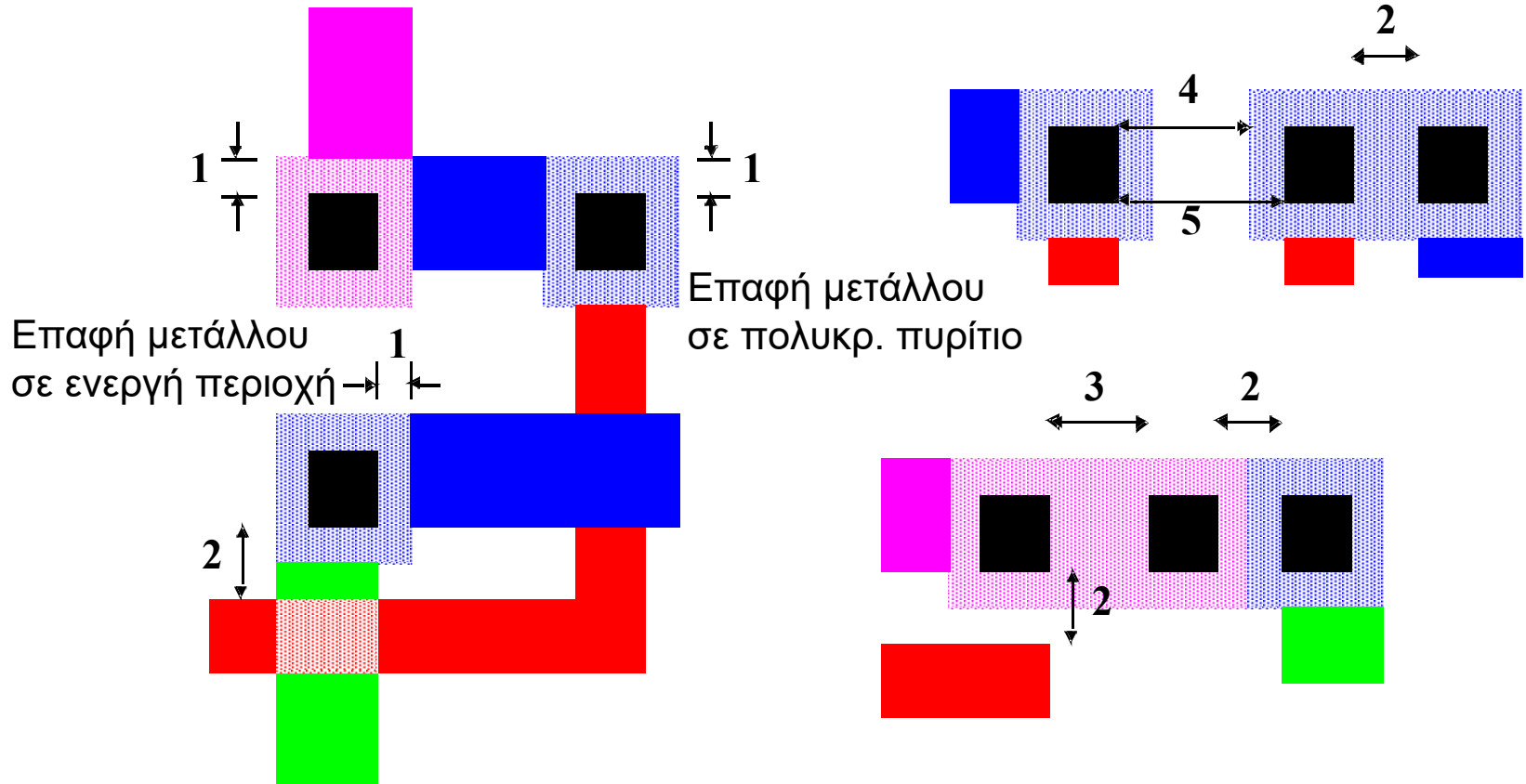


Κανόνες σχεδιασμού ολοκληρωμένων κυκλωμάτων



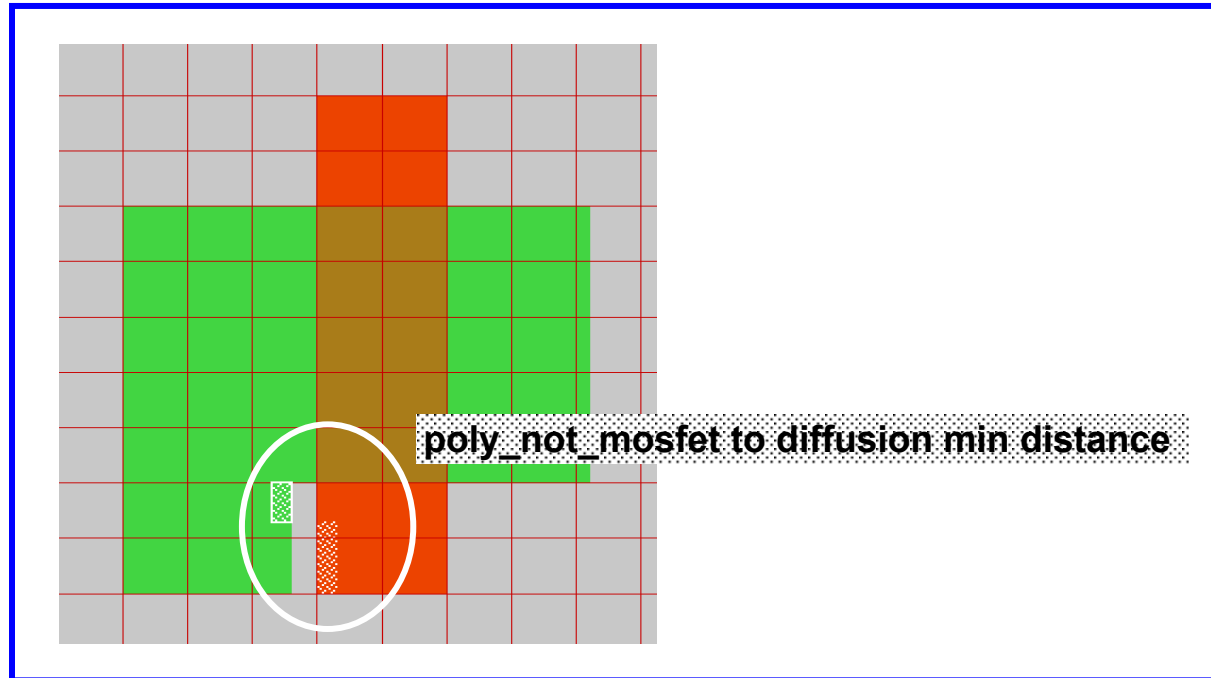
Κανόνες σχεδιασμού ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

Κανόνες σχεδιασμού επαφών



Κανόνες σχεδιασμού ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Η εξασφάλιση του ότι κανένας από τους κανόνες σχεδιασμού δεν παραβιάζεται είναι μία θεμελιώδης απαίτηση στη διαδικασία του φυσικού σχεδιασμού.
- Η αποτυχία αυτού θα οδηγήσει σχεδόν σίγουρα σε μη λειτουργικά κυκλώματα.
- Ο έλεγχος των κανόνων σχεδιασμού (design rule checking, DRC) γίνεται από ειδικά εργαλεία που είναι συνήθως ενσωματωμένα στα εργαλεία φυσικού σχεδιασμού (συντάκτες φυσικού σχεδίου).

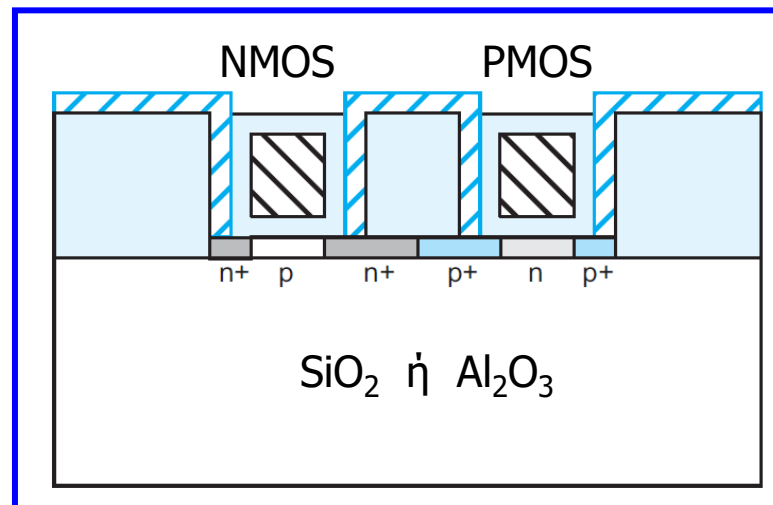


Προηγμένες τεχνικές διεργασιών κατασκευής

- Αν και οι προηγμένες διεργασίες κατασκευής σε γενικές γραμμές ακολουθούν τη ροή των βημάτων που προαναφέρθηκαν, ωστόσο έχουν εφαρμοστεί τροποποιήσεις και βελτιώσεις με στόχο ένα καλύτερο κατασκευαστικό αποτέλεσμα.
- Αρκετές σημαντικές **εξελίξεις ή βελτιώσεις της τεχνολογίας κατασκευής** έχουν εφαρμοστεί και αξίζουν αναφοράς και προσοχής.
- Οι εξελίξεις ή βελτιώσεις αφορούν την **κατασκευή ή την δομή των τρανζίστορ**, αλλά και την **κατασκευή των διασυνδέσεων**.

Διεργασία CMOS πυριτίου πάνω σε μονωτή (SOI)

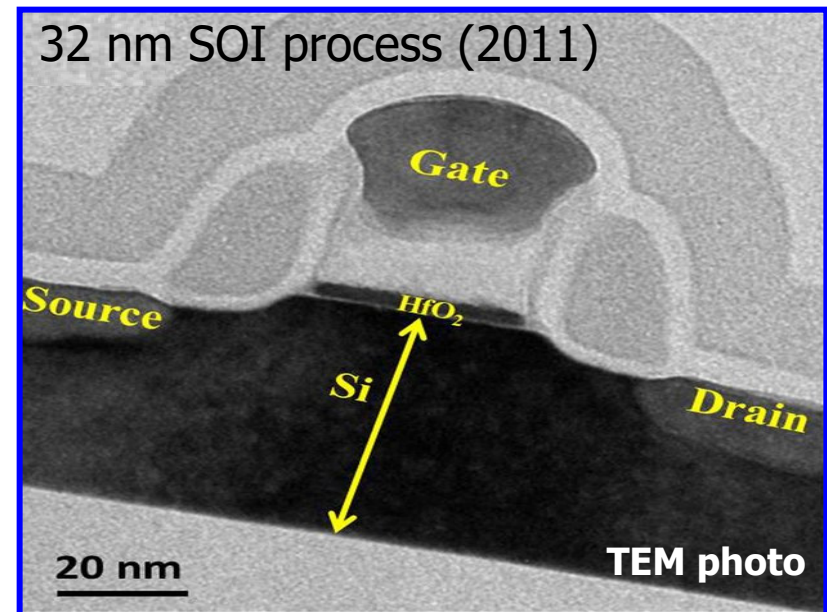
- Η κύρια διαφορά της **διεργασίας CMOS πυριτίου πάνω σε μονωτή (silicon-on-insulator, SOI)** βρίσκεται στο αρχικό υλικό.
- Τα τρανζίστορ SOI κατασκευάζονται σε μία λεπτή στρώση πυριτίου, που έχει εναποτεθεί πάνω σε ένα παχύ στρώμα μονωτικού SiO_2 ή ζαφειριού (Al_2O_3).
- Βασικό πλεονέκτημα της διεργασίας SOI είναι οι μειωμένες παρασιτικές χωρητικότητες μεταξύ των περιοχών πηγής-υποδοχής και του υποστρώματος, γεγονός που οδηγεί σε τρανζίστορ υψηλότερης ταχύτητας (έως 20%).
- Δεύτερο πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι παρουσιάζει μικρότερο ρεύμα διαρροής στα τρανζίστορ με αποτέλεσμα μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.
- Μειονέκτημα αποτελεί το αυξημένο κόστος της προετοιμασίας του υποστρώματος SOI.



Τρανζίστορ με διηλεκτρικό πύλης υψηλής σταθεράς (k)

- Στα τρανζίστορ MOSFET απαιτείται μεγάλη χωρητικότητα πύλης, έτσι ώστε να προσελκυστεί φορτίο στο κανάλι.
- Αυτό οδηγεί στην ανάγκη χρήσης πολύ λεπτού οξειδίου πύλης (διηλεκτρικού της χωρητικότητας πύλης), π.χ. σε μια διεργασία 65 nm το πάχος του οξειδίου πύλης είναι 1.2 nm.
- Σε τρανζίστορ με τόσο μικρά πάχη οξειδίου πύλης, το ρεύμα διαρροής πύλης αυξάνεται σε προβληματικά επίπεδα.
- Αν χρησιμοποιηθεί διηλεκτρικό υλικό με μεγαλύτερη σταθερά από το SiO_2 ($k = 3.9$), μειώνεται το ρεύμα διαρροής της πύλης.
- Αρχικά, σε διεργασίες 130 nm (2001), χρησιμοποιήθηκε ως διηλεκτρικό το οξυνιτρίδιο του πυριτίου (SiON) με σταθερά $k = 4.2$.
- Σε διεργασίες 45, 32 nm (2008, 2011) χρησιμοποιήθηκε ως διηλεκτρικό πύλης το διοξείδιο του χαφνίου (HfO_2) με $k = 20$.

$$C = \frac{k\epsilon_0 A}{t}$$



Τρανζίστορ με διηλεκτρικό πύλης υψηλής σταθεράς (k)

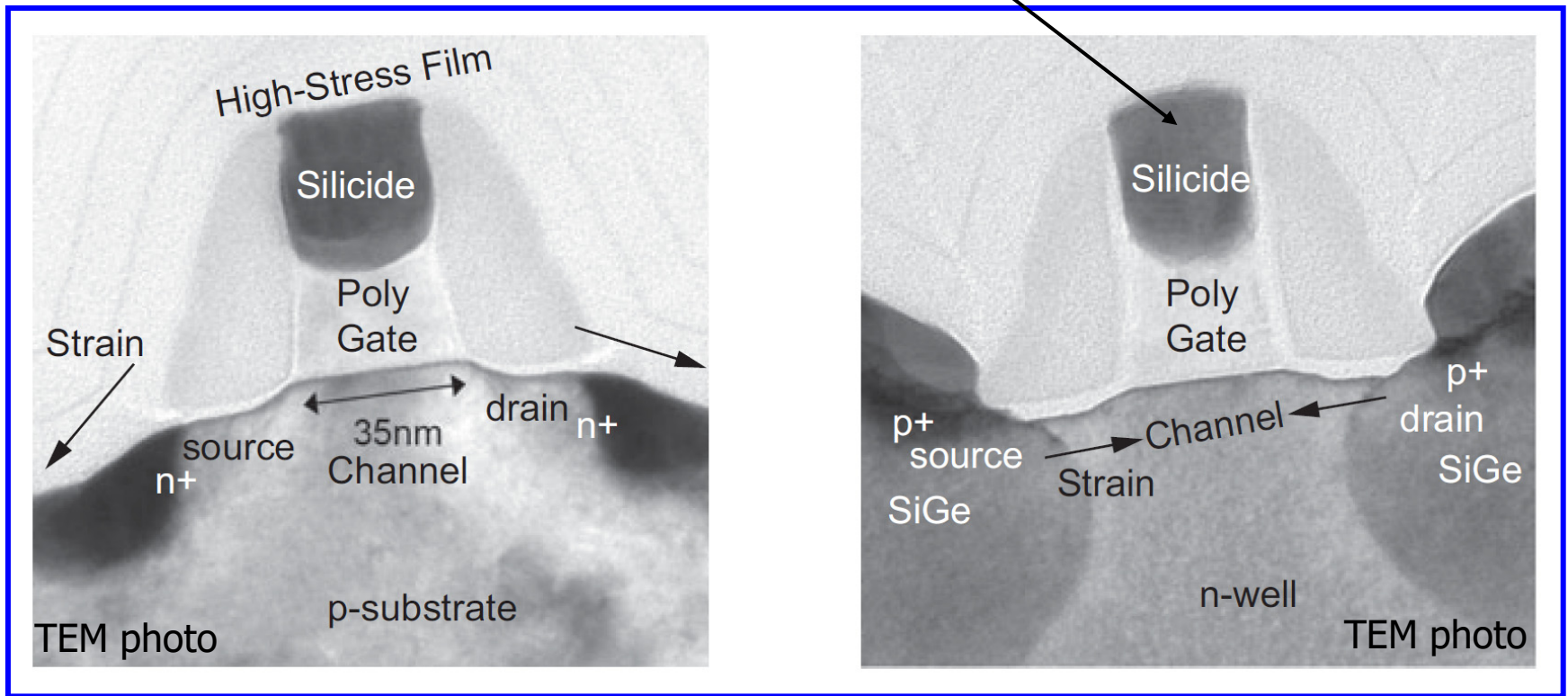
- Ωστόσο, η χρήση τέτοιων διηλεκτρικών οδηγεί στην δημιουργία μιας περιοχής αραίωσης (depletion region) στην επαφή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου και του διηλεκτρικού με αποτέλεσμα στην αύξηση του πάχους της περιοχής του διηλεκτρικού, γεγονός που υποβαθμίζει την ταχύτητα του τρανζίστορ.
- Επίσης, οι πύλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου είναι γενικά μη συμβατές με διηλεκτρικά υλικά υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς, αφού η συνύπαρξή τους προκαλεί αστάθεια στην τάση κατωφλίου των τρανζίστορ και μείωση της κινητικότητας των φορέων που οδηγεί σε επιβράδυνση των τρανζίστορ.
- Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό έχει χρησιμοποιηθεί μέταλλο ως υλικό της πύλης των τρανζίστορ και με τον τρόπο αυτό μειώνεται και η αντίσταση της πύλης.
- Ένας τρόπος που έχει ακολουθηθεί, είναι η ανάπτυξη των τρανζίστορ με διηλεκτρικό πύλης υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς και τυπική πύλη πολυκρυσταλλικού πυριτίου.
- Στη συνέχεια, το δισκίο γυαλίζεται ώστε να εμφανιστούν οι πύλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου και χαράσσεται ώστε να απομακρυνθεί το ανεπιθύμητο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο.
- Στο επόμενο βήμα, εναποτίθενται πύλες μετάλλου στα αυλάκια που δημιουργήθηκαν από την χάραξη.

Πυρίτιο υπό μηχανική τάση (strained silicon)

- Η αύξηση της κινητικότητας των φορέων στο κανάλι των τρανζίστορ, αυξάνει το ρεύμα τους, με αποτέλεσμα να γίνονται ταχύτερα.
- Ένας τρόπος να αυξηθεί η κινητικότητα των φορέων είναι η **άσκηση μηχανικής τάσης (πίεση) στο κανάλι (strained silicon)**.
- Το κανάλι του τρανζίστορ NMOS πιέζεται στην άνω πλευρά του από μία στρώση **μονωτικού νιτριδίου του πυριτίου (SiN)**, η οποία καλύπτει την πύλη.
- Το τρανζίστορ PMOS πιέζεται από την πλευρά των περιοχών πηγής και υποδοχής από δύο σχισμές που έχουν χαραχθεί στις περιοχές πηγής και υποδοχής και γεμίζεται με γερμανιούχο πυρίτιο (SiGe).
- Όταν ένα μικρό μέρος των ατόμων του πυριτίου αντικαθίστανται από γερμάνιο, το πλέγμα του πυριτίου διατηρεί τη μορφή του, αλλά δέχεται μηχανική τάση, λόγω του ότι τα άτομα του γερμανίου είναι μεγαλύτερα.
- Σε διεργασία CMOS 65 nm, με την τεχνική «πυρίτιο υπό μηχανική τάση» επιτυγχάνεται έως 40% αύξηση κινητικότητας φορέων στα τρανζίστορ NMOS και έως 100% στα PMOS.

Πυρίτιο υπό μηχανική τάση (strained silicon)

Πυριτιούχο υλικό (π.χ. PtSi, TiSi₂, NiSi) που αντικαθιστά μία στρώση μετάλλου με στόχο τη μείωση της αντίστασης των συνδέσεων

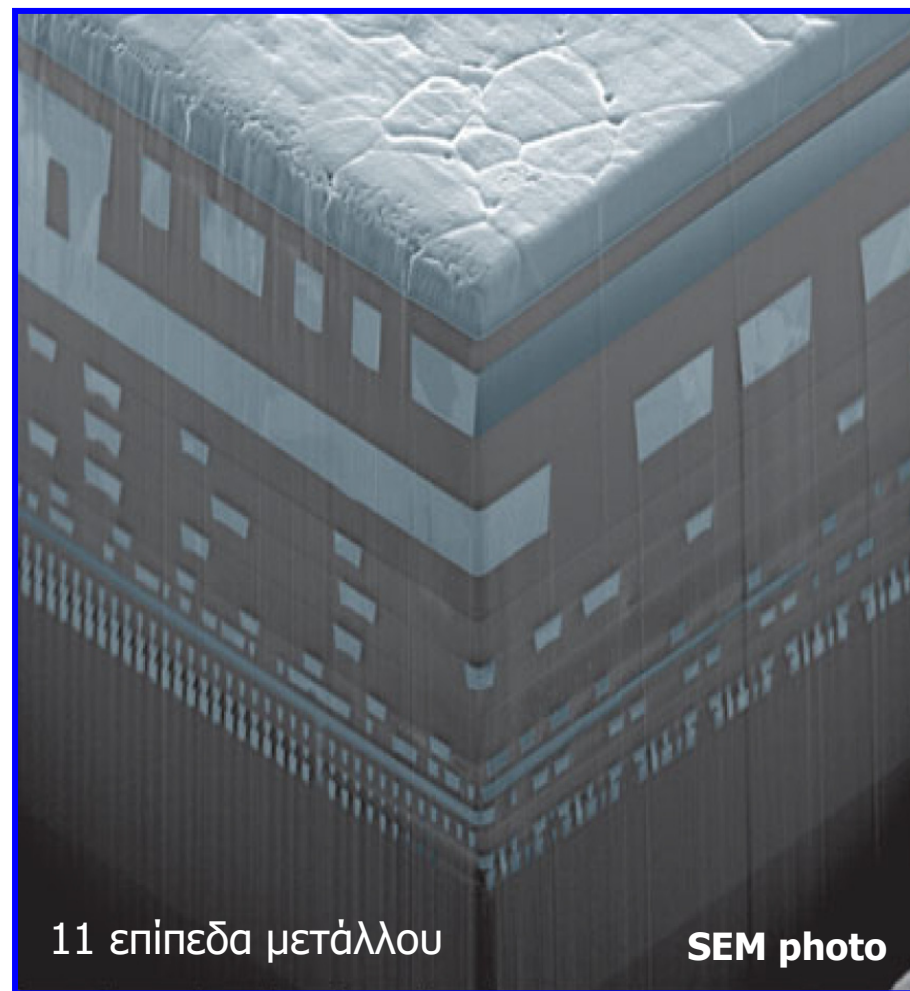


Κατασκευή προηγμένων διασυνδέσεων

- Η επίδραση των διασυνδέσεων στην απόδοση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων γίνεται συνεχώς πιο σημαντική.
- Η αύξηση της πολυπλοκότητας των κυκλωμάτων οδηγεί σε απαίτηση για αυξημένο αριθμό διασυνδέσεων που επιτυγχάνεται κυρίως με χρήση περισσότερων στρώσεων μετάλλου.
- Στα σύγχρονα ολοκληρωμένα κυκλώματα ο αριθμός των στρώσεων μετάλλου που χρησιμοποιείται για διασυνδέσεις έχει ξεπεράσει τις 10 στρώσεις.
- Η επαφή μεταξύ των στρώσεων μετάλλου επιτυγχάνεται με χρήση κατάλληλων δομών που αναφέρονται ως περάσματα (vias).
- Παραδοσιακά, για τις διάφορες στρώσεις μετάλλου χρησιμοποιείται αλουμίνιο σε συνδυασμό με SiO_2 για μόνωση μεταξύ των στρώσεων αλουμινίου.
- Το 1998, πρωτοεμφανίστηκε μια προσέγγιση που έκανε **χρήση του χαλκού ως υλικού διασύνδεσης** για διεργασίες CMOS.
- Ο χαλκός είναι οικονομικότερος από το αλουμίνιο και έχει ειδική αντίσταση σημαντικά μικρότερη από αυτήν του αλουμινίου.
- Έχει όμως το μειονέκτημα της εύκολης διάχυσης στο πυρίτιο, που υποβαθμίζει τα χαρακτηριστικά των στοιχείων.
- Ωστόσο, εάν καλυφθεί με μονωτικό υλικό (TiN) εμποδίζεται η διάχυση (dual damascene process).

Κατασκευή προηγμένων διασυνδέσεων

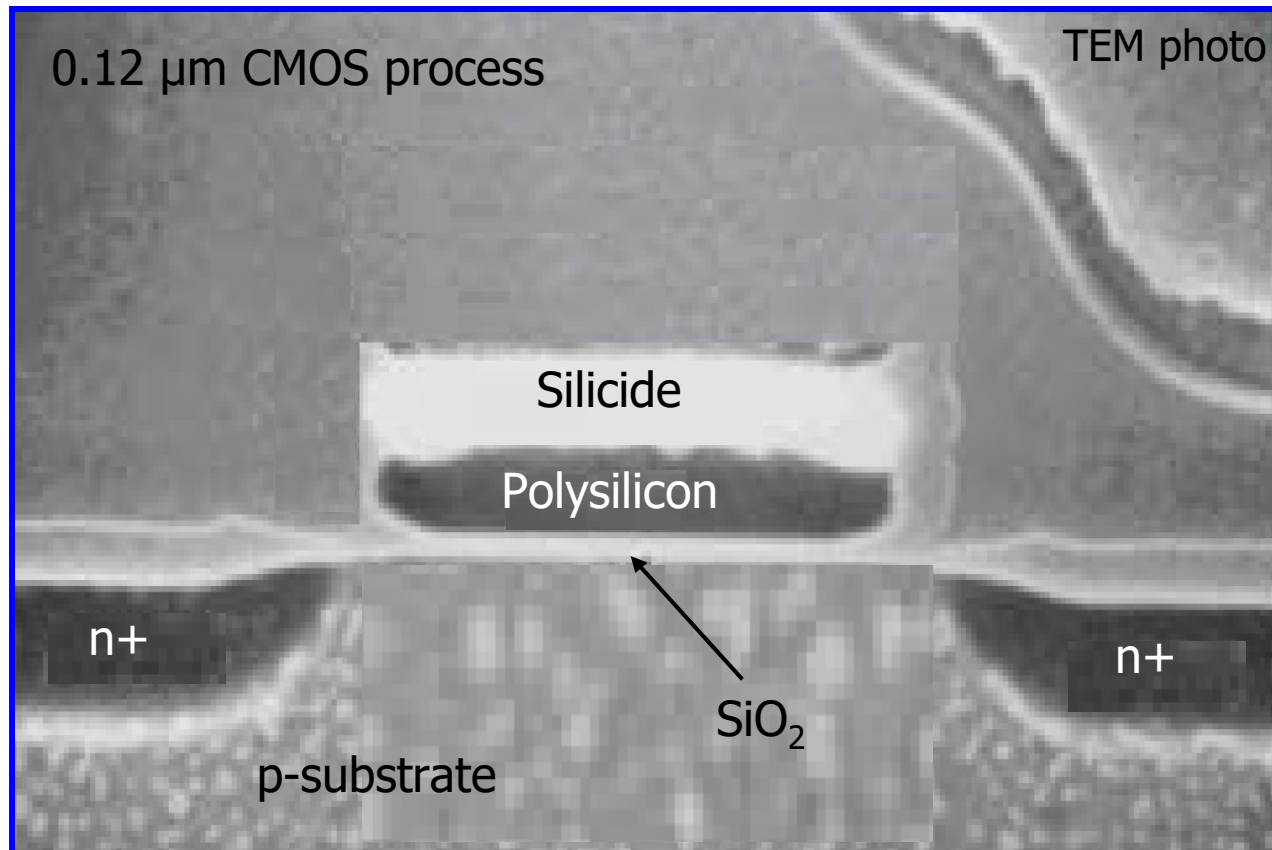
Εναπόθεση πολλαπλών στρώσεων μετάλλου



Κατασκευή προηγμένων διασυνδέσεων

- Επιπρόσθετα, μαζί με τις διασυνδέσεις μετάλλου με χαμηλή ειδική αντίσταση, έχουν χρησιμοποιηθεί **μονωτικά υλικά με χαμηλότερη διηλεκτρική σταθερά k** από το SiO_2 και συνεπώς χαμηλότερη χωρητικότητα, που οδηγούν σε αύξηση της ταχύτητας των κυκλωμάτων.
- Η στρώση πολυκρυσταλλικού πυριτίου χρησιμοποιείται ευρέως ως στρώση διασύνδεσης στις πύλες των τρανζίστορ.
- Η αντίστασή του όμως είναι υψηλή, με αποτέλεσμα να υποβαθμίζει την ταχύτητα του κυκλώματος στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται για συνδέσεις μεγάλου μήκους.
- Το χαρακτηριστικό αυτό μπορεί να βελτιωθεί χωρίς να απαιτηθεί στρώση μετάλλου διασύνδεσης, εάν συνδυαστεί το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο με κάποιο πυρίμαχο μέταλλο με μικρότερη αντίσταση.
- Μια τεχνική είναι η χρήση **στρώσης πυριτιούχου υλικού (silicide) πάνω στο πολυκρυσταλλικό της πύλης**, η οποία αναφέρεται ως **προσέγγιση polycide**.
- Η διεργασία αυτή επιτρέπει στο υλικό της πύλης να χρησιμοποιηθεί ως γραμμή διασύνδεσης μεγαλύτερου μήκους, λόγω της μειωμένης αντίστασής του.
- Μερικά κατάλληλα πυριτιούχα υλικά (silicides): TaSi_2 , PtSi , NiSi , TiSi_2 , CoSi_2 .

Κατασκευή προηγμένων διασυνδέσεων

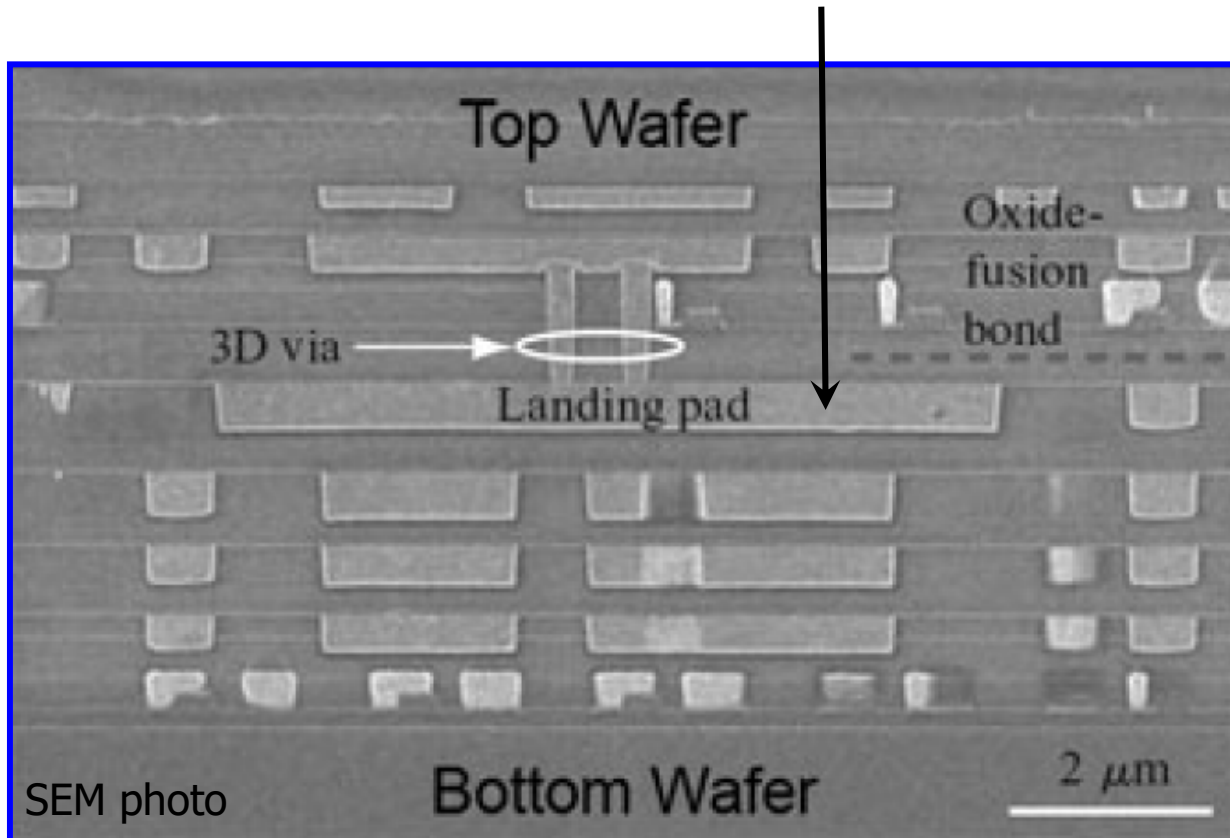


Τρισδιάστατα ολοκληρωμένα κυκλώματα

- Μία από τις κύριες προκλήσεις που εμφανίζεται με τη συνεχή αύξηση της πυκνότητας ολοκλήρωσης είναι η έγκαιρη λήψη των σημάτων εισόδου και εξόδου των στοιχείων.
- Ένας τρόπος για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα αυτό είναι να εισάγουμε επιπλέον ενεργές στρώσεις και να τις τοποθετήσουμε μεταξύ των στρώσεων μεταλλικών διασυνδέσεων.
- Μια πρώτη προσέγγιση που πέρασε από την έρευνα στην παραγωγή τα τελευταία χρόνια, είναι ο **συνδυασμός δυο πλήρως επεξεργασμένων δισκίων**, στην επιφάνεια των οποίων έχουν κατασκευαστεί κυκλώματα έτσι ώστε τα δισκία να επικαλύπτονται.
- Χαράσσονται οπές διασύνδεσης για να συνδεθούν ηλεκτρικά οι ψηφίδες των δύο δισκίων μετά τη μεταλλοποίηση.
- Ο κύριος περιορισμός της τεχνικής αυτής είναι η περιορισμένη ακρίβεια κατά την ευθυγράμμιση των δισκίων ($> 1 \mu\text{m}$), που περιορίζει την επικοινωνία μεταξύ των ψηφίδων σε καθολικές μεταλλικές γραμμές.

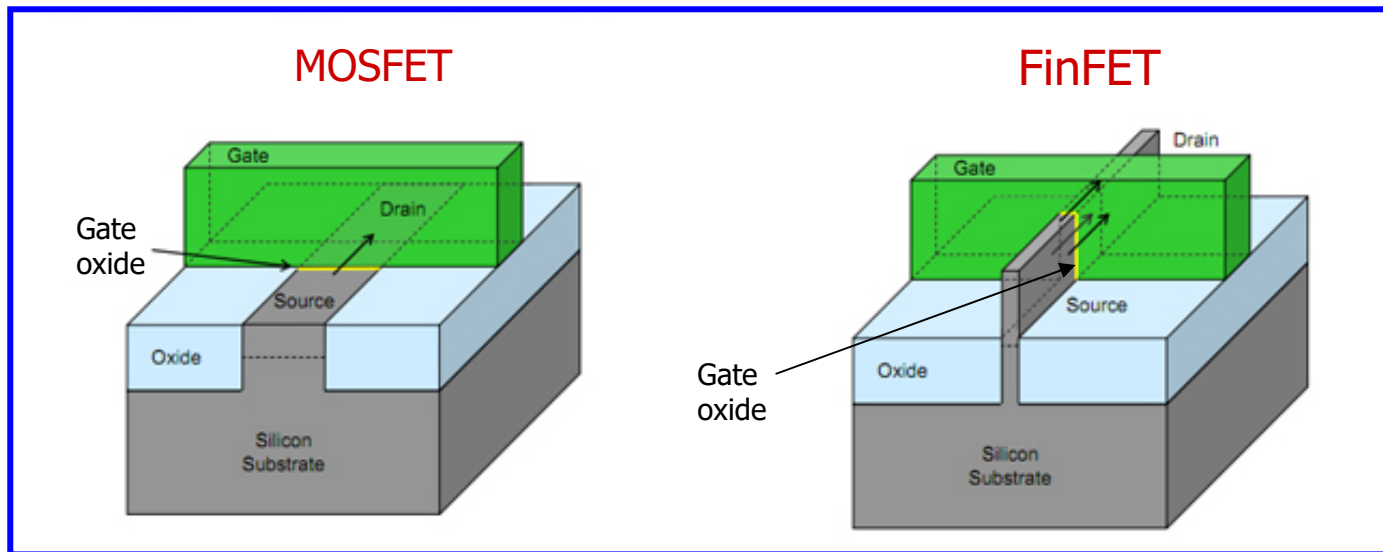
Τρισδιάστατα ολοκληρωμένα κυκλώματα

Ο ακροδέκτης προσγείωσης (landing pad) των 8 μm που είναι μέρος του κάτω δισκίου, παρέχει ανοχή στην μη ευθυγράμμιση με τα τρισδιάστατα περάσματα (3D vias) που προεξέχουν από το άνω δισκίο



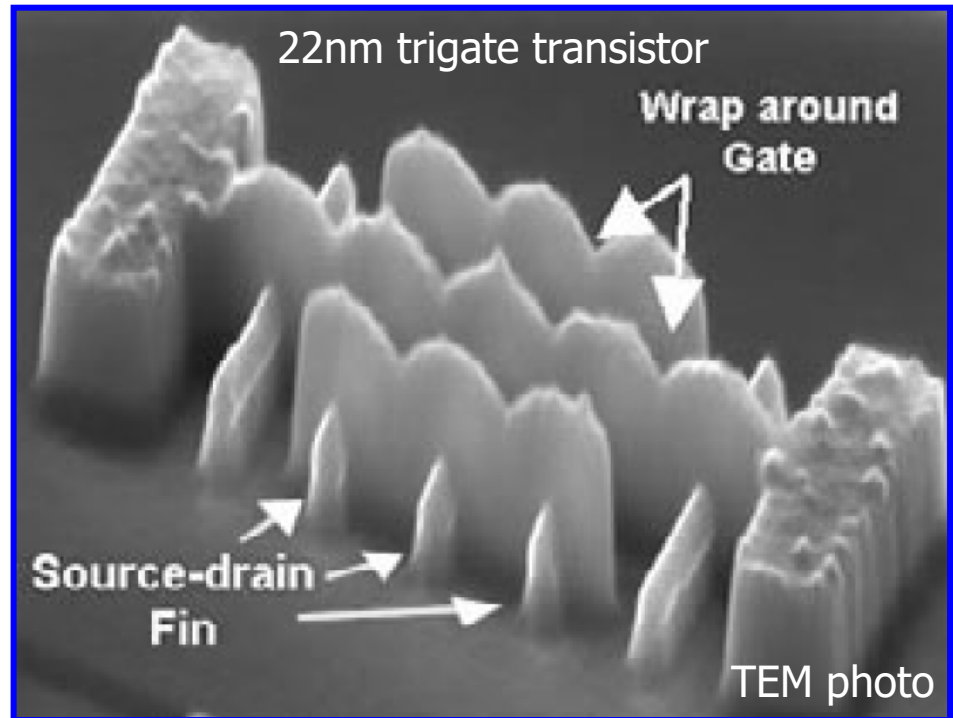
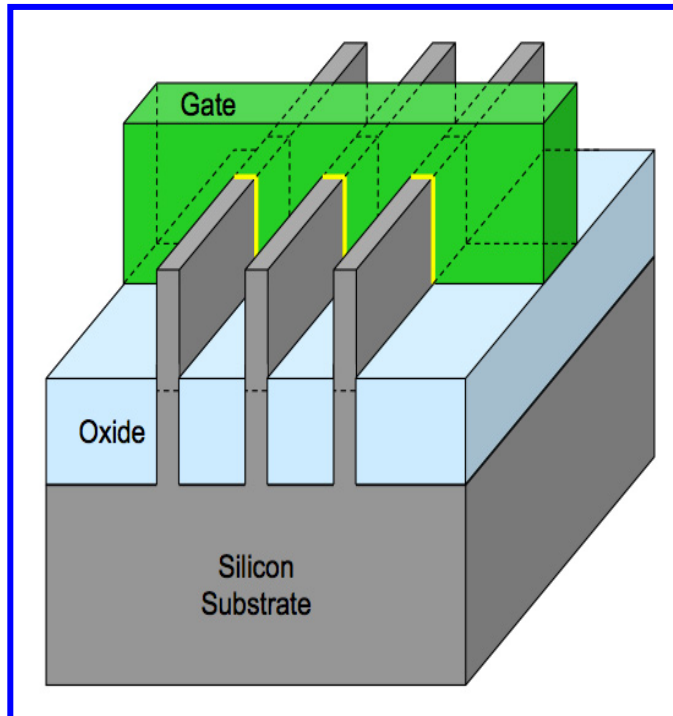
Τρανζίστορ FinFET

- Βασικό πρόβλημα με τη σμίκρυνση των διαστάσεων των MOSFET, είναι το ρεύμα διαρροής από την υποδοχή στην πηγή, όταν $V_{GS} < V_{TH}$.
- Το πρόβλημα αυτό μπορεί να μετριαστεί με την κατασκευή τρανζίστορ που ελέγχουν αποτελεσματικότερα το φορτίο του καναλιού.
- Μια ελπιδοφόρα δομή είναι ο σχηματισμός κατακόρυφου καναλιού και η τοποθέτηση της πύλης έτσι ώστε να περιβάλλει το κανάλι σε 3 πλευρές.
- Τα τρανζίστορ αυτής της δομής αναφέρονται ως FinFET, λόγω του ότι οι περιοχές πηγής και υποδοχής έχουν τη μορφή πτερυγίων (fins).
- Η πύλη τυλίγει τα κατακόρυφα πτερύγια της πηγής και της υποδοχής σε 3 πλευρές



Τρανζίστορ FinFET

- Το πλάτος καναλιού ενός τρανζίστορ FinFET καθορίζεται από το ύψος των πτερυγίων, επομένως για την κατασκευή **τρανζίστορ με ευρύ πλάτος καναλιού** χρησιμοποιούνται **παράλληλα τοποθετημένα πτερύγια**.
- Με την τεχνολογία FinFET αναπτύσσονται σήμερα τρανζίστορ με μήκος καναλιού μικρότερο από 30 nm, με αποτέλεσμα η τεχνολογία αυτή να θέτει σημαντική υποψηφιότητα ως εναλλακτική της τεχνολογίας CMOS, η οποία πιθανώς προσεγγίζει τα όριά της.

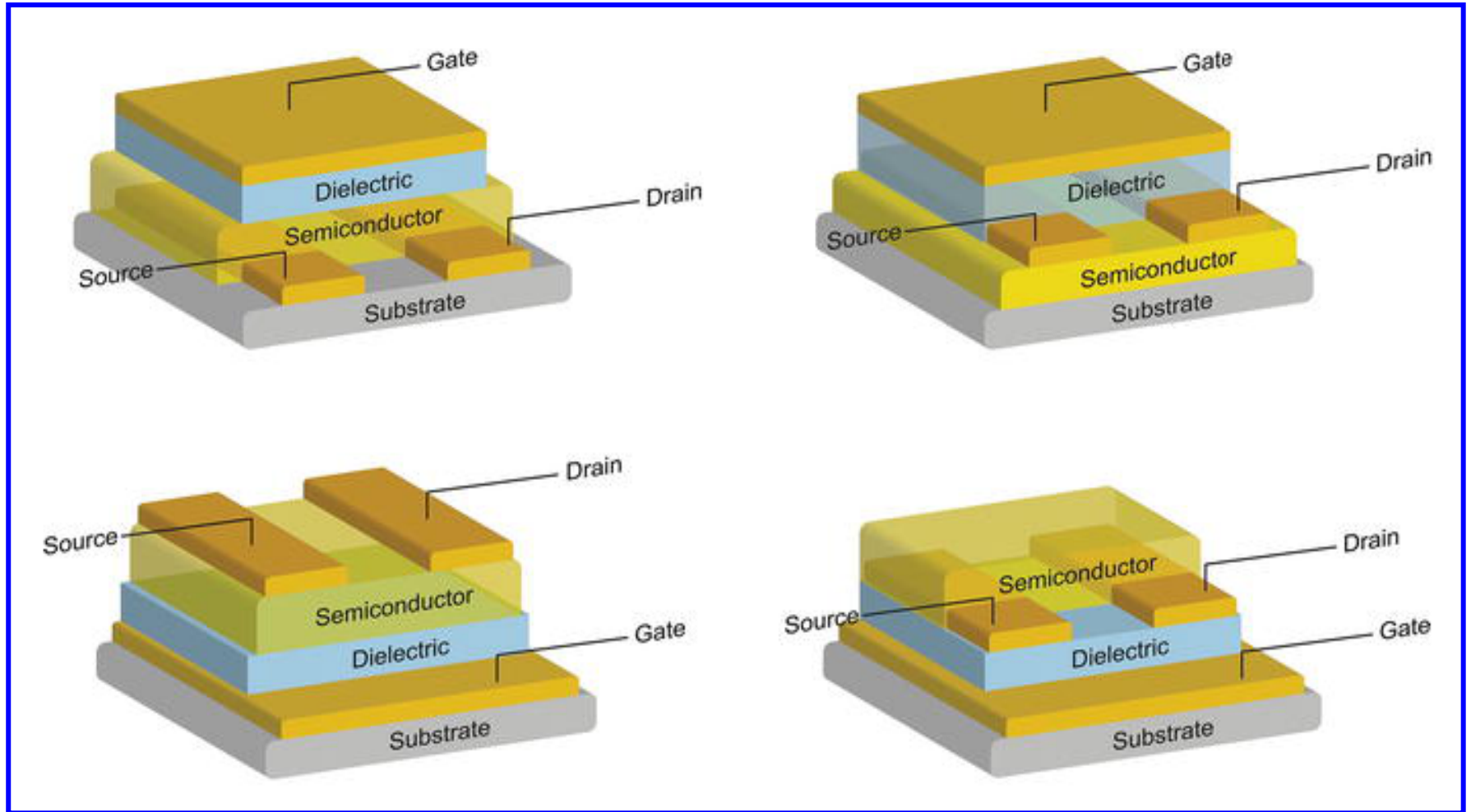


Τρανζίστορ λεπτής μεμβράνης (TFTs)

- Στα **τρανζίστορ λεπτής μεμβράνης (thin film transistors, TFTs)** οι περιοχές υποδοχής, πηγής και καναλιού εναποτίθενται ως λεπτές μεμβράνες ημιαγώγιμου υλικού (συνήθως **άμορφο πυρίτιο, a-silicon**) σε ένα **μη αγώγιμο υπόστρωμα (συνήθως γυάλινο)**, το οποίο απλώς υποστηρίζει μηχανικά τα τρανζίστορ.
- Η πύλη διαχωρίζεται από την πηγή και την υποδοχή με μία λεπτή στρώση ισχυρού μονωτικού (διηλεκτρικού) υλικού (συνήθως SiN).
- Τα ηλεκτρόδια της υποδοχής και της πηγής σχηματίζονται από δύο παράλληλες λεπτές στρώσεις μετάλλου.
- Τα TFTs μπορούν επίσης να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας **οργανικά υλικά (organic TFTs, OTFTs)** τα οποία αντικαθιστούν το ημιαγώγιμο υλικό.
- Η κύρια χρήση των TFTs είναι αυτή του ηλεκτρονικού διακόπτη του ρεύματος μεταξύ πηγή και υποδοχής, ο οποίος ελέγχεται από την τάση που εφαρμόζεται στην πύλη.
- Χρησιμοποιούνται σε **οθόνες υγρών κρυστάλλων (LCDs)**, στις οποίες ενσωματώνονται κατάλληλα και καταλαμβάνουν μικρό ποσοστό της επιφάνειας της οθόνης.
- Ο φωτισμός των περισσότερων από 1 εκατομμύριο εικονοστοιχείων ελέγχεται από ισάριθμους διακόπτες (TFTs) με αποτέλεσμα τα εικονοστοιχεία να αναβοσβήνουν με γρήγορο ρυθμό και να παρέχουν καλύτερα χαρακτηριστικά εικόνας.

Τρανζίστορ λεπτής μεμβράνης (TFTs)

Τα TFTs κατασκευάζονται σε 4 βασικές διαφορετικές δομές:

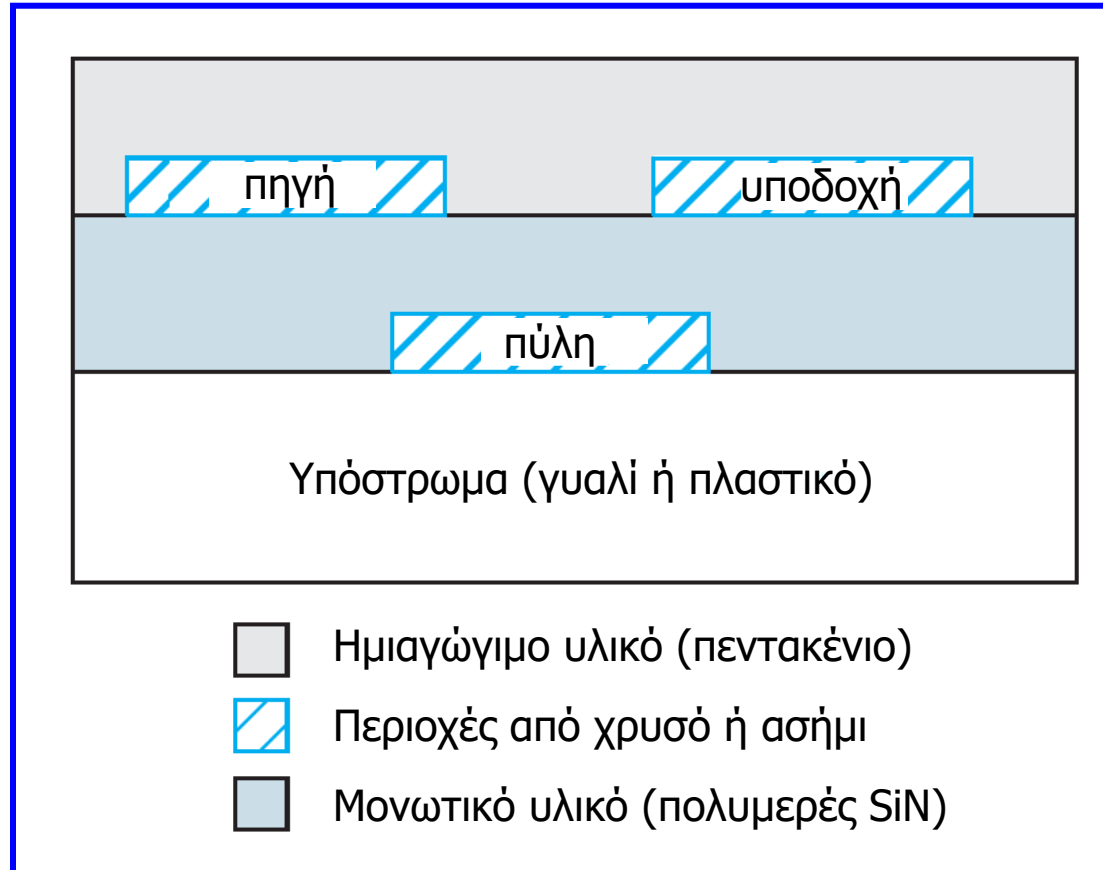


Οργανικά (πλαστικά) τρανζίστορ

- Τα πλαστικά τρανζίστορ κατασκευάζονται από **οργανικά υλικά**.
- Τα τρανζίστορ αυτά θεωρούνται ιδανικά για **επίπεδες οθόνες ενεργής μήτρας (active matrix displays)** και **εύκαμπτα ηλεκτρονικά εξαρτήματα (flexible electronics)**.
- Η κατασκευή τους βασίζεται σε χημικά διαλύματα με μικρό κόστος.
- Αρχικά αναπτύσσονται στο πλαστικό ή γυάλινο υπόστρωμα η πύλη, οι διασυνδέσεις και το μονωτικό υλικό.
- Στη συνέχεια αναπτύσσονται η πηγή και η υποδοχή του τρανζίστορ και στο τέλος εναποτίθεται το ημιαγώγιμο υλικό (συνήθως πεντακένιο).
- Η κινητικότητα των φορέων στα πλαστικά τρανζίστορ είναι 3 τάξεις μεγέθους χαμηλότερη από εκείνη ενός τρανζίστορ πυριτίου, αλλά είναι αρκετή για τις εφαρμογές για τις οποίες προορίζονται τα πλαστικά τρανζίστορ.
- Τυπικό μήκος και πλάτος καναλιού των πλαστικών τρανζίστορ 5 μm και 400 μm , αντίστοιχα.

Οργανικά (πλαστικά) τρανζίστορ

Παράδειγμα δομής οργανικού τρανζίστορ



Συσκευασία (packaging) ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Η **συσκευασία (packaging)** ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος παρέχει το μέσο για τη μεταφορά της τροφοδοσίας και των σημάτων μέσα και έξω από την ψηφίδα, απομακρύνει τη θερμότητα που παράγεται από το κύκλωμα, παρέχει μηχανική υποστήριξη και προστατεύει την ψηφίδα από περιβαλλοντολογικές συνθήκες (π.χ. υγρασία).
- Επιπρόσθετα, η τεχνολογία της συσκευασίας έχει μεγάλη επίδραση στην ταχύτητα και την κατανάλωση ενέργειας ενός κυκλώματος.
- Μέχρι το 50% της καθυστέρησης ενός επεξεργαστή οφείλεται σε καθυστερήσεις λόγω συσκευασίας.
- Τα τελευταία χρόνια έχει επιταχυνθεί η έρευνα για συσκευασίες υψηλότερης επίδοσης με λιγότερα επαγωγικά και χωρητικά παρασιτικά στοιχεία.
- Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των ψηφίδων μεταφράζεται σε ανάγκη για περισσότερους ακροδέκτες εισόδου/εξόδου και επομένως για μεγαλύτερο μέγεθος συσκευασίας.
- Αυτό έχει οδηγήσει στην αντικατάσταση των παραδοσιακών συσκευασιών με προηγμένες προσεγγίσεις, όπως η **τεχνική τοποθέτησης επιφάνειας**, η **διάταξη πλέγματος με μπάλες** και οι **τεχνικές μονάδας πολλαπλών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (multi-chip modules)**.

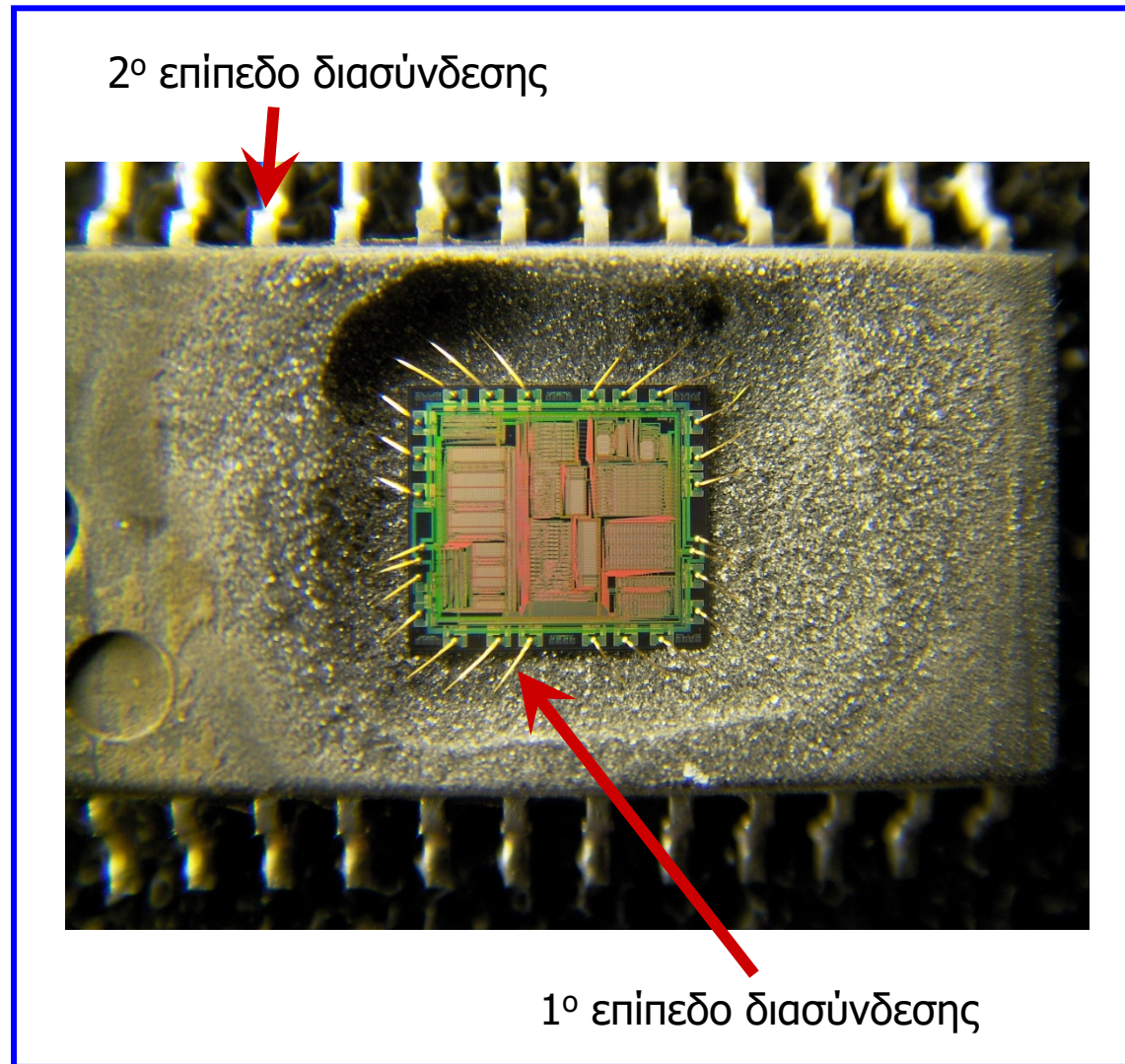
Συσκευασία (packaging) ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Μια καλή συσκευασία πρέπει να ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένες απαιτήσεις:
 - ✓ **Ηλεκτρικές απαιτήσεις** — Ακροδέκτες με μικρή χωρητικότητα (και μεταξύ των καλωδίων και ως προς το υπόστρωμα), αντίσταση και επαγωγή.
 - ✓ **Μηχανικές και θερμικές ιδιότητες** — Υψηλός ρυθμός απομάκρυνσης θερμότητας, δυνατότητα ισχυρής σύνδεσης της ψηφίδας στη συσκευασία και της συσκευασίας στην κάρτα (board).
 - ✓ **Κόστος** — Η αύξηση της θερμότητας στα κυκλώματα συνεπάγεται την αύξηση του κόστους της συσκευασίας τους, αφού για την απαγωγή μεγάλου ποσού θερμότητας απαιτούνται κεραμικές συσκευασίες και όχι πλαστικές που είναι φθηνότερες. Επιπλέον, τα κυκλώματα που καταναλώνουν πάνω από 20 W, απαιτούν ειδικά προσαρτήματα απαγωγών θερμότητας (ψήκτρες, ανεμιστήρες). Η συνεχής αύξηση του αριθμού των ακροδεκτών απαιτεί αύξηση του μεγέθους της συσκευασίας ή μείωση της απόστασης μεταξύ των ακροδεκτών (και τα δύο επιδρούν στο κόστος).
- Οι συσκευασίες μπορούν να ταξινομηθούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους: κύριο υλικό κατασκευής, αριθμός επιπέδων διασύνδεσης, μέσο που χρησιμοποιείται για την απαγωγή της θερμότητας.

Συσκευασία (packaging) ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται για συσκευασία είναι τα **κεραμικά** και τα **πολυμερή (πλαστικά)**.
- Τα πολυμερή έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι φθηνότερα, αλλά πάσχουν σε ότι αφορά την απαγωγή θερμότητας.
- Το μειονέκτημα των κεραμικών είναι η υψηλή τους διηλεκτρική σταθερά, που έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη χωρητικότητα διασυνδέσεων.
- Η κλασική προσέγγιση συσκευασίας χρησιμοποιεί μία **στρατηγική διασύνδεσης δύο-επιπέδων**.
- Η ψηφίδα αρχικά προσαρμόζεται σε ένα ξεχωριστό φορέα ολοκληρωμένου κυκλώματος ή υπόστρωμα.
- Το σώμα της συσκευασίας περιέχει μία εσωτερική κοιλότητα όπου τοποθετείται το κύκλωμα, η οποία παρέχει επαρκή χώρο για πολλές συνδέσεις στους ακροδέκτες της ψηφίδας.
- Οι ακροδέκτες της συσκευασίας συνθέτουν το δεύτερο επίπεδο διασύνδεσης και συνδέουν το ολοκληρωμένο κύκλωμα στην κάρτα.
- Τα σύνθετα συστήματα περιλαμβάνουν ακόμα περισσότερα επίπεδα διασύνδεσης, επειδή οι κάρτες συνδέονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας πίσω όψεις και λωρίδες καλωδίου.

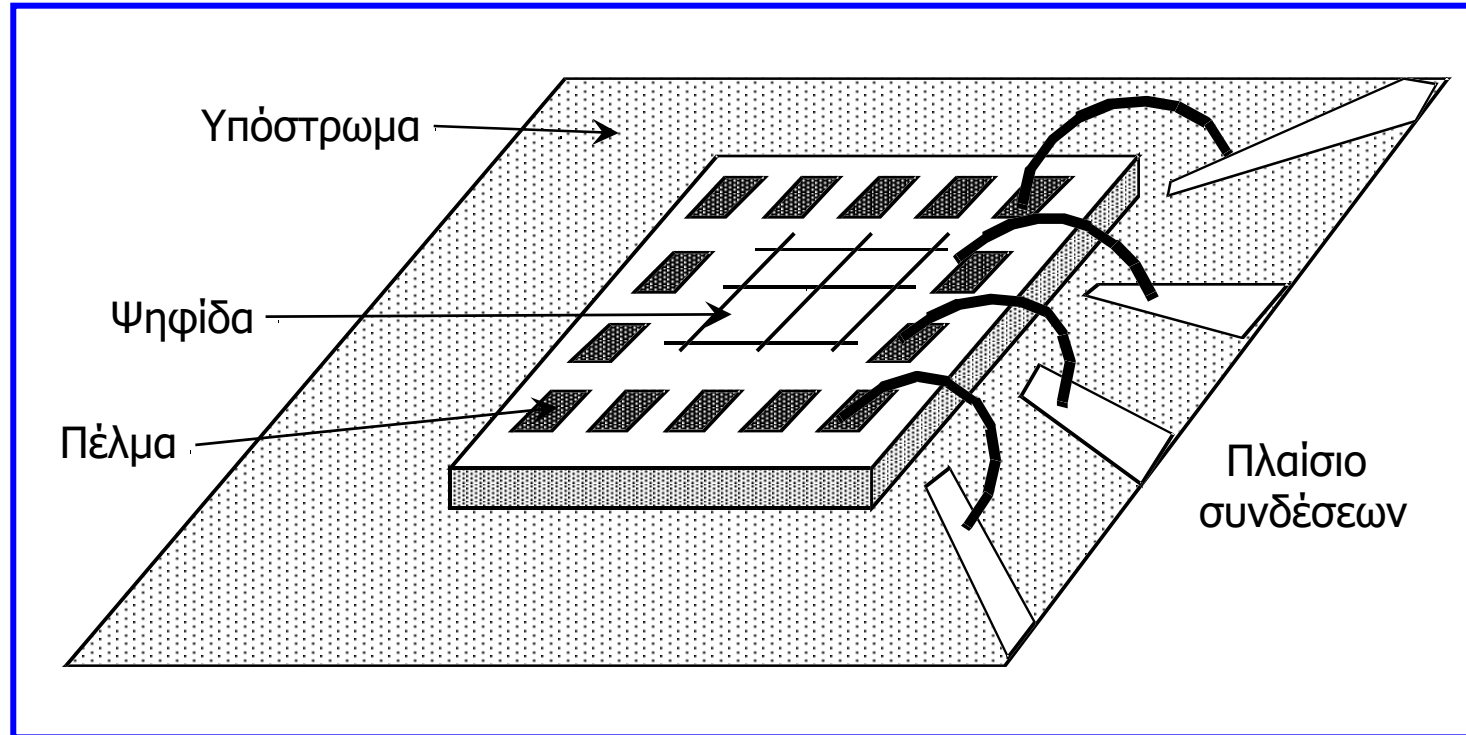
Συσκευασία (packaging) ολοκληρωμένων κυκλωμάτων



Συσκευασία (packaging) ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Για μεγάλο χρονικό διάστημα, οι **καλωδιακές συνδέσεις (wire bonding)** αποτελούσαν τη βασική τεχνική για την παροχή σύνδεσης μεταξύ ψηφίδας και συσκευασίας.
- Η πίσω όψη της ψηφίδας προσαρτάται στο υπόστρωμα με κόλλα καλής θερμικής αγωγιμότητας.
- Κατόπιν, τα πέλματα (pads) της ψηφίδας συνδέονται ξεχωριστά στο πλαίσιο των ακροδεκτών με σύρμα αλουμινίου ή χρυσού.
- Οι καλωδιακές συνδέσεις παρουσιάζουν υψηλή αυτεπαγωγή και αμοιβαία επαγωγή με τα γειτονικά σήματα.
- Τα καλώδια πρέπει να προσαρτώνται στη σειρά, το ένα μετά το άλλο και αυτό οδηγεί σε μεγάλους χρόνους κατασκευής με την αύξηση του αριθμού των ακροδεκτών.
- Η σημαντική αύξηση του αριθμού ακροδεκτών επιβάλλει εναλλακτικές μορφές σύνδεσης, έτσι ώστε να αποφεύγονται τα βραχυκυκλώματα μεταξύ των συρμάτων.

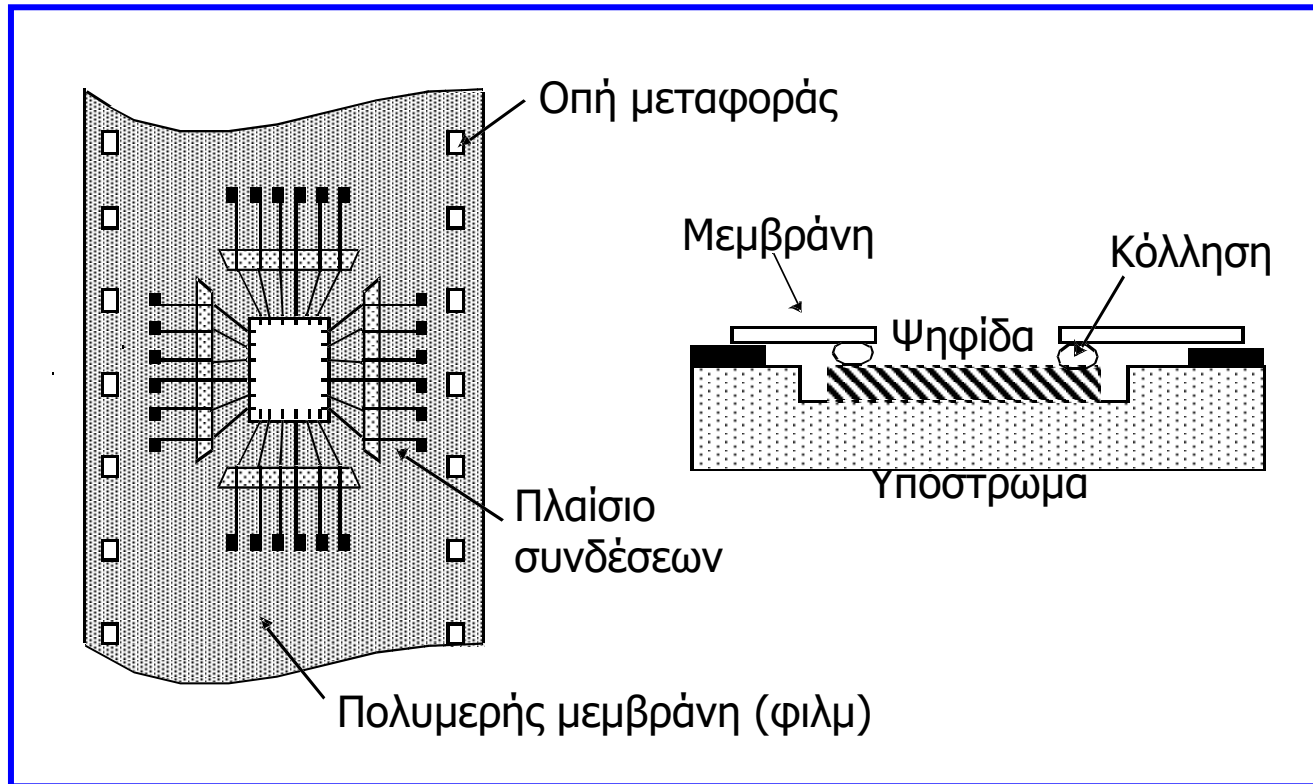
Συσκευασία (packaging) ολοκληρωμένων κυκλωμάτων



Συσκευασία (packaging) ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

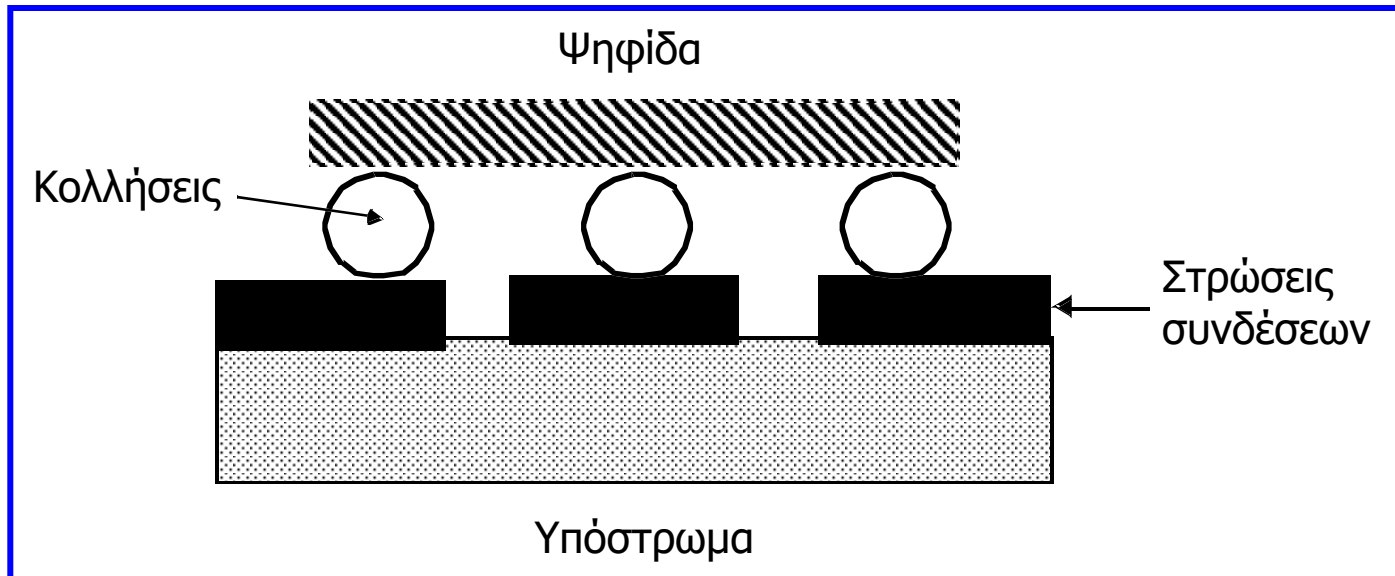
- Λόγω αυτών των αδυναμιών των καλωδιακών συνδέσεων έχουν επινοηθεί εναλλακτικές τεχνικές προσάρτησης της ψηφίδας στη συσκευασία.
- Στην προσέγγιση που αναφέρεται ως **σύνδεση αυτοματοποιημένης ταινίας (tape automated bonding, TAB)**, η ψηφίδα προσαρτάται σε ένα πλαίσιο μεταλλικών συνδέσεων που τυπώνονται σε μία πολυμερή μεμβράνη (φιλμ), συνήθως από πολυμινίδιο.
- Η σύνδεση μεταξύ των πελμάτων της ψηφίδας και των συρμάτων της πολυμερούς μεμβράνης πραγματοποιείται με χρήση κόλλησης από καλάι.
- Η ταινία κατόπιν συνδέεται στο σώμα της συσκευασίας με ειδικούς συνδετήρες.
- Το πλεονέκτημα της προσέγγισης TAB είναι η αυτοματοποίησή της.
- Η μεμβράνη περιέχει οπές που χρησιμοποιούνται για την αυτόματη μεταφορά της.
- Όλες οι συνδέσεις γίνονται ταυτόχρονα.
- Η τυπωμένη προσέγγιση βοηθά στη μείωση της επιτρεπόμενης απόστασης των συρμάτων και είναι κατάλληλη για μεγάλο αριθμό ακροδεκτών.
- Η εξάλειψη καλωδιακών συνδέσεων μεγάλου μήκους βελτιώνει την ηλεκτρική συμπεριφορά.

Συσκευασία (packaging) ολοκληρωμένων κυκλωμάτων



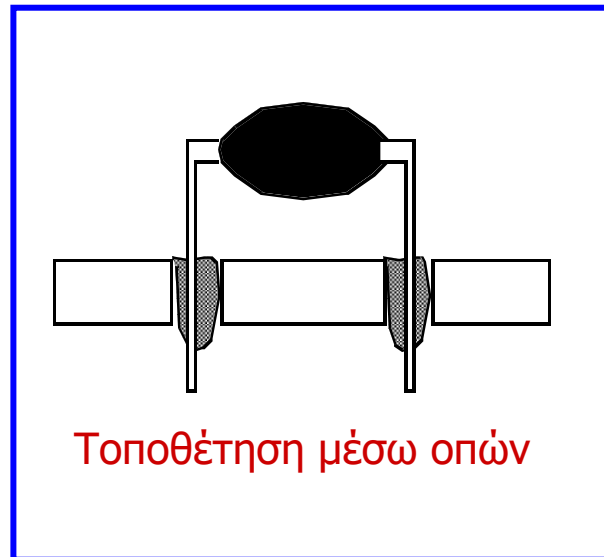
Συσκευασία (packaging) ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Στην προσέγγιση **ανάστροφου ολοκληρωμένου κυκλώματος (flip-chip mounting)**, η ψηφίδα αναστρέφεται και προσκολλάται απευθείας στο υπόστρωμα χρησιμοποιώντας κόλληση με καλαί.
- Η προσέγγιση αυτή πλεονεκτεί ως προς την ηλεκτρική συμπεριφορά.
- Αντί να τοποθετούνται οι συνδέσεις εισόδου/εξόδου στην περιφέρεια της ψηφίδας, τα πέλματα μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιαδήποτε θέση στην άνω πλευρά της.
- Αυτό βοηθάει στην αποδοτικότερη διανομή τροφοδοσίας και ρολογιού, αφού τα υλικά διασύνδεσης (στρώσεις συνδέσεων) πάνω στο υπόστρωμα (π.χ. Cu ή Au) είναι συνήθως καλύτερης ποιότητας από ότι το αλουμίνιο της ψηφίδας.



Τοποθέτηση συσκευασίας σε κάρτα (mounting)

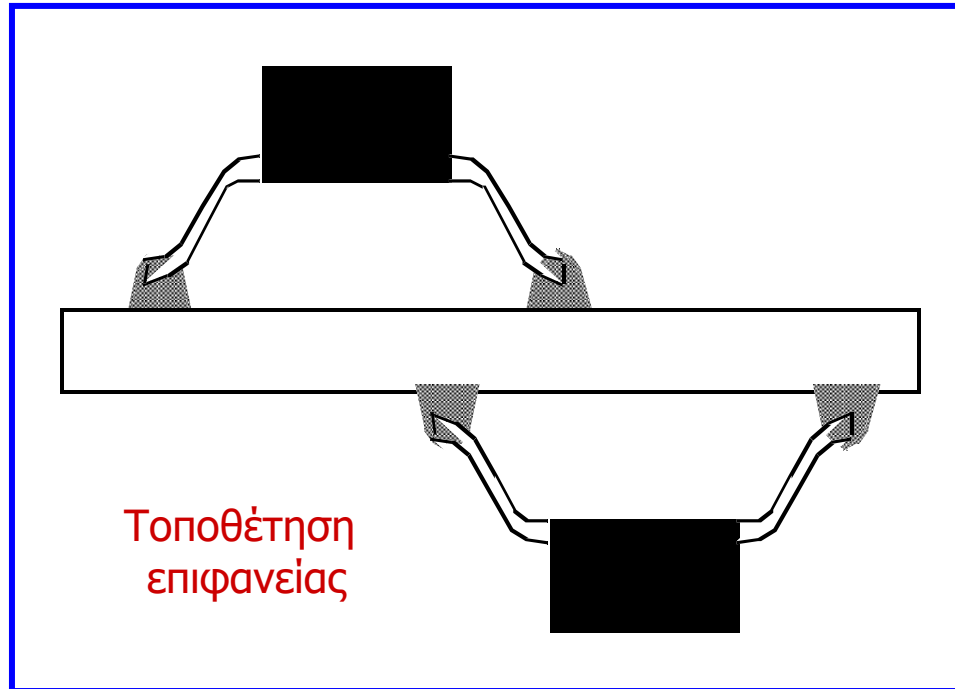
- Για τη σύνδεση της συσκευασίας σε κάρτα (board), μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση που αναφέρεται ως **τοποθέτηση μέσω οπών (through-hole mounting)**.
- Οι κάρτες αποτελούνται από στρώσεις χαλκού και μονωτικού εποξικού γυαλιού και οι οπές που ανοίγονται στην κάρτα θωρακίζονται με χαλκό.
- Οι ακροδέκτες της συσκευασίας εισάγονται σε αυτές και η ηλεκτρική σύνδεση πραγματοποιείται με κόλληση καλάι.
- Η ευνοούμενη συσκευασία σε αυτόν τον τύπο ήταν η συσκευασία **διπλό-σε-γραμμή (dual-in-line ή DIP)**, στην οποία οι ακροδέκτες τοποθετούνται σε δύο πλευρές της.
- Η πυκνότητα της συσκευασίας DIP υποβαθμίζεται όταν οι ακροδέκτες είναι > 64 .



Τοποθέτηση συσκευασίας σε κάρτα (mounting)

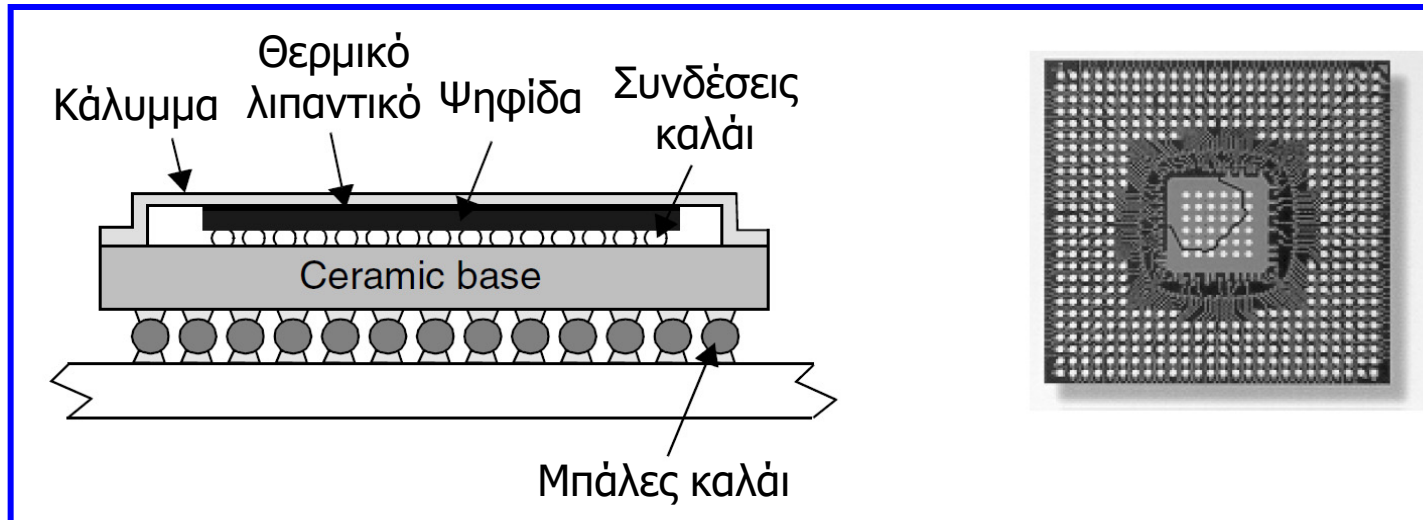
- Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με χρήση της συσκευασίας **διάταξης πλέγματος ακροδεκτών (pin-grid-array, PGA)**, η οποία έχει ακροδέκτες σε ολόκληρη την κάτω επιφάνεια.
- Οι συσκευασίες PGA μπορούν να επεκταθούν σε μεγάλο αριθμό ακροδεκτών (πάνω από 400 ακροδέκτες).
- Η προσέγγιση τοποθέτησης μέσω οπών προσφέρει μία μηχανικά αξιόπιστη και ισχυρή σύνδεση.
- Η παρασιτική χωρητικότητα και η επαγωγή στις συσκευασίες PGA είναι λίγο χαμηλότερες από ότι στις συσκευασίες DIP.
- Στην προσέγγιση που αναφέρεται ως **τοποθέτηση επιφάνειας (surface-mount technique)**, η συσκευασία προσαρτάται στην επιφάνεια της κάρτας με χρήση κόλλησης καλάι χωρίς να απαιτούνται οπές.
- Λόγω της εξάλειψης των οπών, η πυκνότητα της συσκευασίας αυξάνεται, η απόσταση μεταξύ των ακροδεκτών μειώνεται και οι συσκευασίες μπορούν να τοποθετηθούν και στις **δυο πλευρές της κάρτας**.
- **Μειονεκτήματα:** πιο αδύνατη σύνδεση συσκευασίας και κάρτας, δυσκολότερη τοποθέτηση συσκευασίας στην κάρτα που απαιτεί ακριβότερες συσκευές αφού μία απλή μεταλλική συγκόλληση δεν είναι πλέον ικανοποιητική, πολύπλοκη δοκιμή της κάρτας αφού οι ακροδέκτες της συσκευασίας δεν είναι πλέον προσπελάσιμοι στην πίσω όψη της κάρτας.

Τοποθέτηση συσκευασίας σε κάρτα (mounting)

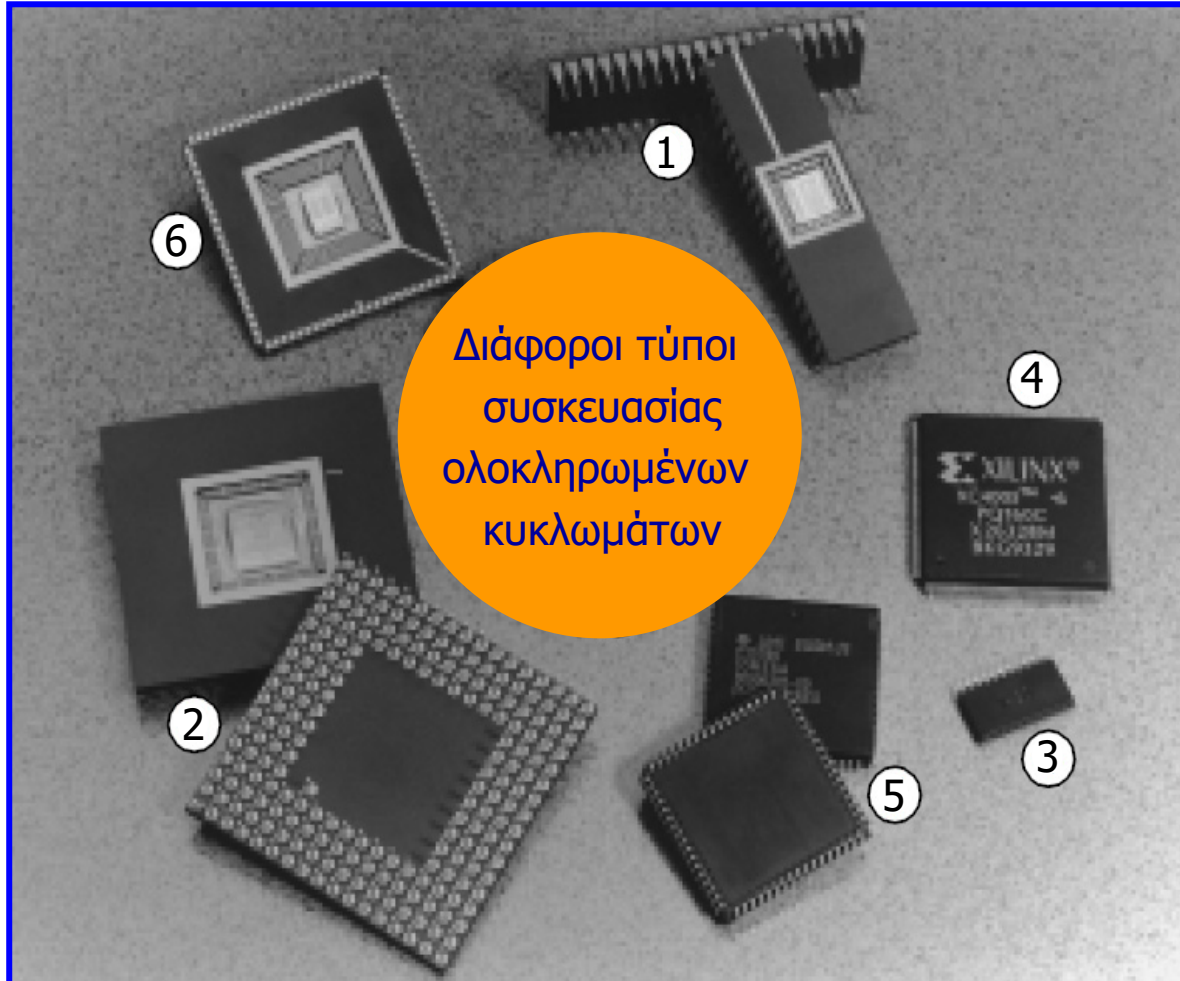


Τοποθέτηση συσκευασίας σε κάρτα (mounting)

- Ακόμα και η συσκευασία τοποθέτησης επιφανείας δεν μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση για ακόμη υψηλότερο αριθμό ακροδεκτών.
- Όταν απαιτούνται περισσότερες από 300 συνδέσεις εισόδων/εξόδων, οι **μπάλες από καλάι** αντικαθιστούν τους ακροδέκτες ως το προτιμότερο μέσο διασύνδεσης μεταξύ της συσκευασίας και κάρτας.
- Μια τέτοια προσέγγιση που αναφέρεται ως **κεραμική διάταξη πλέγματος με μπάλες (ball grid array, BGA)**, χρησιμοποιεί κολλήσεις καλάι για τη σύνδεση της ψηφίδας στο υπόστρωμα της συσκευασίας και μπάλες καλάι για τη σύνδεση συσκευασίας και κάρτας.
- Με την προσέγγιση αυτή μπορεί να επιτευχθεί απόσταση μεταξύ των μπαλών έως 0.8 mm, ώστε να είναι εφικτή η κατασκευή συσκευασιών με πολλούς ακροδέκτες.



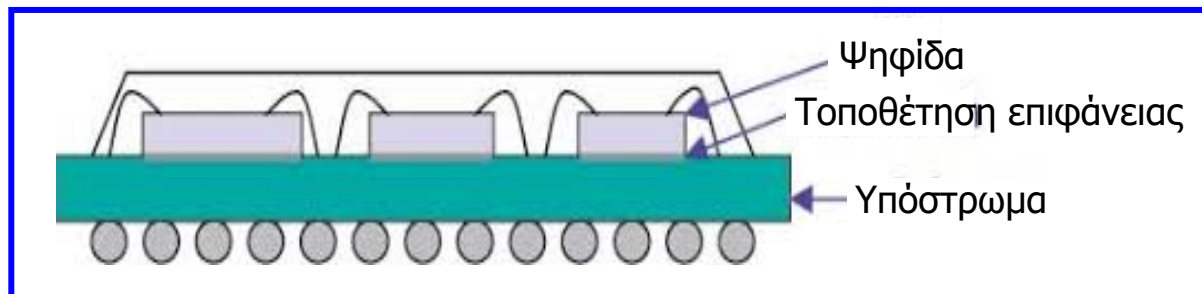
Τοποθέτηση συσκευασίας σε κάρτα (mounting)



- 1: **DIP**
2. **PGA**
3. **SOP** (small outline package, συσκευασία μικρού περιγράμματος με ακροδέκτες στις 2 πλευρές)
4. **QFP** (quad flat package, συσκευασία επίπεδου πακέτου με ακροδέκτες στις 4 πλευρές για τοποθέτηση επιφάνειας)
5. **PLCC** (plastic leaded chip carrier, πλαστικός φορέας ψηφίδας με ακροδέκτες σχήματος J για τοποθέτηση επιφάνειας)
6. **LCC** (leadless chip carrier, φορέας ψηφίδας χωρίς ακροδέκτες, με μεταλλικά πέλματα για τοποθέτηση επιφάνειας)

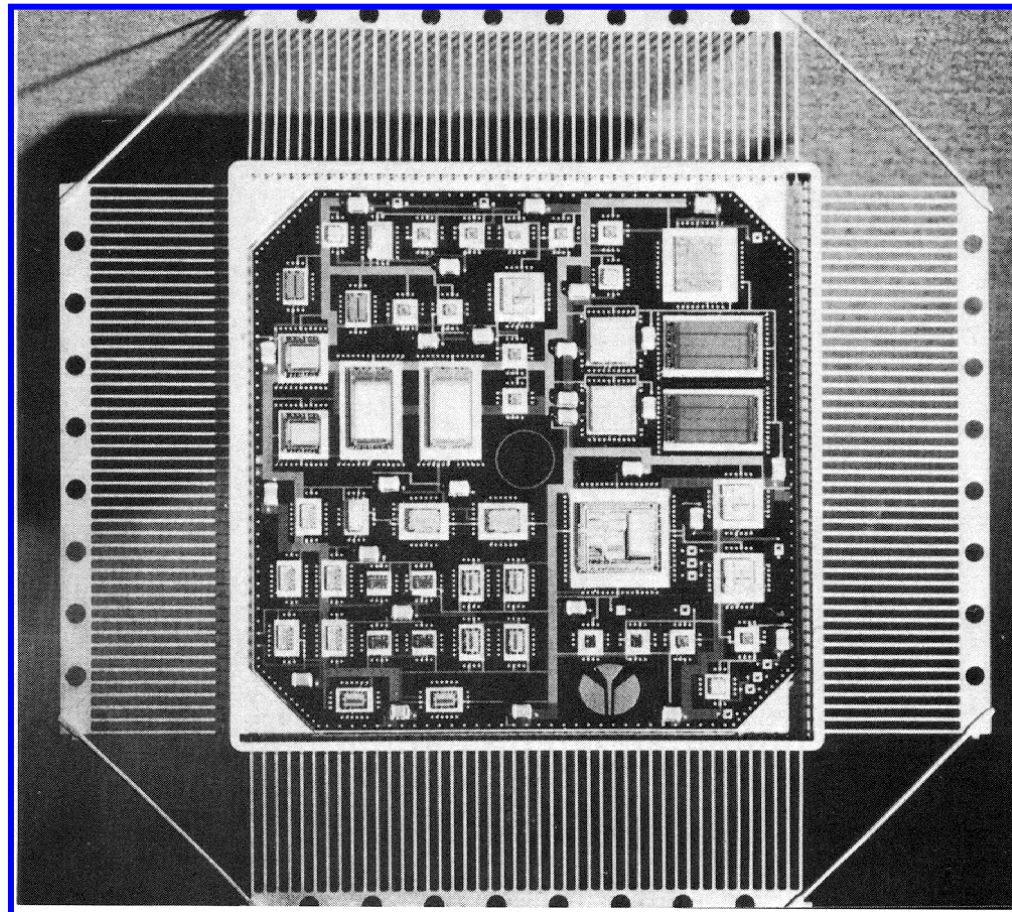
Μονάδες πολλαπλών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Η απομάκρυνση ενός επιπέδου στην ιεραρχία της συσκευασίας με την τοποθέτηση της ψηφίδας απευθείας σε κάρτα ή υπόστρωμα, προσφέρει ένα σημαντικό κέρδος όταν το ζητούμενο είναι η απόδοση ή η πυκνότητα.
- Η προσέγγιση αυτή αναφέρεται ως **τεχνική μονάδας πολλαπλών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (multichip module technique, MCM)** και έχει ως αποτέλεσμα μία ουσιαστική αύξηση στην πυκνότητα συσκευασίας και βελτίωση στις επιδόσεις.
- Οι τεχνικές τοποθέτησης ψηφίδας που αναφέρθηκαν προηγουμένως μπορούν να προσαρμοστούν για την τοποθέτηση ψηφίδων απευθείας πάνω σε υπόστρωμα.
- Το υπόστρωμα μπορεί να κατασκευαστεί από διάφορα υλικά, όπως είναι τα εποξικά υποστρώματα (παρόμοια με τις κάρτες υπολογιστών), το μέταλλο, τα κεραμικά και το πυρίτιο (προσέγγιση που αναφέρεται ως **πυρίτιο-σε-πυρίτιο, silicon-to-silicon**).
- Το πυρίτιο έχει το πλεονέκτημα ότι παρουσιάζει τέλεια ταύτιση όσον αφορά τις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες με το υλικό της ψηφίδας.



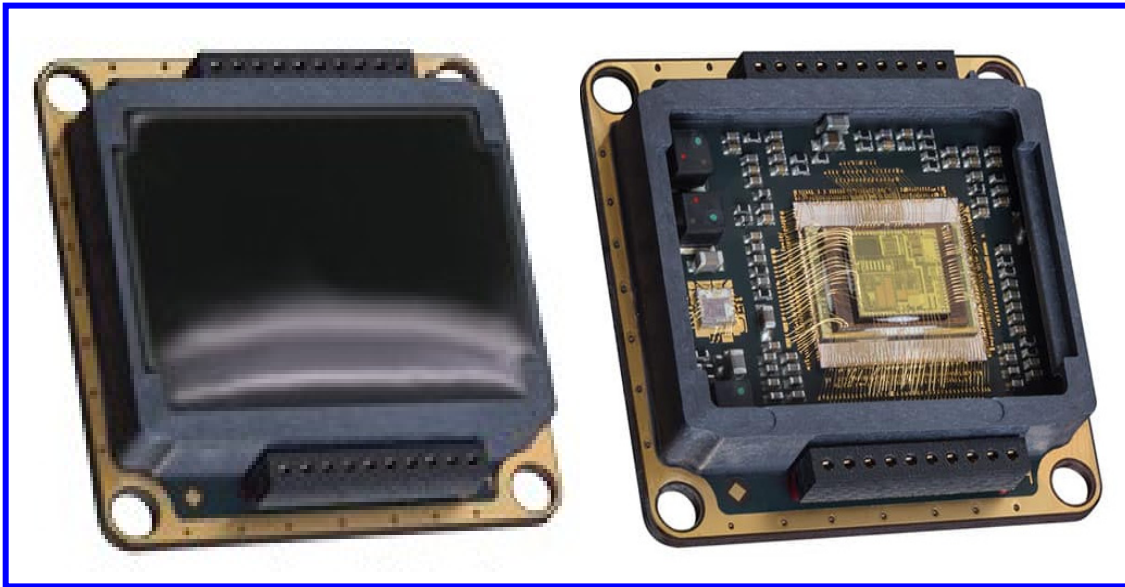
Μονάδες πολλαπλών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

Παράδειγμα μονάδας MCM σε υπόστρωμα πυριτίου: υλοποίηση επεξεργαστή για αεροπορικές εφαρμογές (Rockwell) που περιέχει 53 ολοκληρωμένα κυκλώματα και 40 διακριτά στοιχεία σε ένα 5.6 x 5.6 cm υπόστρωμα με διασύνδεση πολυμιδιούχου αλουμινίου



Σύστημα σε μια συσκευασία (system-in-a-package)

- Με την τεχνική MCM γίνεται εφικτή η ολοκλήρωση στο ίδιο σύστημα κυκλωμάτων που έχουν κατασκευαστεί με διαφορετικές τεχνολογίες.
- Μειονέκτημα της τεχνικής MCM αποτελεί το υψηλό κόστος, αφού απαιτεί πρόσθετα κατασκευαστικά βήματα.
- Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί συσκευασίες πολλαπλών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων υψηλής πυκνότητας που υλοποιούν συνολικά το σύστημα λειτουργιών που απαιτεί μια εφαρμογή (σύστημα σε μία συσκευασία, system-in-a-package, SiP).



SiP επιφάνειας 5 cm²,
με μικροεπεξεργαστή,
μνήμη, ADC και εξωτερική
σύνδεση με τη μνήμη

Σύστημα σε μια συσκευασία (system-in-a-package)

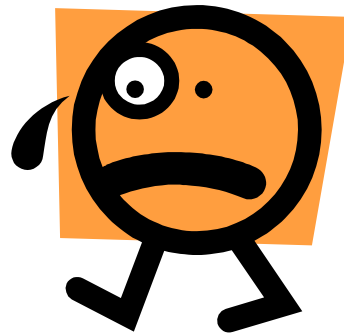


Apple i-watch 4:

Περιέχει SIP με 2 επεξεργαστές (CPU: ARM7 32-bit και GPU), μνήμες DRAM και Flash, μονάδα ασύρματης φόρτισης, κυκλώματα υλοποίησης Bluetooth και Wi-Fi, γυροσκόπιο, ελεγκτή οθόνης αφής, μονάδα διαχείρισης ενέργειας

Συμπεράσματα

- Η διεργασία κατασκευής των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων απαιτεί πολλά βήματα, κάθε ένα από τα οποία περιλαμβάνει μία σειρά από βασικές λειτουργίες.
- Ένας αριθμός από αυτά τα βήματα, όπως η φωτολιθογραφική έκθεση και ανάπτυξη, η εναπόθεση υλικού και η χάραξη, εκτελούνται επαναληπτικά κατά τη διεργασία της κατασκευής.
- Οι μάσκες αποτελούν το μέσο επικοινωνίας μεταξύ των εσωτερικών χαρακτηριστικών της διεργασίας κατασκευής και του σχεδιασμού που πρόκειται να μεταφερθεί στο πυρίτιο.
- Το σύνολο των κανόνων σχεδιασμού καθορίζει τους περιορισμούς που πρέπει να ακολουθεί ο σχεδιασμός του ολοκληρωμένου κυκλώματος, ώστε το κύκλωμα που προκύπτει να είναι πλήρως λειτουργικό.
- Οι κανόνες σχεδιασμού αποτελούν το μέσο επικοινωνίας μεταξύ του σχεδιαστή κυκλωμάτων και του μηχανικού διεργασίας.
- Έχουν εφαρμοστεί αρκετές σημαντικές εξελίξεις ή βελτιώσεις της διεργασίας κατασκευής που αφορούν την κατασκευή ή την δομή των τρανζίστορ, αλλά και την κατασκευή των διασυνδέσεων.
- Η συσκευασία αποτελεί το μέσο επικοινωνίας μεταξύ του κυκλώματος που υλοποιείται στο πυρίτιο και του εξωτερικού κόσμου και έτσι έχει σημαντική επίδραση στην επίδοση, την αξιοπιστία, την αντοχή και το κόστος του ολοκληρωμένου κυκλώματος.



Τέλος 2^{ης} ενότητας