

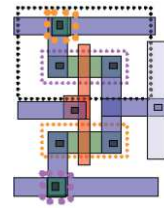
Μικροηλεκτρονική & VLSI

Μάθημα 0: Εισαγωγή

Λευτέρης Καπετανάκης



Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο
Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών
2021-2022



ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Περίγραμμα

☐ Σημερινό μάθημα

- Εξαρτήματα ηλεκτρονικού κυκλώματος
- Τι είναι το ολοκληρωμένο κύκλωμα (ΟΚ)
- Επιθεώρηση της κατασκευής ενός ΟΚ
- Γνωριμία με το MOSFET & την τεχνολογία CMOS

ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

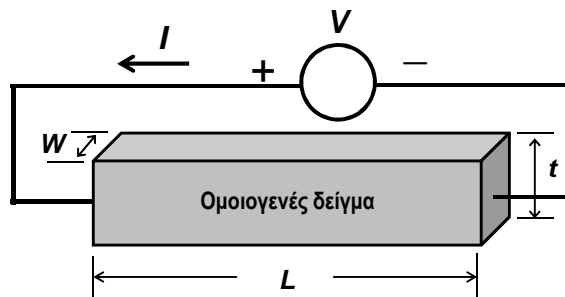
Ηλεκτρονικό Κύκλωμα

- Ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα αποτελείται από διάφορα ηλεκτρονικά στοιχεία όπως, αντιστάσεις, πυκνωτές, διόδους, τρανζίστορ καθώς και αγωγίμα σύρματα για τις μεταξύ τους διασυνδέσεις.

ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Ηλεκτρική αντίσταση



Αντίσταση

$$R \equiv \frac{V}{I} = \rho \frac{L}{Wt}$$

(Μονάδες: Ω)

όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση

resistivity

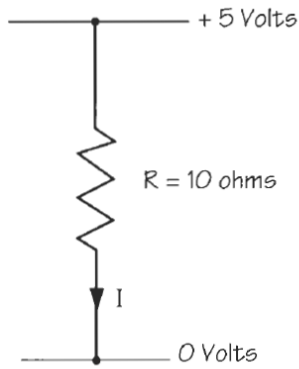
(Μονάδες: Ω-cm)

ΤΑ 503

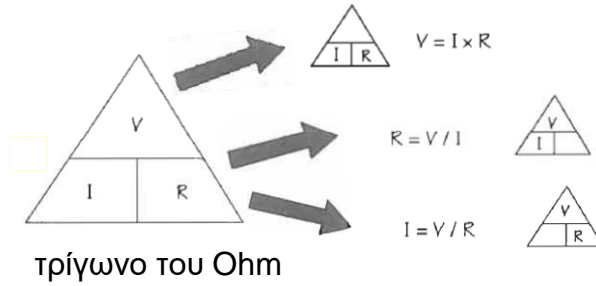
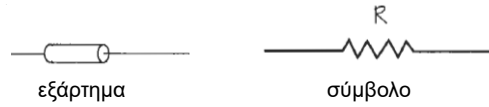
L0: Εισαγωγή

Αντίσταση

Είναι ένα ηλεκτρονικό στοιχείο το οποίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροής του ρεύματος.



Νόμος του Ohm: $V = I \times R$
 $I = V/R$
 $I = 5 \text{ volts}/10 \text{ ohms}$
 $I = 0.5 \text{ amps}$ $\mu\lambda$



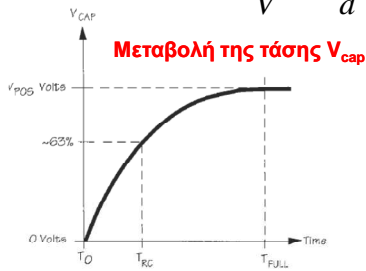
Το ηλεκτρόνιο χάνει ενέργεια καθώς διέρχεται μέσα από μια αντίσταση. Η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου είναι η ισχύς P . Η απώλεια ισχύος μέσα σε ένα εξάρτημα είναι το γινόμενο τάσης και ρεύματος και η μονάδα μέτρησης είναι το Watt (W)

$$P = I V$$

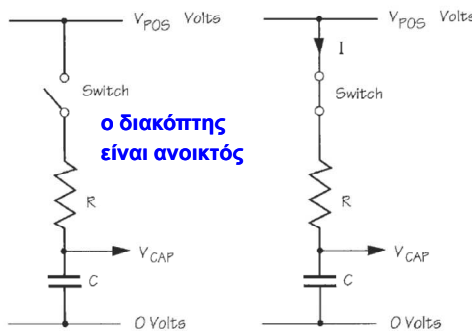
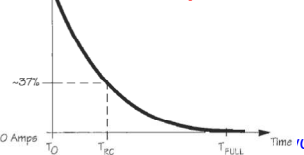
Πυκνωτής

Είναι ένα ηλεκτρονικό στοιχείο το οποίο μπορεί να αποθηκεύει ηλεκτρικό φορτίο.

Χωρητικότητα $C \equiv \frac{Q}{V} = \epsilon \frac{A}{d}$



Ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα



Τη χρονική στιγμή T_0 ο διακόπτης κλείνει

• Χρειάζεται χρόνος για τη φόρτιση / εκφόρτιση του πυκνωτή.

• Ο χρόνος φόρτισης / εκφόρτισης σχετίζεται εκθετικά με RC.

• Χρειάζεται ενέργεια για τη φόρτιση / εκφόρτισης του πυκνωτή.

• Η ενέργεια που αποθηκεύεται σε έναν πυκνωτή είναι $(1/2) CV^2$

Ορολογία

ενδογενής (intrinsic) ημιαγωγός: “μη-νοθευμένος” ημιαγωγός
οι ηλεκτρικές ιδιότητες είναι οι έμφυτες του υλικού

εξωγενής (extrinsic) ημιαγωγός: νοθευμένος ημιαγωγός
οι ηλεκτρικές ιδιότητες καθορίζονται από τα πρόσθετα άτομα πρόσμιξης

δότης (donor): άτομο πρόσμιξης που αυξάνει τη συγκέντρωση των ηλεκτρονίων
στοιχεία της ομάδας V (P, As)

αποδέκτης (acceptor): άτομο πρόσμιξης που αυξάνει τη συγκέντρ. των οπών
στοιχεία της ομάδας III (B, In)

η-τύπου υλικό: ημιαγωγός που περιέχει περισσότερα ηλεκτρόνια από οπές

p-τύπου υλικό: ημιαγωγός που περιέχει περισσότερες οπές από ηλεκτρόνια

φορέας πλειονότητας (majority carrier): ο φορέας με την περισσότερη αφθονία μέσα στο ημιαγωγικό δείγμα

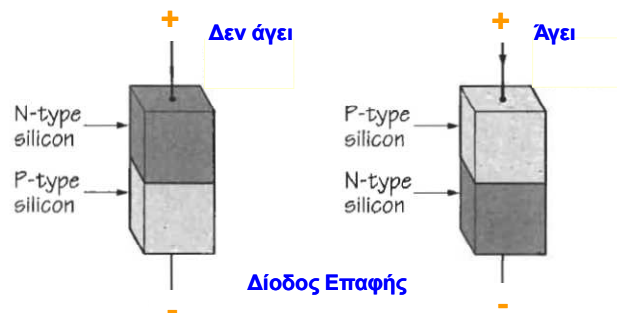
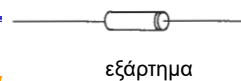
φορέας μειονότητας (minority carrier): ο φορέας με την ελάχιστη αφθονία μέσα στο ημιαγωγικό δείγμα

ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Δίοδος

Είναι ένα στοιχείο που επιτρέπει το ηλεκτρικό ρεύμα να περάσει από τη μια διεύθυνση, αλλά μπλοκάρει την κίνηση από την αντίθετη διεύθυνση.

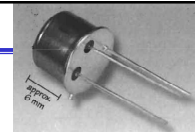


ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

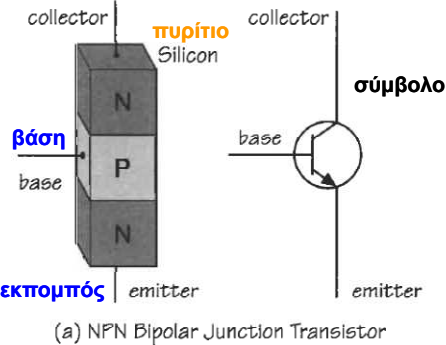
Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής (BJT)

Δουλεύει σαν ένας διακόπτης. Μπορεί να ενεργοποιήσει (ή να απενεργοποιήσει) την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος ή να αυξομειώσει την ένταση του ρεύματος.

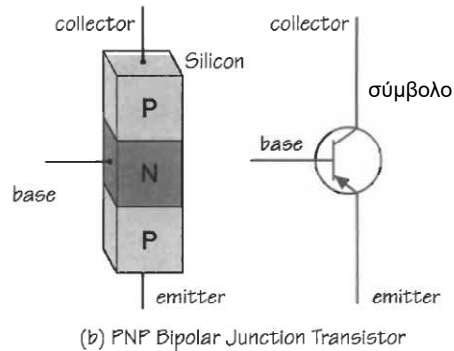


εξάρτημα

συλλέκτης



(a) NPN Bipolar Junction Transistor



(b) PNP Bipolar Junction Transistor

TA 503

L0: Εισαγωγή

Τύποι τρανζίστορ

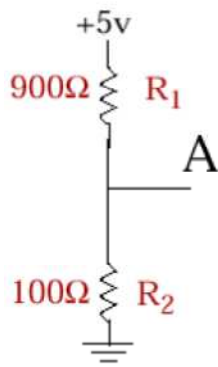
- **Διπολικά τρανζίστορ**
 - n-p-n και p-n-p δομές πυριτίου
 - Μικρό ρεύμα εντός του πολύ λεπτού στρώματος της βάσης ελέγχει υψηλά επίπεδα ρεύματος μεταξύ του εκπομπού και του συλλέκτη
 - Τα ρεύματα βάσης περιορίζουν την πυκνότητα ολοκλήρωσης
- **Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET)**
 - **Μετάλλου-Οξειδίου-ημιαγωγού (MOS)**
 - nMOS και pMOS MOSFETS
 - Η εφαρμογή τάσης στην πύλη ελέγχει το ρεύμα μεταξύ της πηγής και της υποδοχής
 - Η χαμηλή ισχύς επιτρέπει πολύ μεγάλη ολοκλήρωση

TA 503

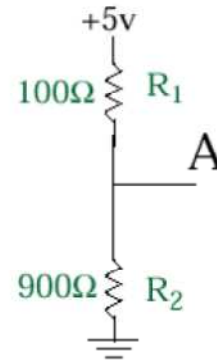
L0: Εισαγωγή

Παράδειγμα διαιρέτη τάσης

Βρείτε την τάση στο σημείο A σε σχέση με τη γείωση



$$V_X = \frac{R_X}{R_1 + R_2} V$$

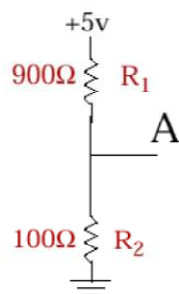


ΤΑ 503

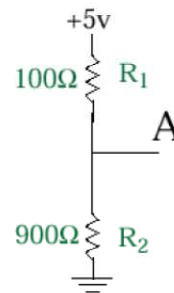
L0: Εισαγωγή

Παράδειγμα διαιρέτη τάσης

Βρείτε την τάση στο σημείο A σε σχέση με τη γείωση



$$V_X = \frac{R_X}{R_1 + R_2} V$$



$$V_1 = (900/1000) 5\text{v} = 4.5\text{v}$$

$$V_2 = (100/1000) 5\text{v} = 0.5\text{v}$$

$$V_{A-GND} = 0.5\text{v}$$

$$V_1 = (100/1000) 5\text{v} = 0.5\text{v}$$

$$V_2 = (900/1000) 5\text{v} = 4.5\text{v}$$

$$V_{A-GND} = 4.5\text{v}$$

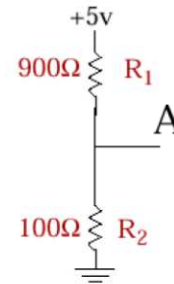
ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Πώς σχετίζεται αυτό με το κύκλωμα VLSI

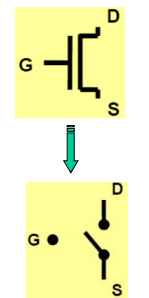
■ Δείτε ξανά το παράδειγμα του διαιρέτη τάσης:

- Σκεφτείτε τι θα μπορούσαμε να κάνουμε αν είχαμε μια συσκευή που θα μπορούσε να μεταβάλλει την αντίστασή της, από υψηλή σε χαμηλή αντίσταση.
- Θα μπορούσαμε να την χρησιμοποιούσαμε για να επιβάλουμε υψηλή ή χαμηλή τάση στο σημείο A, ανάλογα με τη σχετική αντίσταση.



■ Αυτό είναι ένα τρανζίστορ

- Συγκεκριμένα ένα FET CMOS .
- Complementary Metal-Oxide Semiconductor (CMOS) Field Effect Transistor (FET).
- Αν τάση στην πύλη (gate) είναι υψηλή, τότε υπάρχει μια χαμηλή αντίσταση μεταξύ της πηγής (source) και της υποδοχής (drain), αλλιώς είναι πολύ υψηλή αντίσταση.



TA 503

L0: Εισαγωγή

Τι είναι το MOSFET;

• Τα ψηφιακά Ο.Κ. βασίζονται σε διακόπτες τρανζίστορ

- Η πιο συνηθής διάταξη για ψηφιακά και μικτά σήματα: MOSFET

• Ορισμοί

- MOS = Metal Oxide Semiconductor

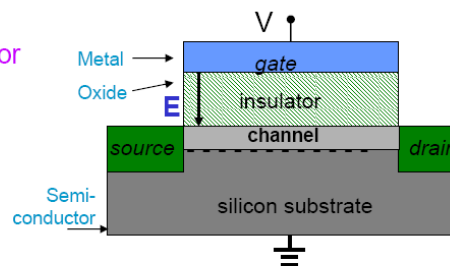
- Φυσικά στρώματα της διάταξης

- FET = Field Effect Transistor

- Τι είναι πεδίο **E**; Τι κάνει το πεδίο;
- Είναι άλλα πεδία σημαντικά;

- CMOS = Complementary MOS

- Χρήση αμφότερων nMOS και pMOS στην κατασκευή κυκλώματος



• Βασικά χαρακτηριστικά

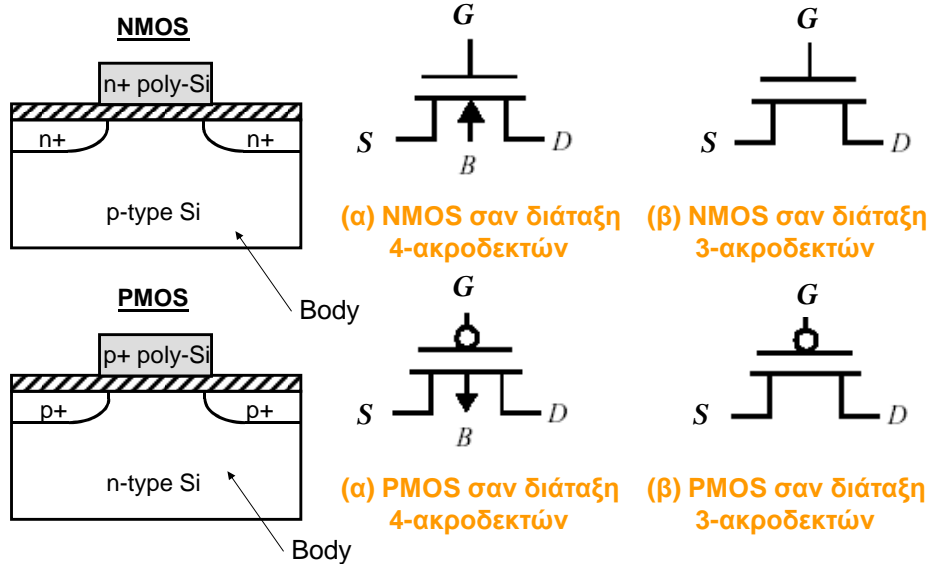
- gate → Πύλη
- gate oxide (insulator) → οξείδιο πύλης (μονωτής)
- source and drain → πηγή και υποδοχή
- bulk/substrate → υπόστρωμα
- channel → κανάλι

Σημείωση: Στα μοντέρνα MOSFETs το μέταλλο της πύλης έχει αντικαταστεί από πολυπυρίτιο
"metal" → polysilicon

TA 503

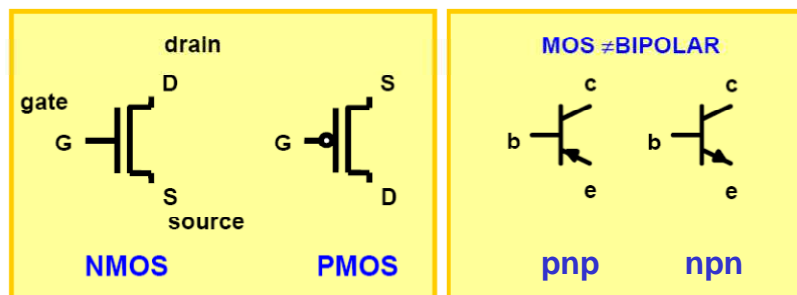
L0: Εισαγωγή

Κυκλωματικός συμβολισμός του MOSFET



TA 503

L0: Εισαγωγή



MOSFET = "Metal"-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

Όψη κάθετης τομής του MOSFET

Ακροδέκτης πύλης του MOSFET
≠
Λογική πύλη

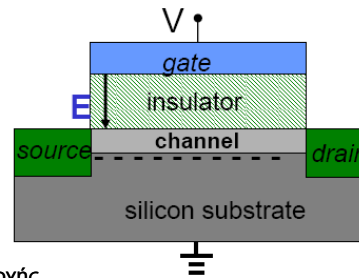
TA 503

L0: Εισαγωγή

MOSFET: Θεμελιώδεις σχέσεις

- **Ηλεκτρικά πεδία**

- Βασική Εξίσωση
 - Ηλεκτρικό πεδίο: $E = V/d$
- Κατακόρυφο πεδίο διαμέσου του οξειδίου πύλης
 - Καθορίζει τα επαγόμενα φορτία στο κανάλι
- Οριζόντιο πεδίο κατά μήκος του καναλιού
 - Καθορίζει τη ροή ρεύματος μεταξύ πηγής-υποδοχής



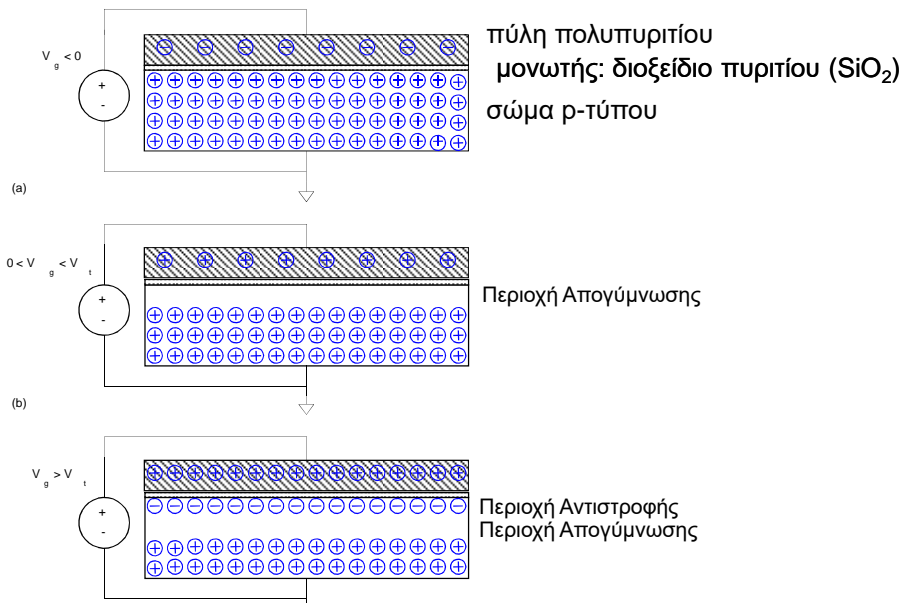
- **Χωρητικότητα**

- Βασικές Εξισώσεις
 - Φορτίο πυκνωτή : $Q = CV$
 - Χωρητικότητα : $C = \epsilon A/d$
- Εξισορρόπηση φορτίου στους οπλισμούς του πυκνωτή: $Q_+ = Q_-$
 - Το φορτίο της πύλης εξισορροπείται από το φορτίο στο κανάλι
 - Τι είναι το φορτίο του καναλιού; Από πού προέρχεται;

ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Ο Πυκνωτής MOS



ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Παράγοντας για την επιτυχία των Ο.Κ.

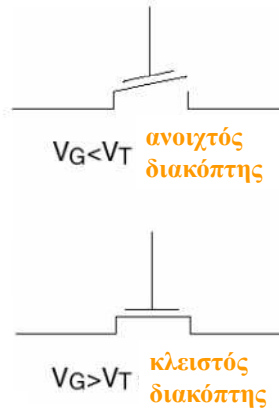
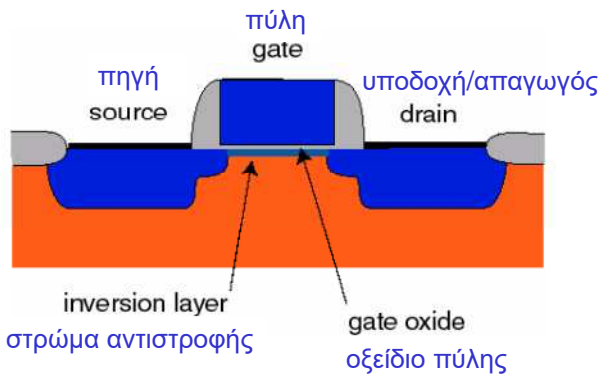
MOSFET

Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου
Μετάλλου-Οξειδίου-Ημιαγωγού

Metal-Oxide-Semiconductor

MOSFET=διακόπτης

Field-Effect Transistor



Ελκυστικό κέρδος, απομόνωση, και ταχύτητα

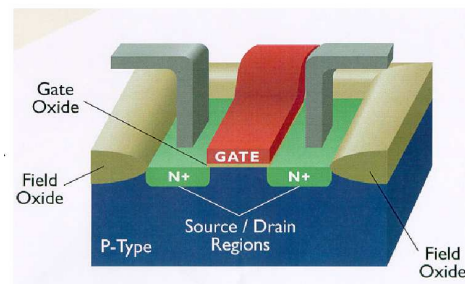
ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Μοντέρνο τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET)

- Ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται κάθετα στην επιφάνεια του ημιαγωγού (με την εφαρμογή τάσης στο πάνω ηλεκτρόδιο της πύλης "gate"), ώστε να διαμορφωθεί κατάλληλα η αγωγιμότητα του ημιαγωγού.
- Ελεγχόμενο ρεύμα ολίσθησης διέρχεται μεταξύ των 2 επαφών (της πηγής "source" και της υποδοχής "drain") μεταβάλλοντας κατάλληλα την τάση στο ηλεκτρόδιο της πύλης "gate".

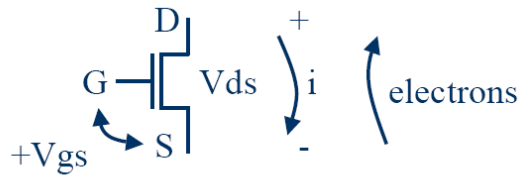
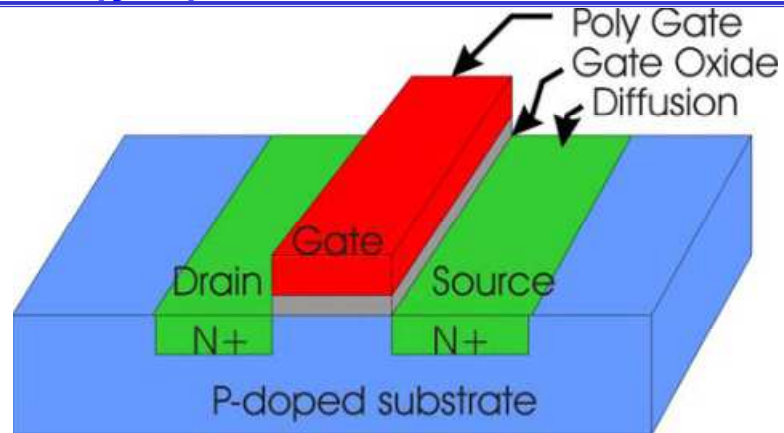
Metal-oxide-semiconductor
(MOS) FET:



ΤΑ 503

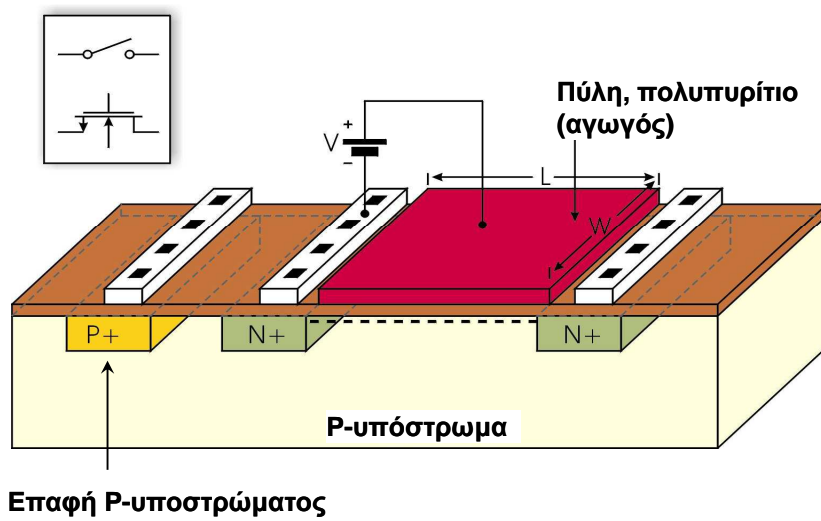
L0: Εισαγωγή

Ο διακόπτης πυριτίου: NMOS



TA 503

Ο διακόπτης πυριτίου: NMOS

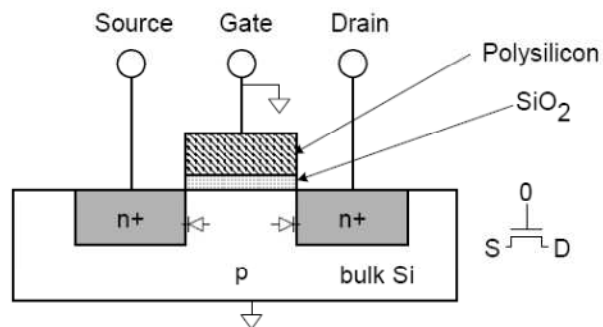


TA 503

L0: Εισαγωγή

Λειτουργία nMOS

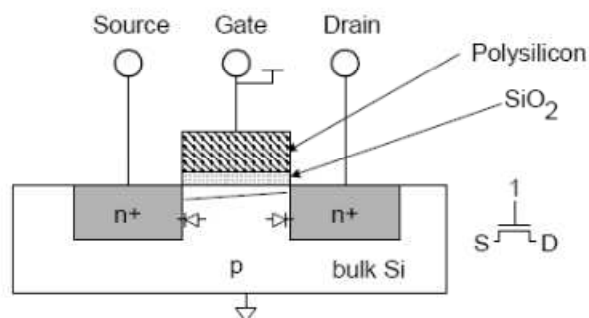
- ❑ Το σώμα είναι συνήθως στη γείωση (0 V).
- ❑ Όταν η πύλη είναι σε χαμηλή τάση:
 - p-τύπου σώμα είναι σε χαμηλή τάση.
 - Οι δίοδοι πηγής-σώματος και υποδοχής-σώματος είναι off.
 - Δεν ρέει ρεύμα, το τρανζίστορ είναι off.



TA 503

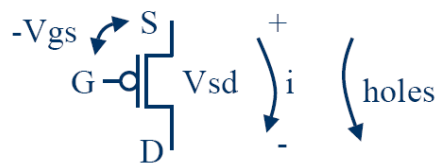
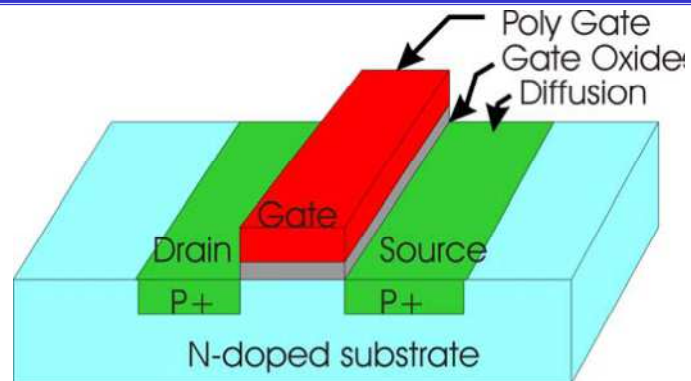
Λειτουργία nMOS συν.

- ❑ Όταν η πύλη βρίσκεται σε υψηλή τάση:
 - Θετικό φορτίο στην πύλη του MOS πυκνωτή.
 - Αρνητικό φορτίο έλκονται από το σώμα.
 - Δημιουργείται ένα στρώμα αντιστροφής, δηλ. ένα κανάλι n-τύπου κάτω από την πύλη.
 - Τώρα ρεύμα μπορεί να ρέει μέσω του πυριτίου n-τύπου από την πηγή μέσω του καναλιού στην υποδοχή, το τρανζίστορ είναι ON.



TA 503

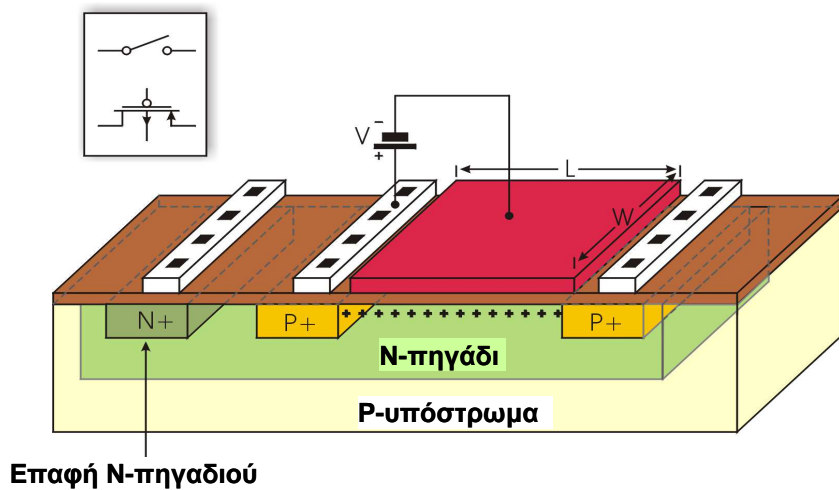
Ο διακόπτης πυριτίου: PMOS



TA 503

L0: Εισαγωγή

Ο διακόπτης πυριτίου: PMOS



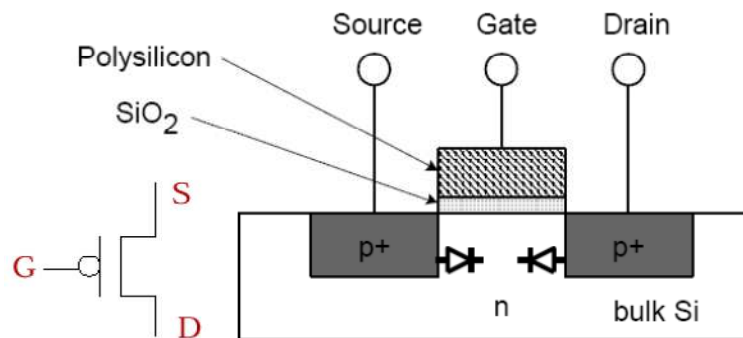
TA 503

L0: Εισαγωγή

Λειτουργία pMOS

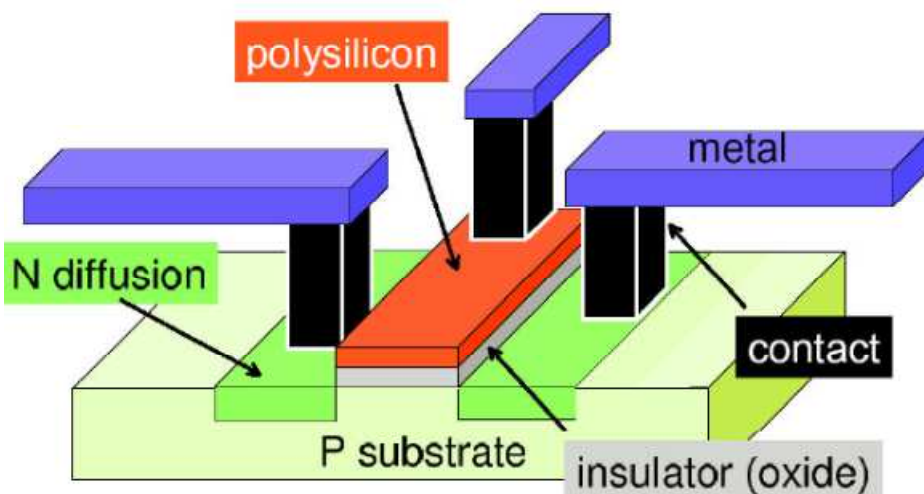
□ Παρόμοια, αλλά η νόθευση και οι τάσεις έχουν αντιστραφεί:

- Το σώμα συνδέεται με υψηλή τάση (V_{DD}).
- Πύλη σε χαμηλό δυναμικό: τρανζίστορ ON.
- Πύλη σε υψηλό δυναμικό: τρανζίστορ OFF.
- Η φουσκάλα δείχνει ανεστραμμένη συμπεριφορά.



TA 503

Απλοποιημένη άποψη της διάταξης MOSFET



TA 503

L0: Εισαγωγή

Ηλεκτρονικά Κυκλώματα

- ❑ Κατά τη δεκαετία του '50 τα τρανζίστορ και τα άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα ήταν διαθέσιμα μόνο σε ξεχωριστές συσκευασίες.
 - Αυτά τα διακριτά εξαρτήματα, τα οποία τοποθετούνταν πάνω στην πλακέτα, συνδέονταν μεταξύ τους με το χέρι, χρησιμοποιώντας ξεχωριστά σύρματα.
 - Μία ηλεκτρονική πύλη ικανή να αποθηκεύει ένα απλό δυαδικό ψηφίο είχε κόστος μεγαλύτερο από \$2.



Friden EC-130 : η 1^η αριθμομηχανή από Τρανζίστορ

➤ 600 τρανζίστορ
+ εκατοντάδες
αντιστάσεις,
πυκνωτές και
διόδους
2 πράξεις/sec

Πλακέτα

ΤΑ 50

): Εισαγωγή

Άσκηση

Σήμερα οι μικροεπεξεργαστές περιέχουν περίπου 100 εκατομμύρια τρανζίστορ σε ένα τσιπ με επιφάνεια περίπου $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ (Το τσιπ έχει πάχος μερικά μικρόμετρα). Υποθέστε ότι τα ΟΚ δεν είχαν ανακαλυφθεί και εμείς προσπαθούσαμε να φτιάξουμε έναν επεξεργαστή χρησιμοποιώντας 100 εκατομμύρια ξεχωριστά τρανζίστορ. Αν κάθε στοιχείο έπινε χώρο $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, εκτιμήστε τον ελάχιστο όγκο του επεξεργαστή.

Λύση

Ο ελάχιστος όγκος δίνεται ως $27 \times 10^9\text{ mm}^3$, δηλ. ένας κύβος με ακμή $1,4\text{ m} !!!$ Φυσικά, η διασύνδεση των τρανζίστορ με σύρματα θα αυξήσει σημαντικά τον όγκο.

Εκτός του ότι πιάνει πολύ χώρο, αυτός ο επεξεργαστής με τα ξεχωριστά στοιχεία θα ήταν εξαιρετικά αργός, δηλ. τα σήματα θα έπρεπε να διέρχονται μέσα από σύρματα μήκους $1,4\text{ m} !!!$ Επιπροσθέτως, αν κάθε ξεχωριστό τρανζίστορ κόστιζε 1 cent και ζύγιζε 1 g κάθε σύστημα επεξεργαστή θα κόστιζε ένα εκατομμύριο ευρώ και θα ζύγιζε $100\text{ τόνους} !!!$

Πόση ισχύ θα καταλάωνε ένα τέτοιο σύστημα αν κάθε τρανζίστορ σπαταλούσε $10\text{ }\mu\text{W}$;

ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Ολοκληρωμένα Κυκλώματα (Ο.Κ.)

- ❑ Στις αρχές της δεκαετίας '90, κάμποσες πύλες ικανές για την αποθήκευση δεδομένων 5000 bits είχαν κόστος λιγότερο από σεντ.
- ❑ Η αιτία αυτής της κολοσσιαίας μείωσης της τιμής ήταν, κυρίως, η ανακάλυψη του ολοκληρωμένου κυκλώματος (integrated circuit, IC).
- ❑ Σε ένα μονολιθικό ολοκληρωμένο κύκλωμα (ο χαρακτηρισμός 'μονολιθικό', συνήθως, παραλείπεται) όλα τα εξαρτήματά του σχηματίζονται πάνω στην επιφάνεια μιας λεπτής φέτας από ημιαγωγίμο υλικό.
- ❑ Αυτό το λεπτό ημιαγωγίμο κομμάτι είναι γνωστό ως τσιπ.
 - Αν και υπάρχουν διαθέσιμα αρκετά ημιαγωγίμο υλικά, αυτό που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το πυρίτιο, και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα είναι ευρέως γνωστά ως τσιπ πυριτίου.

ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Το κλειδί για την ανάπτυξη των Ο.Κ.

Πυρίτιο (Si)

2.33	28.086
5.43	Si 14
	$3s^23p^2$
1683	DIA 625

• Φθινό και Άφθονο

το δεύτερο σε αφθονία χημικό στοιχείο στη γήινη φύση μετά το οξυγόνο, με ποσοστό 28% και το 7ο πιο άφθονο στοιχείο στο Σύμπαν

• Καταπληκτικές μηχανικές, χημικές και ηλεκτρικές ιδιότητες

• Ίσως, το πιο γνωστό υλικό στον άνθρωπο

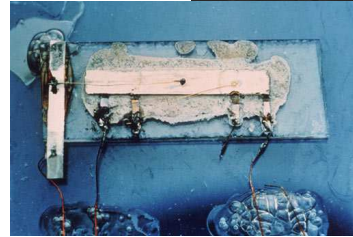
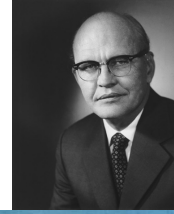
ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Το πρώτο θεμελιώδες ολοκληρωμένο κύκλωμα

Jack Kilby, 1958

Το πρώτο θεμελιώδες ολοκληρωμένο κύκλωμα το οποίο εφευρέθηκε από τον Jack Kilby στην Texas Instruments το 1958. Περιελάμβανε μόνο ένα διπολικό τρανζίστορ, τρεις αντιστάσεις και ένα πυκνωτή, όλα κατασκευασμένα επάνω σε μια φέτα (τσιπ) γερμανίου και διασυνδεδεμένα με σύρματα.



ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Ολοκληρωμένο Κύκλωμα

Ο **Robert Noyce** ήρθε και αυτός με την δική του ιδέα για το ολοκληρωμένο κύκλωμα, μισό χρόνο μετά από τον Kilby. Κατάφερε να λύσει αρκετά πρακτικά προβλήματα που είχε το κύκλωμα του Kilby, κυρίως το πρόβλημα της διασύνδεσης των διάφορων στοιχείων πάνω στο τσιπ.

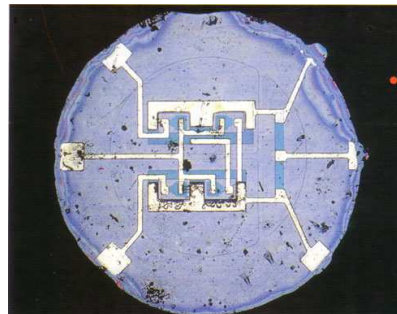


Robert Noyce

Το πρώτο μονολιθικό Ο.Κ. ήταν ένα κύκλωμα φλιπ-φλοπ το οποίο περιελάμβανε έξι στοιχεία. Παρατηρείστε ότι οι αγώγιμοι οδηγοί που συνδέουν διαφορετικά στοιχεία είναι ενσωματωμένοι ως μέρος του τσιπ.

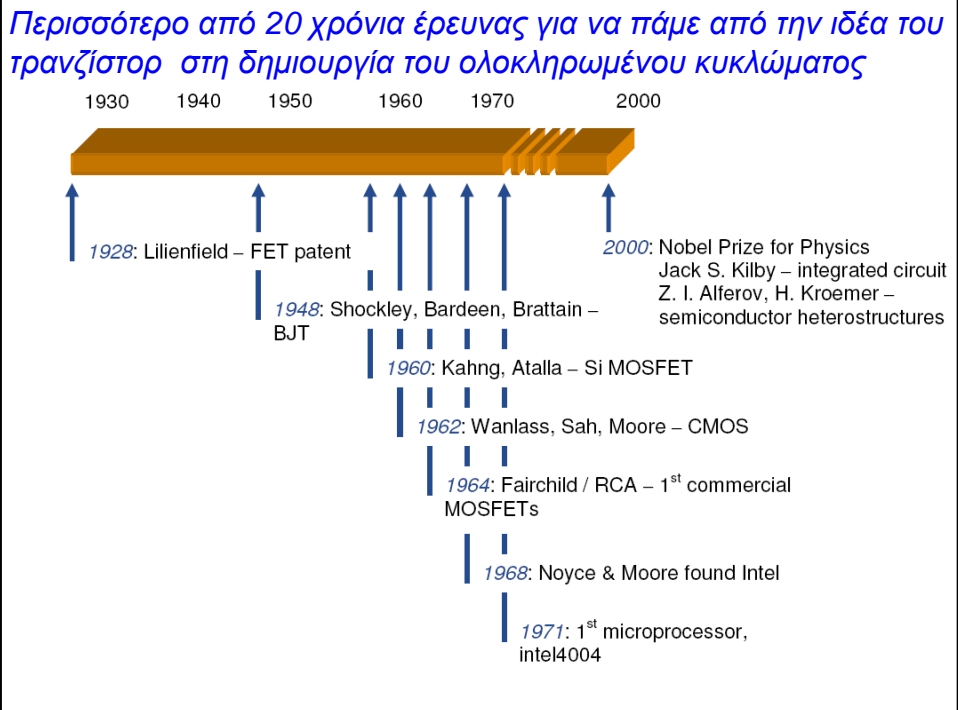
Λευκές συνδέσεις από αλουμίνιο σε σχήμα αράχνης συνδέουν γαλάζια τρανζίστορ σε ένα μικροσκοπικό ολοκληρωμένο κύκλωμα σχεδιασμένο για την εκτέλεση λογικών πράξεων σ'ένα υπολογιστή.

Τα τσιπ-όπως αυτό - που εικονίζεται μεγενθυμένο περίπου 60 φορές (η κόκκινη κουκίδα δείχνει το πραγματικό μέγεθος)-κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά σε μαζική παραγωγή με την επαναστατική **επιπεδή μέθοδο** στις αρχές της δεκαετίας του '60.



ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή



Κατασκευή

Ultraviolet radiation source

Mask

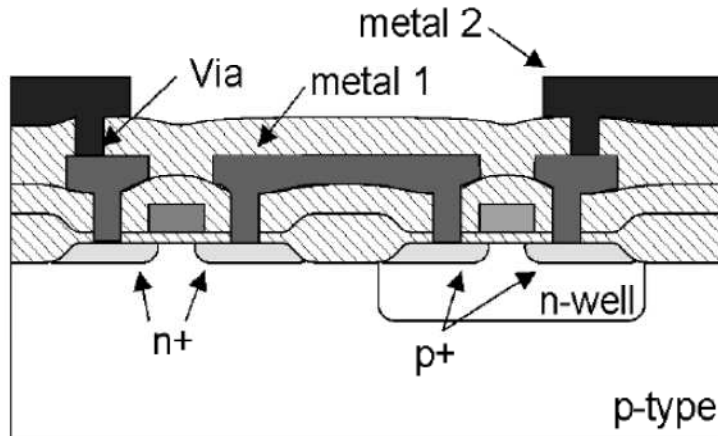
Each square corresponds to an individual integrated circuit

Wafer

ΤΑ 503
Λ0: Εισαγωγή

Η τεχνολογία CMOS

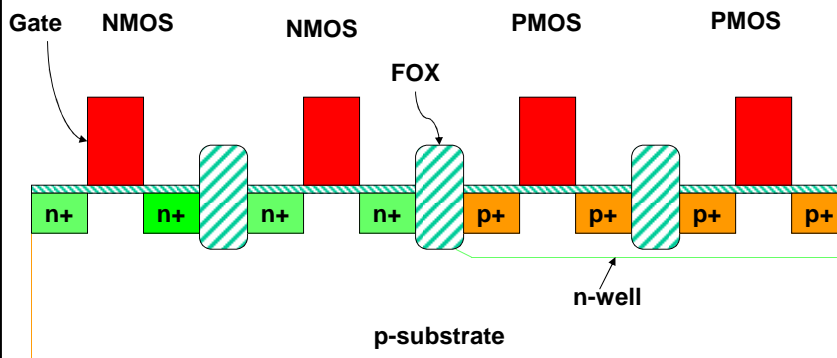
Η διαδικασία CMOS επιτρέπει την κατασκευή τρανζίστορ nMOS και pMOS δίπλα-δίπλα πάνω στο ίδιο υπόστρωμα πυριτίου



TA 503

L0: Εισαγωγή

n-well process



MOSFET Layers in an n-well process

TA 503

L0: Εισαγωγή

CMOS Layers

- n-well process
- p-well process
- Twin-tub process

TA 503

L0: Εισαγωγή

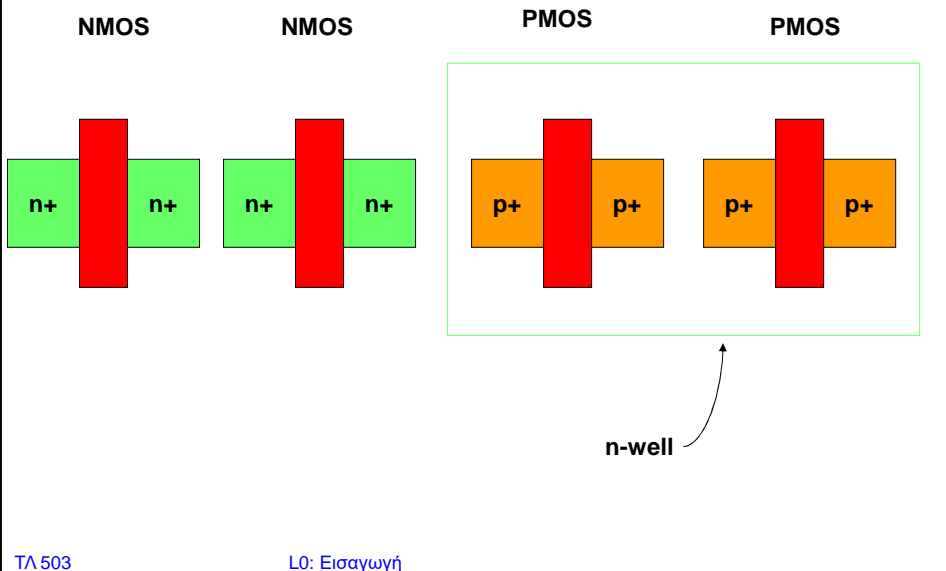
Layer Types

- p-substrate
- n-well
- n+
- p+
- Gate oxide
- Gate (polycilicon)
- Field Oxide
 - Insulated glass
 - Provide electrical isolation

TA 503

L0: Εισαγωγή

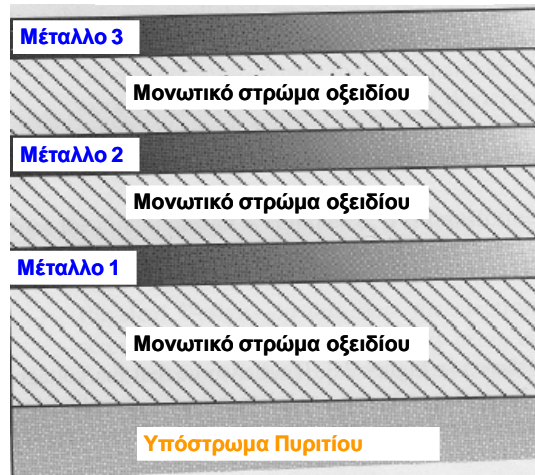
Top view of the FET pattern



Στρώματα κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

μέταλλα, καλά για αγωγή ρεύματος, χρησιμοποιούνται για τις διασυνδέσεις
μονωτές, (οξειδίο του πυριτίου), εμποδίζουν τη διέλευση ρεύματος
ημιαγωγοί, (πυρίτιο), άγουν ρεύμα κάτω από ορισμένες συνθήκες

Δομή διαδοχικών στρωμάτων



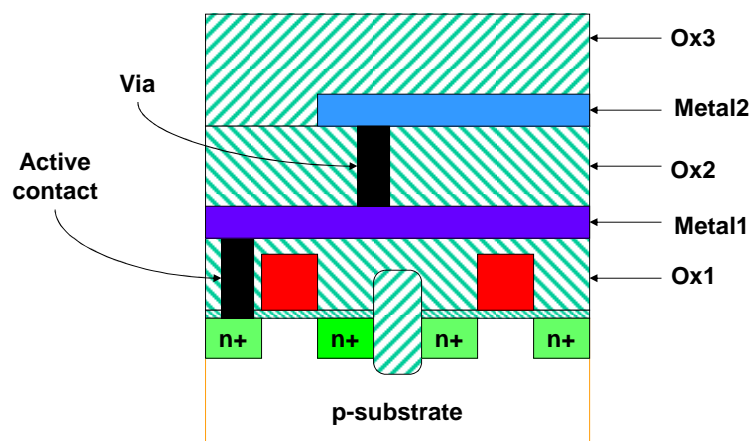
Μεταλλικά Στρώματα Διασύνδεσης

- ❑ Τα Μεταλλικά στρώματα είναι ηλεκτρικά απομονωμένα μεταξύ τους.
- ❑ Οι ηλεκτρικές επαφές μεταξύ διπλανών αγωγίμων στρωμάτων γίνονται με contact cuts και vias.

ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

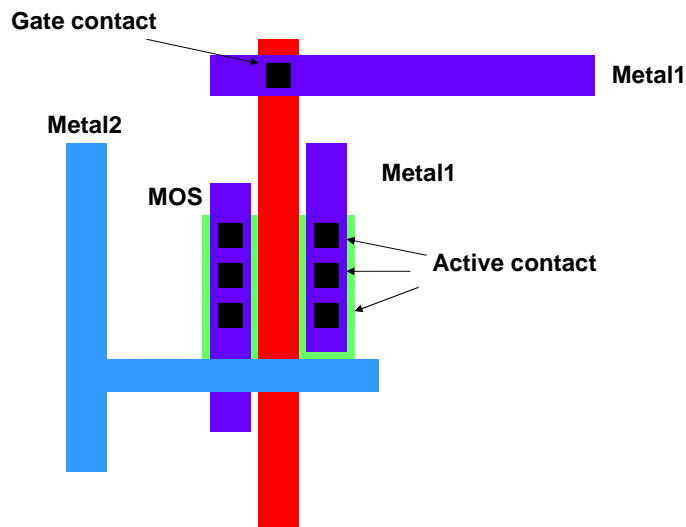
Metal Interconnect Layers



ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Interconnect Layout Example



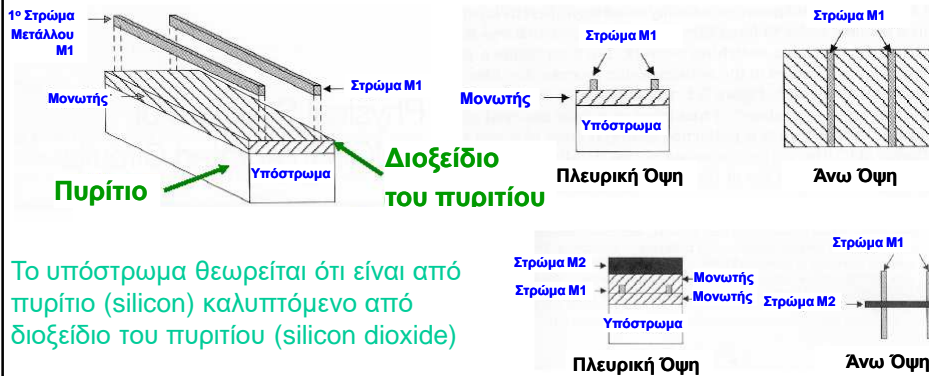
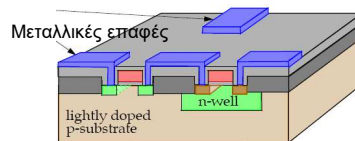
TA 503

L0: Εισαγωγή

Στρώματα κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα είναι ένα πλήθος από στρώματα διάφορων σχεδίων

Διαδοχικά στρώματα σχηματίζουν δομές 3-διαστάσεων



Το υπόστρωμα θεωρείται ότι είναι από πυρίτιο (silicon) καλυπτόμενο από διοξείδιο του πυριτίου (silicon dioxide)

TA 503

L0: Εισαγωγή

Βασική διαδικασία Παραγωγής Σχεδίων

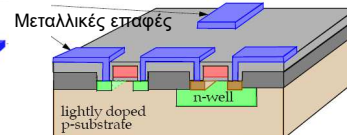
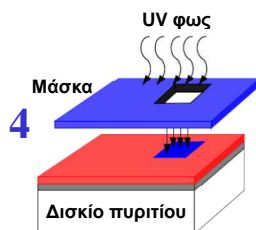
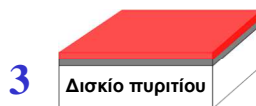
Η παραγωγή των σχεδίων στα διάφορα στρώματα ενός τσιπ βασίζεται στην φωτολιθογραφία, όπου UV (υπεριώδης ακτινοβολία) φως υψηλής ενέργειας εκπέμπεται μέσα από μια μάσκα σε ένα δισκίο πυριτίου που είναι καλυμμένο με ένα φωτοευαίσθητο φιλμ.

ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Φωτολιθογραφία

1. Καθαρισμός δισκίου
2. Εναπόθεση υλικού (στρώμα μετάλλου, ημιαγωγού ή μονωτή)
3. Στρώση φωτοευαίσθητου φιλμ
4. Έκθεση στο UV φως
5. Εμφάνιση φιλμ
6. Εγχάραξη των μη-προστατευμένων περιοχών του υλικού
7. Απομάκρυνση φωτοευαίσθητου φιλμ

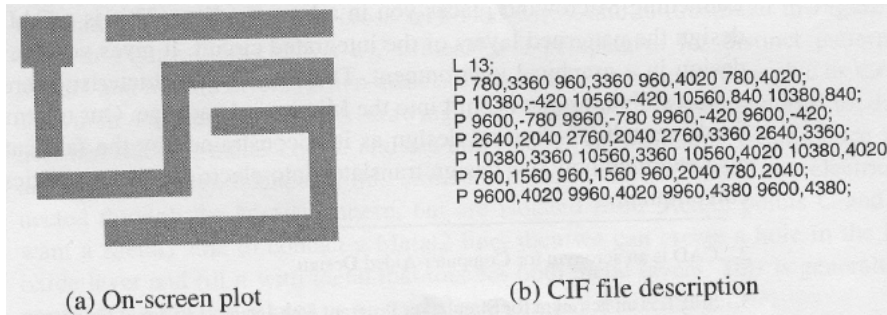


Τεχνολογία CMOS

ΠΟΛΛΕΣ ΦΟΡΕΣ

Παράδειγμα Μεταφοράς Σχεδίου διασυνδέσεων

- ❑ Σχεδίαση των γραμμών διασύνδεσης με υπολογιστή
- ❑ Κατασκευή μάσκας
- ❑ Μεταφορά του σχεδίου πάνω στην επιφάνεια του τσιπ
- ❑ Χρήση της εμφανιζόμενης περιοχής για τον ορισμό των γραμμών διασύνδεσης

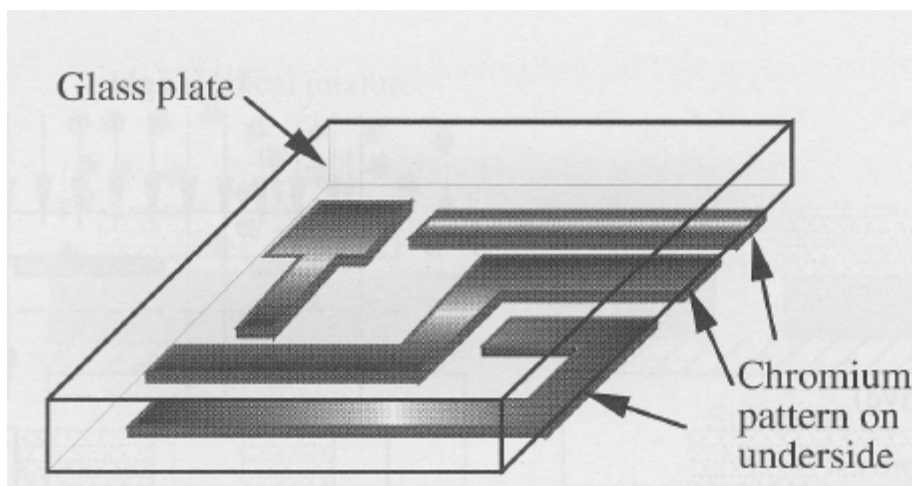


Caltech-Intermediate-Format

TA 503

L0: Εισαγωγή

Κατασκευή μάσκας

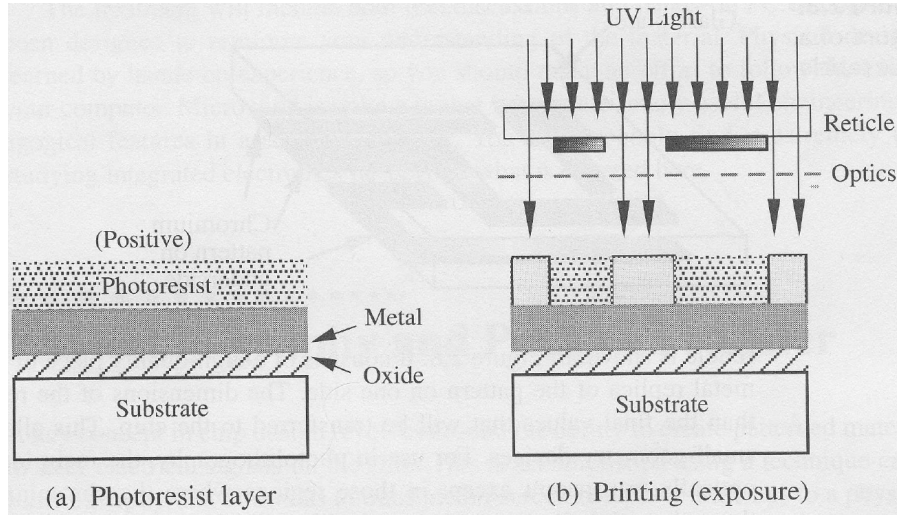


TA 503

L0: Εισαγωγή

Διαδικασία μεταφοράς σχεδίου (φωτολιθογραφία)-I

Εναπόθεση φωτοευαίσθητου φιλμ (ρητίνη) και έκθεση σε UV

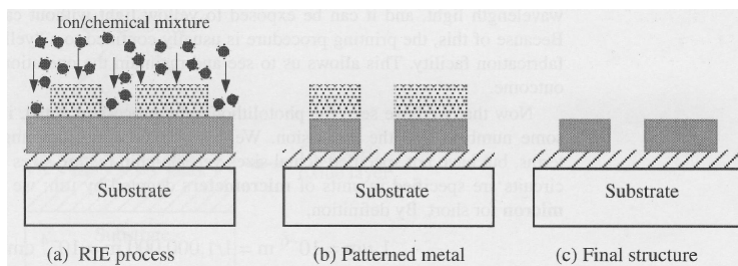
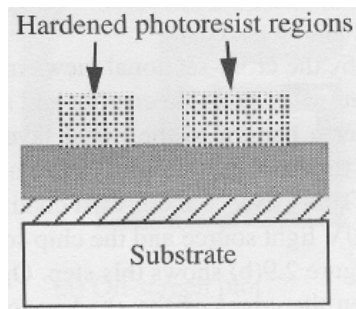


TA 503

L0: Εισαγωγή

Διαδικασία μεταφοράς σχεδίου - II

Μετά την εμφάνιση

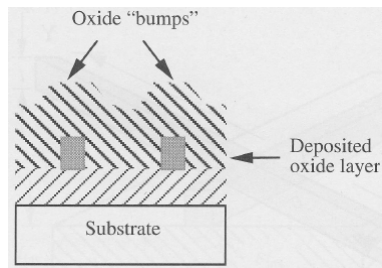


Διαδικασία
Εγχάραξης

TA 503

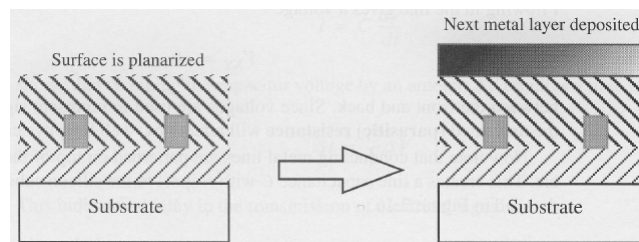
L0: Εισαγωγή

Εναπόθεση μονωτικού στρώματος



Ανάγκη για λείανση

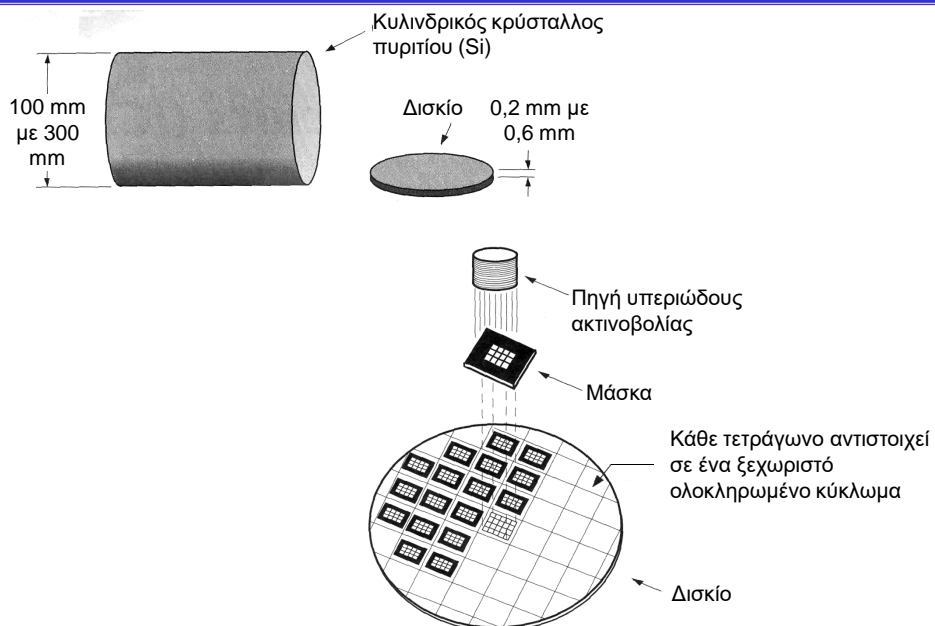
Λείανση



TA 503

L0: Εισαγωγή

Γενική εποπτεία ολοκληρωμένου κυκλώματος (Ο.Κ.)

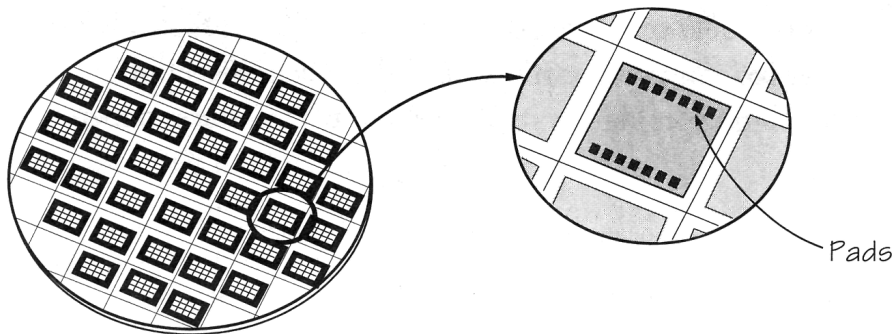


TA 503

L0: Εισαγωγή

Επαφές τροφοδοσίας & σημάτων

- ❑ Για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας του τσιπ καθώς και για σκοπούς διασύνδεσης, κατασκευάζονται στις άκρες κάθε Ο.Κ. μεγάλες σχετικά επιφάνειες από αλουμίνιο.
- ❑ Οι επαφές αυτές αποτελούν τους εξωτερικούς ακροδέκτες (pads) του Ο.Κ.
- ❑ Μερικοί ακροδέκτες χρησιμοποιούνται για την παροχή τροφοδοσίας της διάταξης, ενώ οι υπόλοιποι χρησιμοποιούνται για την παροχή των σημάτων εισόδου και εξόδου.

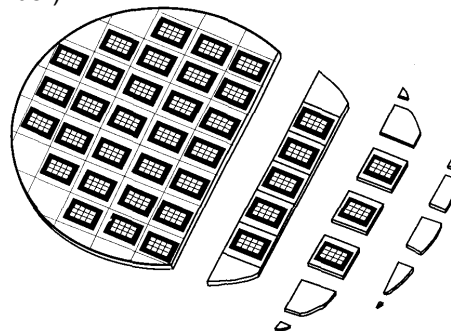


TA 503

L0: Εισαγωγή

Έλεγχος ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- ❑ Η λειτουργία των μεμονωμένων Ο.Κ. ελέγχεται σε επίπεδο δισκίου (wafer probing).
- ❑ Ένας αυτοματοποιημένος σταθμός ελέγχου (prober) τοποθετεί αγώγιμες ακίδες πάνω στους ακροδέκτες της διάταξης, εφαρμόζει τάσεις στους ακροδέκτες τροφοδοσίας, εισάγει σειρά σημάτων στους ακροδέκτες εισόδου και καταγράφει τα αντίστοιχα σήματα τα οποία επιστρέφουν από τους ακροδέκτες εξόδου.
- ❑ Τα άρτια κυκλώματα, γνωστά ως ψηφίδες (die) χωρίζονται με ειδικό εργαλείο κοψίματος (διαμάντι, scribe)



TA 503

L0: Εισαγωγή

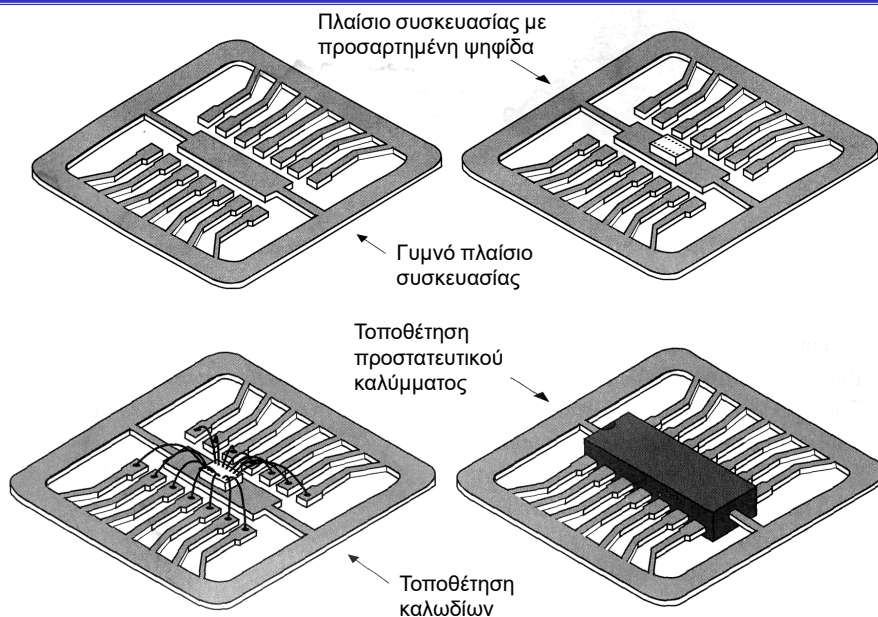
Συσκευασία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- ❑ Μετά το κόψιμο, η πλειοψηφία των ψηφίδων συσκευάζεται ξεχωριστά.
- ❑ Εκτός από την παροχή ενός μέσου για τη μεταφορά των καλωδίων σήματος και τροφοδοσίας μέσα και έξω από τη ψηφίδα, η συσκευασία απομακρύνει επίσης τη θερμότητα που παράγεται από το κύκλωμα, προστατεύει την ψηφίδα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. υγρασία) και τέλος παρέχει μηχανική υποστήριξη.
- ❑ Γενικά, υπάρχουν πάρα πολλές τεχνολογίες συσκευασίας, σχεδόν τόσες όσες είναι και οι κατασκευαστές διατάξεων, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους: με βάση το κύριο υλικό κατασκευής, τον αριθμό των επιπέδων διασύνδεσης, και το μέσον που χρησιμοποιείται για την απαγωγή της θερμότητας.

TA 503

L0: Εισαγωγή

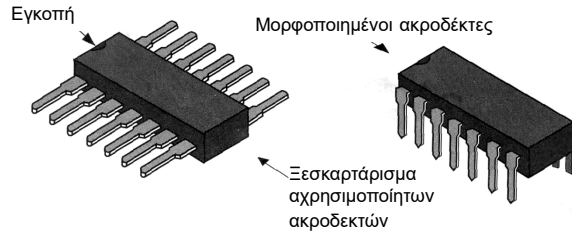
Παραδοσιακή διαδικασία συσκευασίας



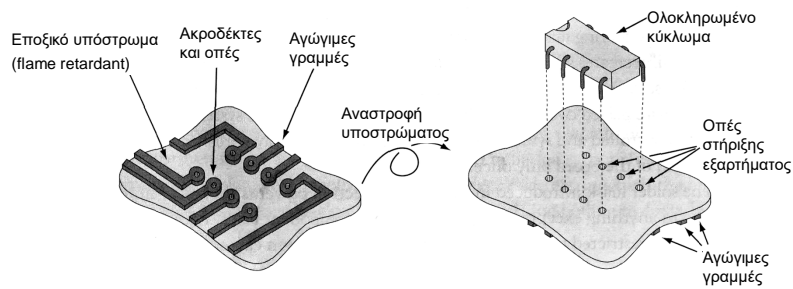
TA 503

L0: Εισαγωγή

Συσκευασία διπλής σειράς (Dual-in-Line, DIL ή DIP)



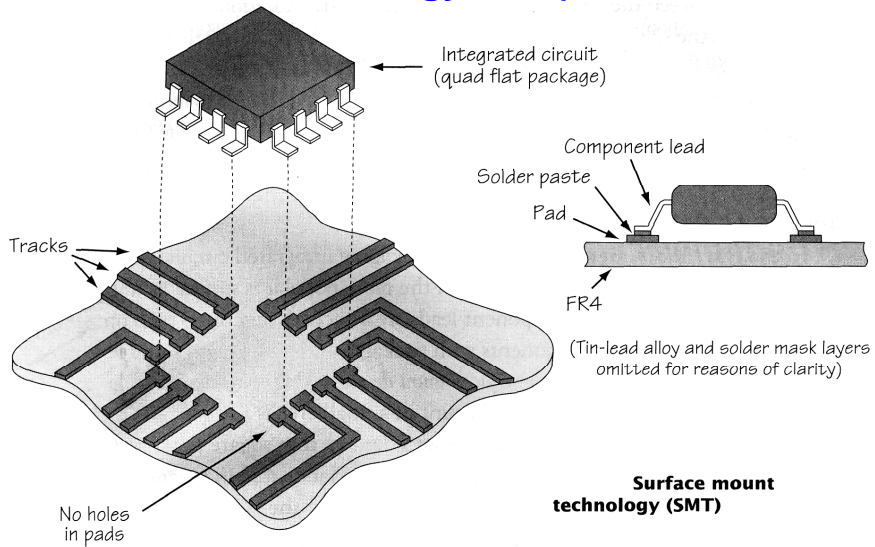
Τοποθέτηση συσκευασίας πάνω στην πλακέτα Τοποθέτηση μέσω οπών (Lead through-hole, LTH)



TA 503

L0: Εισαγωγή

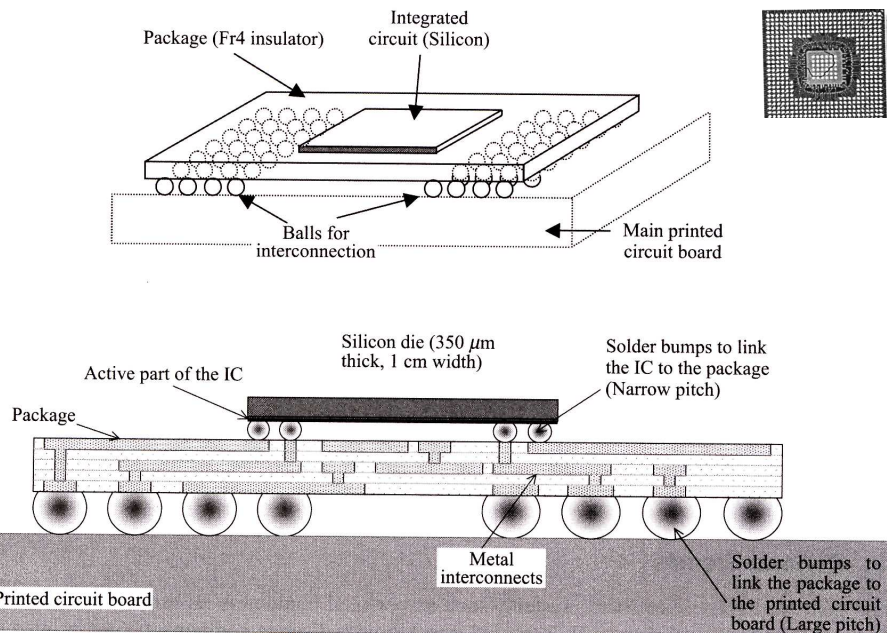
Τοποθέτηση πάνω σε επιφάνεια (surface mount technology, SMT)



TA 503

L0: Εισαγωγή

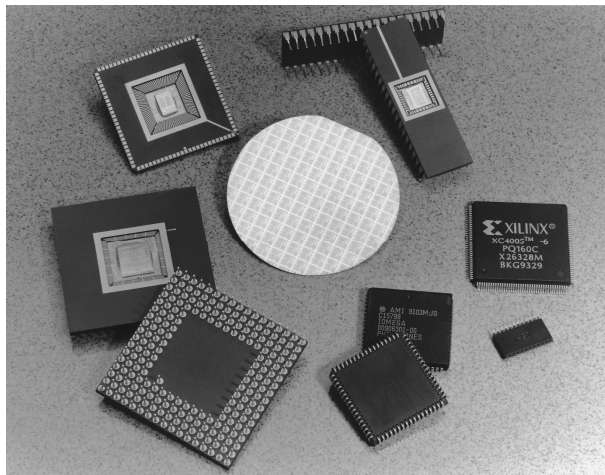
Κεραμική διάταξη πλέγματος με μπάλες (BGA)



TA 503

L0: Εισαγωγή

Χρησιμοποιούμενες συσκευασίες



TA 503

L0: Εισαγωγή

Τι είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα VLSI;

ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΚΥΚΛΩΜΑ

VERY LARGE SCALE INTEGRATED CIRCUIT

Τεχνική κατά την οποία πολλά κυκλωματικά εξαρτήματα καθώς και τα καλώδια που τα συνδέουν μεταξύ τους κατασκευάζονται ταυτόχρονα πάνω στην επιφάνεια ενός μικρού ημιαγωγίου κομματιού, γνωστό ως τσιπ.

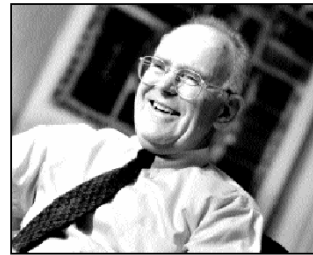
Πρώιμος χαρακτηρισμός (περίπου από το 1978) για το «μέγεθος» ενός κυκλώματος, πριν οι άνθρωποι καταλάβουν την εκθετική αύξηση του αριθμού των εξαρτημάτων ανά τσιπ (αναφέρεται ως νόμος του Moore)

TA 503

L0: Εισαγωγή

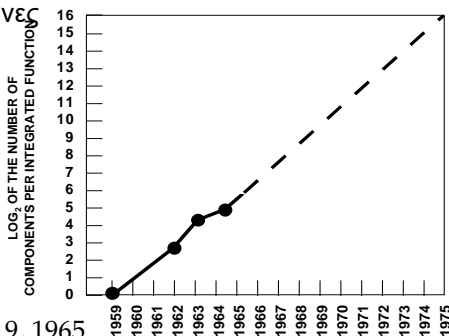
Νόμος του Moore

- ❑ Cordon Moore
- ❑ Νόμος του Moore: απεικόνιση σε διάγραμμα του αριθμού των τρανζίστορ κάθε τσιπ
 - Ευθεία γραμμή προσαρμόζει τα δεδομένα σε ημιλογαριθμική κλίμακα
 - Ο αριθμός των τρανζίστορ διπλασιάζεται κάθε 18-24 μήνες



Επίπεδα Ολοκλήρωσης

- SSI:** 10 πύλες
- MSI:** 1000 πύλες
- LSI:** 10,000 πύλες
- VLSI:** > 10k πύλες



Electronics, April 19, 1965.

TA 503

L0: Εισαγωγή

Τεχνολογίες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

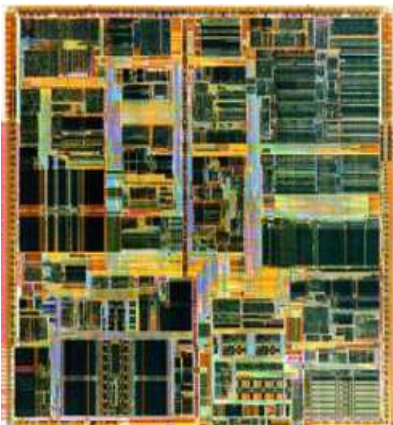
- Γιατί επικρατούν τα Ο.Κ. CMOS;
 - άλλες τεχνολογίες
 - Παθητικά κυκλώματα
 - Διατάξεις III-V
 - Τρανζίστορ πυριτίου BJT
 - CMOS (90%)
 - BiCMOS (5%)
 - Bipolar (2%)
 - GaAs (2%)
 - SOI (1%)
- Τυπική ταξινόμηση της παγκόσμιας κατασκευής Ο.Κ.
- Αιτίες επικράτησης των Ο.Κ. CMOS:
 - Το πυρίτιο είναι φθηνότερο → έναντι άλλων υλικών
 - Η φυσική των Ο.Κ. CMOS είναι περισσότερο κατανοητή
 - Τα Ο.Κ. CMOS είναι ευκολότερα στην υλοποίηση/κατασκευή
 - Τα Ο.Κ. CMOS παρέχουν χαμηλότερο γινόμενο ισχύος-καθυστερήσης
 - Η τεχνολογία CMOS έχει τη χαμηλότερη ισχύ κατανάλωσης
 - Επιτυγχάνει περισσότερα CMOS τρανζίστορ για ίδια επιφάνεια τσιπ
 - **Ωστόσο! Η CMOS δεν είναι η ταχύτερη τεχνολογία!**
Οι διατάξεις BJT και III-V είναι ταχύτερες

ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Ένα σύγχρονο τσιπ μικροεπεξεργαστή

Intel's Pentium IV



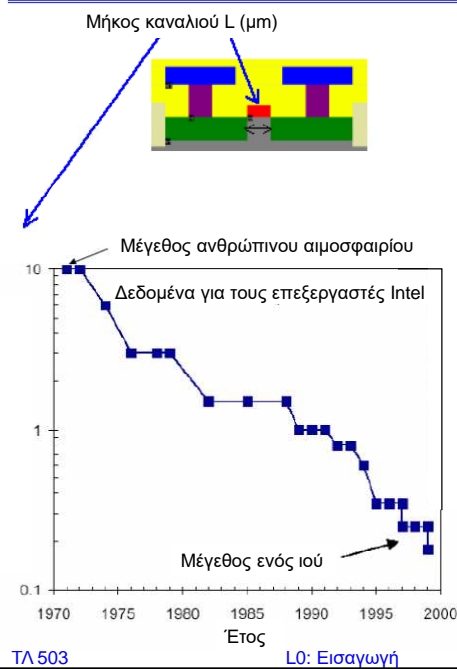
□ Βγάλτε το κάλυμμα του μικροεπεξεργαστή. Τι βλέπετε;

- Ένα πυκνό δίκτυο διασυνδέσεων σε βάθος πολλών επιπέδων
- Πολύ μικρά τρανζίστορ σε υψηλή συγκέντρωση

ΤΑ 503

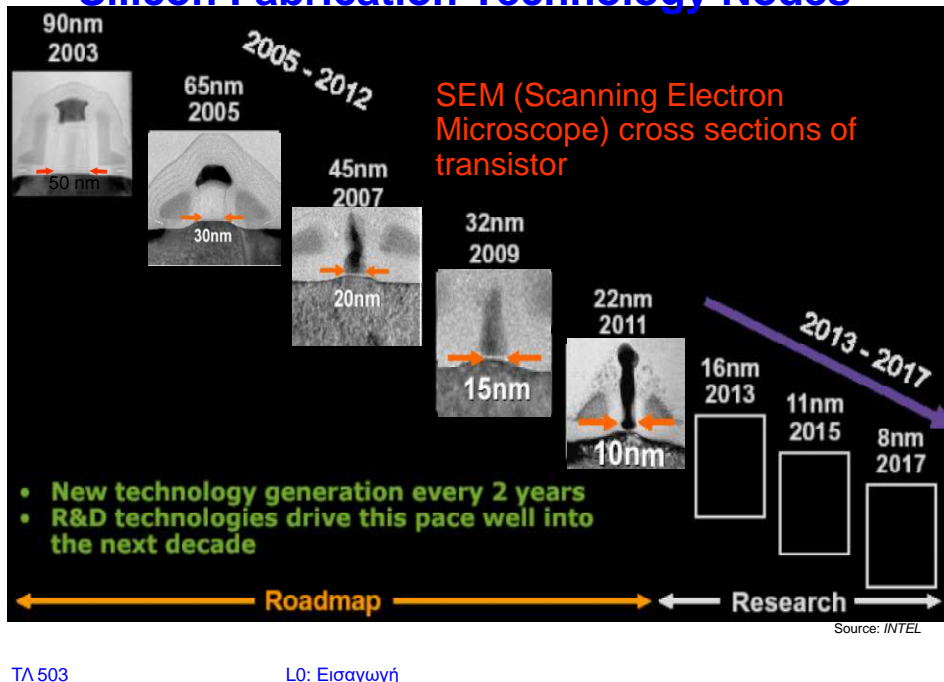
L0: Εισαγωγή

Μέγεθος Τρανζίστορ: Κλιμάκωση των διαστάσεων

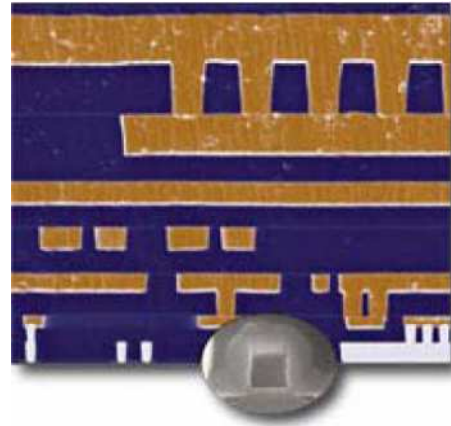
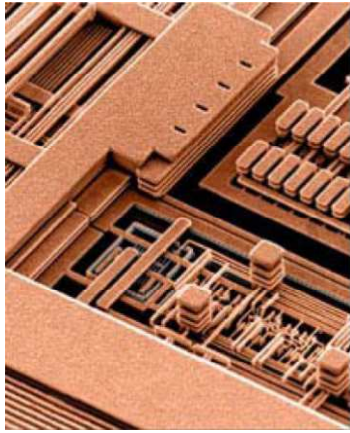


Τα τελευταία 30 χρόνια οι διαστάσεις του τρανζίστορ έχουν μειωθεί κατά δύο τάξεις μεγέθους.

Silicon Fabrication Technology Nodes



Διασυνδέσεις

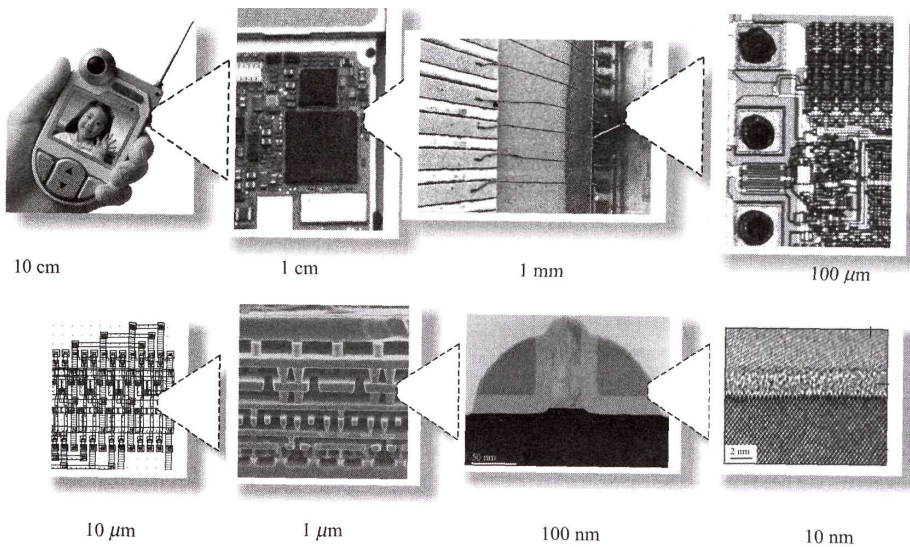


Σήμερα, τα μεταλλικά επίπεδα τα οποία χρησιμοποιούνται για τις διασυνδέσεις περιλαμβάνουν τουλάχιστον 7 στρώματα χαλκού (Cu)

ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα κλίμακας για κάθε δεκάδα μήκους, από 10 cm έως 10 nm



ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Εξέλιξη σημαντικών τεχνολογικών παραμέτρων

Λιθογραφία	Έτος	Μεταλλικά στρώματα	Παροχή πυρήνα (V)	Οξειδίο πυρήνα (nm)	Μέγεθος τσιπ (mm)	Ακροδέκτες Εισόδου/ Εξόδου	Microwind 2 rule file
1.2 μm	1986	2	5.0	25	5 × 5	250	Cmos12.rul
0.7 μm	1988	2	5.0	20	7 × 7	350	Cmos08.rul
0.5 μm	1992	3	3.3	12	10 × 10	600	Cmos06.rul
0.35 μm	1994	5	3.3	7	15 × 15	800	Cmos035.rul
0.25 μm	1996	6	2.5	5	17 × 17	1000	Cmos025.rul
0.18 μm	1998	6	1.8	3	20 × 20	1500	Cmos018.rul
0.12 μm	2001	6–8	1.2	2	22 × 20	1800	Cmos012.rul
90 nm	2003	6–10	1.0	1.8	25 × 20	2000	Cmos90n.rul
65 nm	2005	6–12	0.8	1.6	25 × 20	3000	Cmos65n.rul

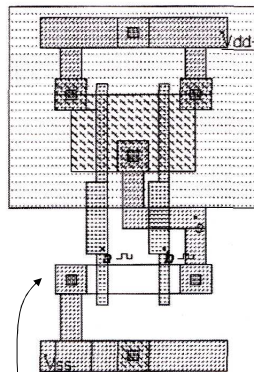
- Αύξηση του αριθμού των στρωμάτων διασύνδεσης → αύξηση πυκνότητας
 - Μείωση της τάσης τροφοδοσίας → μείωση της κατανάλωσης ισχύος
 - Μείωση του πάχους οξειδίου → αύξηση της ταχύτητας
- Προσέξτε επίσης την αύξηση στο μέγεθος του τσιπ & τον αυξανόμενο αριθμό των ακροδεκτών εισόδου/εξόδου

TA 503

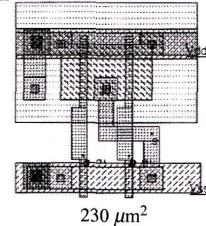
L0: Εισαγωγή

Βελτιώσεις στην απαιτούμενη επιφάνεια πυριτίου

(a) 1.2 μm

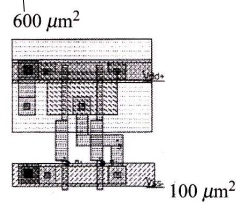


(b) 0.35 μm

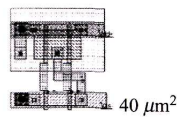


Υλοποίηση της πύλης NAND

(c) 0.12 μm



(d) 90 nm



TA 503

L0: Εισαγωγή

Αυξανόμενη πολυπλοκότητα

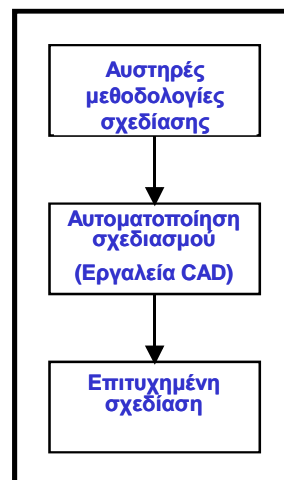
- ❑ Η τεχνολογία μειώνει τις χαρακτηριστικές διαστάσεις κατά ~0.7 ανά παραγωγή
- ❑ Σε κάθε νέα παραγωγή μπορούν να ολοκληρωθούν 2x περισσότερες λειτουργίες πάνω στο τσιπ, το κόστος του τσιπ δεν αυξάνει σημαντικά.
- ❑ Το κόστος ανά λειτουργία μειώνεται κατά 2x
- ❑ **Αλλά ...**
 - Πώς να σχεδιάσουμε τσιπς με όλο και πιο πολλές λειτουργίες;
 - Ο πληθυσμός των μηχανικών σχεδίασης δεν διπλασιάζεται κάθε δύο χρόνια...
- ❑ **Οπότε, απαιτούνται πιο αποδοτικές μέθοδοι σχεδιασμού**
 - Αξιοποίηση των διαφορετικών επιπέδων σχεδιασμού

ΤΛ 503

L0: Εισαγωγή

Πώς αντιμετωπίζεται επιτυχώς η πολυπλοκότητα;

- ❑ Εφαρμόζοντας:
 - Αυστηρές μεθοδολογίες σχεδίασης
 - Αυτοματοποίηση σχεδιασμού



ΤΛ 503

L0: Εισαγωγή

Μεθοδολογία σχεδιασμού Ο.Κ.

- ❑ **Ο παλιός τρόπος-Πριν το 1970**
 - τα ηλεκτρικά κυκλώματα ήταν χειροποίητα
 - Κυκλωματικά διαγράμματα έδειχναν με σύμβολα τα εξαρτήματα που έπρεπε να χρησιμοποιηθούν
 - Οι διασυνδέσεις μεταξύ των εξαρτημάτων ζωγραφίζονταν χρησιμοποιώντας το χέρι .
 - Με όμοιο τρόπο, οι χάλκινες αγώγιμες γραμμές της πλακέτας εικονίζονταν χρησιμοποιώντας χρωματιστά μολύβια, κόκκινο και μπλε, για την απεικόνιση της κορυφής και της βάσης της πλακέτας.
 - Κάθε μορφή ανάλυσης, π.χ. «Σε ποια συχνότητα θα δουλεύει αυτός ο ταλαντωτής αν χρησιμοποιήσω αυτόν τον πυκνωτή και αυτήν την αντίσταση;» έπρεπε να γίνει με μολύβι και χαρτί (ή με μηχανικό υπολογιστή αν ήσουν τυχερός)
 - Εξαιρετικά επιδέξιοι σχεδιαστές απαιτούνταν για να μετατρέψουν το κυκλωματικό διάγραμμα σε φυσικό σχέδιο κυκλώματος.

Εντάξει για μικρά τσιπ, αλλά ο σχεδιασμός εκατομμυρίων τρανζίστορ με αυτόν τον τρόπο είναι αδύνατος

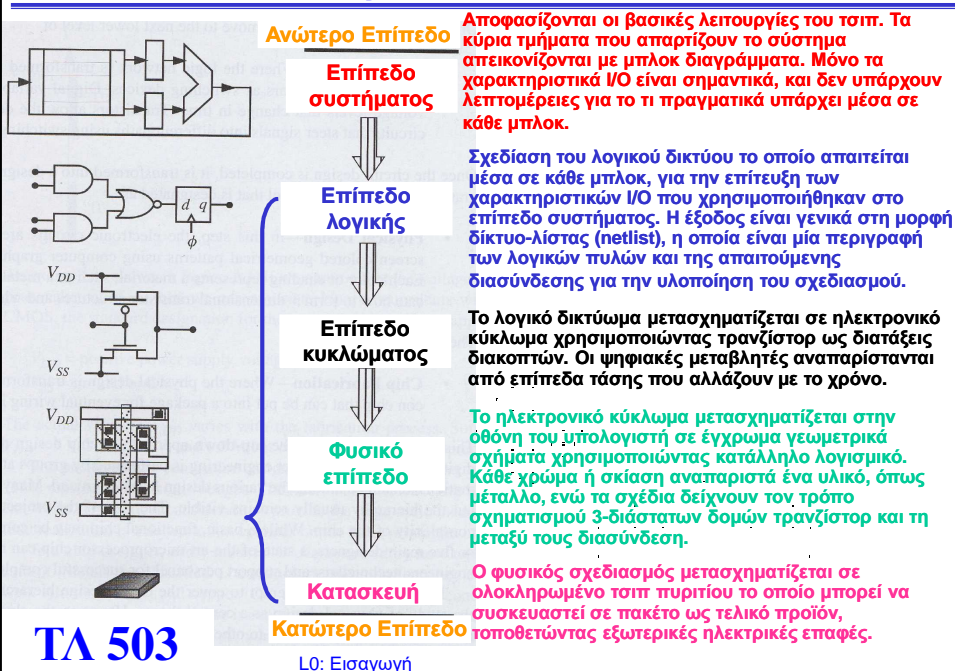
- ❑ **Ο σύγχρονος τρόπος: χρήση εργαλείων CAD στα υψηλά επίπεδα σχεδιασμού**

Ο σχεδιασμός του Chip ομοιάζει αρκετά με το σχεδιασμό λογισμικού

TA 503

L0: Εισαγωγή

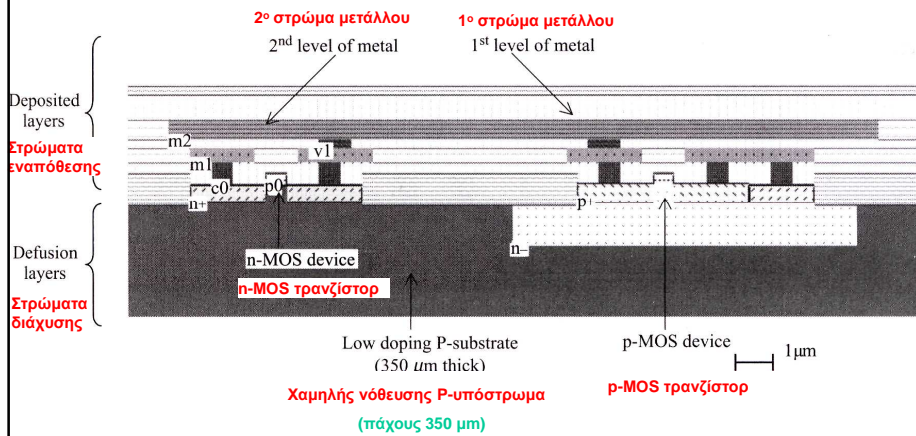
Επίπεδα σχεδίασης



TA 503

L0: Εισαγωγή

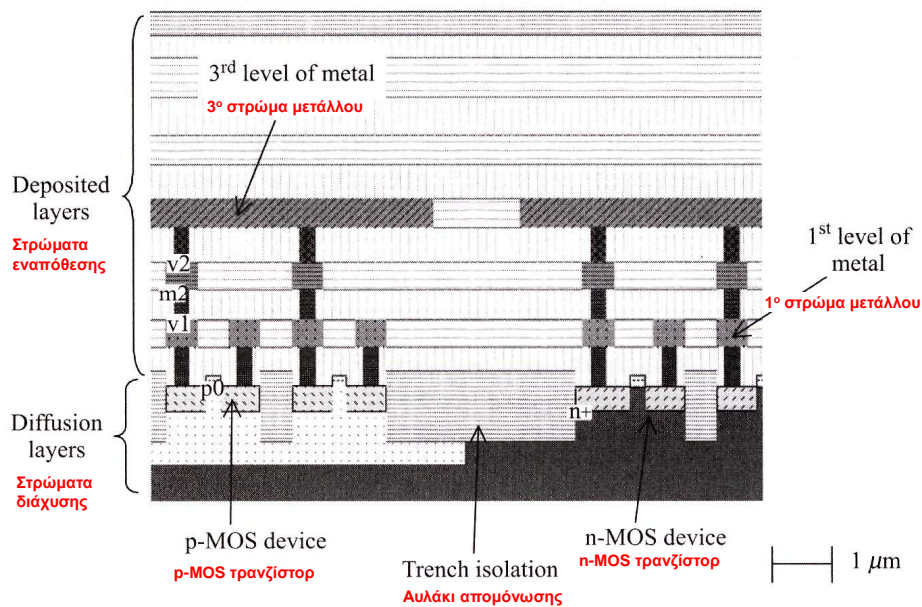
Κάθετη τομή της τεχνολογίας 1,2 μm CMOS



TA 503

L0: Εισαγωγή

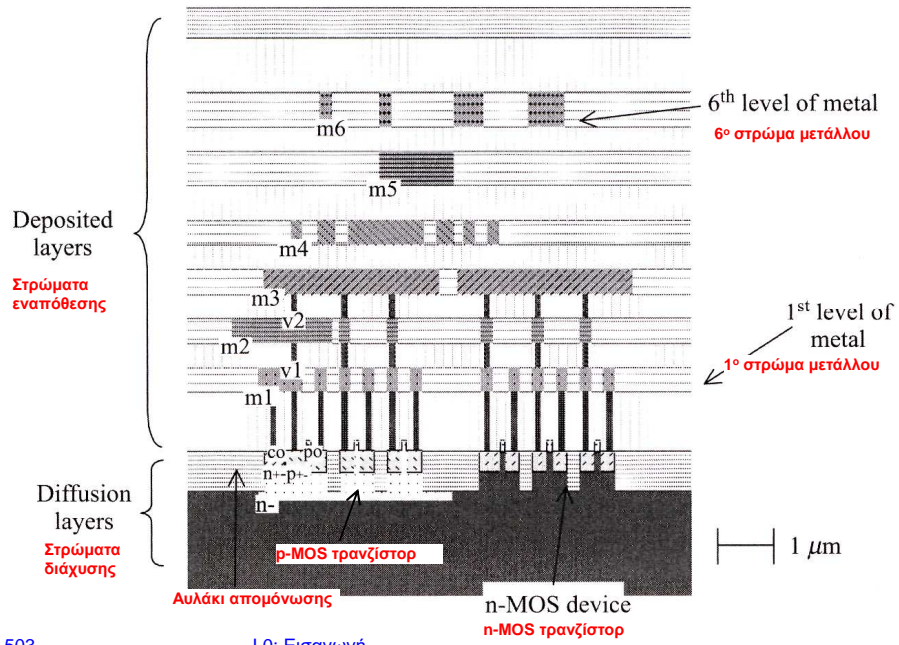
Κάθετη τομή της τεχνολογίας 0,35 μm CMOS



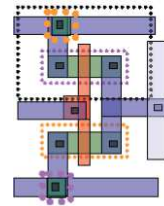
TA 503

L0: Εισαγωγή

Κάθετη τομή της τεχνολογίας 0,12 μm CMOS



Φυσικός Σχεδιασμός



TA 503

L0: Εισαγωγή

Γενική Εποπτεία Φυσικού Σχεδιασμού

- ❑ Ο φυσικός σχεδιασμός ενός τσιπ μπορεί να χαρακτηριστεί σαν το βήμα της διαδικασίας σχεδιασμού κατά το οποίο το ηλεκτρονικό κύκλωμα μεταφέρεται στην επιφάνεια πυριτίου. Ο σχεδιαστής φυσικού σχεδίου είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία της μορφής κάθε στρώματος έτσι ώστε η τελική δομή των διαδοχικών στρωμάτων να ορίζει:
 - Τα στοιχεία των ηλεκτρονικών διακοπών (τρανζίστορ)
 - Τα σύρματα τα οποία συνδέουν τους διακόπτες μεταξύ τους

TA 503

L0: Εισαγωγή

Δουλεία του Μηχανικού Φυσικού Σχεδίου (1/2)

- ❑ Αρχικά, πρέπει να εξετάσει τα στρώματα τα οποία απαρτίζουν ένα τρανζίστορ, και μετά να εξετάσει τα χαρακτηριστικά των αγώγιμων και μονωτικών στρωμάτων.
- ❑ Αυτή η διαδικασία καταλήγει σε ένα σύνολο κανόνων το οποίο βοηθά ώστε να καθοδηγηθεί σωστά το περίπλοκο έργο καθορισμού του κάθε στρώματος σε κάθε τρανζίστορ και μετά του κάθε μεταλλικού σύρματος.
- ❑ Το φυσικό σχέδιο γίνεται εξολοκλήρου με υπολογιστή χρησιμοποιώντας έναν συντάκτη σχεδίου (layout editor). Κάθε στρώμα πάνω στο τσιπ φτιάχνεται έτσι ώστε όλα τα διαδοχικά στρώματα να φτιάχνουν τρισδιάστατες δομές οι οποίες αντιστοιχούν στο ζητούμενο ηλεκτρονικό κύκλωμα

TA 503

L0: Εισαγωγή

Δουλεία του Μηχανικού Φυσικού Σχεδίου (2/2)

- ❑ Ένα κοινό πλέγμα χρησιμοποιείται από την αρχή έως το τέλος της διαδικασίας, και η οθόνη απεικονίζει ολόκληρο το σχέδιο, αλλά η πληροφορία της μορφής του κάθε στρώματος αποθηκεύεται σε μια ξεχωριστή βάση δεδομένων.
- ❑ Τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της μάσκας έτσι ώστε η συγκεκριμένη μορφή του στρώματος να μπορεί να μεταφερθεί πάνω στο τσιπ κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της φωτολιθογραφίας
- ❑ Είναι ευθύνη του σχεδιαστή να διασφαλίσει ότι οι μορφές των στρωμάτων που σχεδιάζει ακολουθούν τους γεωμετρικούς κανόνες που διέπουν την διαδικασία κατασκευής.

TA 503

L0: Εισαγωγή

Φυσικό σχέδιο (Layout)

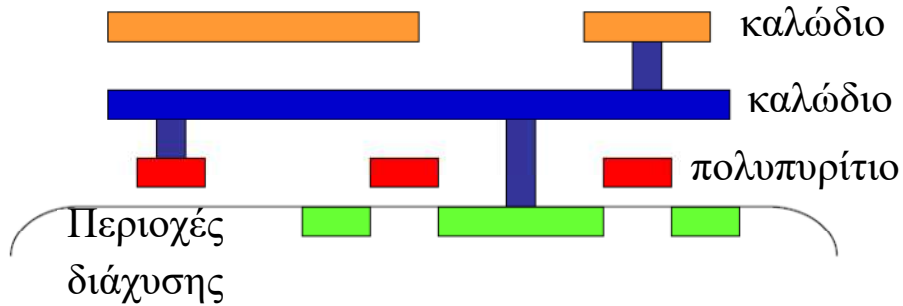
- ❑ **Layout = Προδιαγραφές κατασκευής**
- ❑ **Σύνολο σχεδίων για την κατασκευή των μασκών λιθογραφίας (ένα σχέδιο για κάθε στρώμα)**
 - Σχεδιαστικοί κανόνες (design rules) για αξιόπιστη κατασκευή
 - Κάθε στρώμα αναπαρίσταται με ένα ξεχωριστό χρώμα
 - Χρησιμοποίηση εργαλείων CAD

TA 503

L0: Εισαγωγή

Φυσική τοπολογία

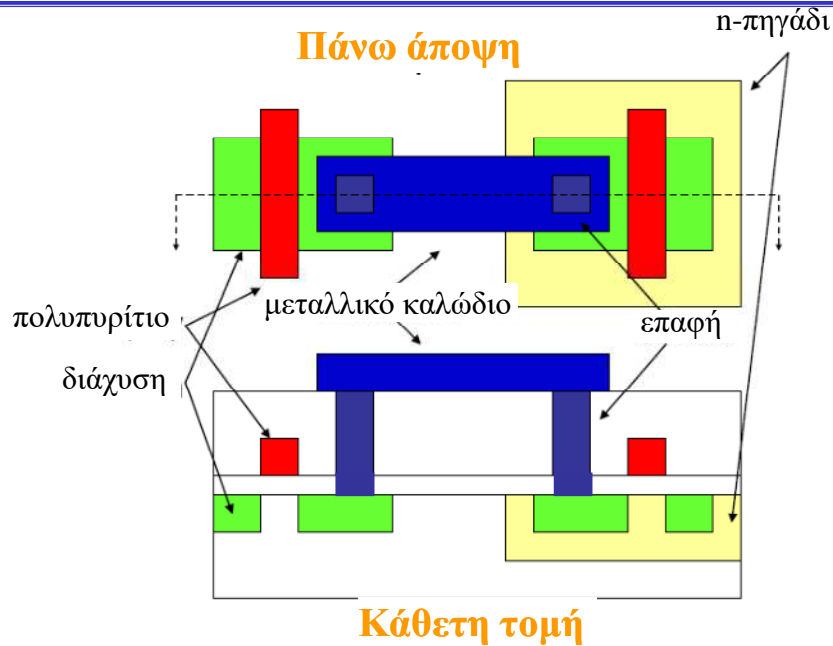
- Τα τρανζίστορ κατασκευάζονται μέσα στο πυρίτιο
- Τα καλώδια πάνω σε μεταλλικά στρώματα τα οποία απομονώνονται μεταξύ τους
 - Τα καλώδια συνδέουν τα τρανζίστορ μεταξύ τους



ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή

Μία άλλη άποψη



ΤΑ 503

L0: Εισαγωγή