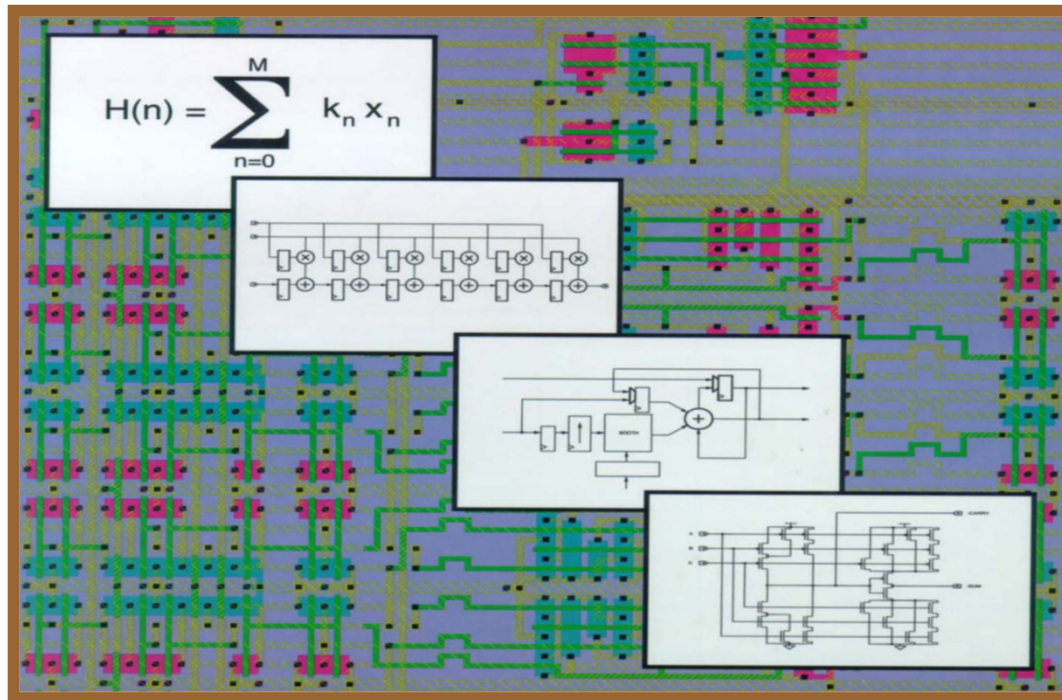


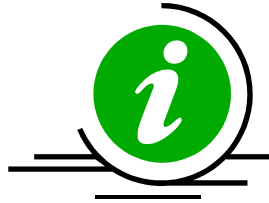
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΟΛΥ ΜΕΓΑΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ (VLSI)



Λάμπρος Μπισδούνης
Καθηγητής



Διδάσκων και διδασκαλία του μαθήματος



- Διδάσκων: Λάμπρος Μπισδούνης



- Γραφείο: Εργαστήριο Ηλεκτρονικών, 1^{ος} όροφος κτηρίου Α1



- Τηλέφωνο: 2610 369293

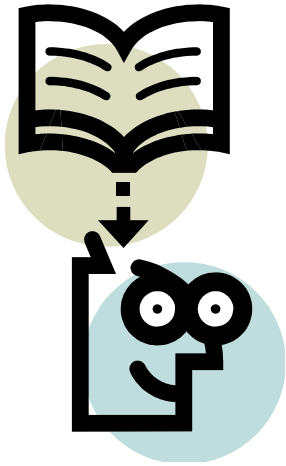
- E-mail: bisdounis@uop.gr



- Διδασκαλία μαθήματος:

Τρίτη, 09:00 – 13:00, αίθουσα ΨΗΦ

Βιβλία και αξιολόγηση μαθήματος



J. M. Rabaey, A. Chandrakasan, B. Nikolic, **Ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα: Μια σχεδιαστική προσέγγιση**, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2006.

H. N. Weste, D. M. Harris, **Σχεδίαση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων CMOS VLSI**, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2011.

S. Kang, Y. Leblebici, **Ανάλυση και σχεδίαση ψηφιακών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων CMOS**, Εκδόσεις Τζιόλα, 2007.

Το μάθημα αξιολογείται με **τελική γραπτή εξέταση**.

Πρόσθετο διδακτικό υλικό



- Ιστοσελίδα του μαθήματος:
<https://eclass.uop.gr/courses/694>
- Οι διαλέξεις παρέχονται σε μορφή παρουσιάσεων και περιλαμβάνουν **στοιχεία θεωρίας** και **λυμένα παραδείγματα**.
- Όλο το υλικό των διαλέξεων θα αναρτάται στην ιστοσελίδα του μαθήματος, στην οποία η πρόσβαση είναι ελεύθερη.
- Στην ίδια ιστοσελίδα αναρτάται πρόσθετο υλικό με τη μορφή βίντεο και συνδέσμων κ.ά.



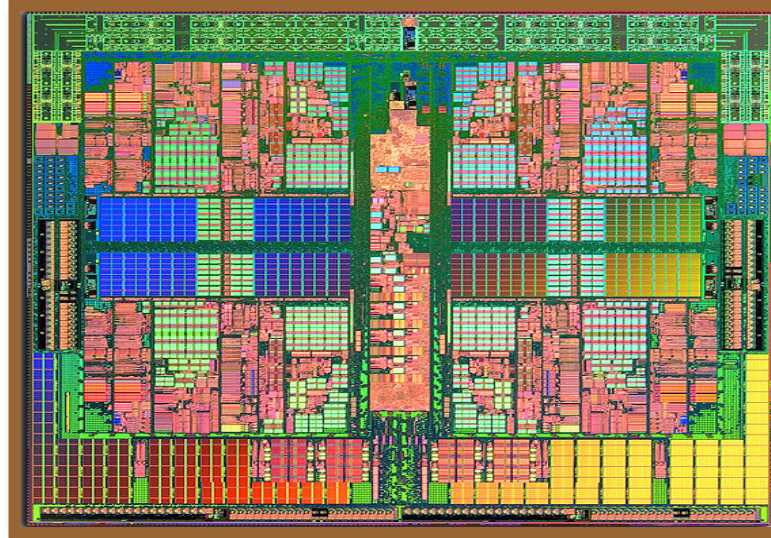
Στόχοι του μαθήματος

- Η τεχνολογία κατασκευής και σχεδιασμού ολοκληρωμένων κυκλωμάτων παρουσιάζει αλματώδη ρυθμό εξέλιξης.
- Οι διαστάσεις των στοιχείων είναι πλέον μικρότερες των 50nm και τα κυκλώματα γίνονται πιο σύνθετα, γεγονότα που αποτελούν προκλήσεις για τους κατασκευαστές και τους σχεδιαστές κυκλωμάτων και συστημάτων VLSI.
- Το μάθημα επικεντρώνεται στην τεχνολογία CMOS (complementary metal-oxide-silicon) και περιλαμβάνει απαραίτητες γνώσεις για το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία στοιχείων και κυκλωμάτων που βασίζονται στην τεχνολογία αυτή.
- Βασικοί **στόχοι του μαθήματος** είναι η εισαγωγή στα κυκλώματα και συστήματα VLSI, η περιγραφή και κατανόηση των διαδικασιών κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, η κατανόηση της λειτουργίας των βασικών στοιχείων που απαρτίζουν τα ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα, καθώς και των παραμέτρων που επηρεάζουν την επίδοσή τους, η εξοικείωση με τη σχεδίαση λογικών πυλών και σύνθετων ψηφιακών κυκλωμάτων (συνδυαστικών και ακολουθιακών) και η κατανόηση των μεθοδολογιών σχεδιασμού και υλοποίησης των ψηφιακών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και συστημάτων.

Ενότητες του μαθήματος

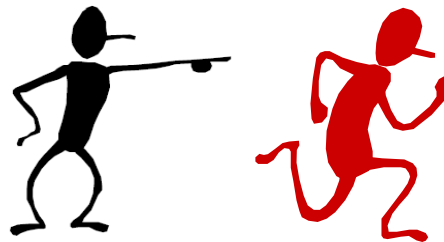
Οι ενότητες που θα μελετηθούν στα πλαίσια του μαθήματος είναι οι ακόλουθες:

1. Εισαγωγή στα κυκλώματα και συστήματα VLSI
2. Διεργασία κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων
3. Τρανζίστορ MOSFET
4. Αντιστροφέας CMOS και διασυνδέσεις κυκλωμάτων CMOS
5. Συνδυαστικά κυκλώματα CMOS
6. Ακολουθιακά κυκλώματα CMOS
7. Μεθοδολογίες σχεδιασμού και υλοποίησης ψηφιακών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων



1^η ενότητα:

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ VLSI



Περιεχόμενα 1^{ης} ενότητας

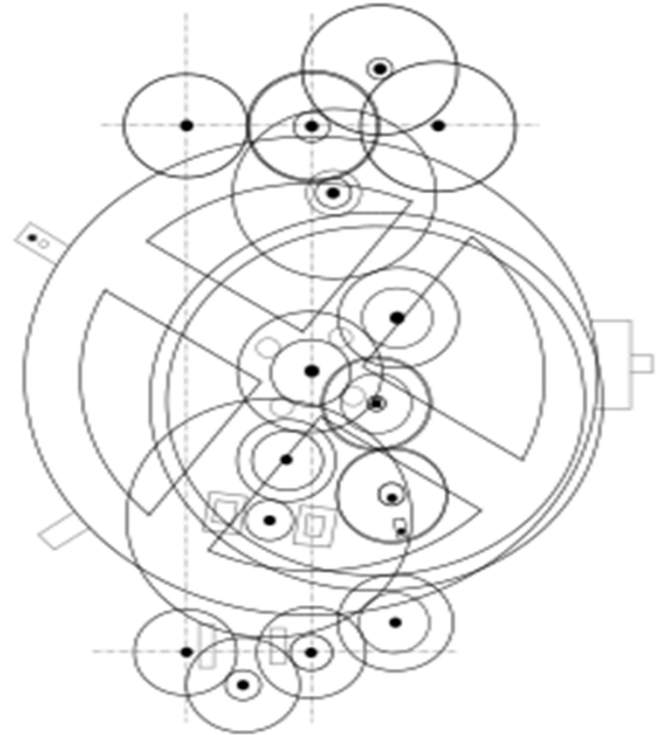
- Ιστορική αναδρομή
- Ολοκληρωμένα κυκλώματα (Ο.Κ.) και μικροεπεξεργαστές
- Νόμος Moore, εξέλιξη πολυπλοκότητας, συχνότητας, κατανάλωσης ενέργειας των Ο.Κ.
- Ιεραρχικός σχεδιασμός Ο.Κ.
- Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Ο.Κ.
- Μέτρα ποιότητας ψηφιακών κυκλωμάτων
- Κόστος και απόδοση (yield) κατασκευής Ο.Κ.
- Λειτουργικότητα και στιβαρότητα (ψηφιακή λογική, χαρακτηριστική μεταφοράς, περιθώρια θορύβου, αναγεννητική ιδιότητα, φόρτος εισόδου και εξόδου)
- Συχνότητα λειτουργίας και καθυστέρηση διάδοσης
- Ισχύς και κατανάλωση ενέργειας
- Γινόμενο ενέργειας – καθυστέρησης διάδοσης

Ιστορική αναδρομή

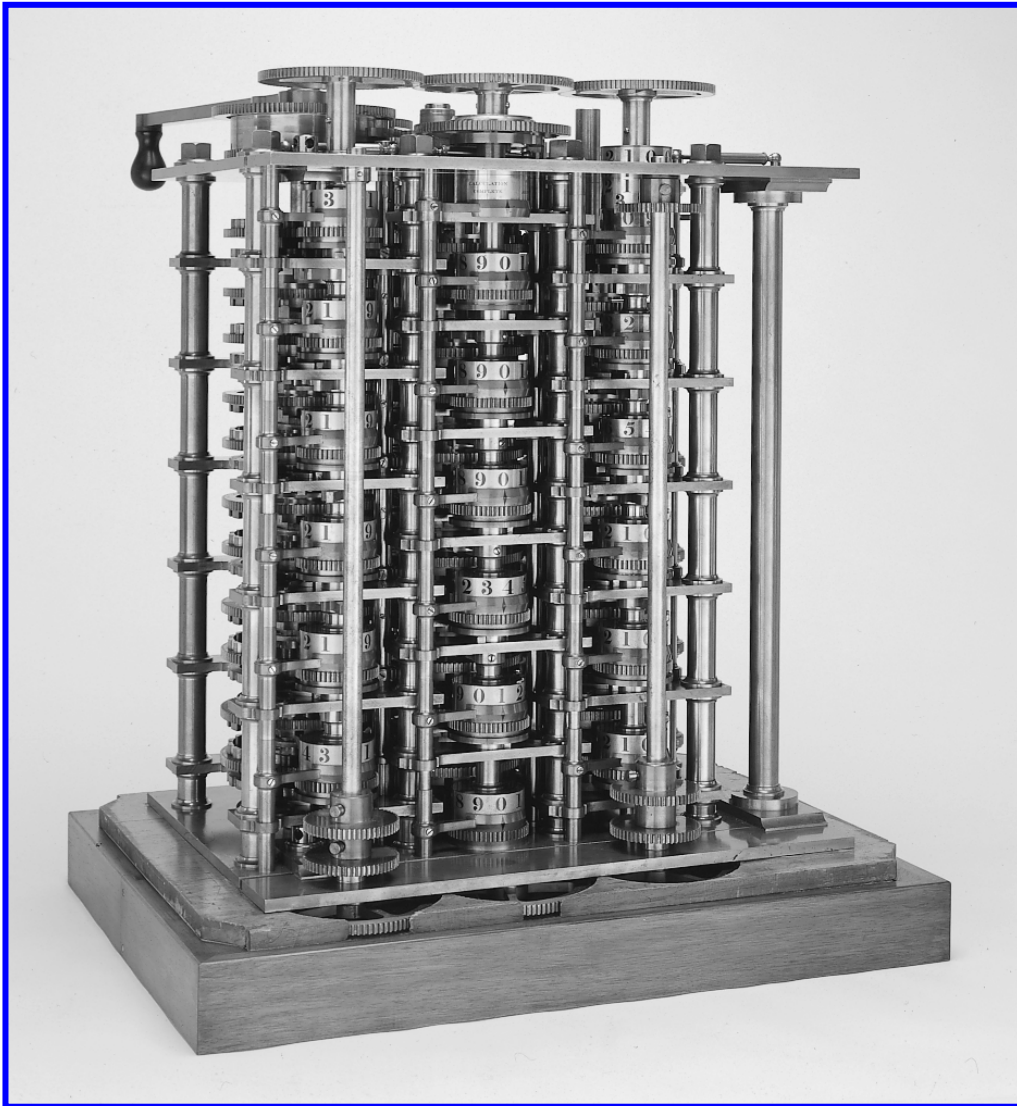
- Η βασική ιδέα της υλοποίησης των υπολογιστικών μηχανών αναπτύχθηκε στις αρχές του 19ου αιώνα και αρχικά ο σχεδιασμός και η κατασκευή τους βασίστηκαν σε μηχανικά μέρη.
- Ωστόσο, η ηλεκτρική λύση αποδείχθηκε οικονομικά πιο αποδοτική.
- Τα αρχικά ηλεκτρονικά υπολογιστικά συστήματα βασίζονταν στους μαγνητικά ελεγχόμενους διακόπτες (**ρελέ**) και χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στην υλοποίηση πολύ απλών κυκλωμάτων.
- Η εποχή του ψηφιακού ηλεκτρονικού υπολογισμού άρχισε με την εισαγωγή της **λυχνίας κενού**, αλλά γρήγορα έγινε σαφές ότι η τεχνολογία αυτή ήταν ασύμφορη (μεγάλο πλήθος λυχνιών και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας) και δεν παρείχε αξιοπιστία.
- Όλα άλλαξαν στα μέσα του 20ου αιώνα με την ανακάλυψη του **τρανζίστορ διπολικής επαφής** και την σύλληψη της ιδέας του ολοκληρωμένου κυκλώματος, στο οποίο όλα τα στοιχεία ενσωματώνονται σε ένα υπόστρωμα ημιαγωγού.
- Τελικά, η διπολική ψηφιακή λογική έχασε τη μάχη για την ηγεμονία στον κόσμο του ψηφιακού σχεδιασμού με την εμφάνιση των **MOSFETs** τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης περισσότερων στοιχείων σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα και καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια.
- Η δεύτερη εποχή της επανάστασης των **ολοκληρωμένων κυκλωμάτων** εγκαινιάστηκε με την εμφάνιση των πρώτων **μικροεπεξεργαστών** στις αρχές της δεκαετίας του 1970.

Μηχανισμός αντικυθήρων

- Μηχανικός υπολογιστής για αστρονομικές παρατηρήσεις που παρουσιάζει ομοιότητες με ωρολογιακό μηχανισμό και έδινε (κατά την επικρατέστερη σύγχρονη άποψη), τη θέση του ήλιου και της σελήνης καθώς και τις φάσεις της.
- Χρονολογείται μεταξύ του 150 και 100 π.Χ. και ανακαλύφθηκε σε ναυάγιο το 1900.

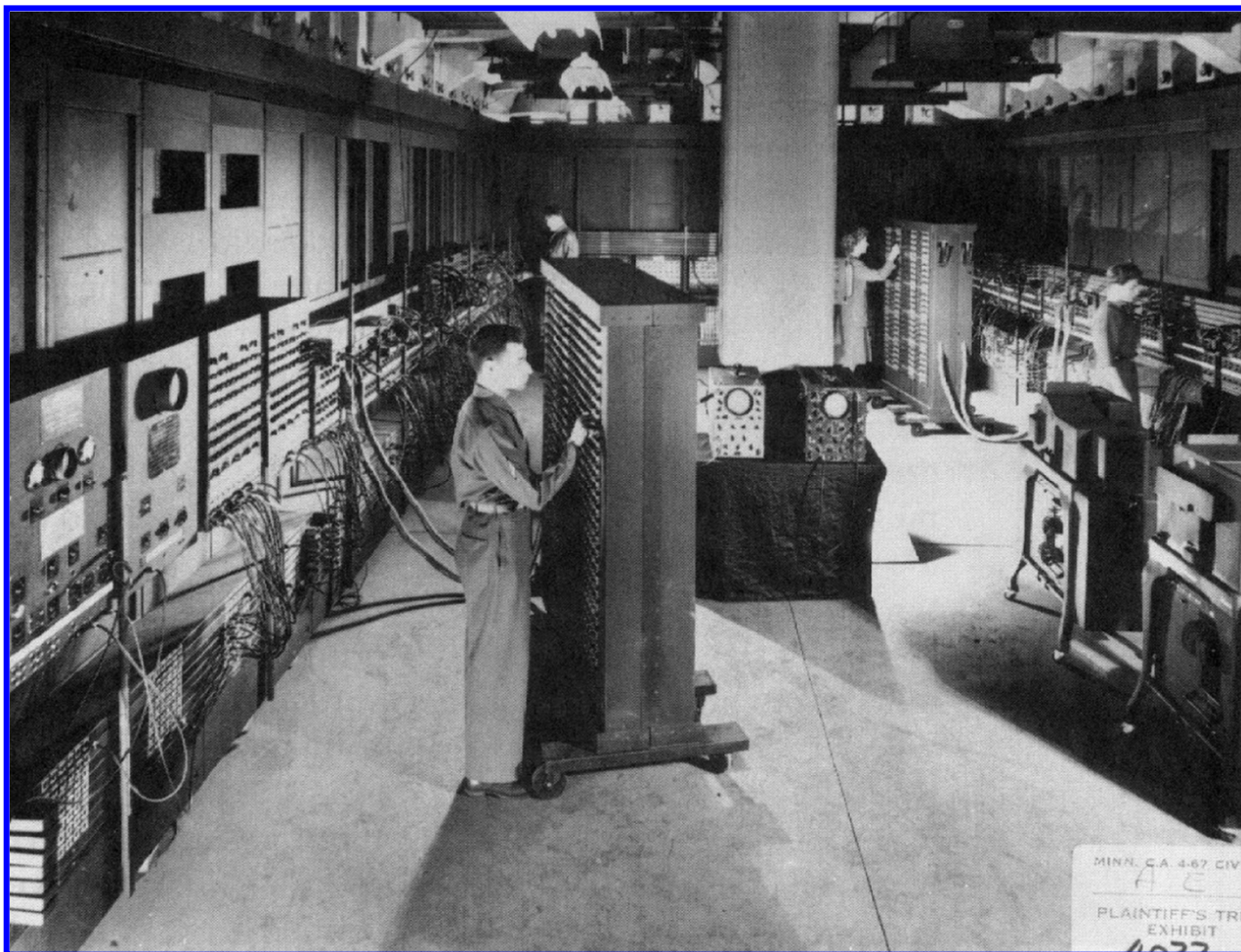


Ο πρώτος υπολογιστής (1834)



- Διαφορική μηχανή του Babbage
- 25000 μηχανικά μέρη
- Κόστος 17500 £
- Χρησιμοποιούσε το δεκαδικό σύστημα αρίθμησης και όχι το δυαδικό που χρησιμοποιείται στη σύγχρονη ηλεκτρονική.
- Γενικής χρήσης υπολογιστική μηχανή για την εκτέλεση των 4 βασικών πράξεων σε δύο κύκλους (επεξεργασία, αποθήκευση).

Ο πρώτος ηλεκτρονικός υπολογιστής (1946)



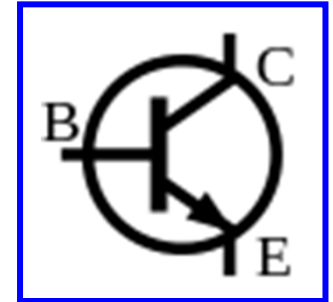
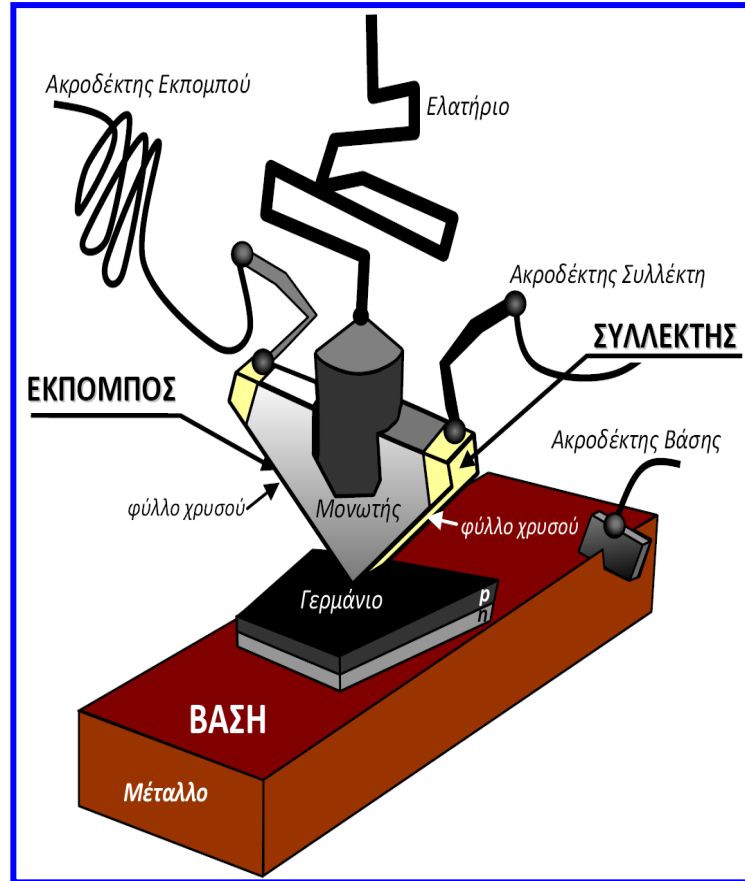
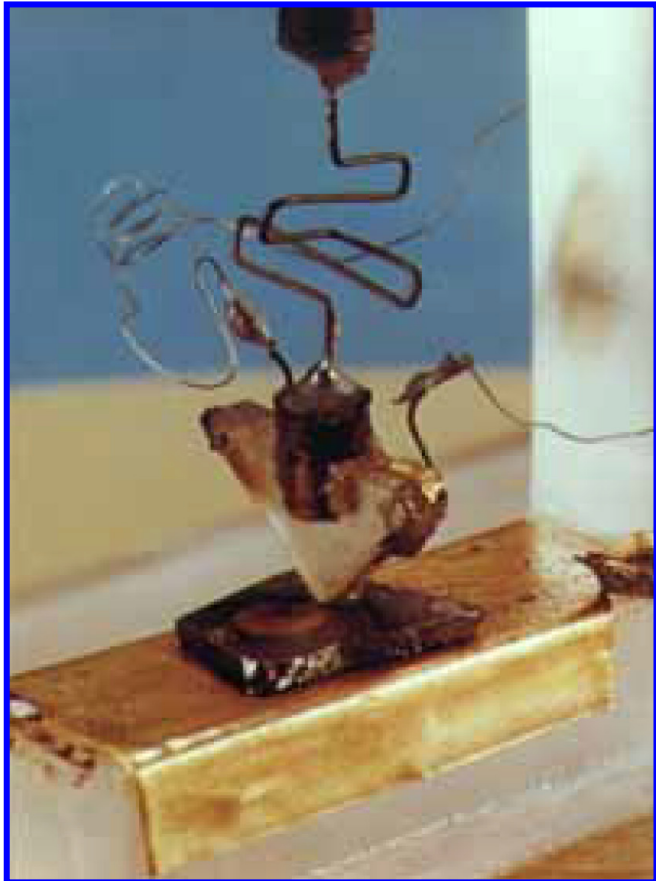
- ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer)
- 20000 λυχνίες
- 7200 κρυσταλοδιόδους
- 1500 διακόπτες
- 70000 αντιστάσεις
- 10000 πυκνωτές
- 200 KW
- 167 m²
- Χρησιμοποιήθηκε για τη σχεδίαση της ατομικής βόμβας....

Ο πρώτος εμπορικός ηλεκτρονικός υπολογιστής (1951)

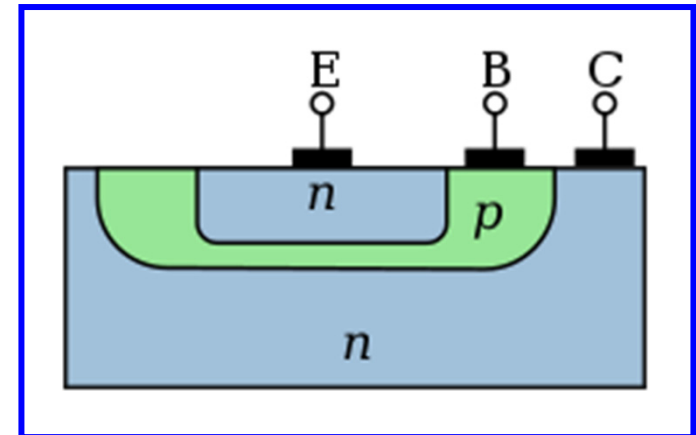
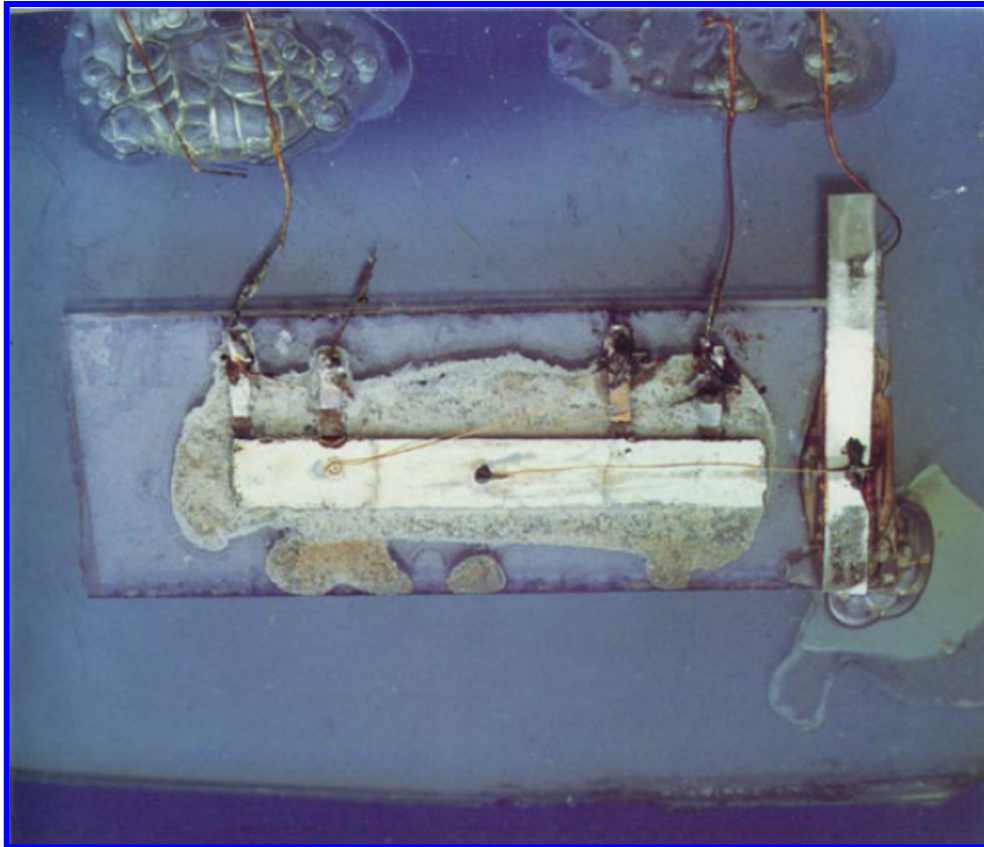


- UNIVAC I (UNIVERSal Automatic Computer I)
- Ο πρώτος εμπορικός υπολογιστής γενικού σκοπού.
- Υλοποιήθηκαν 48 τέτοια συστήματα με κόστος 1 εκατ. \$ το καθένα.
- Χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη του αποτελέσματος των Αμερικανικών εκλογών του 1952.

Το πρώτο τρανζίστορ (1947)



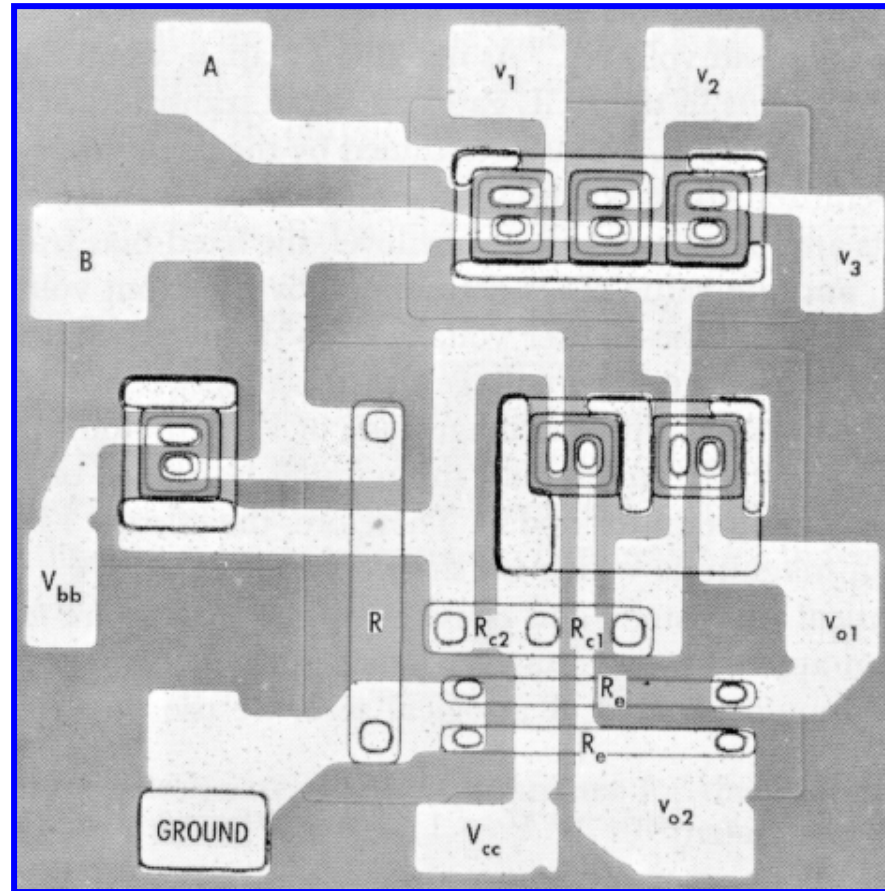
Το πρώτο επίπεδο (planar) τρανζίστορ (1958)



Το πρώτο τρανζίστορ (Fairchild) που βασιζόταν σε διάχυση του εκπομπού και της βάσης σε υπόστρωμα ημιαγωγού (γερμανίου) και αποτέλεσε βασικό βήμα για την κατασκευή μονολοθικών (ολοκληρωμένων) κυκλωμάτων

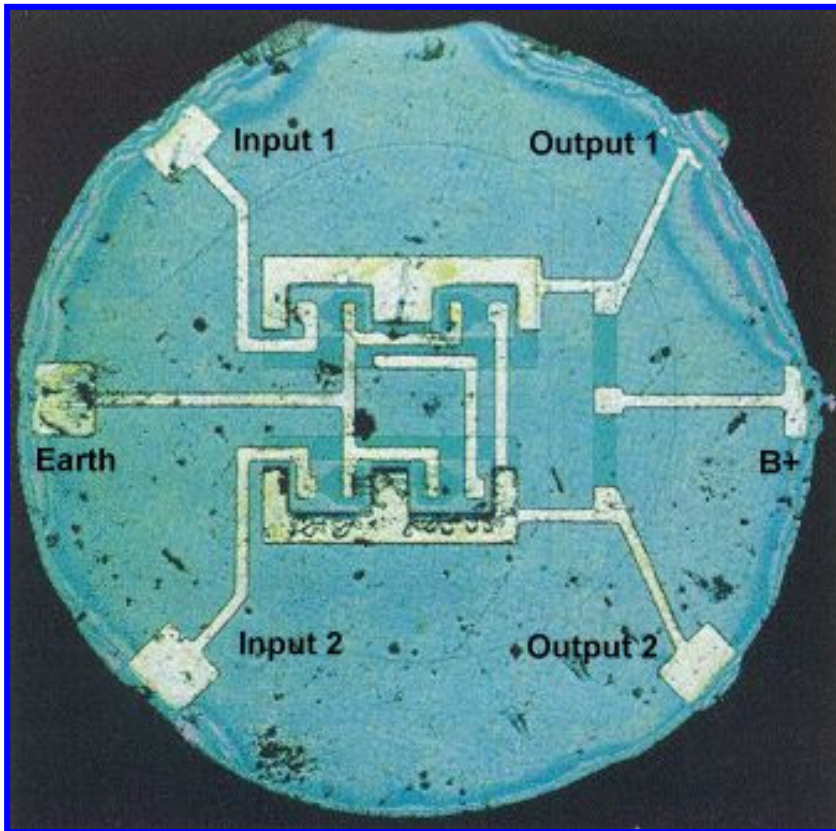
Τα πρώτα ολοκληρωμένα κυκλώματα (1960)

Πύλη διπολικής λογικής με τρεις εισόδους (Motorola)

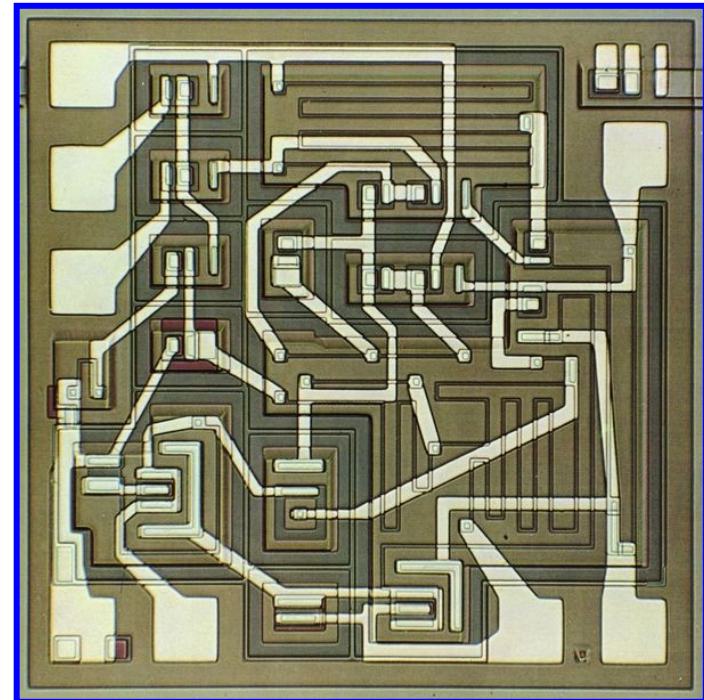


Τα πρώτα ολοκληρωμένα κυκλώματα (1961, 1963)

RS flip-flop (Fairchild) με 4 τρανζίστορ και 5 αντιστάσεις

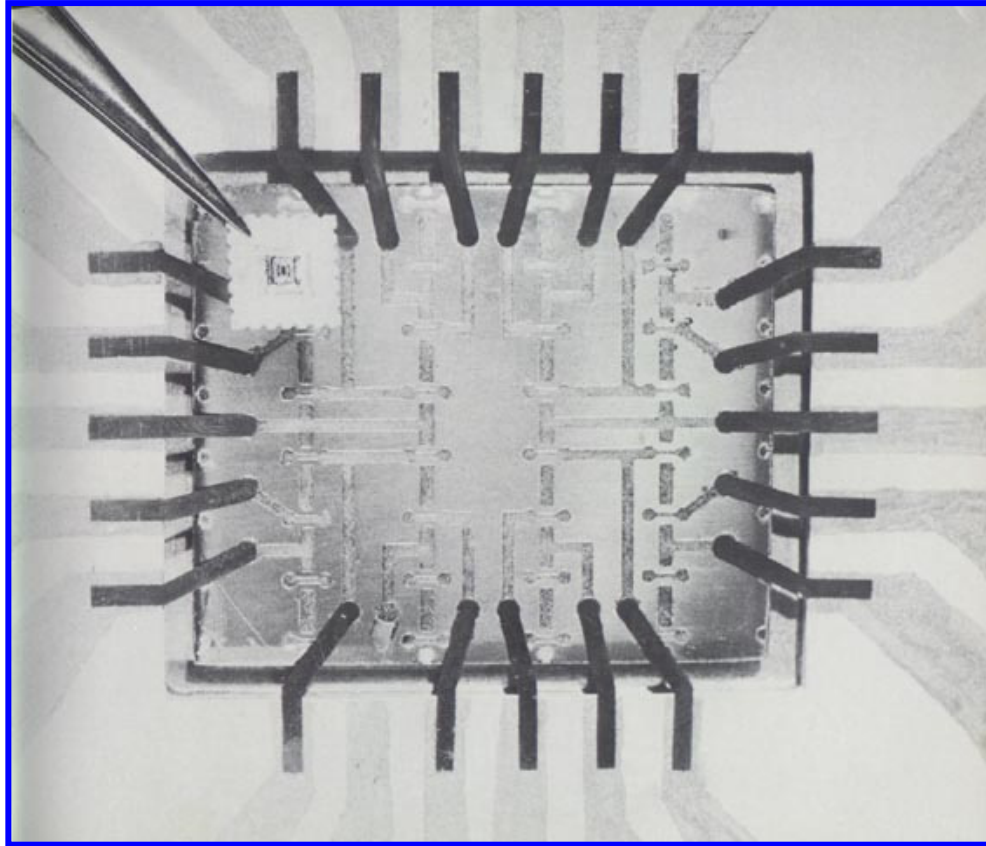


Ο πρώτος μονολιθικός τελεστικός ενισχυτής (Fairchild)



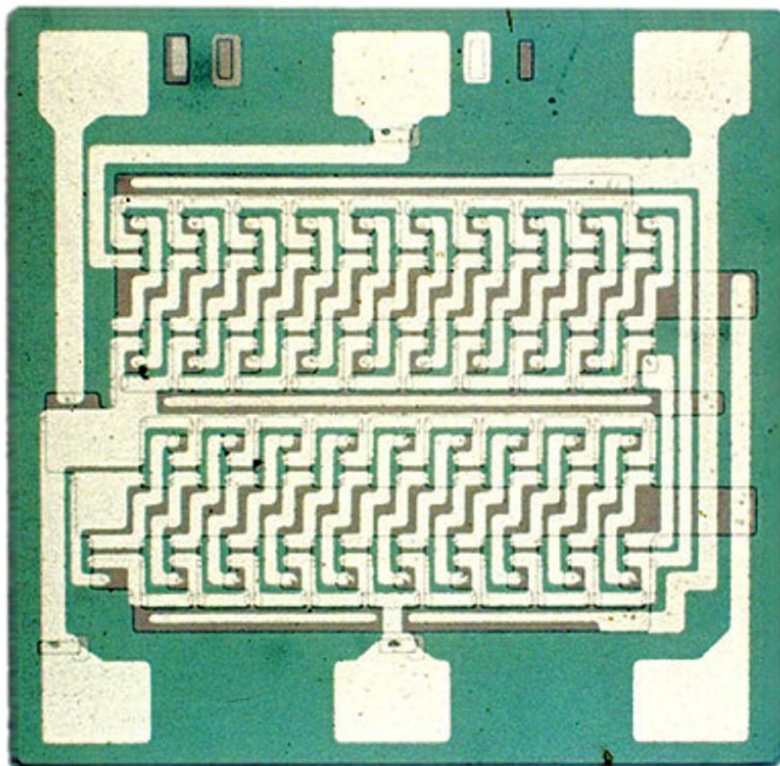
Το πρώτο ολοκληρωμένο κύκλωμα με MOSFETs (1962)

Πειραματικό κύκλωμα με 16 MOSFETs (RCA)

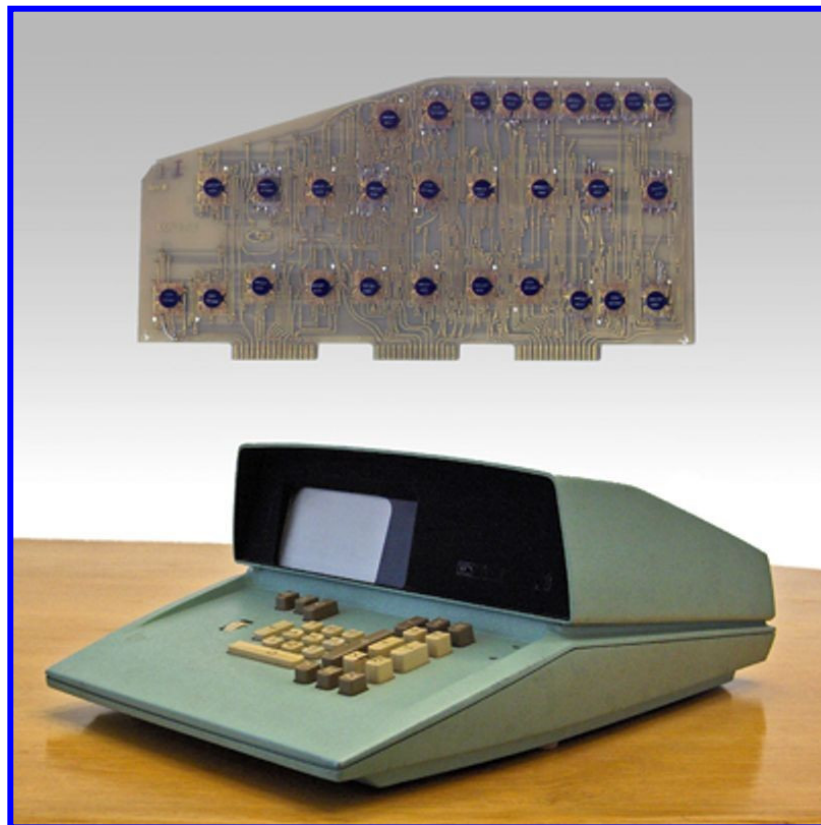


Τα πρώτα εμπορικά Ο.Κ. με MOSFETs (1964, 1965)

Το πρώτο εμπορικό ολοκληρωμένο κύκλωμα με MOSFETs: καταχωρητής ολίσθησης των 20-bit με 120 τρανζίστορ PMOS (General Microelectronics)

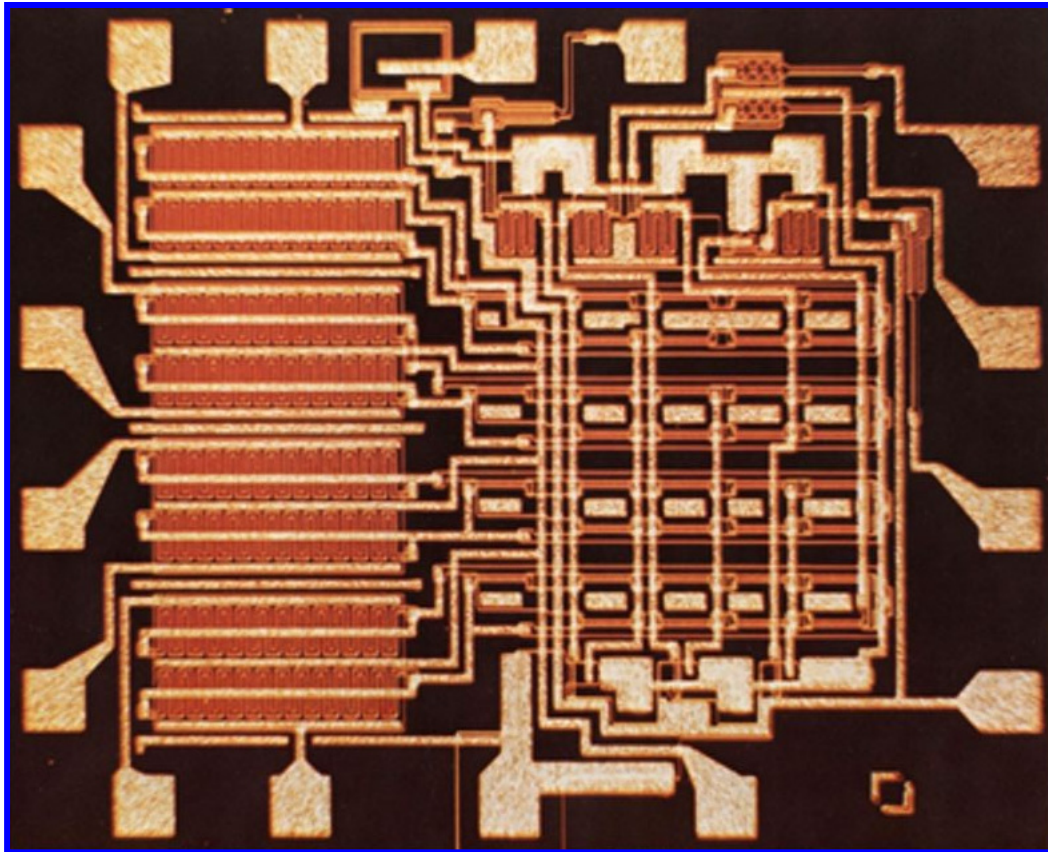


Η πρώτη ηλεκτρονική αριθμομηχανή με MOSFETs (Victor Comptometer) με 20 ολοκληρωμένα κυκλώματα και σειριακή μνήμη με 6 καταχωρητές ολίσθησης των 100-bit (General Microelectronics)



Το 1ο εμπορικό Ο.Κ. με MOSFETs πύλης πυριτίου (1968)

Ολοκληρωμένο κύκλωμα αναλογικού πολυπλέκτη 8 καναλιών με MOSFETs, με πύλη από πολυκρυσταλικό πυρίτιο (Fairchild). Στην τεχνολογία αυτή (silicon gate technology, SGT), βασίζονται οι σύγχρονες τεχνολογίες κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



Τα πρώτα ολοκληρωμένα κυκλώματα που βασίζονταν σε MOSFETs, υλοποιήθηκαν με τρανζίστορ PMOS, ενώ οι πρώτοι μικροεπεξεργαστές υλοποιήθηκαν μόνο με NMOS (υψηλότερη ταχύτητα). Προς το τέλος της δεκαετίας του 1970, η λογική NMOS εγκαταλείφθηκε κυρίως λόγω της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας. Αυτό σε συνδυασμό με την πρόοδο στην τεχνολογία κατασκευής, οδήγησε στη χρήση της **τεχνολογίας CMOS** (συμπληρωματική χρήση NMOS και PMOS), η οποία παραμένει μέχρι σήμερα

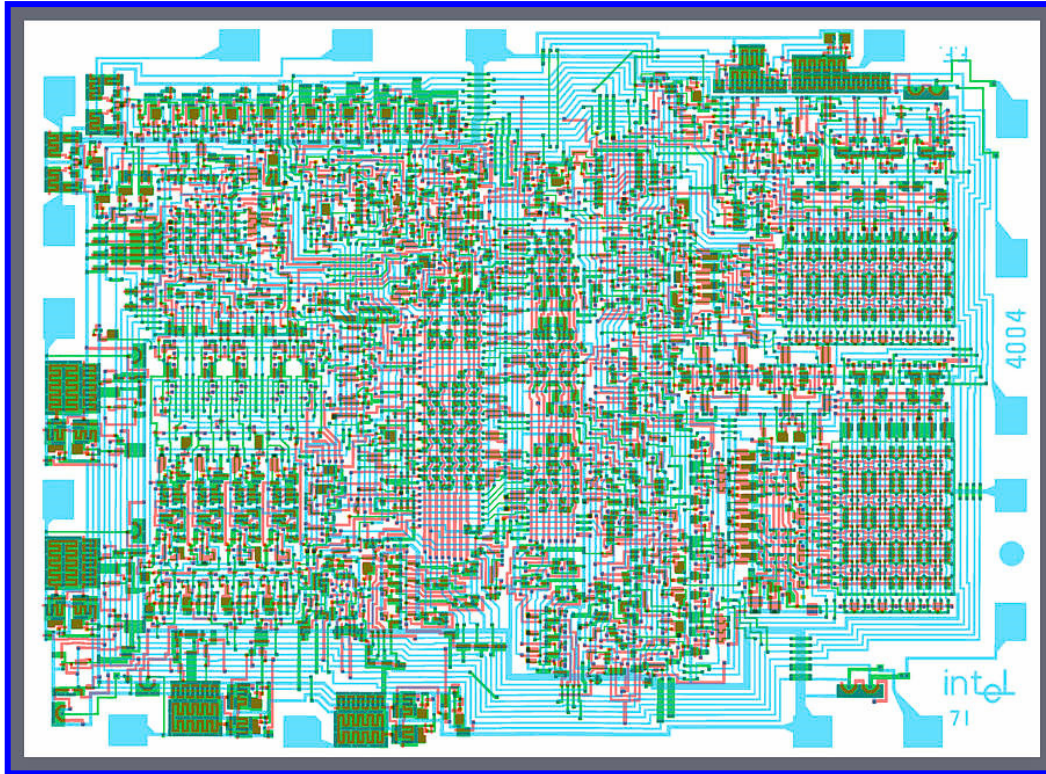
Κατηγορίες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα διακρίνονται σε κατηγορίες, ανάλογα με το πλήθος των τρανζίστορς που περιλαμβάνουν:
 - ✓ κυκλώματα **μικρής κλίμακας ολοκλήρωσης (small scale integration, SSI)**, που περιλαμβάνουν μερικά μόνο τρανζίστορς,
 - ✓ κυκλώματα **μεσαίας κλίμακας ολοκλήρωσης (medium scale integration, MSI)**, που περιλαμβάνουν από μερικές δεκάδες μέχρι εκατοντάδες τρανζίστορς.
 - ✓ κυκλώματα **μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης (large scale integration, LSI)**, που περιλαμβάνουν από μερικές εκατοντάδες έως μερικές χιλιάδες τρανζίστορς,
 - ✓ κυκλώματα **πολύ μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης (very large scale integration, VLSI)**, που περιλαμβάνουν από μερικές χιλιάδες έως εκατοντάδες χιλιάδες τρανζίστορς και
 - ✓ κυκλώματα **πάρα πολύ μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης (ultra large scale integration, ULSI)**, που περιλαμβάνουν πάνω από ένα εκατομμύριο τρανζίστορς.
- Καθώς ο αριθμός των τρανζίστορς που περικλείονται σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα, έχει γίνει τρομακτικά μεγάλος, έχουν αναπτυχθεί **εργαλεία σχεδιασμού με υπολογιστή (computer-aided design)** και έχει **αυτοματοποιηθεί η κατασκευή** των κυκλωμάτων.

Μικροεπεξεργαστές

- Το αποτέλεσμα της εμφάνισης της τεχνολογίας ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ήταν η ενσωμάτωση σε ένα μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα όλης της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας ενός υπολογιστικού συστήματος, δηλαδή οι μικροεπεξεργαστές.
- Οι μικροεπεξεργαστές υποστηρίζονται από διάφορα είδη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, όπως κυκλώματα μνήμης (εκτός των μνημών που ενσωματώνονται στους μικροεπεξεργαστές), κυκλώματα διασύνδεσης με τις υπόλοιπες μονάδες του υπολογιστικού συστήματος, κυκλώματα χρονισμού κ.ά.
- Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων τις τελευταίες δεκαετίες έδωσε τη δυνατότητα ενσωμάτωσης σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα όλο και πιο πολύπλοκων κυκλωμάτων.
- Ξεκινώντας από τους μικροεπεξεργαστές της δεκαετίας του 1970 που περιλάμβαναν μερικές χιλιάδες τρανζίστορς έχουμε φτάσει σήμερα σε μικροεπεξεργαστές που περιλαμβάνουν μερικά δισεκατομμύρια τρανζίστορς.
- Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ταχύτερη ανάπτυξη των μικροεπεξεργαστών και την μεγάλη αύξηση της χρήσης τους τόσο σε πολύπλοκες υπολογιστικές μηχανές, όσο και σε συστήματα καθημερινής χρήσης (προσωπικούς και φορητούς υπολογιστές, ταμπλέτες, έξυπνα κινητά τηλέφωνα, ηλεκτρονικές συσκευές διασκέδασης κ.ά.).

Μικροεπεξεργαστής Intel 4004 (1971)



Τεχνολογία κατασκευής: 10 μm ,
NMOS

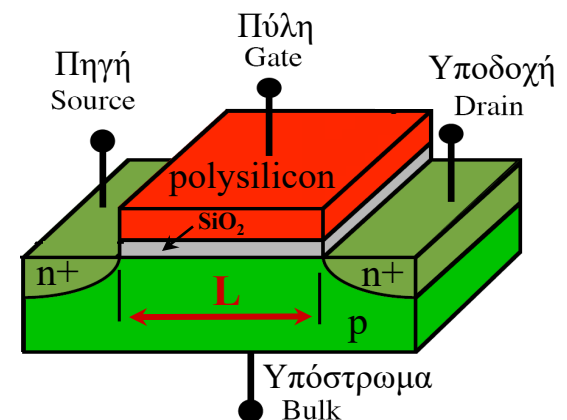
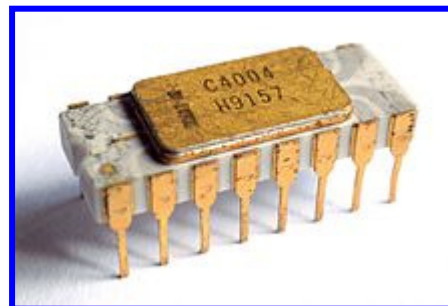
Επιφάνεια: 12 mm^2

Πλήθος τρανζιστορς: 2300

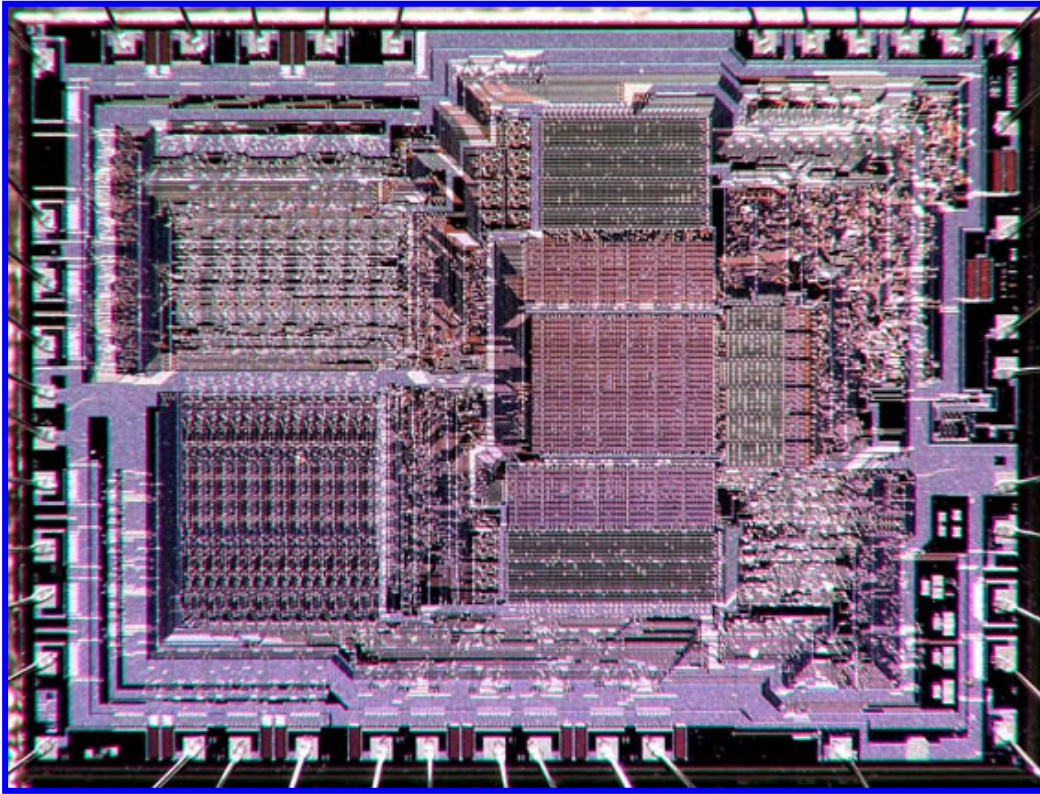
Συχνότητα λειτουργίας: 108 KHz

Η τεχνολογία κατασκευής αναφέρεται στο ελάχιστο μήκος καναλιού (L) ενός τρανζιστορ

Ένας από τους πρώτους εμπορικούς μικροεπεξεργαστές



Μικροεπεξεργαστής Intel 8085 (1976)



Τεχνολογία κατασκευής: 3 μm ,
NMOS

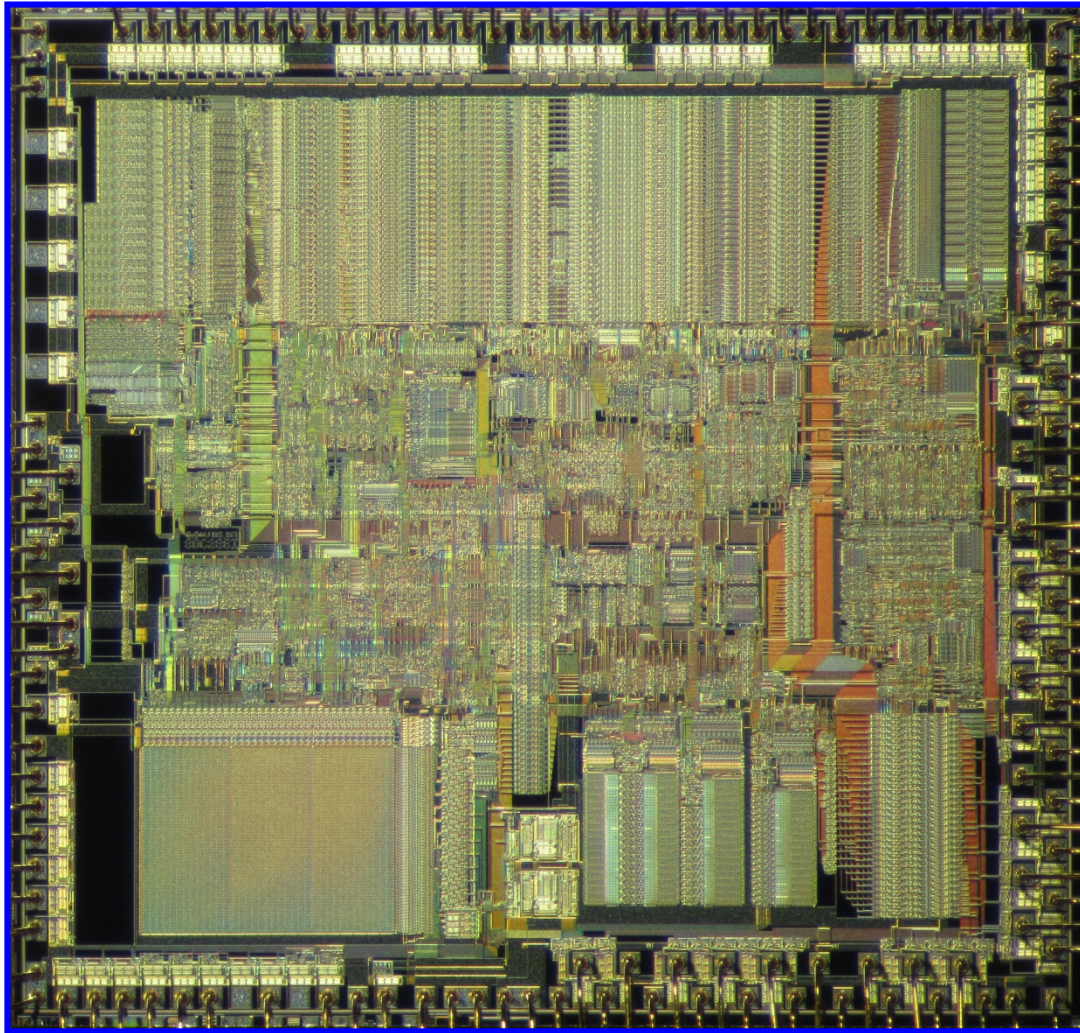
Επιφάνεια: 20 mm²

Πλήθος τρανζιστορς: 6500

Συχνότητα λειτουργίας: 3 MHz



Μικροεπεξεργαστής Intel 80386 (1985)



Τεχνολογία κατασκευής: 1.5 μm

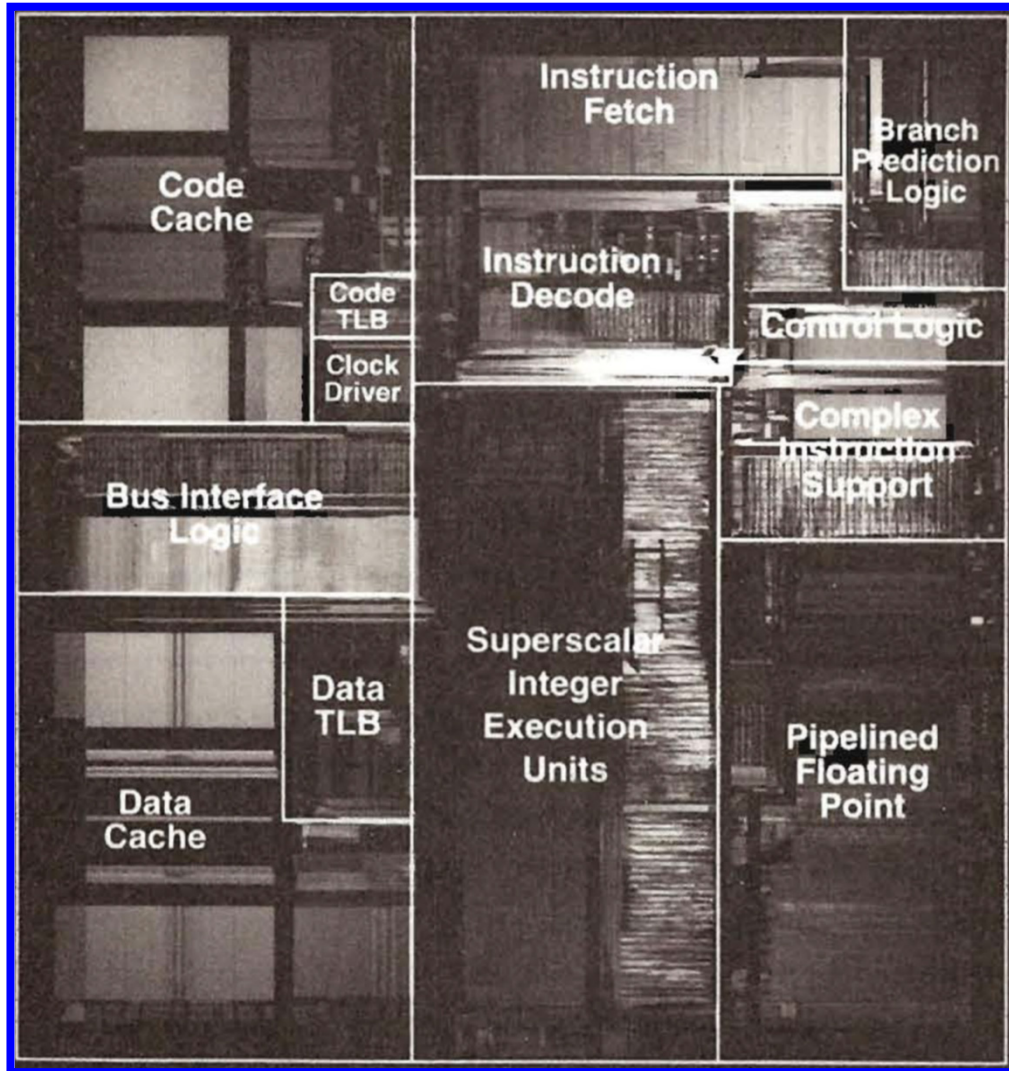
Επιφάνεια: 104 mm^2

Πλήθος τρανζιστορς: 275000

Συχνότητα λειτουργίας: 16 MHz



Μικροεπεξεργαστής Intel Pentium (1993)



Τεχνολογία κατασκευής: 0.8 μm

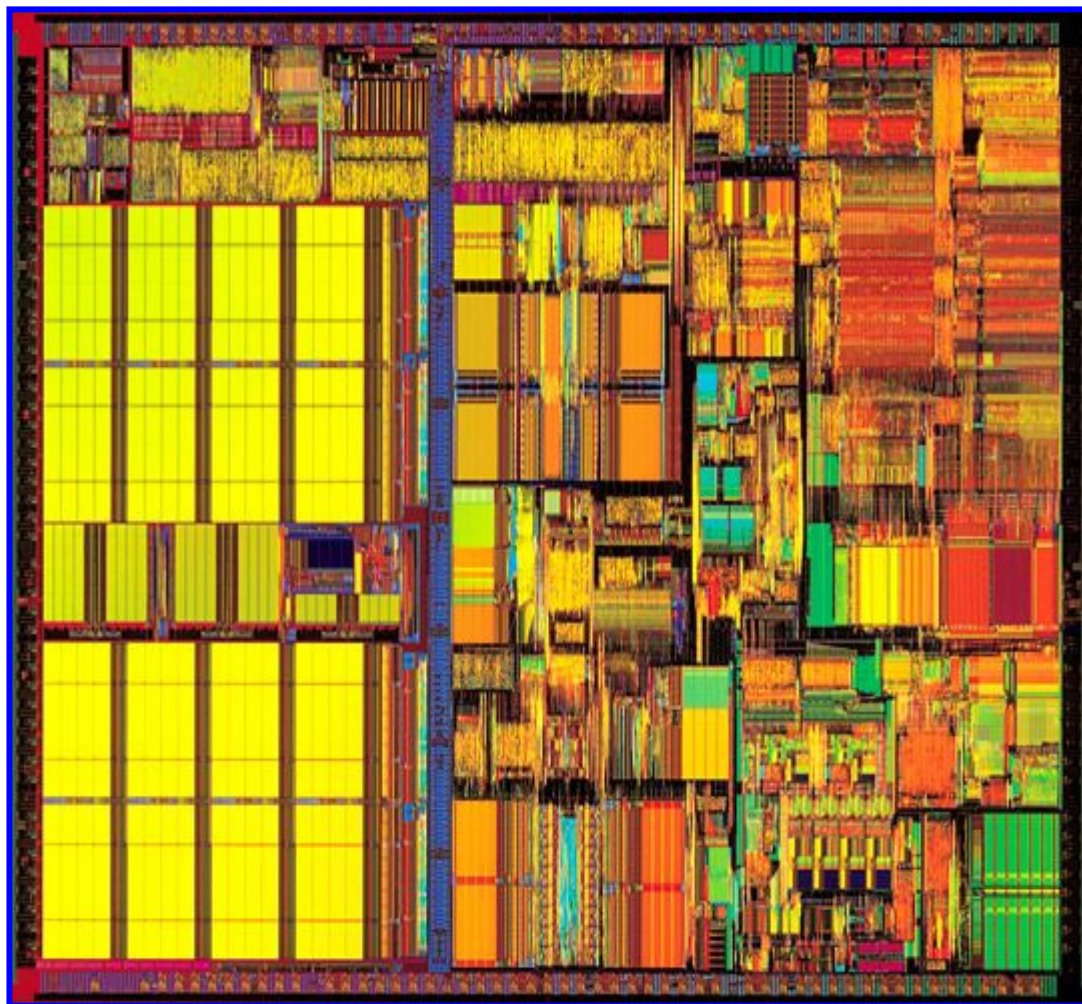
Επιφάνεια: 294 mm^2

Πλήθος τρανζιστορς:
3.1 εκατομμύρια

Συχνότητα λειτουργίας: 66 MHz



Μικροεπεξεργαστής Intel Pentium III (1999)

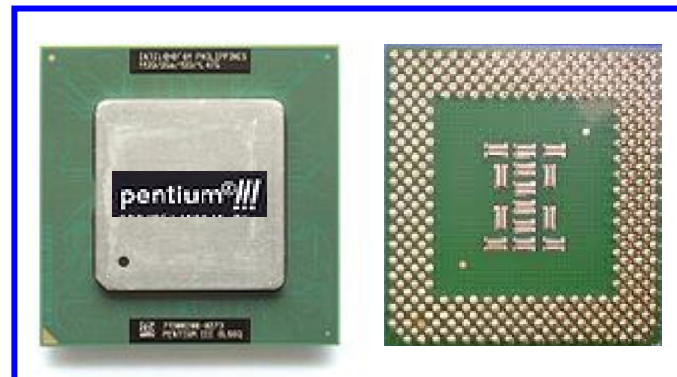


Τεχνολογία κατασκευής: 0.25 μm

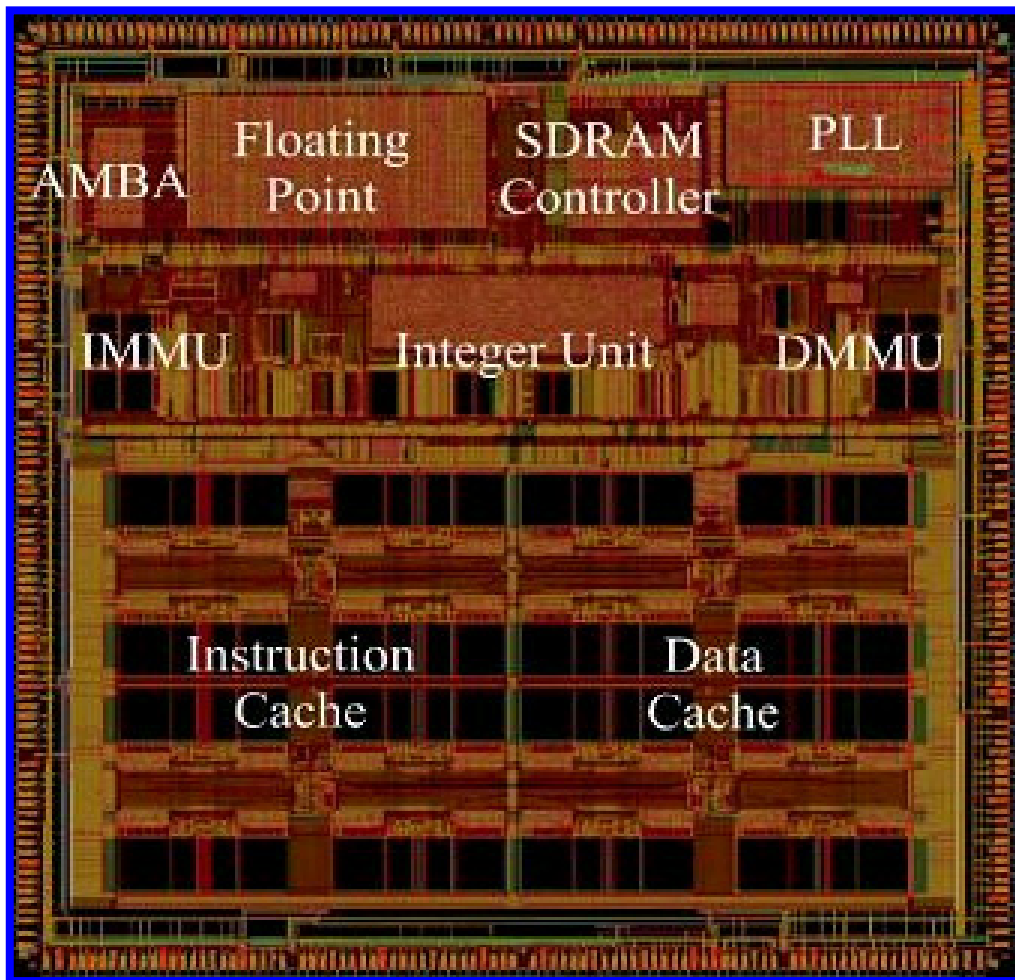
Επιφάνεια: 128 mm^2

Πλήθος τρανζιστορς:
9.5 εκατομμύρια

Συχνότητα λειτουργίας: 450 MHz



Μικροεπεξεργαστής ARM 1020E (2001)



Τεχνολογία κατασκευής: 0.18 μm

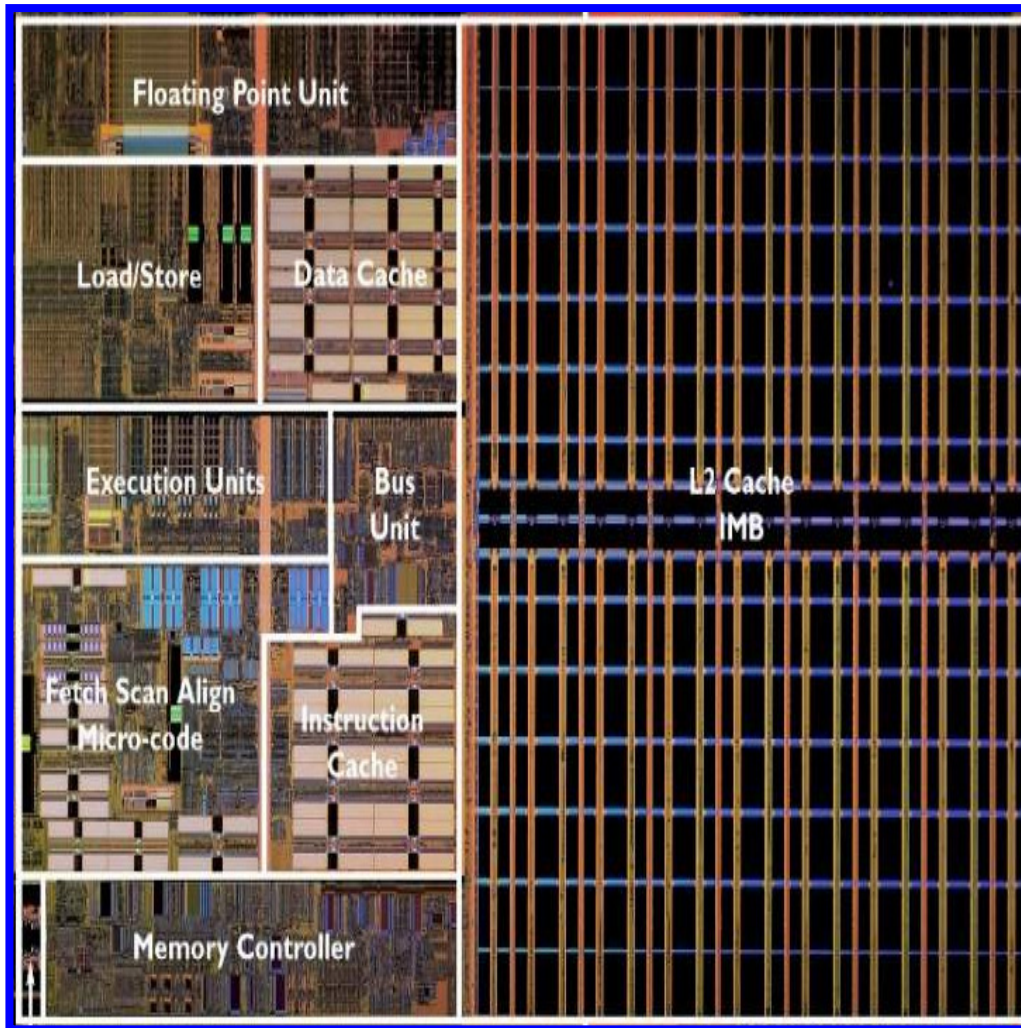
Επιφάνεια: 17.5 mm²

Πλήθος τρανζίστορες:
7 εκατομμύρια

Συχνότητα λειτουργίας: 400 MHz



Μικροεπεξεργαστής AMD Athlon 64 (2004)



Τεχνολογία κατασκευής: 0.13 μm

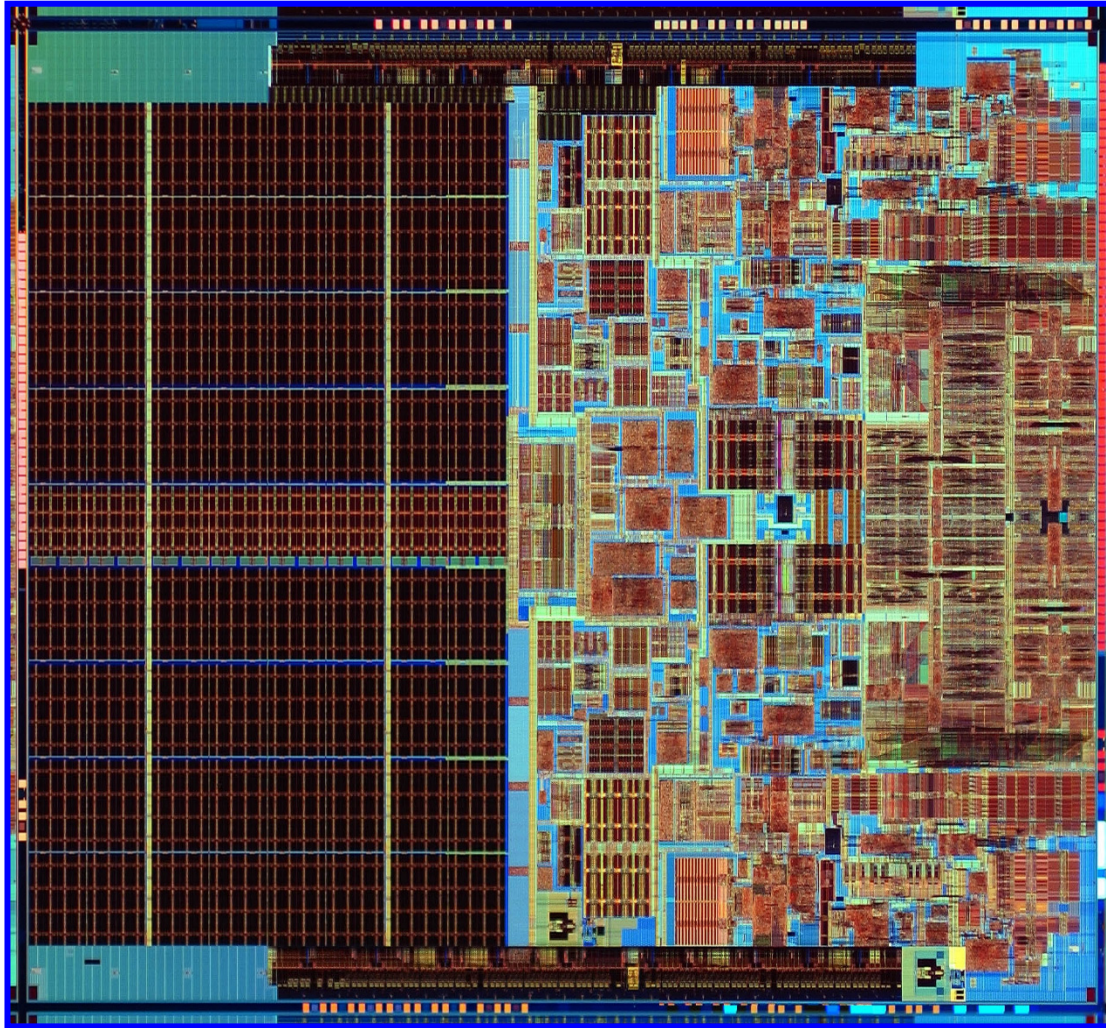
Επιφάνεια: 193 mm^2

Πλήθος τρανζίστορς:
106 εκατομμύρια

Συχνότητα λειτουργίας: 1.6 GHz



Διπύρηνος μικροεπεξεργαστής Intel Core 2 Duo (2007)



Τεχνολογία κατασκευής: 65 nm

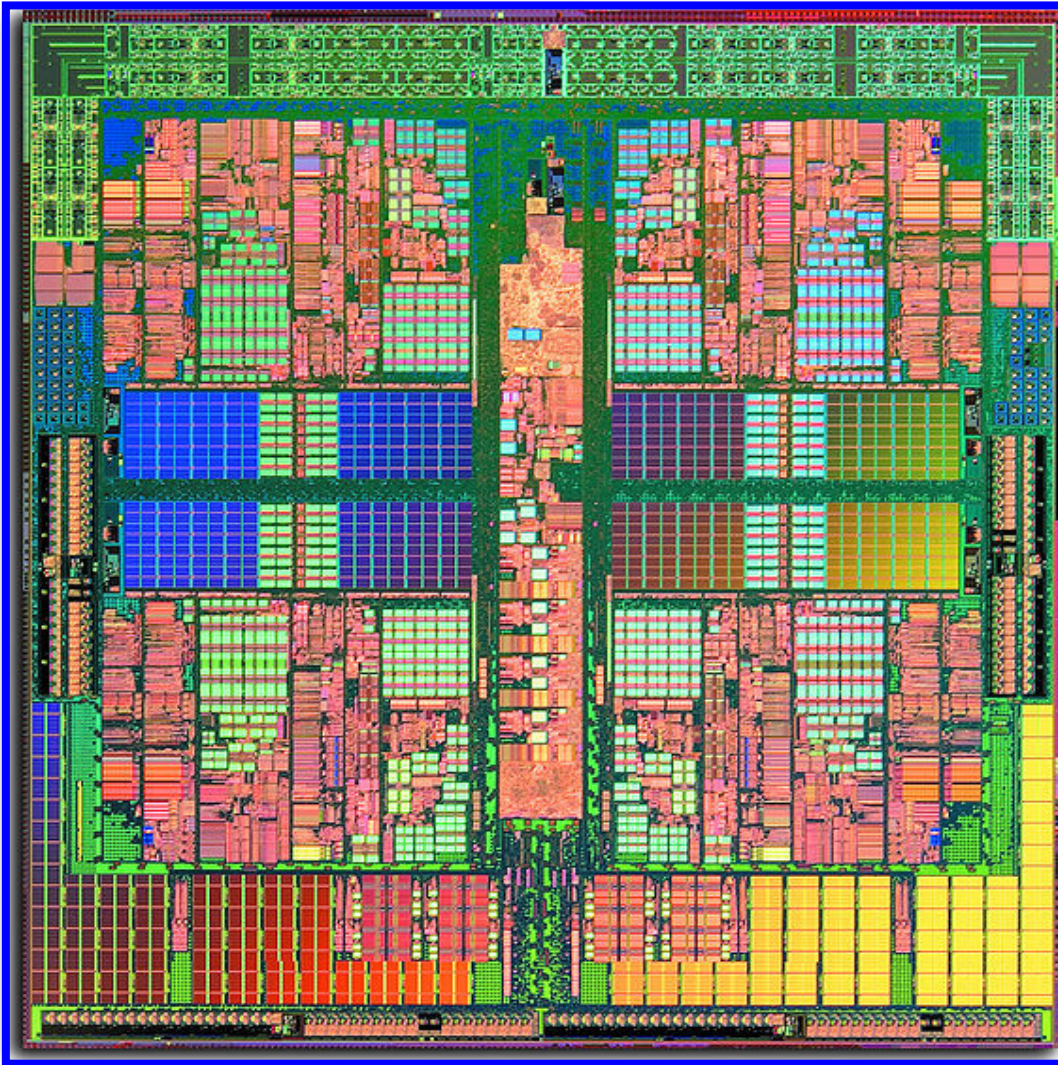
Επιφάνεια: 111 mm²

Πλήθος τρανζιστορς:
169 εκατομμύρια

Συχνότητα λειτουργίας: 1.8 GHz



Τετραπύρηνος μικροεπεξεργαστής AMD Opteron (2008)



Τεχνολογία κατασκευής: 65 nm

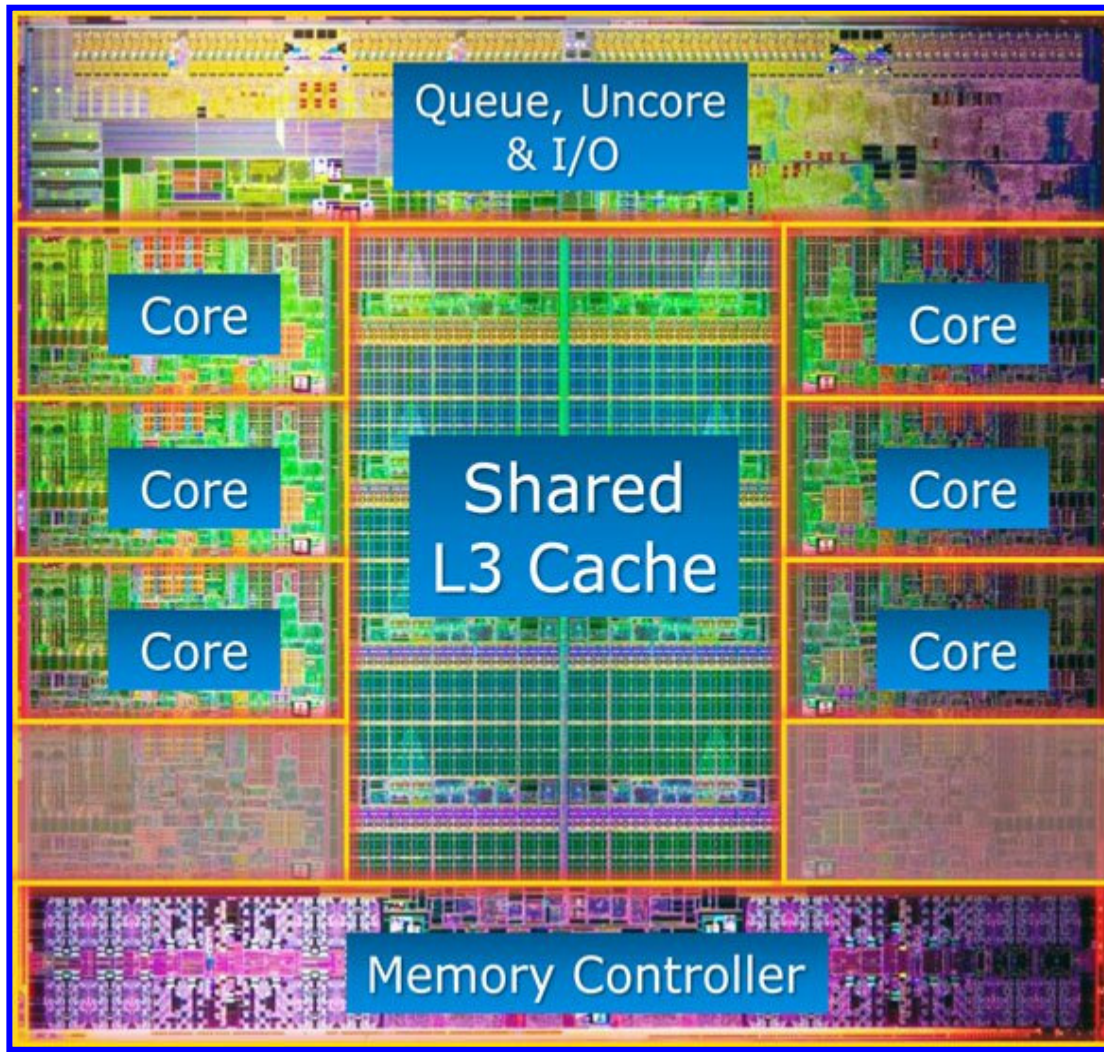
Επιφάνεια: 283 mm²

Πλήθος τρανζιστορς:
463 εκατομμύρια

Συχνότητα λειτουργίας: 2 GHz



Εξαπύρηνος μικροεπεξεργαστής Intel Core i7 (2011)



Τεχνολογία κατασκευής: 32 nm

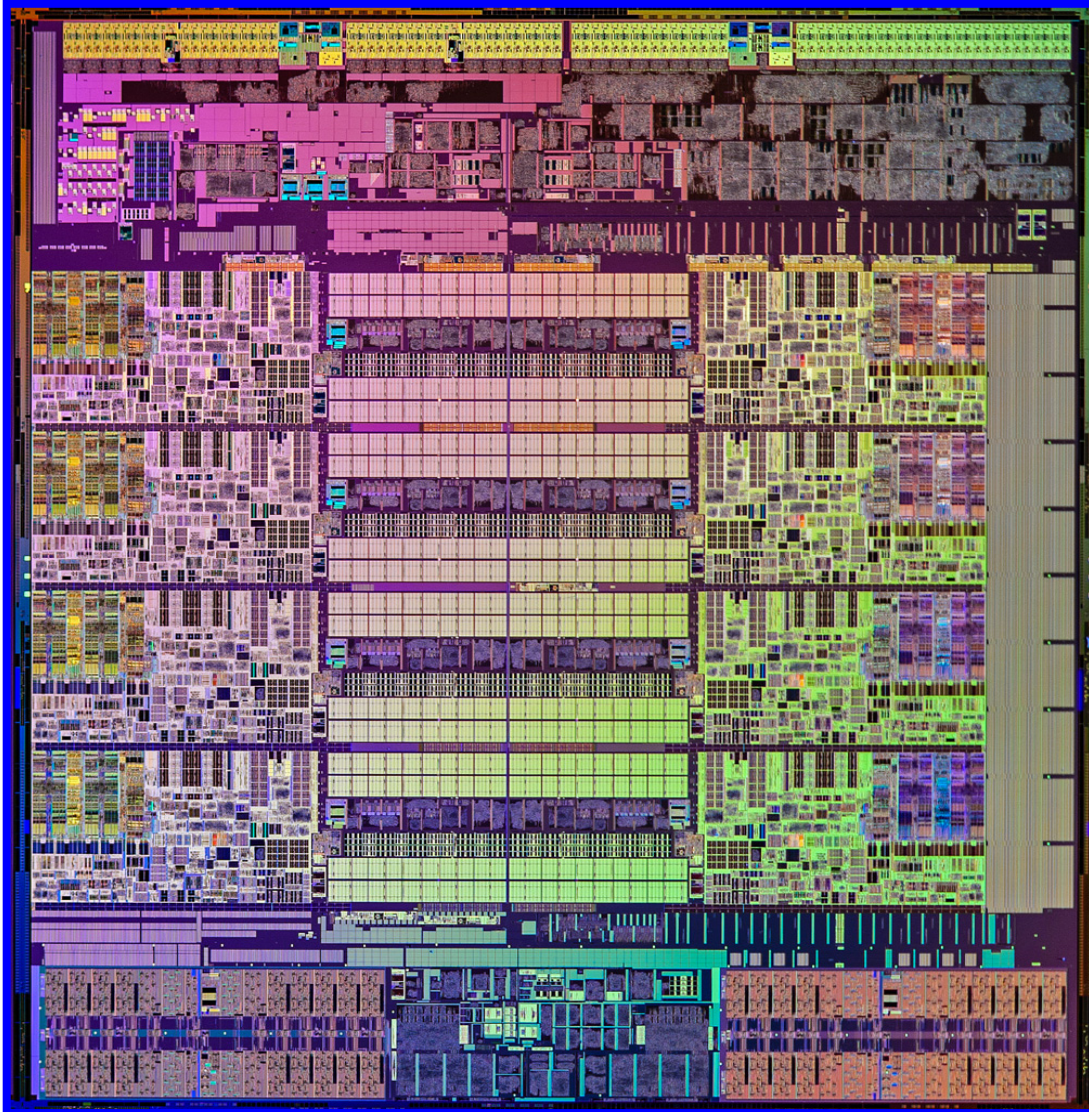
Επιφάνεια: 240 mm²

Πλήθος τρανζίστορες:
1.17 δισεκατομμύρια

Συχνότητα λειτουργίας: 3.3 GHz



Οκταπύρηνος μικροεπεξεργαστής Intel Core i7 (2014)



Τεχνολογία κατασκευής: 22 nm

Επιφάνεια: 355 mm²

Πλήθος τρανζιστορς:
2.6 δισεκατομμύρια

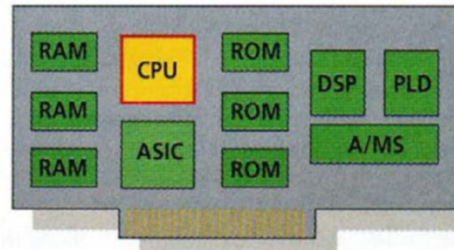
Συχνότητα λειτουργίας: 3.6 GHz

Η εξέλιξη των μικροεπεξεργαστών συνεχίζεται...

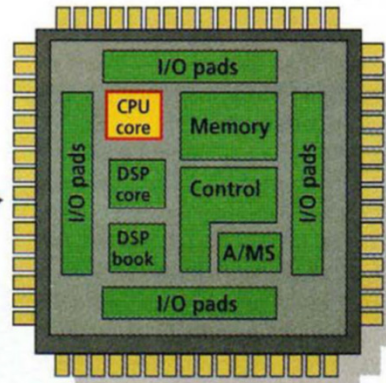
- Την διετία 2017-2018, η Intel ανέπτυξε τη σειρά μικροεπεξεργαστών **Core i9** σε τεχνολογία κατασκευής **14 nm**, που περιλαμβάνουν από **8 έως 14 πυρήνες** με περισσότερα από **5 δισεκατομμύρια τρανζίστορες**.
- Το 2020 η Intel ανέπτυξε την **11^η γενιά** μικροεπεξεργαστών της σε τεχνολογία κατασκευής **10 nm**, υποστηρίζοντας ότι η τεχνολογία αυτή παρέχει 25% καλύτερη επίδοση και 45% χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, καθώς επίσης και ότι με την τεχνολογία αυτή μπορούν να αναπτυχθούν 100 εκατ. τρανζίστορ σε επιφάνεια πυριτίου ενός τετραγωνικού χιλιοστού.
- Την διετία 2017-2018, η AMD ανέπτυξε τη σειρά μικροεπεξεργαστών **Ryzen** σε τεχνολογία **14 nm**, που περιλαμβάνουν **έως 16 πυρήνες**, ενώ πρόσφατα ανέπτυξε την **3^η γενιά μικροεπεξεργαστών Ryzen** σε τεχνολογία **7 nm** που περιλαμβάνει **έως 32 πυρήνες**, βελτιώνοντας τις επιδόσεις των μικροεπεξεργαστών της.
- Επίσης, τα τελευταία χρόνια, η AMD ανέπτυξε τη σειρά μικροεπεξεργαστών **Epic 7000 (multi-chip modules)** που περιλαμβάνει **4 οκταπύρηνους επεξεργαστές** με περισσότερα από **19 δισεκατομμύρια τρανζίστορες**.

Σύστημα σε ολοκληρωμένο κύκλωμα (system-on-chip)

A/MS = analog/mixed signal
ASIC = application-specific IC
CPU = central processing unit
PLD = programmable logic device



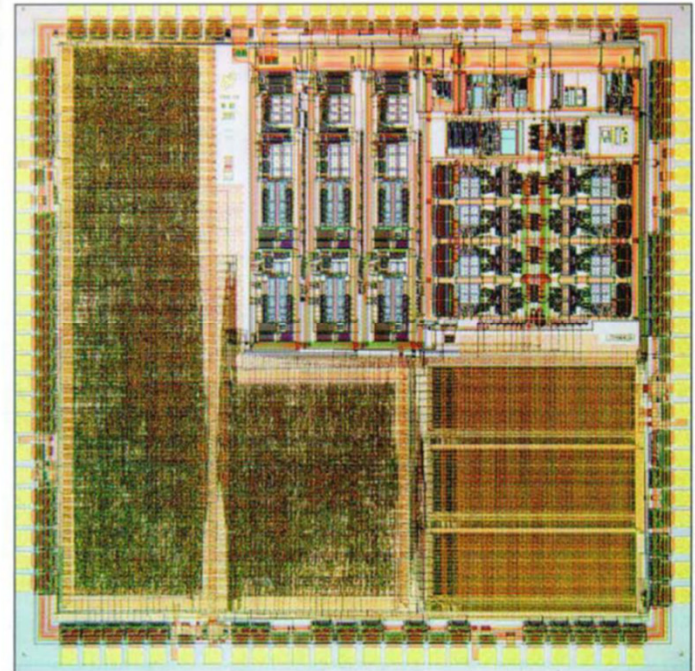
Board components



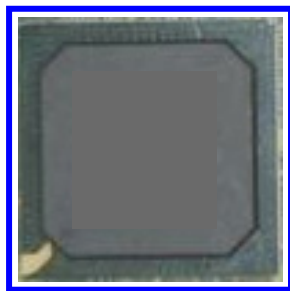
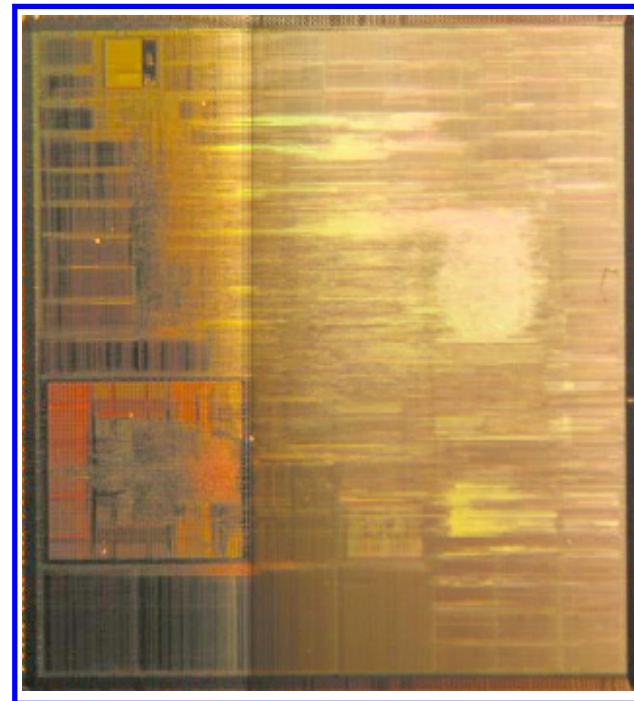
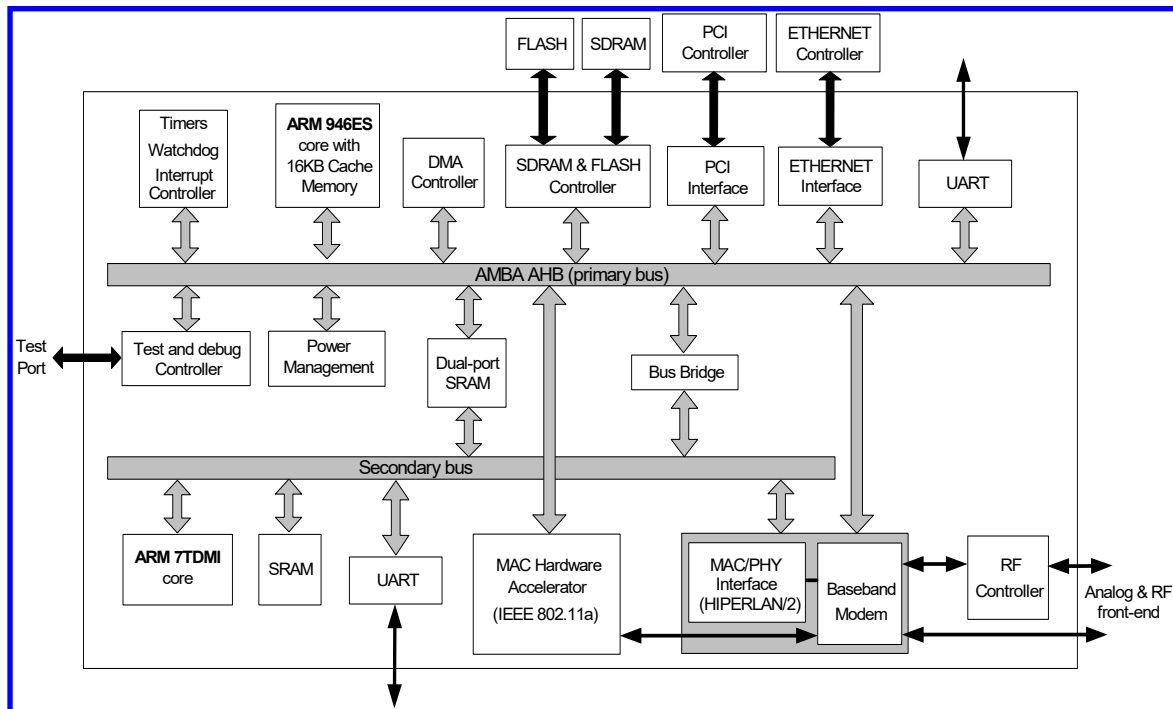
Virtual components

SOURCE: MENTOR GRAPHICS CORP.

**Scanner
system-on-chip**



Σύστημα σε ολοκληρωμένο κύκλωμα (system-on-chip)



**Wireless LAN
system-on-chip**

Τεχνολογία: CMOS 180 nm

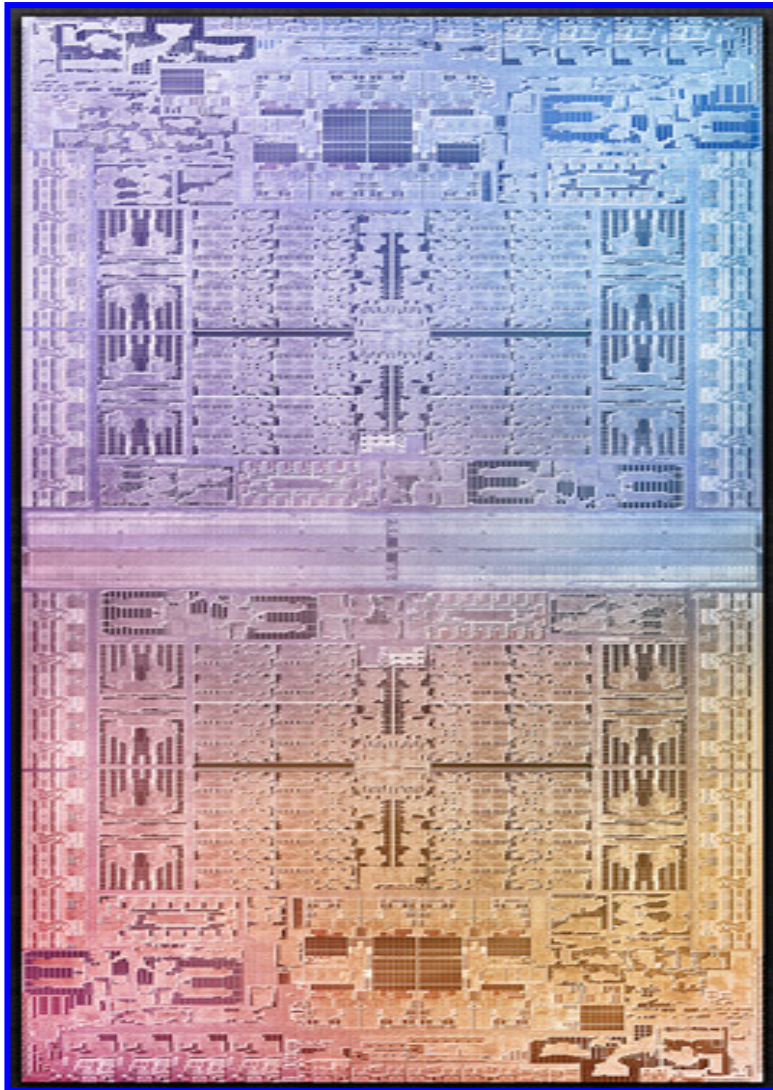
Επιφάνεια: 90 mm²

Τρανζίστορ: 17.5 εκατομμύρια

Διασυνδέσεις: 47 m

2 ενσωματωμένοι επεξεργαστές

Apple M1 Ultra SoC (2022)



ARM processor-based system-on-chip

Τεχνολογία κατασκευής: **5 nm**

Πλήθος τρανζίστορς:
114 δισεκατομμύρια

Δύο ψηφίδες (dies) συνδεδεμένες στην
ίδια συσκευασία (package)

20 πυρήνες CPU

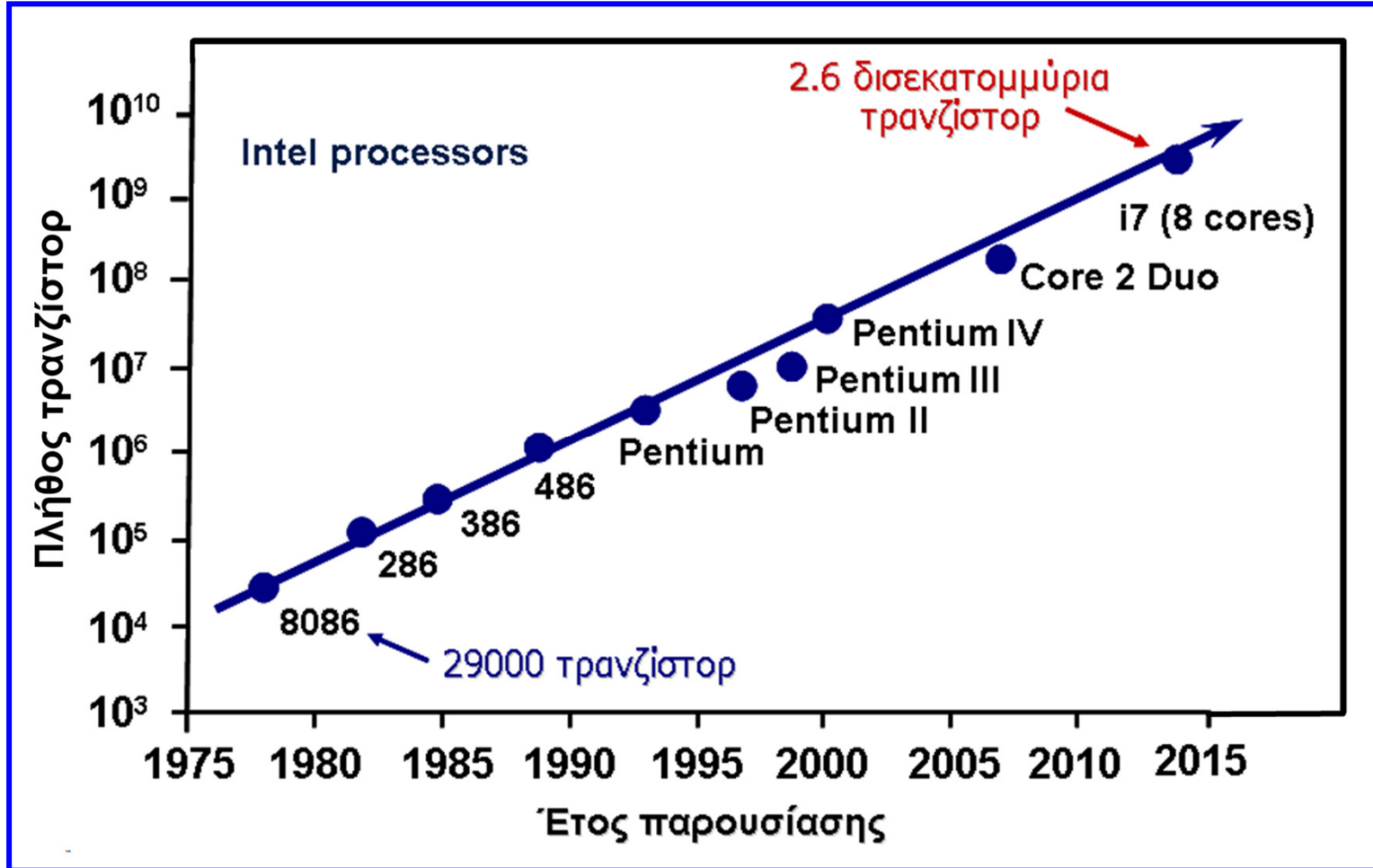
64 πυρήνες GPU (graphics processing unit
για επιτάχυνση λειτουργιών γραφικών)

32 πυρήνες NPU (neural processing unit
για επιτάχυνση λειτουργιών τεχνητής
νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης)

Νόμος του Moore

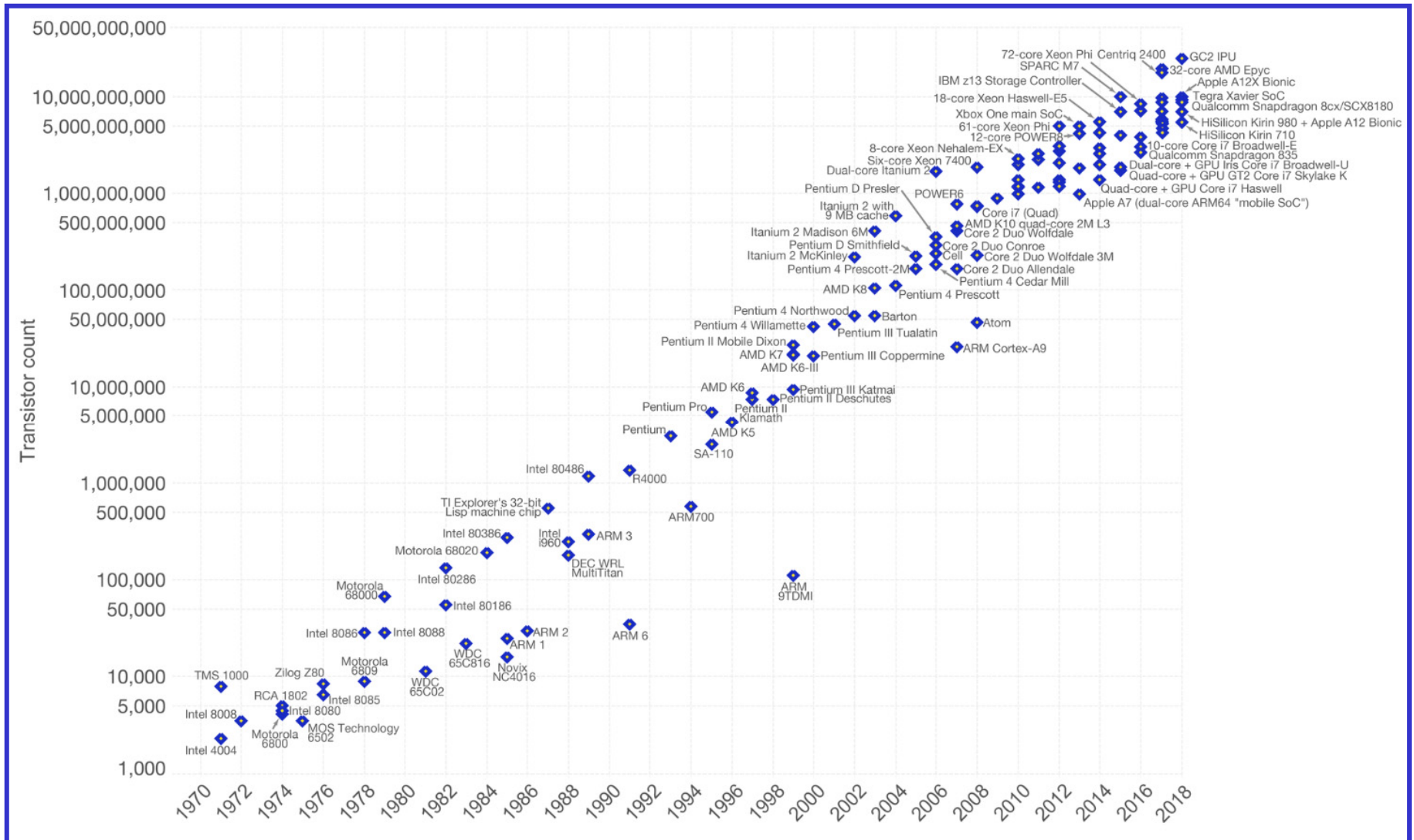
- Τις δύο τελευταίες δεκαετίες έχει σημειωθεί καταπληκτική εξέλιξη όσον αφορά το πλήθος των τρανζίστορ που ολοκληρώνονται σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (πυκνότητα ολοκλήρωσης) και στις επιδόσεις των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.
- Το 1965, ο Gordon Moore (Fairchild και αργότερα συνιδρυτής της Intel), πρόβλεψε ότι **ο αριθμός των τρανζίστορ που μπορούν να ολοκληρωθούν σε μία ενιαία ψηφίδα πυριτίου (die) θα αυξάνεται εκθετικά με το χρόνο.**
- Παρατήρησε ότι ο αριθμός των τρανζίστορ που ολοκληρώνεται σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα διπλασιάζεται κάθε 18 με 24 μήνες.
- Η αύξηση αυτή οφείλεται κυρίως:
 - ✓ στην αλματώδη **ανάπτυξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών** (ολοένα και μικρότερο μέγεθος τρανζίστορ, νέες τεχνολογίες κατασκευής) και
 - ✓ στην ραγδαία **εξέλιξη της τεχνολογίας σχεδιασμού** ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (οι σχεδιαστές χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο εξειδικευμένες μεθοδολογίες και στρατηγικές σχεδιασμού που οδηγούν στην αυτοματοποίησή του).

Εξέλιξη πλήθους τρανζίστορ στους μικροεπεξεργαστές

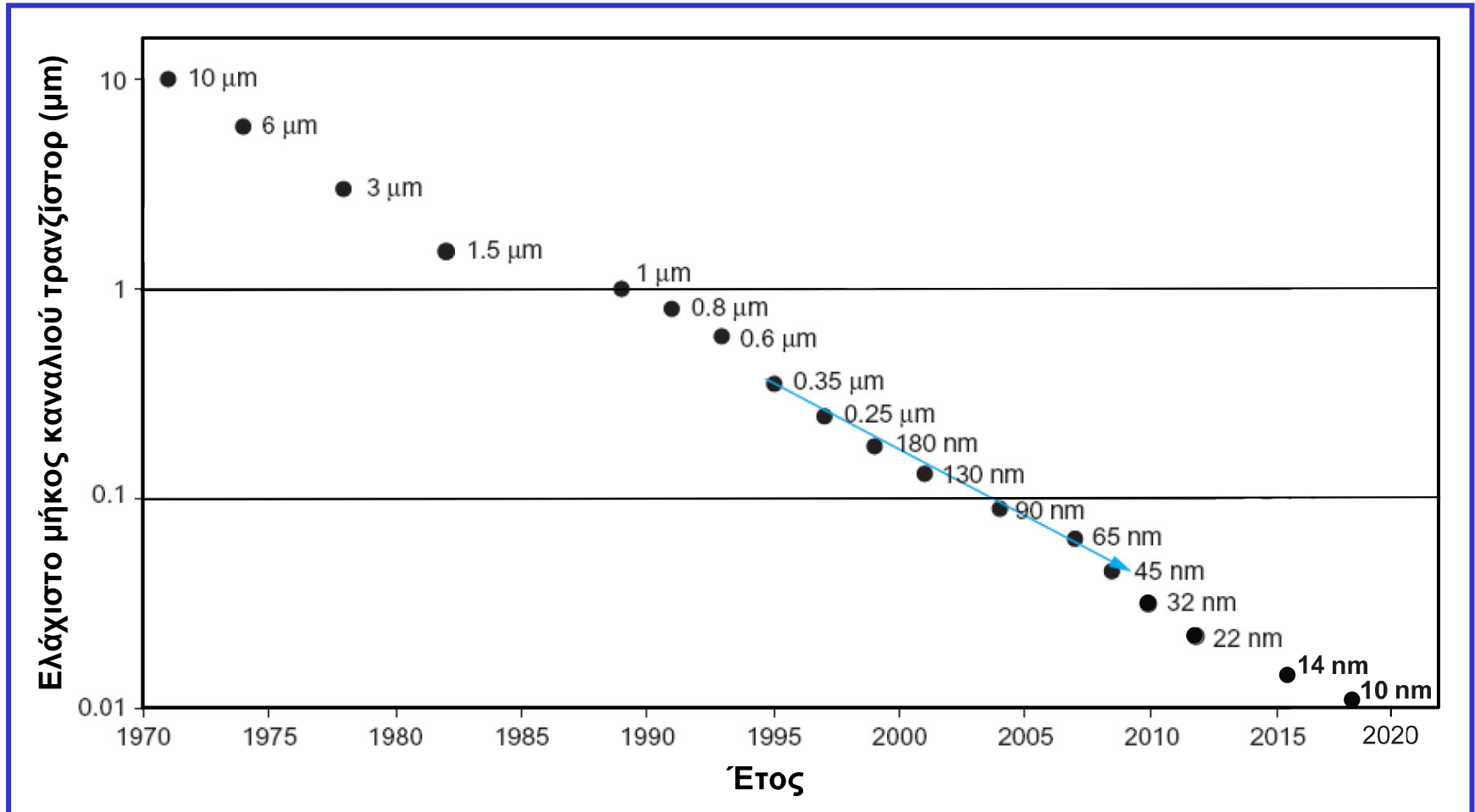


Το όριο του 1 εκατομμυρίου τρανζίστορ ανά Ο.Κ. καταρρίφθηκε στο τέλος της δεκαετίας του 1980 και το όριο του 1 δισεκατομμυρίου στο τέλος της δεκαετίας του 2000

Εξέλιξη πλήθους τρανζιστορ στους μικροεπεξεργαστές

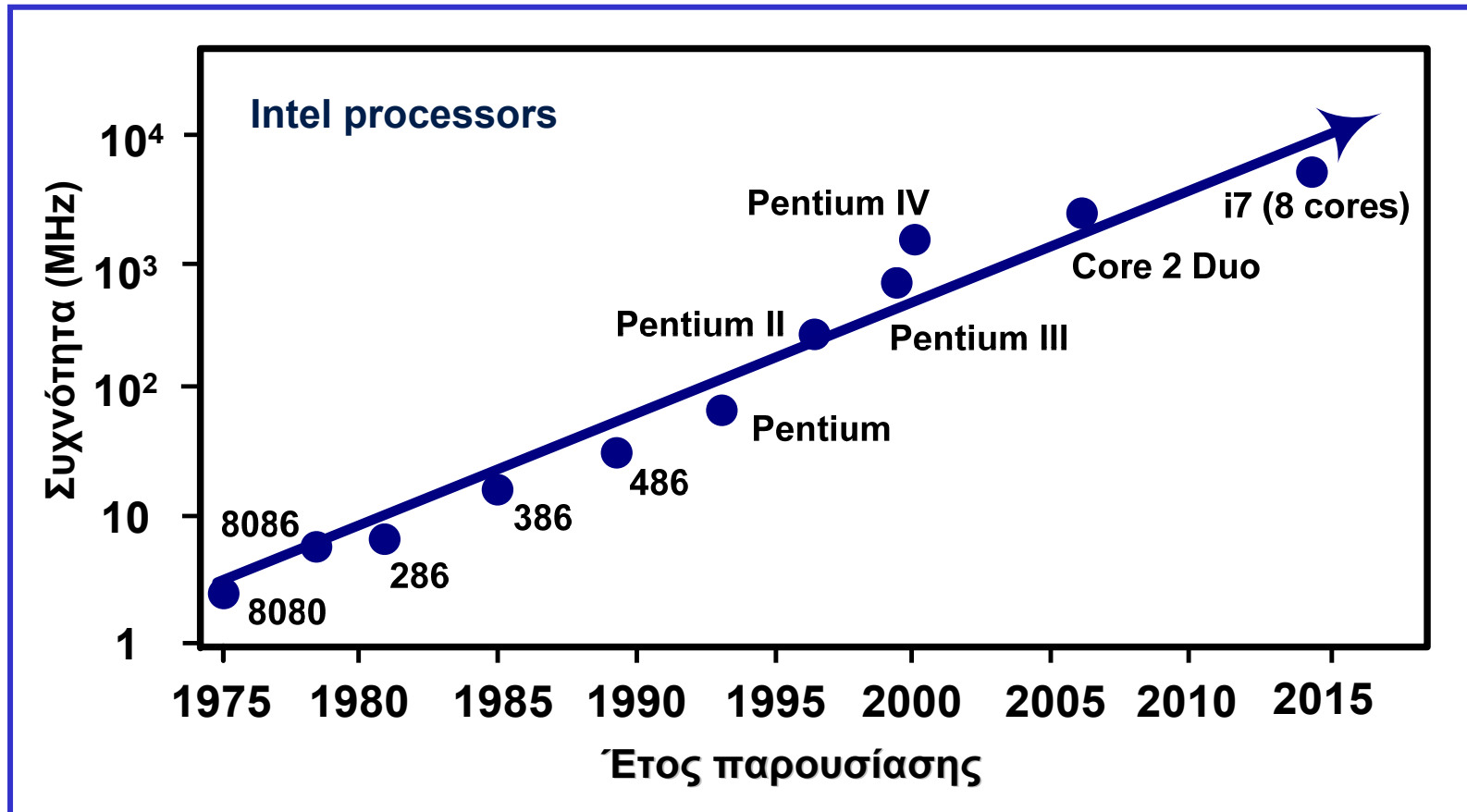


Εξέλιξη μήκους καναλιού των τρανζίστορ



Με την εξέλιξη της τεχνολογίας κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων CMOS, το μήκος καναλιού των τρανζίστορ μειώνεται κατά 30% κάθε 2 έως 3 έτη.

Εξέλιξη συχνότητας στους μικροεπεξεργαστές

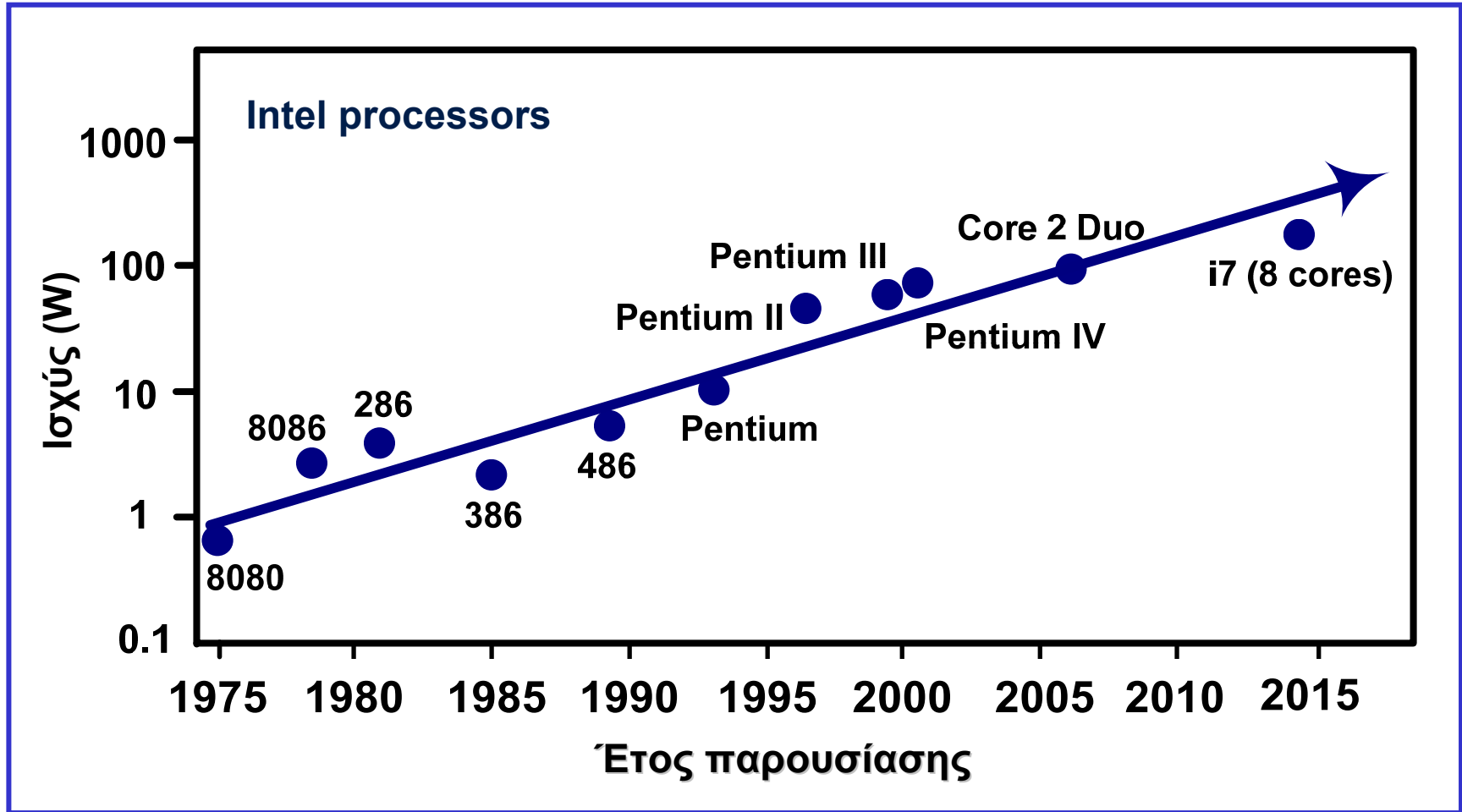


Την δεκαετία του 1990 η συχνότητα των μικροεπεξεργαστών διπλασιαζόταν κάθε 2 χρόνια με το όριο των 100 MHz να καταρρίπτεται στα μέσα της δεκαετίας αυτής. Το όριο του 1 GHz ξεπεράστηκε στην αρχή της δεκαετίας του 2000, ενώ σήμερα παράγονται επεξεργαστές με συχνότητα λειτουργίας μεγαλύτερη από 4 GHz

Εξέλιξη ισχύος στους μικροεπεξεργαστές

- Η ισχύς ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος καθορίζει το ποσό της ενέργειας που καταναλώνει σε λειτουργία και το ποσό της θερμότητας που αποβάλλει.
- Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν ένα μεγάλο αριθμό κρίσιμων αποφάσεων σχεδιασμού, όπως την ικανότητα παροχής ισχύος, τη διάρκεια ζωής των μπαταριών, το μέγεθος των γραμμών τροφοδοσίας και τις απαιτήσεις συσκευασίας και ψύξης.
- Επομένως, η κατανάλωση ενέργειας είναι μία σημαντική ιδιότητα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που επιδρά στον τρόπο υλοποίησής τους, στο κόστος και την αξιοπιστία τους.
- Στα υπολογιστικά συστήματα υψηλής επίδοσης, τα όρια της κατανάλωσης ισχύος που υπαγορεύονται από τη συσκευασία του ολοκληρωμένου κυκλώματος και το σύστημα απομάκρυνσης θερμότητας, καθορίζουν τον αριθμό των κυκλωμάτων που μπορούν να ολοκληρωθούν στο ίδια ψηφίδα και το πόσο γρήγορα επιτρέπεται να λειτουργούν.
- Με την αυξανόμενη δημοτικότητα των φορητών υπολογιστικών συστημάτων που χρησιμοποιούν μπαταρίες, οι ενεργειακοί περιορισμοί αποτελούν βασικό παράγοντα που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή.
- Παρότι έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες σχεδιασμού και τεχνολογίες κατασκευής που μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας στα ολοκληρωμένα κυκλώματα, η ισχύς σε απαιτητικά κυκλώματα αιχμής (όπως οι μικροεπεξεργαστές) συνεχίζει να αυξάνεται.

Εξέλιξη ισχύος στους μικροεπεξεργαστές



Ιεραρχικός σχεδιασμός ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

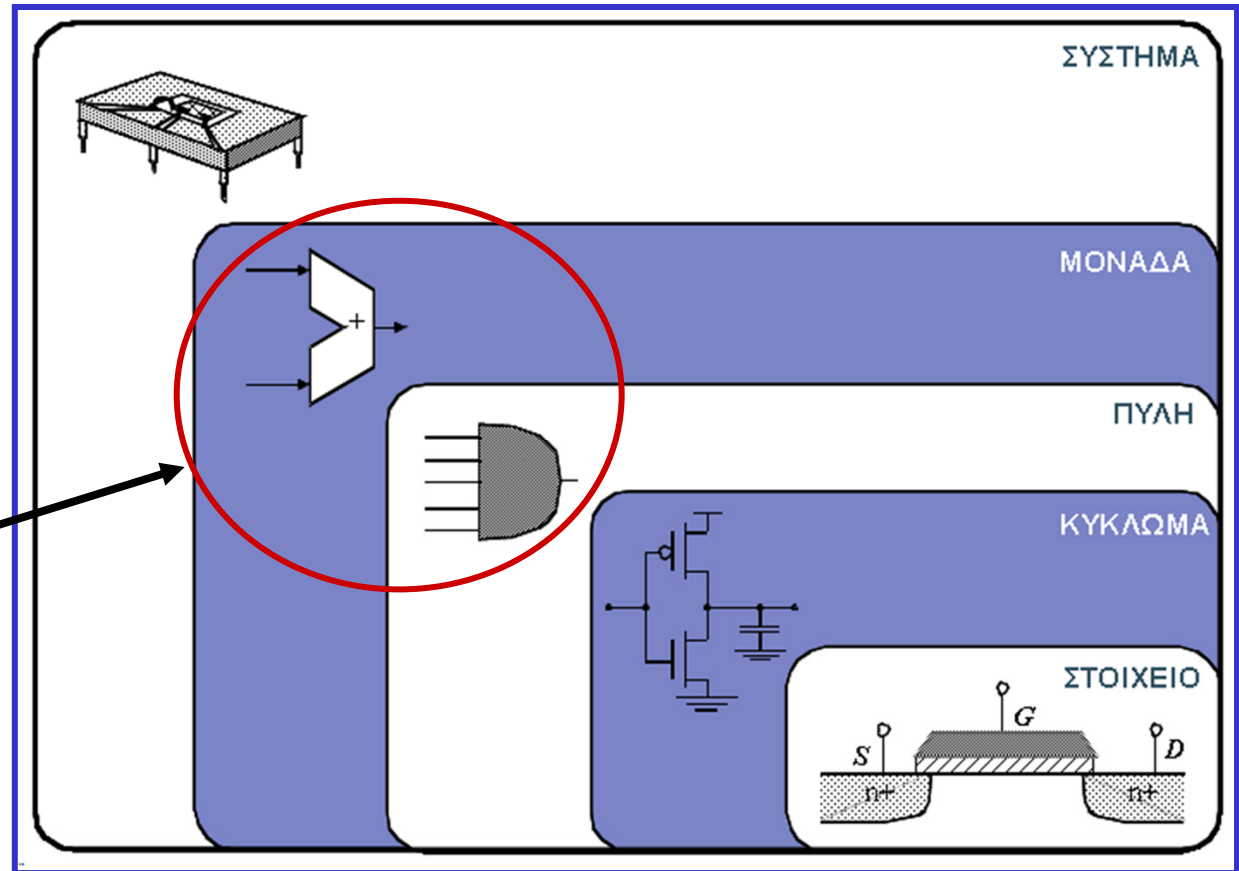
- Η αλματώδης εξέλιξη στην πυκνότητα ολοκλήρωσης και στις επιδόσεις των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, έχει ασκήσει μεγάλη επίδραση στον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται τα ψηφιακά κυκλώματα.
- Αρχικά η σχεδίαση γινόταν πλήρως με το χέρι, δηλαδή κάθε τρανζίστορ σχεδιαζόταν και βελτιστοποιούνταν χωριστά και κατόπιν τοποθετούνταν προσεκτικά στο κύκλωμα.
- Προφανώς, αυτή η προσέγγιση δεν είναι κατάλληλη όταν πρέπει να σχεδιαστούν και να συναρμολογηθούν εκατομμύρια στοιχεία.
- Κατά συνέπεια απαιτούνται και έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες και εργαλεία σχεδιασμού, έτσι ώστε να επιτευχθεί αυτοματοποίηση του σχεδιασμού των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.
- Σε αντίθεση με την εξατομικευμένη προσέγγιση των αρχικών σχεδιασμών, τα κυκλώματα πλέον **σχεδιάζονται με ιεραρχικό τρόπο**, δηλαδή ένα σύστημα αποτελείται από μονάδες καθεμία από τις οποίες αποτελείται από έναν αριθμό κυττάρων.
- Τα κύτταρα **επαναχρησιμοποιούνται** έτσι ώστε για μειώνεται η προσπάθεια σχεδιασμού και να αυξάνεται η πιθανότητα της επιτυχούς υλοποίησης.
- Η **ιεραρχική προσέγγιση σχεδιασμού** αποτελεί το βασικό συστατικό της επιτυχίας του σχεδιασμού ψηφιακών κυκλωμάτων σε **πολύ μεγάλη κλίμακα ολοκλήρωσης**.

Ιεραρχικός σχεδιασμός ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

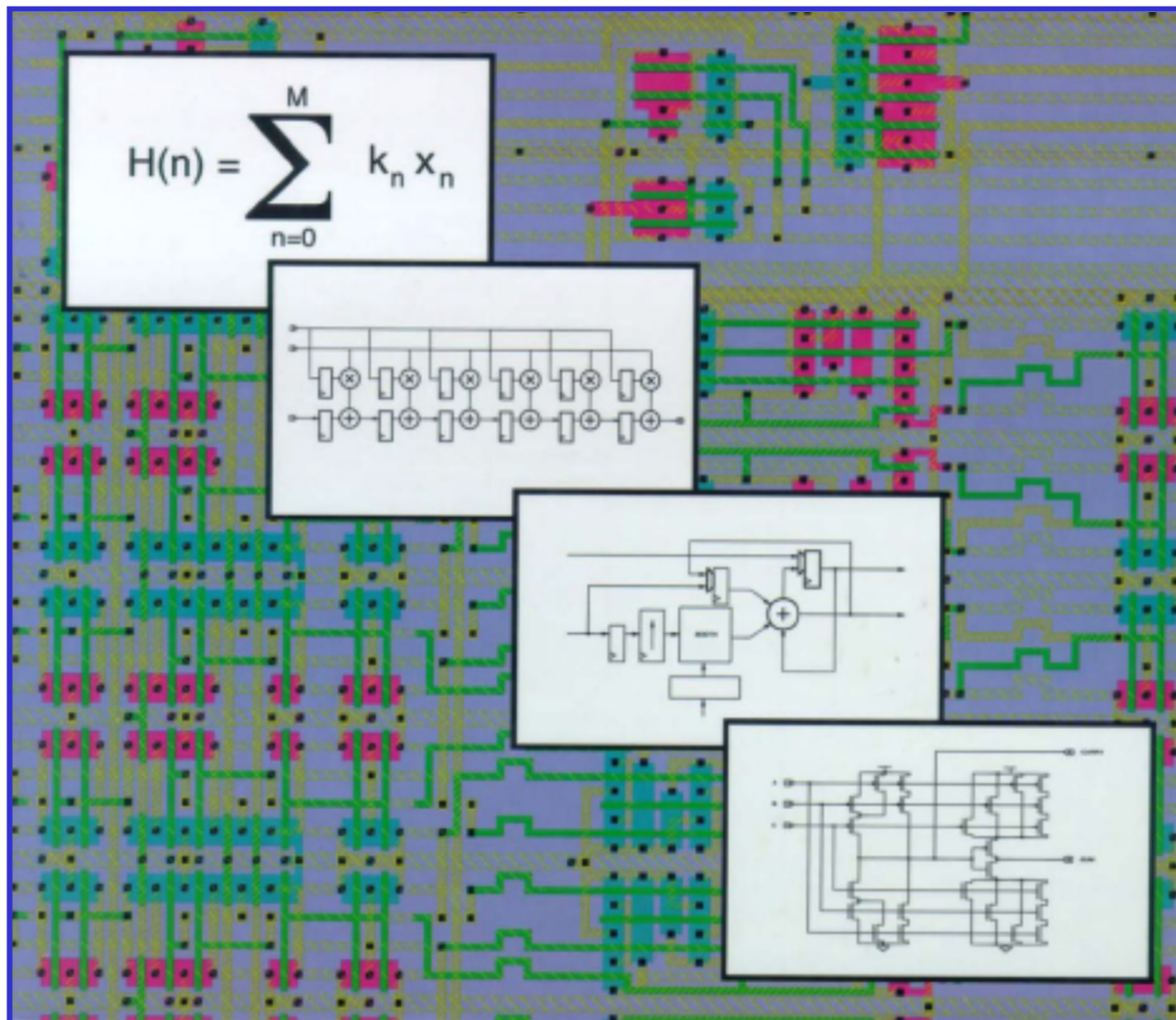
- Στον ιεραρχικό σχεδιασμό, σε κάθε επίπεδο σχεδιασμού οι εσωτερικές λεπτομέρειες μίας σύνθετης μονάδας μπορούν να αντικατασταθούν από ένα μοντέλο.
- Το μοντέλο περιέχει όλες τις πληροφορίες που απαιτούνται ώστε το μοντέλο αυτό να χρησιμοποιηθεί στο επόμενο επίπεδο ιεραρχίας.

Επίπεδα ιεραρχίας
(αφαίρεσης)
σχεδιασμού
ψηφιακών
κυκλωμάτων

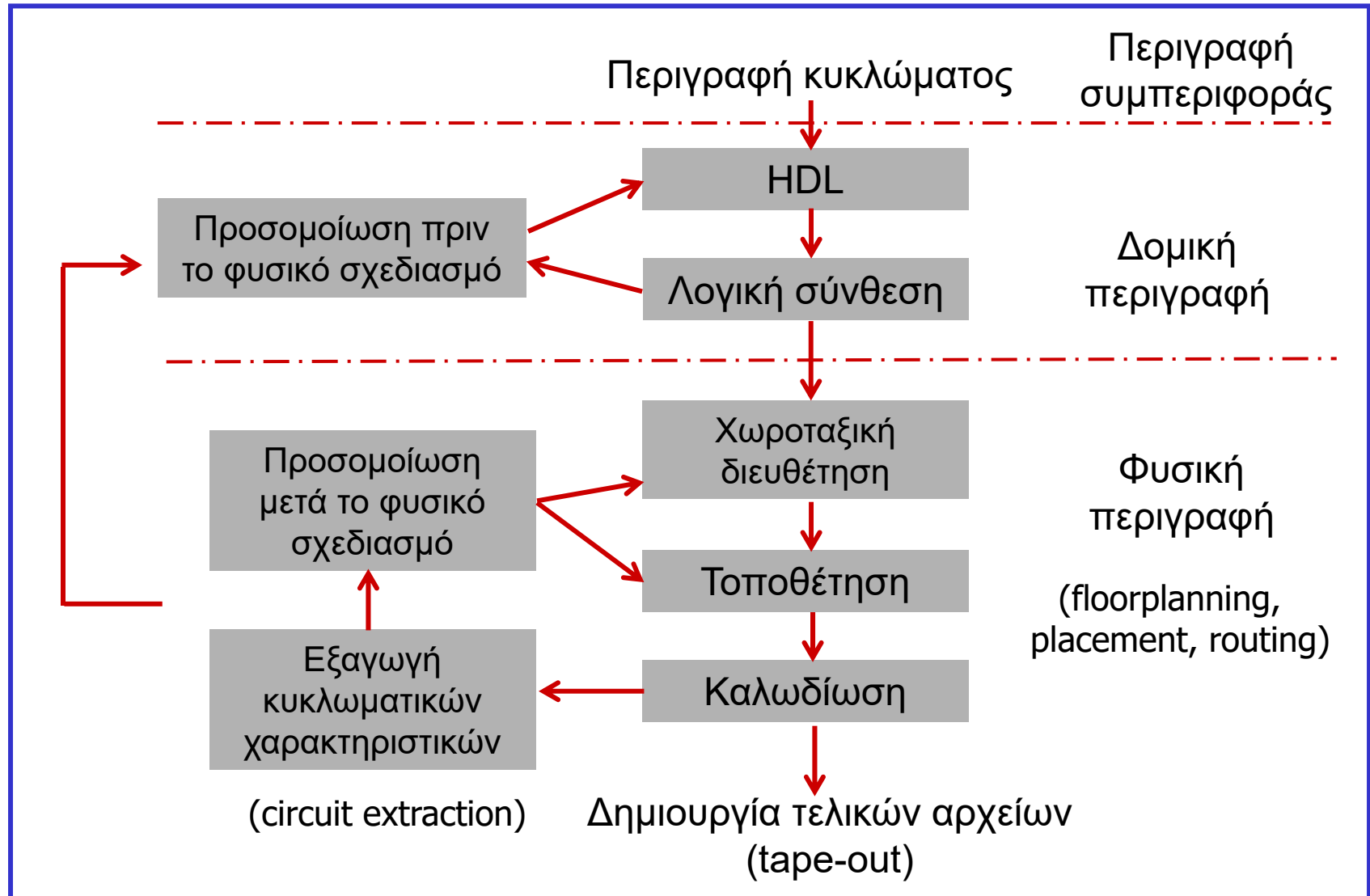
Συχνά χρησιμοποιείται
βιβλιοθήκη
προσχεδιασμένων
κυκλωμάτων
(προσέγγιση τυπικού
κυττάρου, standard
cell)



Ιεραρχικός σχεδιασμός ολοκληρωμένων κυκλωμάτων



Διαδικασία σχεδιασμού ολοκληρωμένων κυκλωμάτων



Πλεονεκτήματα ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Αντικατάσταση μεγάλου αριθμού διακριτών στοιχείων με αποτέλεσμα:
 - ✓ την ελαχιστοποίηση του μεγέθους του συστήματος,
 - ✓ την αύξηση της ταχύτητας,
 - ✓ τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας,
 - ✓ την ελαχιστοποίηση των διατάξεων ψύξης,
 - ✓ την αύξηση της αξιοπιστίας,
 - ✓ τη μείωση του κόστους του συστήματος.
- Εξασφάλιση από πιθανή αντιγραφή.
- Μείωση του χρόνου ανάπτυξης του συστήματος και επιτάχυνση της διάθεσής του στην αγορά.

Μειονεκτήματα ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Πιθανή αποτυχία επίτευξης της απαιτούμενης λειτουργικότητας, κυρίως λόγω αυξημένης πολυπλοκότητας σχεδιασμού και κατασκευής: έως και 50% των κυκλωμάτων ειδικού σκοπού (application specific integrated circuits, ASIC) αποτυγχάνουν να λειτουργήσουν σωστά την πρώτη φορά.
- Πιθανή ανατροπή του χρονοδιαγράμματος λόγω ανάγκης επανάληψης της διαδικασίας σχεδιασμού ή/και κατασκευής.
- Δυσκολία στον έλεγχο και στην εξεύρεση σφαλμάτων.
- Υψηλό κόστος προτυποποίησης.
- Η παραγωγή μπορεί να μην ξεπεράσει την κρίσιμη ποσότητα που απαιτείται για την απόσβεση του κόστους.

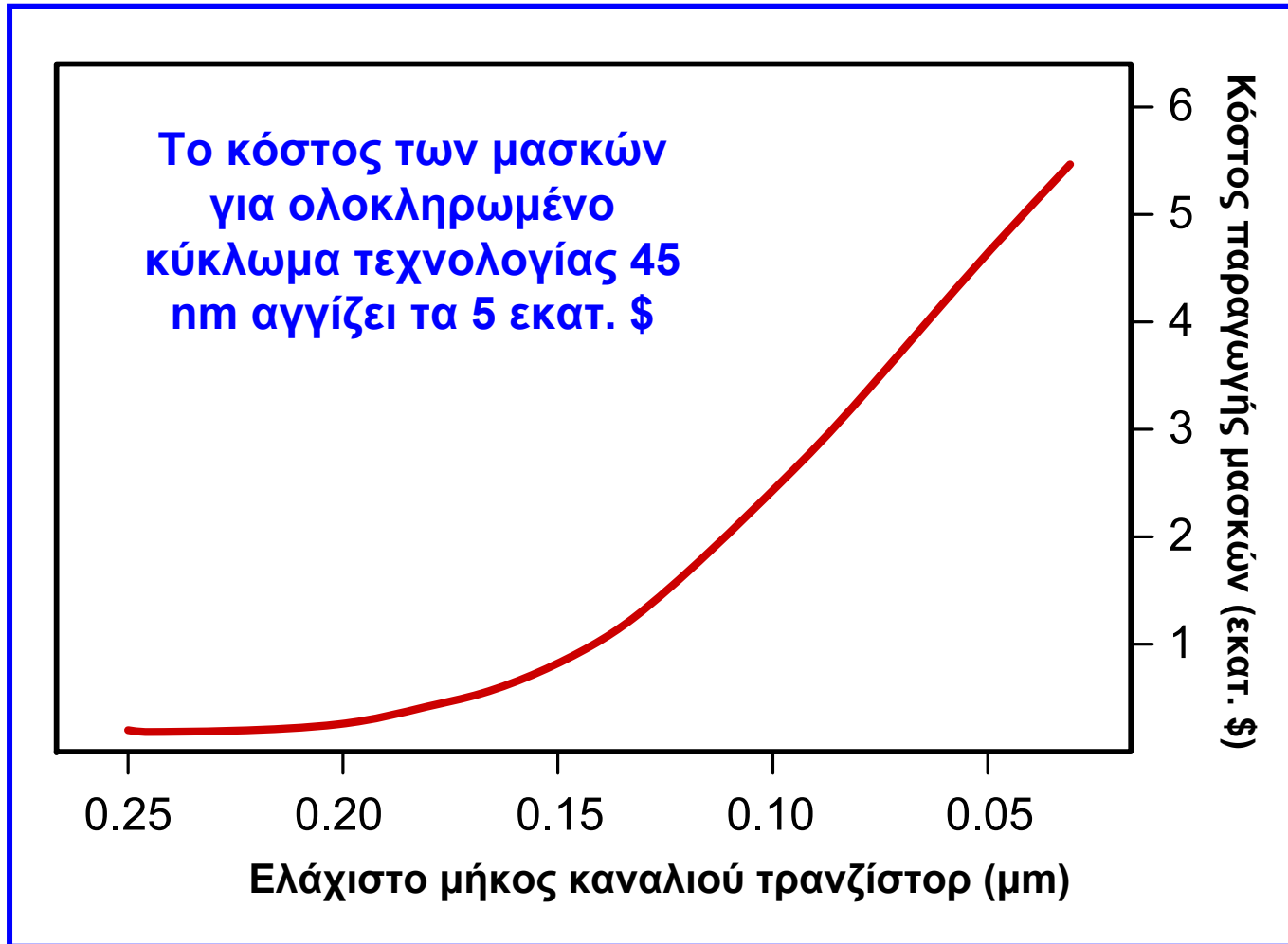
Μέτρα ποιότητας ψηφιακών κυκλωμάτων

- Οι επιδόσεις ενός ψηφιακού κυκλώματος (πύλης, μονάδας κ.ά.) αξιολογούνται με βάση τα ακόλουθα πιο σημαντικά μέτρα:
 - ✓ **Κόστος,**
 - ✓ **Λειτουργικότητα και στιβαρότητα,**
 - ✓ **Ταχύτητα (συχνότητα λειτουργίας και καθυστέρηση διάδοσης),**
 - ✓ **Ισχύς και κατανάλωση ενέργειας.**
- Το ποιο από τα μέτρα αυτά είναι το σημαντικότερο, εξαρτάται από την εφαρμογή που υλοποιείται από το ολοκληρωμένο κύκλωμα.
- Για παράδειγμα, η ταχύτητα είναι μια κρίσιμη παράμετρος για έναν διακομιστή (server) υπολογιστών.
- Από την άλλη πλευρά, η κατανάλωση ενέργειας είναι η κυρίαρχη παράμετρος για εφαρμογές φορητών συσκευών, όπως τα κινητά τηλέφωνα.

Κόστος ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Το συνολικό κόστος ενός προϊόντος επιμερίζεται σε δύο συστατικά: τις μη επαναλαμβανόμενες δαπάνες ή **σταθερό κόστος** (non-recurrent engineering, NRE cost) και τις επαναλαμβανόμενες δαπάνες ή **μεταβλητό κόστος**.
- Σημαντικό μέρος του **σταθερού κόστους** ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος είναι η προσπάθεια του εργατικού δυναμικού που απαιτείται για την **ανάπτυξη του σχεδιασμού** έως και την **παραγωγή των τελικών μασκών** που απαιτούνται για την κατασκευή του κυκλώματος.
- Αυτό το κόστος επηρεάζεται ισχυρά από την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού, τις προδιαγραφές και την παραγωγικότητα των σχεδιαστών.
- Οι προηγμένες μεθοδολογίες σχεδιασμού που αυτοματοποιούν βασικά μέρη της διαδικασίας σχεδιασμού οδηγούν σε μείωση του κόστους σχεδιασμού.
- Σε μια συνεχώς αυξανόμενη πολυπλοκότητα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, η μείωση του κόστους σχεδιασμού είναι μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις της βιομηχανίας ημιαγωγών.
- Στο σταθερό κόστος περιλαμβάνονται και **έμμεσες δαπάνες**, όπως δαπάνες έρευνας, δαπάνες για εξοπλισμό και υποδομές, δαπάνες μάρκετινγκ και πωλήσεων.

Κόστος ολοκληρωμένων κυκλωμάτων



Κόστος ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Το **μεταβλητό κόστος** αντιστοιχεί στο κόστος που αποδίδεται άμεσα σε ένα κατασκευασμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα.
- Περιλαμβάνει τις **διεργασίες κατασκευής (processes)**, τη **συσκευασία** του κυκλώματος (**packaging**) και την **δοκιμή (test)** του κυκλώματος.

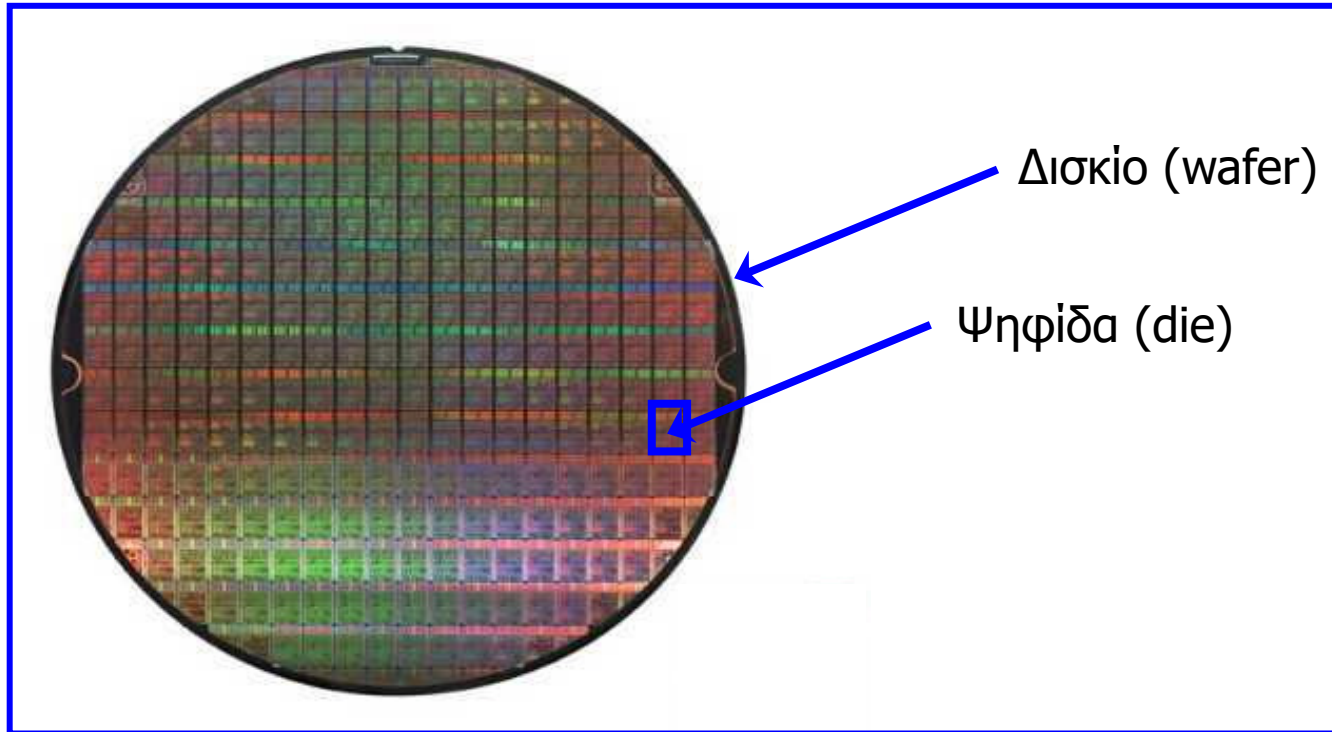
$$\text{Μεταβλητό κόστος} = \frac{\text{κόστος ψηφίδας} + \text{κόστος δοκιμής ψηφίδας} + \text{κόστος συσκευασίας}}{\text{απόδοση δοκιμής ψηφίδων}}$$

- Η επίδραση του σταθερού κόστους είναι μεγαλύτερη για προϊόντα μικρού όγκου παραγωγής.

$$\text{Κόστος ανά IC} = \text{μεταβλητό κόστος} + \frac{\text{σταθερό κόστος}}{\text{όγκος παραγωγής}}$$

- Η διαδικασία κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έχει να κάνει με την ομαδοποίηση ενός αριθμού όμοιων κυκλωμάτων σε ένα μόνο **δισκίο (wafer)**.
- Με την ολοκλήρωση της κατασκευής, το δισκίο τεμαχίζεται σε **ψηφίδες (dies)**, οι οποίες αρχικά υπόκεινται σε δοκιμή και κατόπιν συσκευάζονται χωριστά.

Κόστος ολοκληρωμένων κυκλωμάτων



- Το **κόστος ψηφίδας** εξαρτάται από το κόστος δισκίου, το πλήθος των ψηφίδων ανά δισκίο και την **απόδοση ψηφίδας (die yield)**.

$$\text{Κόστος ψηφίδας} = \frac{\text{κόστος δισκίου}}{\text{πλήθος ψηφίων ανά δισκίο} + \text{απόδοση ψηφίδας}}$$

Κόστος ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

- Ο αριθμός των ψηφίδων ανά δισκίο προκύπτει από τη διαίρεση της επιφάνειας του δισκίου προς την επιφάνεια της ψηφίδας.
- Η πραγματική κατάσταση είναι πιο περίπλοκη δεδομένου ότι τα δισκία είναι στρογγυλά και οι ψηφίδες τετραγωνικές, με αποτέλεσμα οι ψηφίδες γύρω από την περίμετρο του δισκίου να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

$$\text{Ψηφίδες ανά δισκίο} = \frac{\pi \times (\text{διάμετρος δισκίου} / 2)^2}{\text{επιφάνεια ψηφίδας}} - \frac{\pi \times \text{διάμετρος δισκίου}}{\sqrt{2} \times \text{επιφάνεια ψηφίδας}}$$

$$\text{Απόδοση ψηφίδας (Y)} = \frac{\text{πλήθος ψηφίδων ανά δισκίο που λειτουργούν σωστά}}{\text{συνολικό πλήθος ψηφίδων ανά δισκίο}} \times 100\%$$

$$\text{Απόδοση ψηφίδας (Y)} = \left(1 + \frac{\text{ατέλειες ανά μονάδα επιφάνειας} \times \text{επιφάνεια ψηφίδας}}{a} \right)^{-a} \times 100\%$$

όπου οι ατέλειες ανά μονάδα επιφάνειας είναι ένα μέτρο των ελαττωμάτων που προκύπτουν από το υλικό και την διεργασία κατασκευής και a είναι μια παράμετρος που εξαρτάται από την διεργασία κατασκευής.

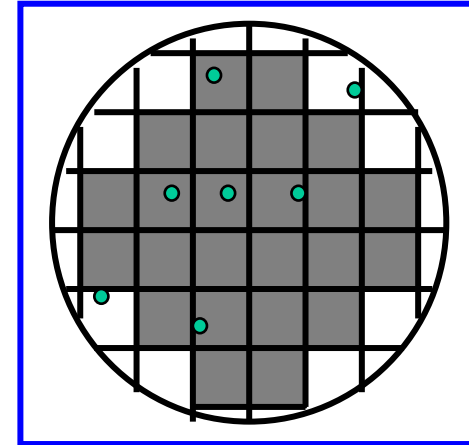
Παράδειγμα

- Δισκίο με διάμετρο 30.5 cm

Μέγεθος ψηφίδας 2.5 cm²

Ατέλειες ανά cm² = 1

Παράμετρος διεργασίας κατασκευής $a = 3$.



- Με βάση την πρώτη σχέση της προηγούμενης σελίδας προκύπτει ότι καταρχήν υπάρχουν 249 (292 – 43) πιθανά λειτουργικές ψηφίδες σε κάθε δισκίο.
Με βάση την τρίτη σχέση της προηγούμενης σελίδας, η απόδοση ψηφίδας (Y) είναι 16.2%.
Λόγω του ότι $249 \times 0.162 = 40.3$, προκύπτει ότι μόνο 40 (!) από τις ψηφίδες ενός δισκίου θα λειτουργούν σωστά.
- Ο αριθμός των λειτουργικών ψηφίδων ανά δισκίο και συνεπώς το κόστος ψηφίδας είναι σε μεγάλο βαθμό συνάρτηση της επιφάνειας της ψηφίδας (ανάλογο της τρίτης ή τέταρτης δύναμης της επιφάνειας ψηφίδας).
- Όσο αυξάνεται το μέγεθος και η πολυπλοκότητα ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος, μειώνεται η απόδοση ψηφίδας.

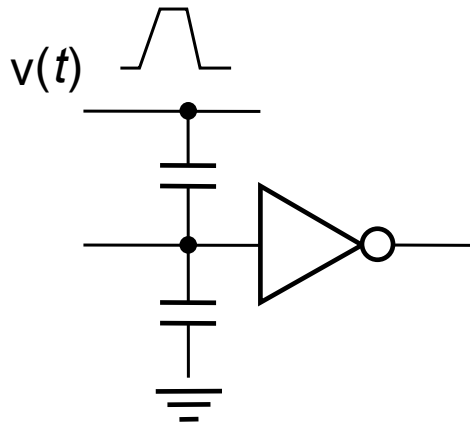
Κόστος ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

Chip	Metal layers	Line width	Wafer cost	Def./cm ²	Area mm ²	Dies/wafer	Yield	Die cost
386DX	2	0.90	\$900	1.0	43	360	71%	\$4
486 DX2	3	0.80	\$1200	1.0	81	181	54%	\$12
Power PC 601	4	0.80	\$1700	1.3	121	115	28%	\$53
HP PA 7100	3	0.80	\$1300	1.0	196	66	27%	\$73
DEC Alpha	3	0.70	\$1500	1.2	234	53	19%	\$149
Super Sparc	3	0.70	\$1700	1.6	256	48	13%	\$272
Pentium	3	0.80	\$1500	1.5	296	40	9%	\$417

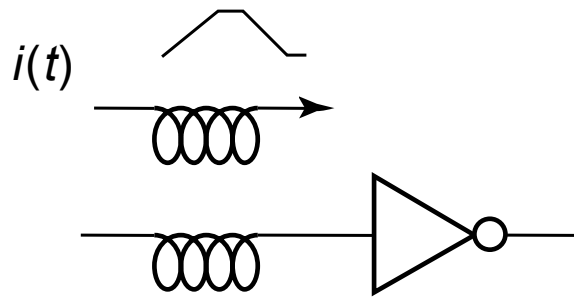
Λειτουργικότητα και στιβαρότητα

- Η πρωταρχική απαίτηση για ένα ψηφιακό κύκλωμα είναι να εκτελεί σωστά την λειτουργία για την οποία σχεδιάστηκε.
- Η μετρούμενη συμπεριφορά ενός κυκλώματος συνήθως παρεκκλίνει από την αναμενόμενη.
- Ένας λόγος γι' αυτή την παρέκκλιση είναι οι μεταβολές στη διεργασία κατασκευής: οι διαστάσεις και οι παράμετροι των στοιχείων διαφέρουν μεταξύ κύκλων παραγωγής ή ακόμα και σε ένα ενιαίο δισκίο ή μία ψηφίδα με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η συμπεριφορά του κυκλώματος.
- Η παρουσία πηγών θορύβου είναι μία άλλη πηγή αποκλίσεων στην απόκριση των κυκλωμάτων.
- **Θόρυβος**, στα πλαίσια των ψηφιακών κυκλωμάτων, είναι οι ανεπιθύμητες μεταβολές των τάσεων και των ρευμάτων στους λογικούς κόμβους ενός κυκλώματος.
- Τα σήματα θορύβου μπορούν να εισβάλουν σε ένα κύκλωμα με πολλούς τρόπους:
 - ✓ χωρητική σύζευξη,
 - ✓ επαγωγική σύζευξη,
 - ✓ γραμμές τροφοδοσίας και γείωσης των κυκλωμάτων.

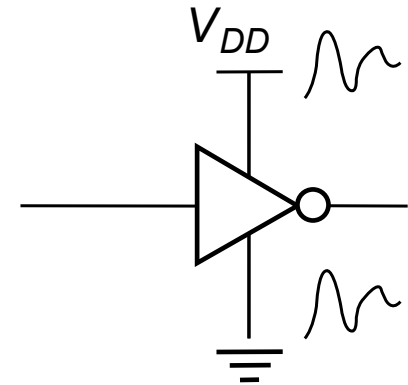
Στιβαρότητα



Χωρητική σύζευξη: μεταβολή τάσης σε μια γραμμή επηρεάζει το σήμα γειτονικής γραμμής



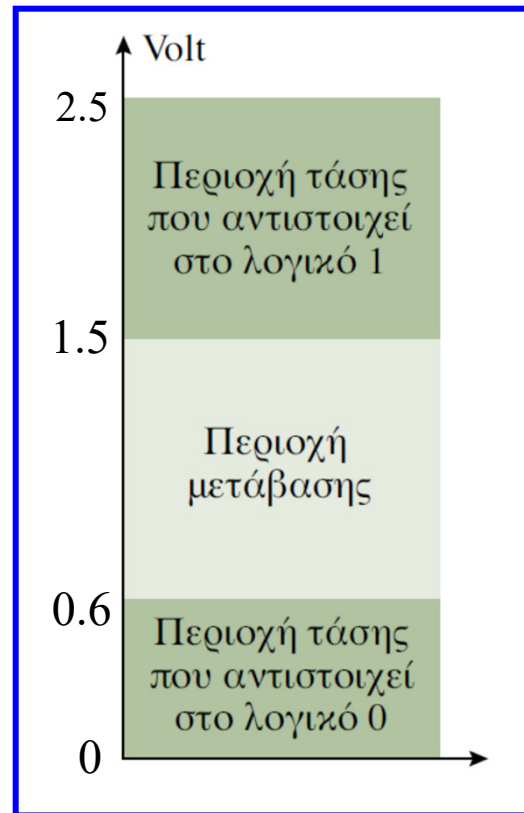
Επαγωγική σύζευξη: μεταβολή ρεύματος σε μια γραμμή επηρεάζει το ρεύμα γειτονικής γραμμής



Θόρυβος στις γραμμές τροφοδοσίας και γείωσης επηρεάζει τα επίπεδα σημάτων στις πύλες

Στιβαρότητα

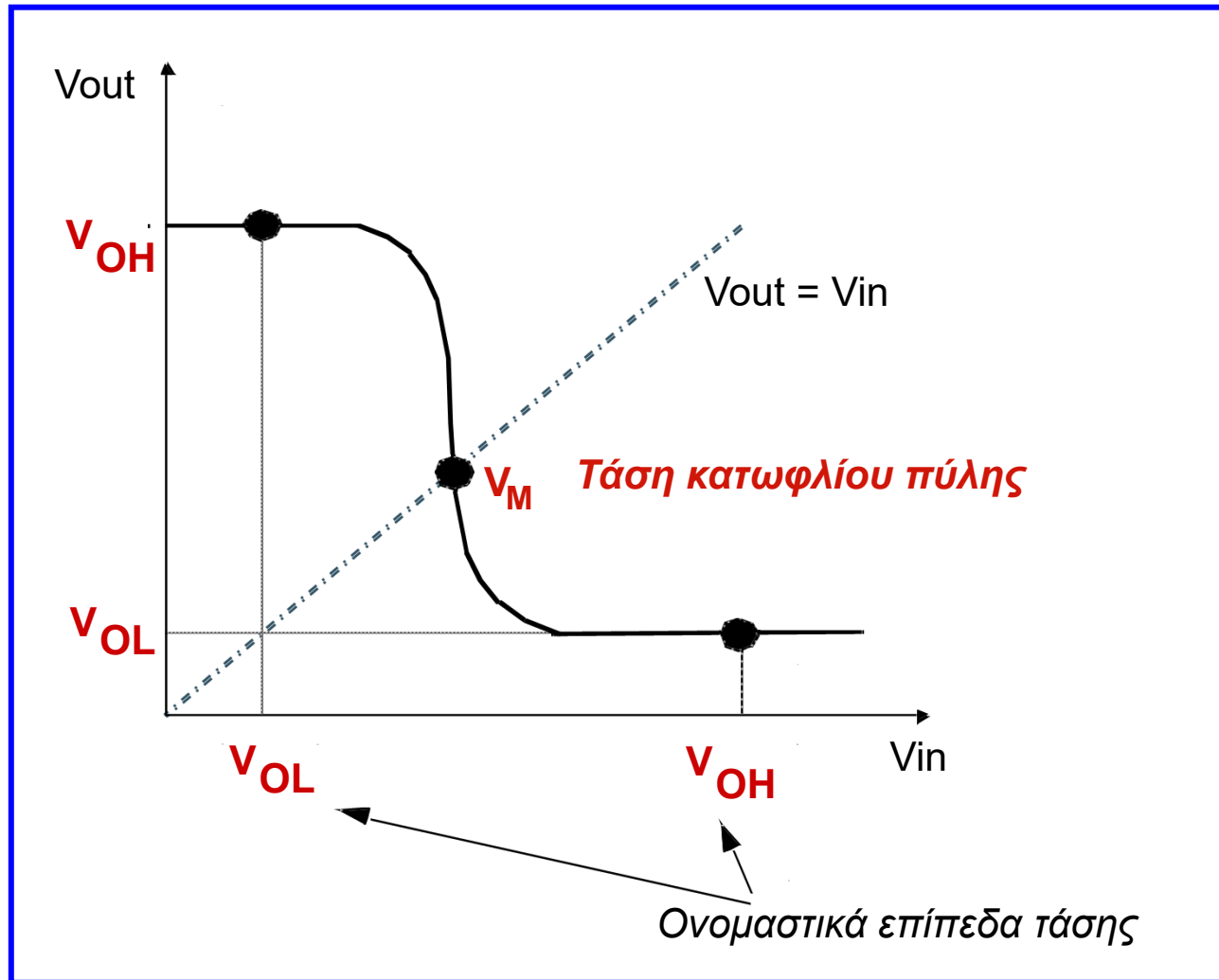
- Στην ψηφιακή λογική αντιστοιχούμε τις διακριτές λογικές 0 και 1 σε αναλογικά διαστήματα τάσης.
- Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της ψηφιακής λογικής είναι το γεγονός ότι επιτρέπει μεγάλα περιθώρια θορύβου.



Στιβαρότητα

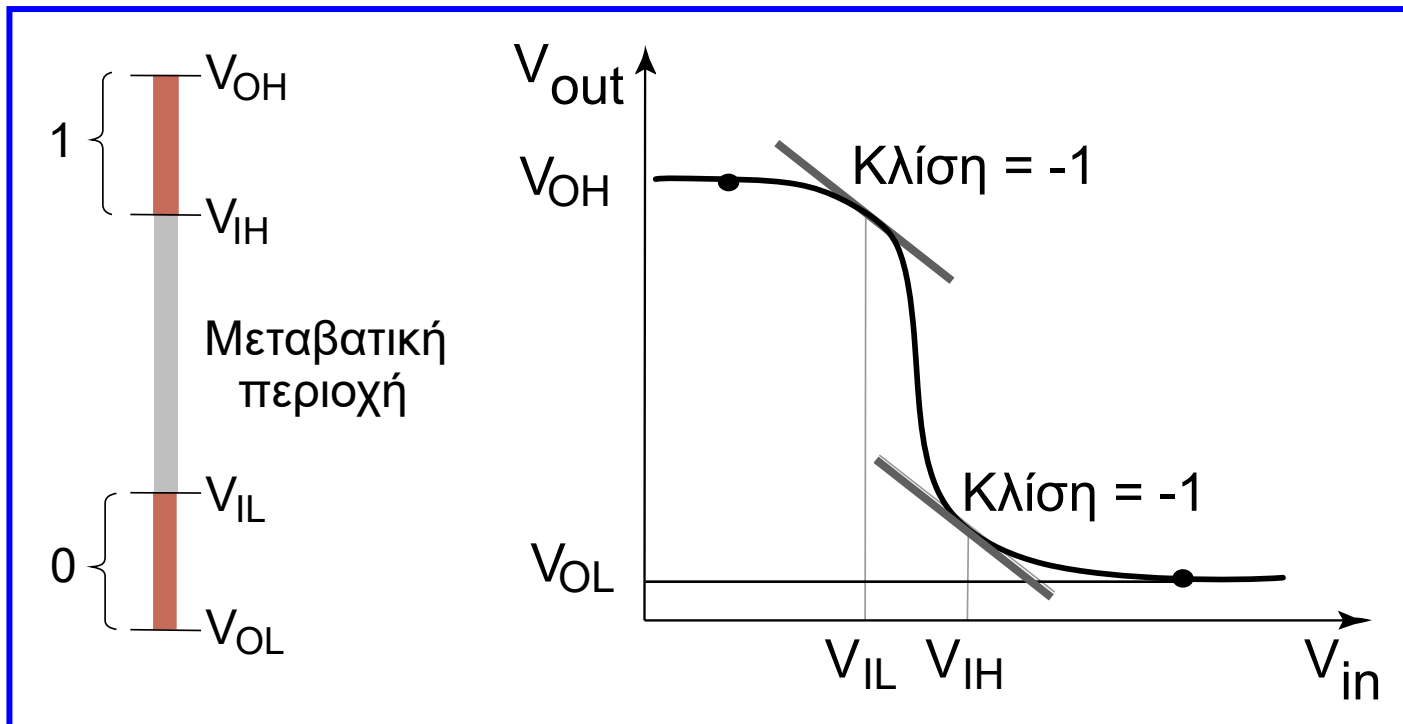
- Η τάση ενός κόμβου κυκλώματος που δεν είναι διακριτή, αλλά μπορεί να πάρει μία συνεχή σειρά από τιμές, μετατρέπεται σε διακριτή μεταβλητή συνδέοντας δύο **ονομαστικά επίπεδα τάσης** (V_{OH} και V_{OL}) με τις δύο **λογικές καταστάσεις** (0 και 1).
- Η διαφορά μεταξύ των δύο επιπέδων αναφέρεται ως **λογική ταλάντευση** ή **ταλάντευση σήματος**.
- Η εφαρμογή του V_{OH} στην είσοδο ενός **αντιστροφέα** (που είναι η πιο απλή λογική πύλη) παράγει το επίπεδο V_{OL} στην έξοδο και αντίστροφα.
- Η ηλεκτρική λειτουργία μιας πύλης εκφράζεται από τη **χαρακτηριστική μεταφοράς τάσης** (**voltage-transfer characteristic**) που είναι η γραφική παράσταση της τάσης εξόδου ως συνάρτηση της τάσης εισόδου **$V_{out} = f(V_{in})$** .
- Από την χαρακτηριστική μεταφοράς τάσης μιας πύλης, μπορούν να καθοριστούν τα δύο ονομαστικά επίπεδα τάσης, καθώς και η **τάση κατωφλίου μετάβασης** της πύλης, η οποία καθορίζεται από την χαρακτηριστικής μεταφοράς τάσης με την ευθεία που δίνεται από τη σχέση $V_{out} = V_{in}$.

Στιβαρότητα



Στιβαρότητα

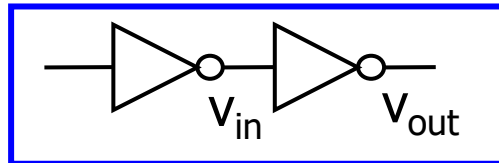
- Οι περιοχές των αποδεκτών υψηλών και χαμηλών τάσεων οριοθετούνται από τα επίπεδα τάσης V_{IH} και V_{IL} , αντίστοιχα, τα οποία αντιπροσωπεύουν τα σημεία όπου η κλίση της χαρακτηριστικής μεταφοράς τάσης είναι ίση με -1 (45°).
- Η περιοχή μεταξύ V_{IH} και V_{IL} αναφέρεται ως **απροσδιόριστη περιοχή** (ή **μεταβατική περιοχή**).
- Τα σήματα σταθερής κατάστασης πρέπει να αποφύγουν την περιοχή αυτή εάν θέλουμε να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία των κυκλωμάτων.



Στιβαρότητα

- Για να είναι μία πύλη στιβαρή και αναισθητη στις διαταραχές θορύβου, οι περιοχές τάσης που αντιστοιχούν στις λογικές τιμές 0 και 1 πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες.
- Ένα μέτρο της ευαισθησίας μιας πύλης στο θόρυβο δίνεται από τα **περιθώρια θορύβου (noise margins) NM_L (χαμηλό περιθώριο θορύβου)** και **NM_H (υψηλό περιθώριο θορύβου)**, που καθορίζουν το εύρος των επιτρεπτών περιοχών 0 και 1, αντίστοιχα, και θέτουν ένα σταθερό μέγιστο κατώφλι στην τιμή του θορύβου:

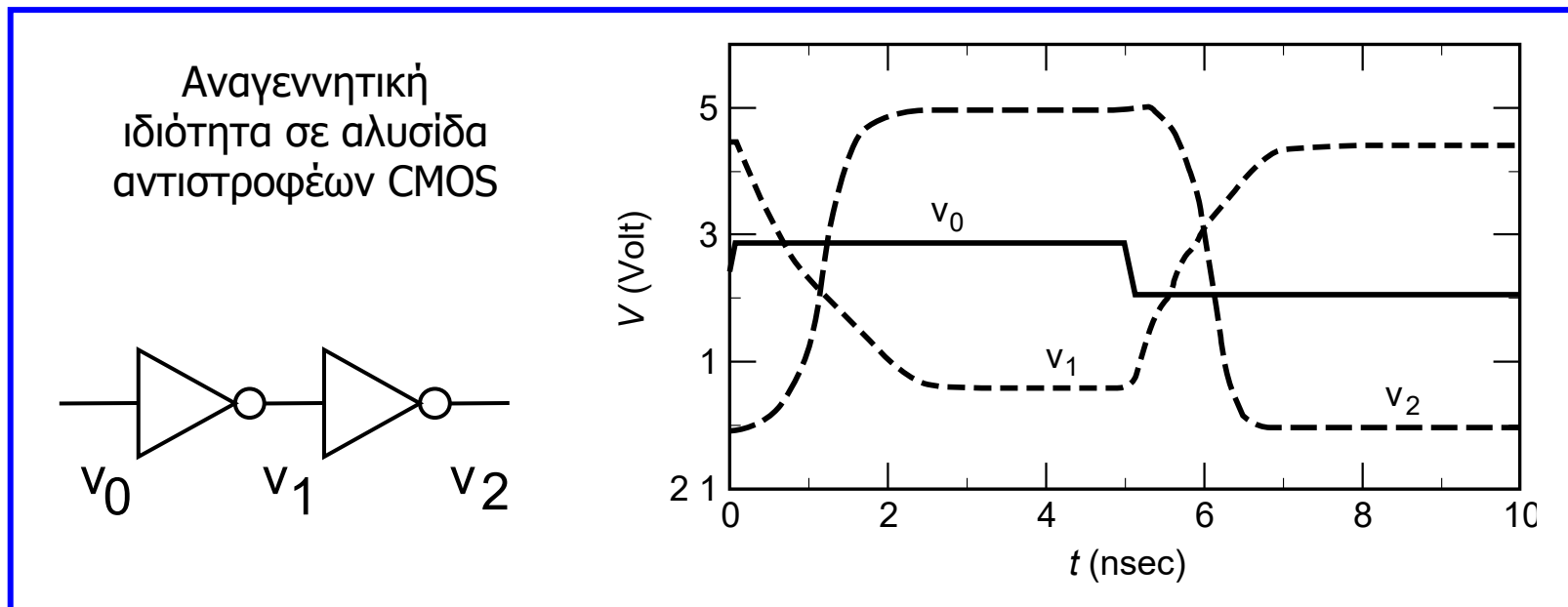
$$NM_L = V_{IL} - V_{OL} \text{ και } NM_H = V_{OH} - V_{IH}$$



- Η τιμή **NM_L** είναι η διαφορά μεταξύ της μέγιστης χαμηλής στάθμης της τάσης εξόδου της πύλης που οδηγεί (V_{in}) και της μέγιστης χαμηλής στάθμης εισόδου που αναγνωρίζεται από την οδηγούμενη πύλη (V_{out}).
- Η τιμή **NM_H** είναι η διαφορά μεταξύ της ελάχιστης υψηλής στάθμης της τάσης εξόδου της πύλης που οδηγεί και της ελάχιστης υψηλής στάθμης εισόδου που αναγνωρίζεται από την οδηγούμενη πύλη.
- Τα **περιθώρια θορύβου** είναι σημαντικό μέτρο της στιβαρότητας ενός κυκλώματος και εκφράζουν τη δυνατότητα ενός κυκλώματος να εξουδετερώνει τις πηγές θορύβου.

Στιβαρότητα

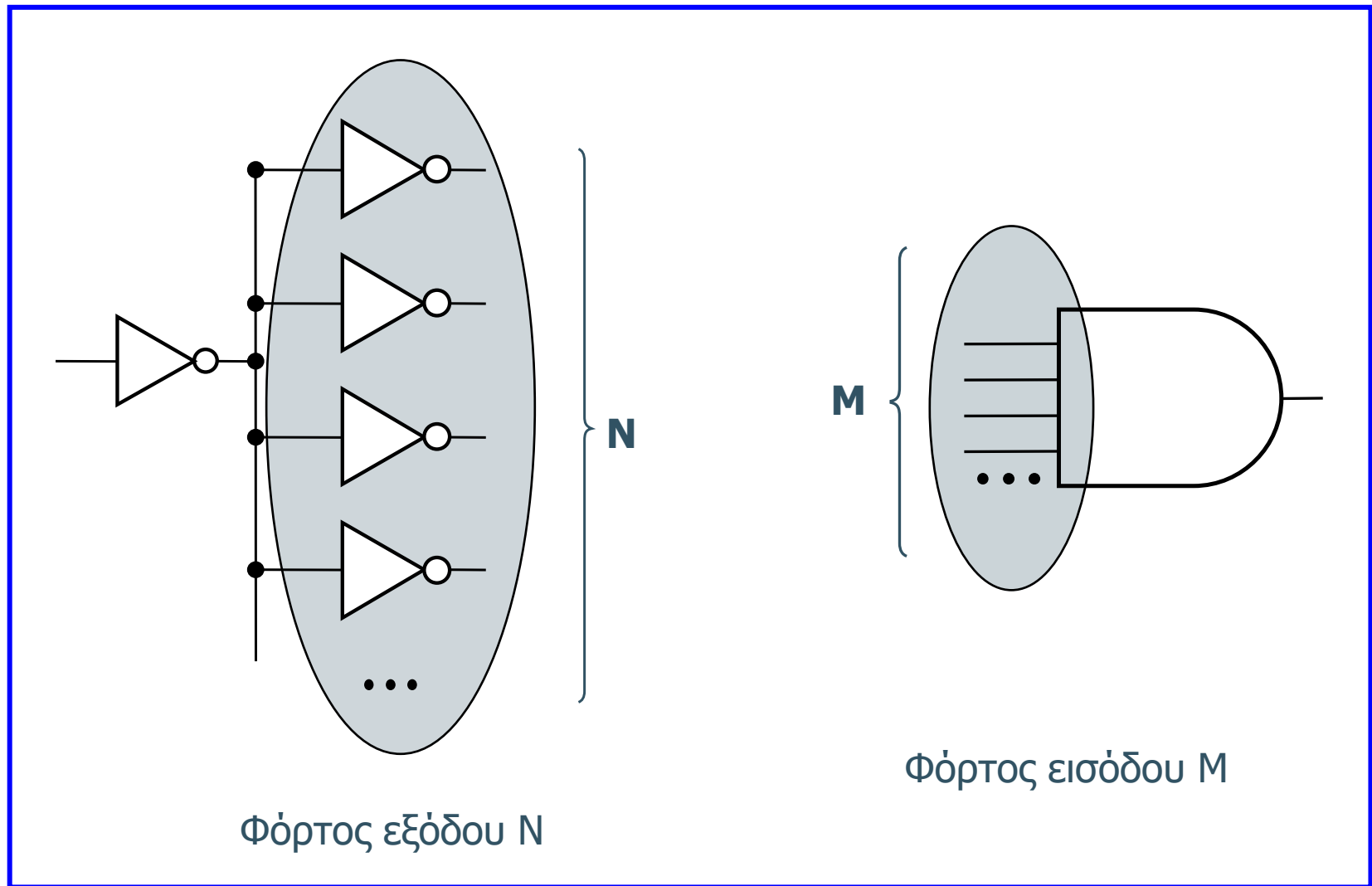
- Για όσο χρόνο το σήμα είναι μέσα στα περιθώρια θορύβου, η πύλη που ακολουθεί συνεχίζει να λειτουργεί σωστά, αν και η τάση εξόδου διαφέρει από την ονομαστική.
- Αυτή η απόκλιση προστίθεται στο θόρυβο που επιδρά στον κόμβο εξόδου και το άθροισμά τους περνά στην επόμενη πύλη, με πιθανό αποτέλεσμα τελικά το επίπεδο σήματος να βρεθεί στην απροσδιόριστη περιοχή.
- Ευτυχώς, αυτό δεν συμβαίνει εάν η πύλη διαθέτει την **αναγεννητική ιδιότητα (regenerative property)** που εξασφαλίζει ότι ένα διαταραγμένο σήμα συγκλίνει σε ένα από τα ονομαστικά επίπεδα τάσης, αφού περάσει μέσω διάφορων λογικών επιπέδων.



Στιβαρότητα

- **Φόρτος εξόδου (fan-out)** είναι ο αριθμός N των πυλών που είναι συνδεδεμένες στην έξοδο μιας οδηγούσας πύλης.
- Η αύξηση του φόρτου εξόδου μίας πύλης μπορεί να επηρεάσει τα λογικά επίπεδα του σήματος της εξόδου.
- Όταν ο φόρτος εξόδου είναι μεγάλος, το επιπρόσθετο φορτίο μπορεί να εκφυλίσει τη δυναμική επίδοση της οδηγούσας πύλης, δηλαδή να οδηγήσει σε μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση της οδηγούσας πύλης.
- Οι σχεδιαστές βασικών κυκλωμάτων καθορίζουν ένα μέγιστο φόρτο εξόδου, ώστε να εγγυώνται ότι η λειτουργία τους και η επίδοσή τους ικανοποιεί τις προδιαγραφές.
- **Φόρτος εισόδου (fan-in)** μίας πύλης είναι το πλήθος των εισόδων της πύλης.
- Οι πύλες με μεγάλο φόρτο εισόδου, δηλαδή οι πύλες με μεγάλο πλήθος εισόδων, τείνουν να είναι πιο σύνθετες, κάτι που οδηγεί συχνά σε χειρότερες στατικές (π.χ. περιορισμένα περιθώρια θορύβου) και δυναμικές ιδιότητες (π.χ. μεγάλη καθυστέρηση).

Στιβαρότητα



Συχνότητα λειτουργίας

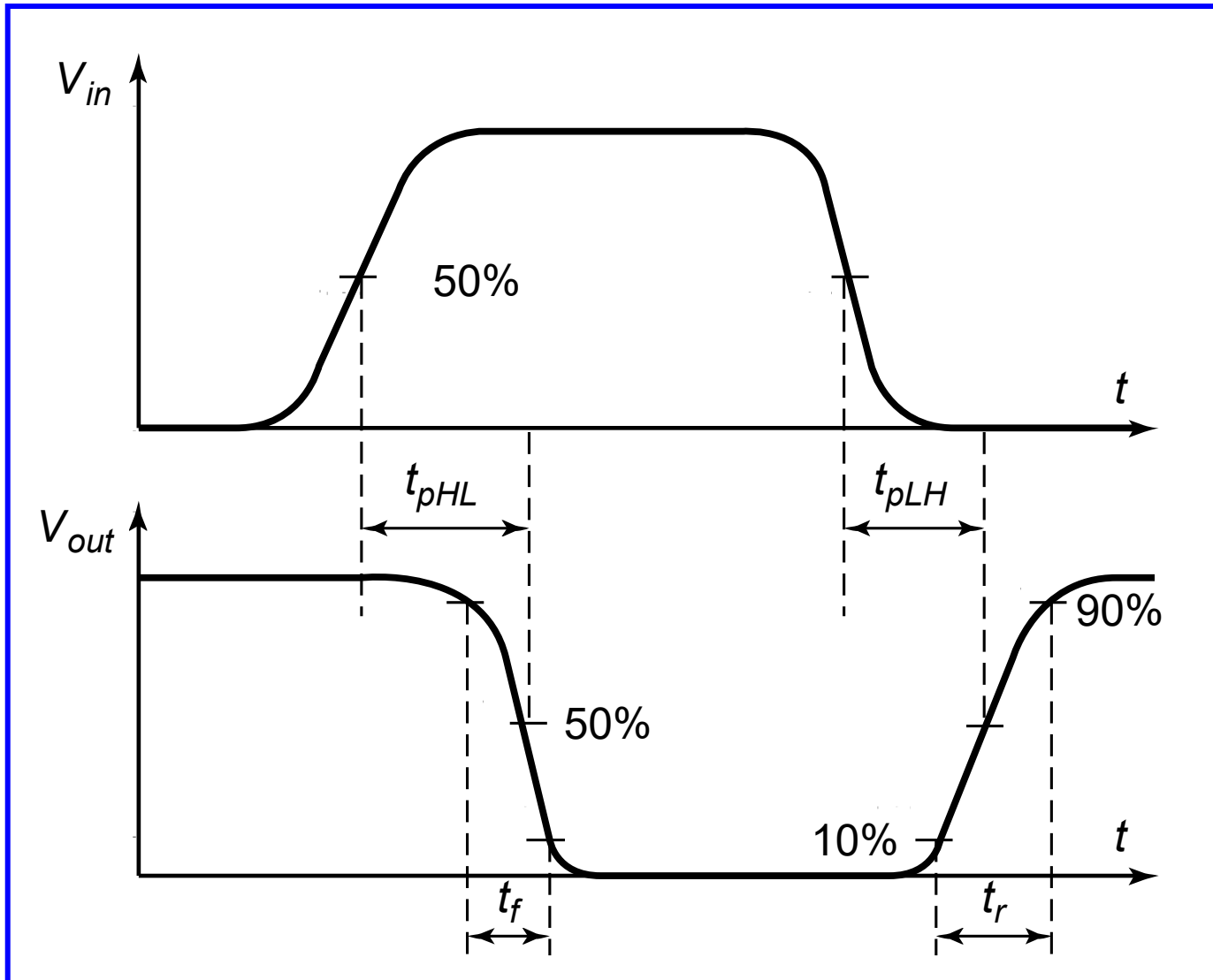
- Η **επίδοση (performance)** ενός ψηφιακού κυκλώματος εκφράζει την υπολογιστική του ικανότητα.
- Για παράδειγμα, ένας μικροεπεξεργαστής συχνά χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των εντολών που μπορεί να εκτελέσει ανά δευτερόλεπτο.
- Το μέτρο αυτό εξαρτάται και από την αρχιτεκτονική του επεξεργαστή (π.χ. δυνατότητα παράλληλης εκτέλεσης εντολών) και από τον σχεδιασμό των λογικών κυκλωμάτων.
- Η επίδοση εκφράζεται συχνά από τη διάρκεια της **περιόδου σήματος ρολογιού (χρόνος κύκλου)** ή **το ρυθμό του σήματος ρολογιού (συχνότητα)**.
- Η ελάχιστη τιμή της περιόδου σήματος ρολογιού για μία δεδομένη τεχνολογία και ένα σχεδιασμό καθορίζεται από παράγοντες όπως ο χρόνος που χρειάζονται τα σήματα για να διαδοθούν μέσω των λογικών κυκλωμάτων, ο χρόνος που χρειάζεται για την εισαγωγή και εξαγωγή των δεδομένων στους καταχωρητές κ.ά.

Καθυστέρηση διάδοσης

- Η **καθυστέρηση διάδοσης (propagation delay) t_p** μιας πύλης καθορίζει το πόσο γρήγορα ανταποκρίνεται αυτή σε μία αλλαγή στην είσοδο ή τις εισόδους της.
- Εκφράζει την καθυστέρηση στην οποία υπόκειται ένα σήμα κατά τη διάβασή του μέσω της πύλης.
- Η καθυστέρηση διάδοσης μετριέται μεταξύ των σημείων μετάβασης των κυματομορφών εισόδου και εξόδου της πύλης, όπου οι τάσεις ισούνται με το 50% της τάσης τροφοδοσίας.
- Επειδή μία πύλη επιδεικνύει διαφορετικούς χρόνους απόκρισης για ανερχόμενες ή κατερχόμενες κυματομορφές, είναι απαραίτητοι δύο ορισμοί της καθυστέρησης διάδοσης.
- Το t_{pLH} καθορίζει το χρόνο απόκρισης της πύλης για μία χαμηλή-σε-υψηλή (ή θετική) μετάβαση εξόδου, ενώ το t_{pHL} αναφέρεται σε μια υψηλή-σε-χαμηλή (ή αρνητική) μετάβαση.
- Η **καθυστέρηση διάδοσης t_p** ορίζεται ως ο μέσος όρος των δύο:

$$t_p = \frac{t_{pHL} + t_{pLH}}{2}$$

Καθυστέρηση διάδοσης

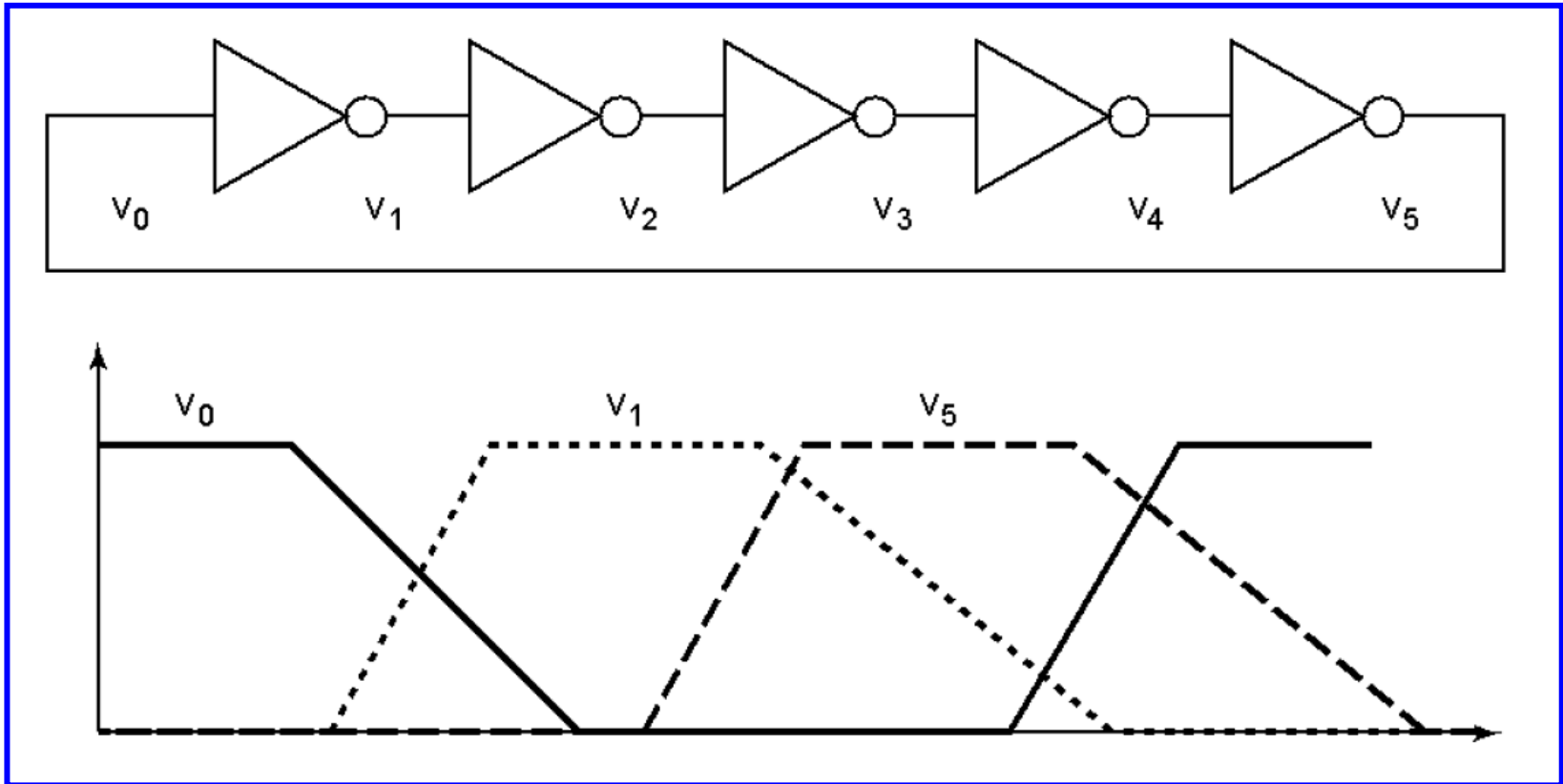


Καθυστέρηση διάδοσης

- Η καθυστέρηση διάδοσης μιας πύλης είναι εξαρτάται από:
 - ✓ την τεχνολογία κατασκευής,
 - ✓ την τοπολογία σχεδιασμού,
 - ✓ και τις κλίσεις των κυματομορφών των σημάτων εισόδου και εξόδου.
- Οι **χρόνοι ανόδου και καθόδου** t_r και t_f εκφράζουν πόσο γρήγορα ένα σήμα διέρχεται μεταξύ διαφορετικών επιπέδων ενός κυκλώματος.
- Οι χρόνοι ανόδου και καθόδου καθορίζονται μεταξύ των σημείων 10% και 90% των κυματομορφών των σημάτων.
- Ο χρόνος ανόδου/καθόδου ενός σήματος καθορίζεται κατά ένα μεγάλο μέρος από την δυνατότητα οδήγησης της οδηγούσας πύλης και από τον φόρτο που αυτή οδηγεί.

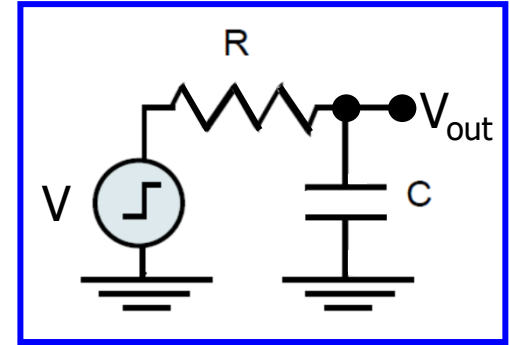
Καθυστέρηση διάδοσης

Ταλαντωτής δακτυλίου (ring oscillator) για μέτρηση και σύγκριση καθυστέρησης διαφορετικών τεχνολογιών



Καθυστέρηση διάδοσης

- Τα ψηφιακά κυκλώματα συχνά μοντελοποιούνται ως **δικτυώματα RC πρώτης τάξης**. Η χωρητικότητα εξόδου ενός κυκλώματος φορτίζεται ή εκφορτίζεται μέσω μίας αντίστασης που αντιστοιχεί σε μια αγωγίμη διαδρομή από τρανζίστορ.
- Εφαρμόζοντας βηματική είσοδο (η τάση εισόδου αλλάζει από 0 σε V και ο πυκνωτής φορτίζεται μέσω της R), η απόκριση του κυκλώματος (V_{out}) είναι εκθετική συνάρτηση του χρόνου:



$$V - V_R - V_{out} = 0 \Rightarrow V = I \cdot R + V_{out} \Rightarrow V = \frac{dQ}{dt} \cdot R + V_{out} \Rightarrow$$

$$V = \frac{d(C \cdot V_{out})}{dt} \cdot R + V_{out} \Rightarrow \frac{dV_{out}}{dt} + \frac{V_{out}}{R \cdot C} - \frac{V}{R \cdot C} = 0 \Rightarrow V_{out} = V \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Συνήθης
διαφορική
εξίσωση
1ης τάξης,
1ου βαθμού

όπου $\tau = R \cdot C$ η **σταθερά χρόνου** του δικτυώματος.

- Ο χρόνος t_{pLH} (**καθυστέρηση**) που η V_{out} **φτάνει το σημείο 50%** υπολογίζεται εύκολα:

$$\frac{V}{2} = V \cdot (1 - e^{-\frac{t_{pLH}}{\tau}}) \Rightarrow \frac{1}{2} = 1 - e^{-\frac{t_{pLH}}{\tau}} \Rightarrow e^{-\frac{t_{pLH}}{\tau}} = \frac{1}{2} \Rightarrow -\frac{t_{pLH}}{\tau} = -\ln(2) \Rightarrow t_{pLH} = \ln(2) \cdot \tau$$

- Όμοιο αποτέλεσμα προκύπτει για την εκφόρτιση του πυκνωτή (δηλ. για την t_{pHL}).

Ισχύς και κατανάλωση ενέργειας

- Η **ισχύς** ενός κυκλώματος καθορίζει το ποσό της ενέργειας που καταναλώνει σε λειτουργία το κύκλωμα και το ποσό της θερμότητας που αποβάλλει.
- Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν ένα μεγάλο αριθμό κρίσιμων αποφάσεων σχεδιασμού, όπως τη διάρκεια ζωής των μπαταριών, το μέγεθος των γραμμών τροφοδοσίας και τις απαιτήσεις συσκευασίας και ψύξης.
- Επομένως, η ισχύς και η **κατανάλωση ενέργειας** είναι μία σημαντική ιδιότητα ενός κυκλώματος που επιδρά στην εφικτότητα της υλοποίησής του, στο κόστος και στην αξιοπιστία του.
- Με την αυξανόμενη δημοτικότητα των φορητών υπολογιστικών συστημάτων που χρησιμοποιούν μπαταρίες, οι ενεργειακοί περιορισμοί αποτελούν βασικό παράγοντα που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή.
- Η **μέγιστη ισχύς** είναι σημαντική κατά τη μελέτη του μεγέθους των γραμμών τροφοδοσίας, ενώ όταν εξετάζουμε τις απαιτήσεις για ψύξη ή μπαταρίες, μας ενδιαφέρει πρωτίστως η **μέση ισχύς**.

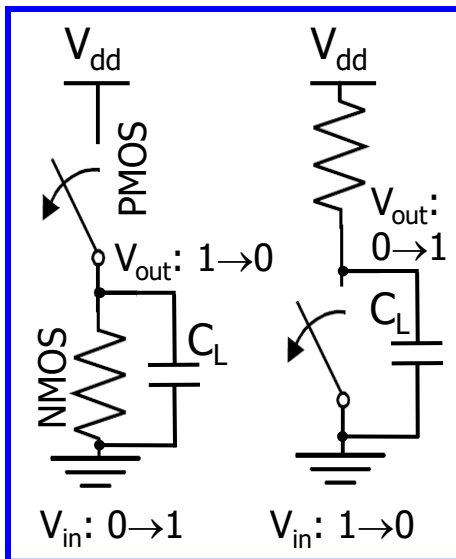
$$P_{peak} = V_{supply} i_{peak}$$
$$P_{ave} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p(t) dt = \frac{V_{supply}}{T} \int_t^{t+T} i_{supply}(t) dt$$

V_{supply} ή V_{dd} : τάση τροφοδοσίας των κυκλωμάτων.

i_{supply} ή i_{dd} : ρεύμα που ρέει από την τροφοδοσία.

Ισχύς και κατανάλωση ενέργειας

- Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω σε **στατική** και **δυναμική**.
- Η **δυναμική κατανάλωση ενέργειας** υφίσταται μόνο κατά τη διάρκεια των μεταβάσεων, όταν η πύλη πραγματοποιεί μεταβολή της τιμής στην έξοδο της και αποδίδεται στη **φόρτιση των χωρητικοτήτων** και στην ύπαρξη προσωρινών διαδρομών ρεύματος από την τροφοδοσία στη γη (**κατανάλωση βραχυκυκλώματος**).
- Η δυναμική κατανάλωση είναι ανάλογη προς τη συχνότητα των μεταβάσεων (f).
- Η **στατική κατανάλωση ενέργειας** είναι παρούσα ακόμα και όταν δεν εμφανίζεται καμία μετάβαση στην έξοδο της πύλης και προκαλείται από τις **στατικές αγωγιμες διαδρομές** μεταξύ των γραμμών τροφοδοσίας ή από τα **ρεύματα διαρροής**.



$$E_{\text{gate}} = C_L V_{dd}^2 f_{0 \rightarrow 1} + E_{sc} + E_{\text{static}} + E_{\text{leakage}}$$

$$E_{0 \rightarrow 1} = \int_0^{T/2} P(t) dt = \int_0^{T/2} V_{dd} i_{dd}(t) dt = V_{dd} \int_0^{T/2} C_L \frac{dV_{out}}{dt} dt = C_L V_{dd} \int_0^{V_{dd}} dV_{out} = C_L V_{dd}^2$$

$$E_C = \int_0^{T/2} P_C(t) dt = \int_0^{T/2} V_{out} i_C(t) dt = \int_0^{T/2} C_L \frac{dV_{out}}{dt} V_{out} dt = C_L \int_0^{V_{dd}} dV_{out} = \frac{C_L V_{dd}^2}{2}$$

50% της $E_{0 \rightarrow 1}$ αποθηκεύεται στη C_L & 50% καταναλώνεται στο PMOS

Γινόμενο ενέργειας - καθυστέρησης διάδοσης

- Η καθυστέρηση διάδοσης και η κατανάλωση ενέργειας μίας πύλης σχετίζονται, αφού η καθυστέρηση διάδοσης καθορίζεται κυρίως από την ταχύτητα με την οποία η ενέργεια αποθηκεύεται στις χωρητικότητες των πυλών.
- Όσο γρηγορότερη είναι η μεταφορά της ενέργειας (ή όσο υψηλότερη η ισχύς), τόσο γρηγορότερη είναι η πύλη.
- Το **γινόμενο ενέργειας - καθυστέρησης (energy-delay product, EDP)** μπορεί να θεωρηθεί ως ποιοτικό μέτρο μιας πύλης, αφού η ιδανική πύλη είναι γρήγορη και καταναλώνει λίγη ενέργεια.
- Το **γινόμενο ισχύος - καθυστέρησης (power-delay product, PDP)**, χρησιμοποιείται επίσης ως ποιοτικό μέτρο μιας πύλης, αφού στην ουσία είναι ισοδύναμο με το EDP.
- Το PDP είναι στην ουσία η ενέργεια που καταναλώνεται από την πύλη ανά μετάβαση (μεταβολή της τάσης εξόδου της πύλης).

Συμπεράσματα

- Σημαντικό σταθμό στην εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων αποτελεί η ανακάλυψη του τρανζίστορ διπολικής επαφής και η σύλληψη του ολοκληρωμένου κυκλώματος.
- Η διπολική ψηφιακή λογική αντικαταστάθηκε, σε ότι αφορά το ψηφιακό σχεδιασμό, με την εμφάνιση των MOSFETs, τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα ενσωμάτωσης περισσότερων στοιχείων σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα και καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια.
- Η δεύτερη εποχή της επανάστασης των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων εγκαινιάστηκε με την εμφάνιση των πρώτων μικροεπεξεργαστών στις αρχές της δεκαετίας του 1970.
- Η εξέλιξη της τεχνολογίας κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με MOSFETs, καθώς και η απαίτηση για κυκλώματα με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, οδήγησε στη χρήση της τεχνολογίας CMOS (συμπληρωματική χρήση NMOS και PMOS), η οποία παραμένει μέχρι σήμερα.
- Τα ψηφιακά κυκλώματα έχουν παρουσιάσει αλματώδη ανάπτυξη και προβλέπεται να διατηρήσουν τη δυναμική τους για τις επόμενες δεκαετίες.
- Οι προκλήσεις για το μέλλον είναι πολλές και ενδιαφέρουσες (περαιτέρω σμίκρυνση της τεχνολογίας, προηγμένα εργαλεία σχεδιασμού, προηγμένες τεχνικές κατασκευής κ.ά.).
- Η κατανόηση των βασικών χαρακτηριστικών των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, όπως κόστος, λειτουργικότητα και στιβαρότητα, συχνότητα και καθυστέρηση διάδοσης, κατανάλωση ενέργειας, είναι πολύ σημαντική για τους σχεδιαστές.



Τέλος 1^{ης} ενότητας