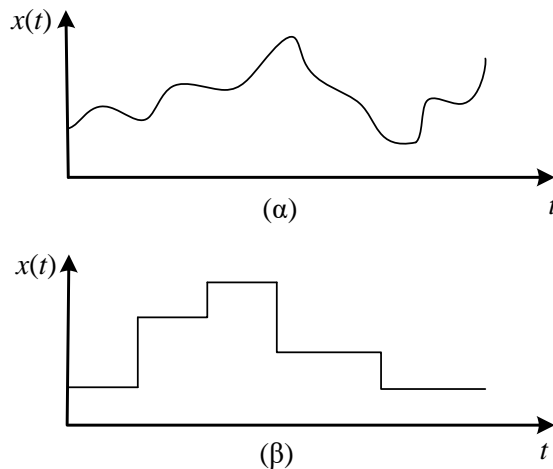


## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΨΗΦΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

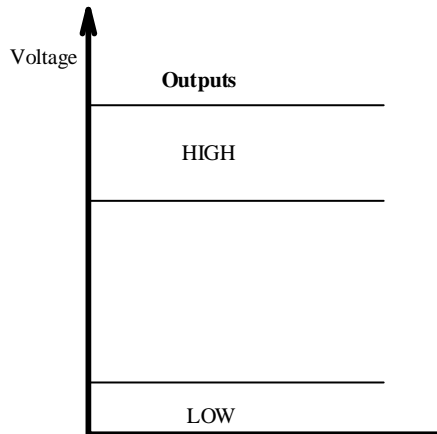
### 1.1 Αναλογικά και Ψηφιακά Σήματα και Συστήματα

Σήματα (*signals*) είναι χρονικά μεταβαλλόμενα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση πληροφοριών. *Αναλογικά* (*analog*) είναι τα σήματα, η τιμή των οποίων μπορεί να πάρει όλες τις δυνατές τιμές μιας συνεχούς περιοχής τάσεως ή εντάσεως ρεύματος ή άλλου μεγέθους και αντίστοιχα αναλογικά είναι τα συστήματα που επεξεργάζονται, μεταδίδουν ή αποθηκεύουν αναλογικά σήματα. *Ψηφιακά* (*digital*) είναι τα σήματα, η τιμή των οποίων μπορεί να πάρει περιορισμένες διακριτές τιμές τάσεως, ή εντάσεως ρεύματος ή άλλου μεγέθους και αντίστοιχα ψηφιακά είναι τα συστήματα που επεξεργάζονται, μεταδίδουν ή αποθηκεύουν ψηφιακά σήματα. Στο σχήμα 1.1 δίδεται γραφική παράσταση ενός αναλογικού (α) και ενός ψηφιακού σήματος (β).



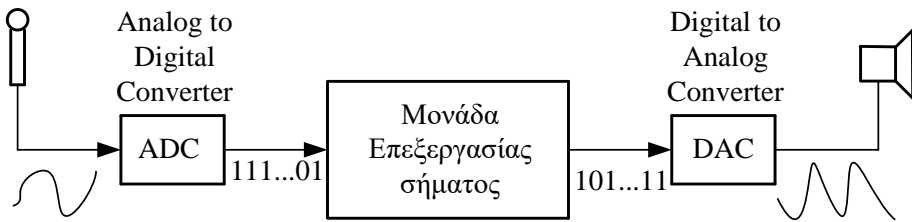
Σχήμα 1.1. Αναλογικό (α) και ψηφιακό (β) σήμα

Τα ψηφιακά συστήματα είναι σήμερα τόσο διαδεδομένα, ώστε η χρονική περίοδος που διανύουμε να μπορεί να χαρακτηριστεί τεχνολογικά σαν *ψηφιακή εποχή*. Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές (H/Y) είναι τα περισσότερο διαδεδομένα ψηφιακά συστήματα. Δημιουργήθηκαν την δεκαετία του 1940, αλλά η χρήση τους άρχισε να διευρύνεται από την δεκαετία του 1960. Αν και παλαιότερα υπήρχαν αναλογικοί υπολογιστές σήμερα όλοι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές είναι πλέον ψηφιακοί. Τα σήματα στα περισσότερα ψηφιακά συστήματα λαμβάνουν δύο διακριτές τιμές και ονομάζονται *δυναδικά* (binary). Οι διακριτές τιμές αυτών των σημάτων αναπαρίστανται από περιοχές τιμών ηλεκτρικών τάσεων που ονομάζονται HIGH (H) και LOW (L). Στο σχήμα 1.2 περιγράφονται οι περιοχές τάσεων που αντιστοιχούν στα ψηφιακά σήματα HIGH και LOW. Οι περιοχές τάσεων για τα σήματα HIGH και LOW διαφέρουν ανάλογα με την τεχνολογία υλοποίησης των ψηφιακών συστημάτων. Στη συνέχεια το HIGH θα αναπαρίσταται με το 1 και το LOW με το 0.



**Σχήμα 1.2.** Περιοχές τάσεων που αντιστοιχούν στα σήματα HIGH και LOW

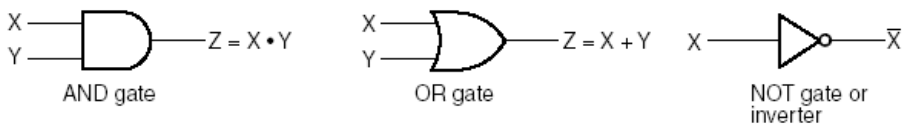
Επειδή τα σήματα που προέρχονται από τον φυσικό κόσμο είναι αναλογικά, όταν εισάγονται στα ψηφιακά συστήματα μετατρέπονται σε ψηφιακά και αντίστροφα κατά την έξοδο τα ψηφιακά σήματα μετατρέπονται σε αναλογικά. Η μονάδα που μετατρέπει τα αναλογικά σήματα σε ψηφιακά ονομάζεται μετατροπέας από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα (Analog to Digital Converter, ή ADC), ενώ η μονάδα που κάνει την αντίστροφη εργασία ονομάζεται μετατροπέας από ψηφιακό σε αναλογικό σήμα (Digital to Analog Converter, ή DAC). Στο σχήμα 1.3 δίδεται σαν παράδειγμα το διάγραμμα βαθμίδων ενός συστήματος που επεξεργάζεται φωνητικά σήματα.



Σχήμα 1.3. Σύστημα με αναλογικά και ψηφιακά σήματα.

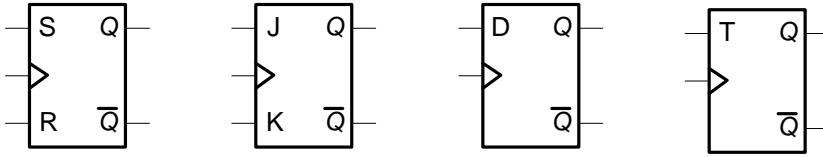
## 1.2 Βασικά Ψηφιακά Κυκλώματα

Τα βασικά ψηφιακά κυκλώματα είναι οι λογικές πύλες (logic gates) οι οποίες όπως θα δούμε στη συνέχεια, κάνουν λογικές πράξεις. Στο σχήμα 1.4 δίδονται τα λογικά σύμβολα των βασικών λογικών πυλών, AND, OR, NOT καθώς και οι αντίστοιχες λογικές πράξεις που εκτελούν. Η έξοδος της πύλης AND γίνεται 1 εάν και οι δύο εισοδοι γίνουν ταυτόχρονα 1. Η έξοδος της πύλης OR γίνεται 1 εάν τουλάχιστον μία τουλάχιστον εισόδος γίνει 1. Η έξοδος της πύλης NOT γίνεται 1 εάν η εισόδος γίνει 0 ενώ γίνεται 0 εάν η εισόδος γίνει 1.



Σχήμα 1.4. Βασικές λογικές πύλες

Σαν βασικά ψηφιακά κυκλώματα μπορούν να θεωρηθούν και τα φλιπ-φλοπ αν και είναι δυνατόν αυτά να συντεθούν από λογικές πύλες. Τα φλιπ-φλοπ (flip-flop) είναι στοιχεία μνήμης που μπορούν να αποθηκεύσουν το 0 ή το 1. Κατάσταση (state) ενός φλιπ-φλοπ είναι η λογική τιμή η οποία είναι αποθηκευμένη σε αυτό. Η κατάσταση των φλιπ-φλοπ μπορεί να αλλάξει μόνο σε καθορισμένες χρονικές στιγμές που καθορίζονται από μία εισόδο ωρολογίου, συμβολικά CLK. Η κατάσταση του φλιπ-φλοπ εμφανίζεται στην έξοδο Q, ενώ στην έξοδο  $\bar{Q}$  εμφανίζεται η συμπληρωματική τιμή της εξόδου. Στο σχήμα 1.5 δίδονται τα λογικά σύμβολα των SR, JK, D και T φλιπ-φλοπ. Τα ψηφιακά κυκλώματα συντίθενται από λογικές πύλες και φλιπ-φλοπ και διακρίνονται σε συνδυαστικά (combinational) και ακολουθιακά (sequential). Οι έξοδοι των συνδυαστικών κυκλωμάτων εξαρτώνται μόνο από τις τιμές των εισόδων τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ενώ οι έξοδοι των ακολουθιακών κυκλωμάτων εξαρτώνται από την ακολουθία των εισόδων τους.



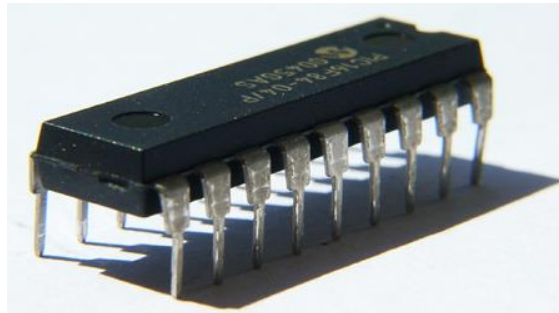
Σχήμα 1.5. Τύποι φλιπ-φλοπ

### 1.3 Μικροηλεκτρονική

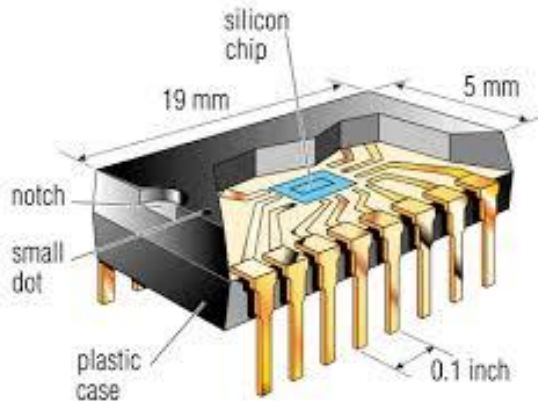
Η *μικροηλεκτρονική* (*microelectronics*) είναι περιοχή της ηλεκτρονικής που περιλαμβάνει την μελέτη και την κατασκευή πολύ μικρών εξαρτημάτων και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Αυτά τα κυκλώματα κατασκευάζονται από ημιαγωγούς. Πολλά εξαρτήματα της κλασικής ηλεκτρονικής υλοποιούνται σε μορφή κατάλληλη για μικροηλεκτρονικές υλοποιήσεις. Σε αυτά περιλαμβάνονται τρανζίστορ, πυκνωτές, πηνία, αντιστάσεις και δίοδοι.

#### 1.3.1 Ολοκληρωμένα κυκλώματα

Για την κατασκευή των ψηφιακών συστημάτων χρησιμοποιούνται σήμερα ολοκληρωμένα κυκλώματα. *Ολοκληρωμένο κύκλωμα* (*Integrated Circuit*, ή *IC*) είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα κατασκευασμένο πάνω σε ένα τμήμα πυριτίου (*silicon* ή *Si*), ή άλλου ημιαγωγού (*semiconductor*). Στο σχήμα 1.6 δείχνεται ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα τοποθετημένο σε θήκη DIP (*Dual In-line Package*). Στο σχήμα 1.7 δίδονται η δομή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

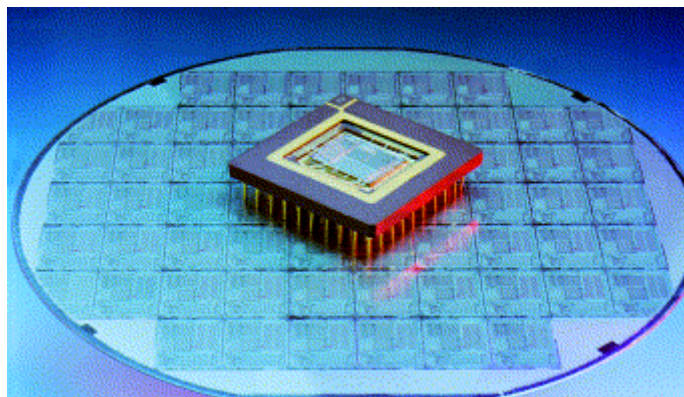


Σχήμα 1.6. Ολοκληρωμένο κύκλωμα σε θήκη DIP



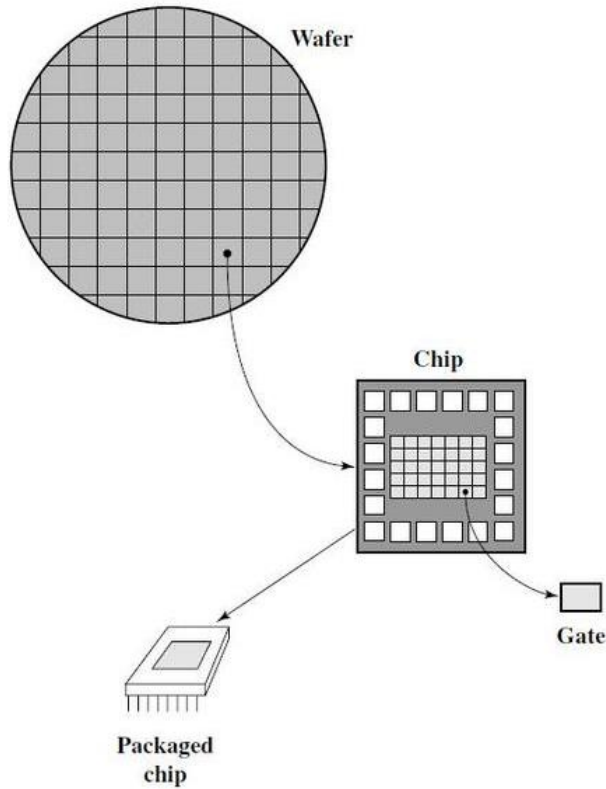
**Σχήμα 1.7.** Δομή ολοκληρωμένου κυκλώματος

Τα ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα κατασκευάζονται σήμερα με MOS (Metal Oxide Semiconductor) τρανζίστορ. Το υλικό που χρησιμοποιείται κύρια για την κατασκευή τους είναι το πυρίτιο (Si). Η τεχνολογία που έχει επικρατήσει είναι η CMOS (Complementary MOS) η οποία χρησιμοποιεί συνδυασμό από NMOS και PMOS τρανζίστορ. Με την τεχνολογία CMOS θα ασχοληθούμε σε επόμενο κεφάλαιο. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα δεν κατασκευάζονται μεμονωμένα, αλλά πολλά μαζί πάνω σε ένα κυκλικό wafer (πλακίδιο). Στο σχήμα 1.8 δείχνεται ολοκληρωμένο κύκλωμα μέσα στη βάση του και το πλακίδιο πάνω στο οποίο έχουν κατασκευασθεί πολλά τέτοια ολοκληρωμένα κυκλώματα.



**Σχήμα 1.8.** Ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) και wafer (πλακίδιο)

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα για να χρησιμοποιηθούν διαχωρίζονται και συσκευάζονται σε ειδικές θήκες όπως δείχνεται στο σχήμα 1.9.



**Σχήμα 1.9** Σχηματικό διάγραμμα κατασκευής chip

Ανάλογα με την πυκνότητα ολοκλήρωσης, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα διακρίνονται σε SSI (Small Scale Integration), MSI (Medium Scale Integration), LSI (Large Scale Integration), VLSI (Very Large Scale Integration). Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα SSI περιέχουν μερικές δεκάδες τρανζίστορ. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα MSI περιέχουν από αρκετές δεκάδες μέχρι μερικές εκατοντάδες τρανζίστορ. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα LSI περιέχουν από μερικές εκατοντάδες έως μερικές χιλιάδες τρανζίστορ. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα VLSI (Very Large Scale Integration) περιέχουν μερικές χιλιάδες έως εκατομμύρια τρανζίστορ. Τα σύγχρονα ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα κατασκευάζονται με την τεχνολογία VLSI. Στο σχήμα 1.10 δείχνεται σύγχρονο εργοστάσιο κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



*Σχήμα 1.10 Εργοστάσιο κατασκευής chip*

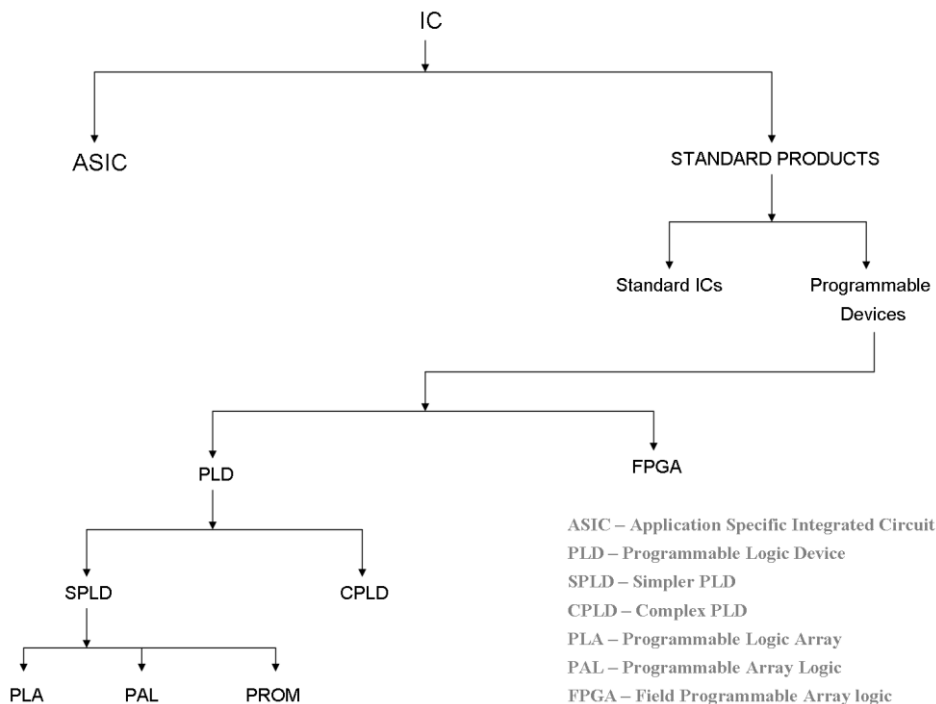
Η σχεδίαση ενός ψηφιακού ολοκληρωμένου κυκλώματος συνίσταται ουσιαστικά στον καθορισμό των χαρακτηριστικών των στοιχείων που το αποτελούν (βασικά των τρανζίστορ), την τοποθέτησή τους στο ολοκληρωμένο κύκλωμα και την σχεδίαση της διασύνδεσής τους. Για την σχεδίαση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων VLSI έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες οι οποίες περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια.

Η σχεδίαση *full custom* χρησιμοποιεί σαν βασικά στοιχεία τα τρανζίστορ. Ο σχεδιαστής έχει πλήρη ελευθερία όσον αφορά την τοποθέτηση και τη διασύνδεση των τρανζίστορ στο ολοκληρωμένο κύκλωμα, αρκεί να τηρούνται ορισμένοι κανόνες. Η μεθοδολογία αυτή δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμη για μεγάλα ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Για να απλοποιηθεί η σχεδίαση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων εισήχθησαν άλλες μεθοδολογίες που χαρακτηρίζονται από τα δομικά στοιχεία που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο σχεδιαστής. Στην *semicustom* σχεδίαση δημιουργείται μία βιβλιοθήκη από *standard cells* τα οποία έχουν σχεδιασθεί σε επίπεδο κυκλώματος. Τα *standard cells* προσδιορίζονται από τη λειτουργία που επιτελούν και ορισμένα άλλα χαρακτηριστικά τους. Η χρήση αυτών των στοιχείων διευκολύνει την σχεδίαση, αλλά περιορίζει τη δυνατότητα να αριστοποιηθούν ορισμένα χαρακτηριστικά των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Μια τρίτη προσέγγιση είναι η σχεδίαση με *gate arrays*. Σύμφωνα με αυτή, ορισμένα βασικά εξαρτήματα, τοποθετούνται σε μία κανονική δομή σε ένα ολοκλη-

ρωμένο κύκλωμα και η σχεδίαση συνίσταται στο να δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνδέσεις μεταξύ αυτών των εξαρτημάτων. Στο σχήμα 1.11 δίδεται μία κατάταξη των ψηφιακών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



**Σχήμα 1.11** Κατάταξη των ψηφιακών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

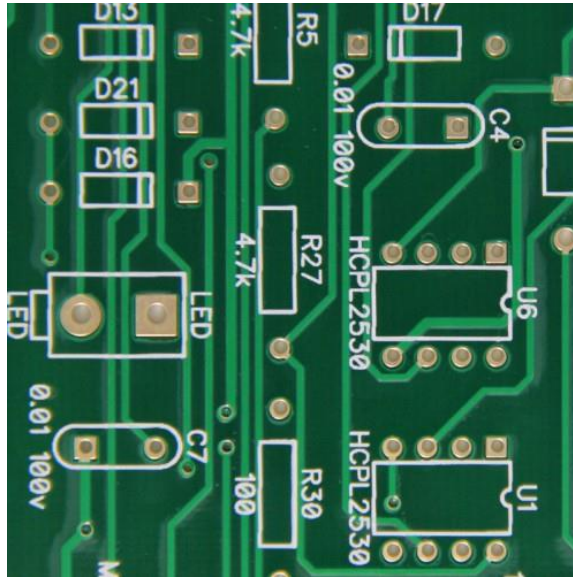
### 1.3.2 Τυπωμένα κυκλώματα

Για τη δημιουργία ενός σύνθετου ψηφιακού συστήματος απαιτείται η διασύνδεση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων καθώς και άλλων εξαρτημάτων που το αποτελούν. Για τη διασύνδεση αυτή χρησιμοποιούνται τα τυπωμένα κυκλώματα.

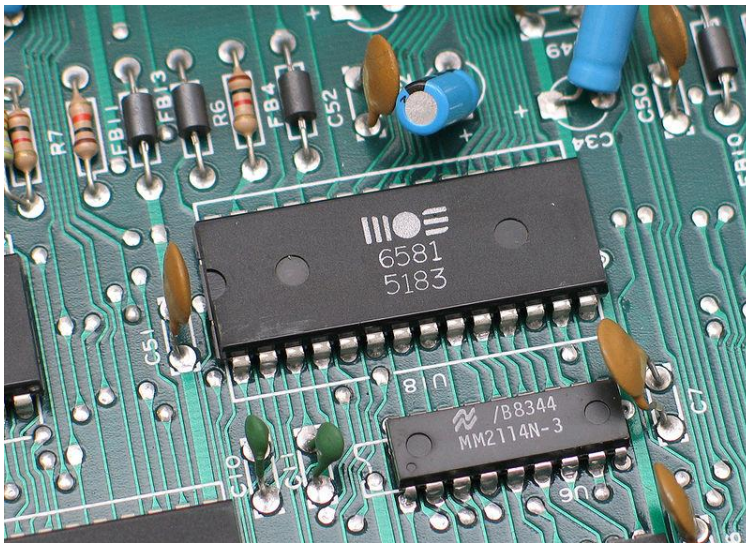
Τα *τυπωμένα κυκλώματα* (*printed circuit boards* ή *PCB*) είναι τμήματα κατάλληλου μονωτικού υλικού πάνω στα οποία έχουν δημιουργηθεί συνδέσεις από χαλκό. Στο σχήμα 1.12 φαίνεται τμήμα τυπωμένου κυκλώματος.

Παλαιότερα στα τυπωμένα κυκλώματα υπήρχαν οπές από τις οποίες διέρχονταν οι ακίδες των εξαρτημάτων και στη συνέχεια γινόταν συγκόλληση μεταξύ των ακίδων και του τυπωμένου κυκλώματος. Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται *through hole*. Τμήμα τυπωμένου κυκλώματος στο οποίο έχουν συγκολληθεί ολοκληρωμένα κυκλώματα και άλλα εξαρτήματα με την τεχνολογία *through hole* δείχνεται στο σχήμα 1.13.





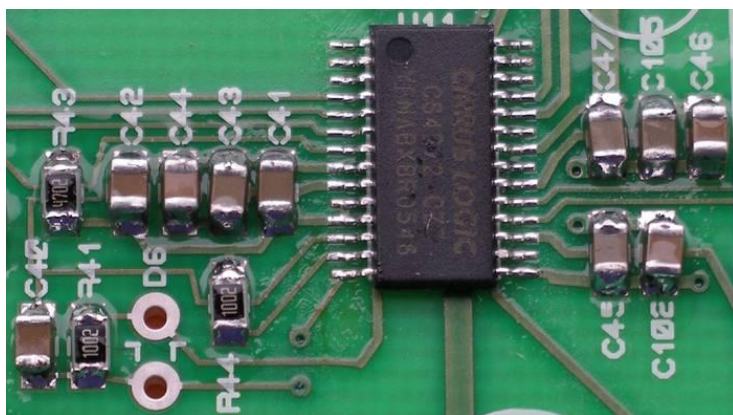
Σχήμα 1.12. Τμήμα τυπωμένου κυκλώματος



Σχήμα 1.13. Τεχνολογία through hole

Σήμερα τα διάφορα εξαρτήματα (ολοκληρωμένα κυκλώματα, αντιστάσεις πυκνωτές, κλπ) τοποθετούνται στα PCB με μία τεχνολογία που λέγεται *surface mount technology* (SMT). Με την τεχνολογία αυτή, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα αντί να έχουν ακίδες που να διαπερνούν τις οπές που δημιουργούνται στο τυπωμένο κύκλωμα και να συγκολλούνται στην άλλη όψη, έχουν ειδικούς ακροδέκτες με

τους οποίους συγκολλούνται απ' ευθείας στην επιφάνεια του τυπωμένου κυκλώματος. Η τεχνολογία SMT επιτρέπει την πυκνή τοποθέτηση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και άλλων εξαρτημάτων πάνω στο τυπωμένο κύκλωμα και τη δημιουργία συστημάτων μικρού όγκου και βάρους. Στο σχήμα 1.14 δείχνεται τμήμα τυπωμένου κυκλώματος στο οποίο έχουν συγκολληθεί ολοκληρωμένα κυκλώματα και άλλα εξαρτήματα με την τεχνολογία SMT.



*Σχήμα 1.14. Τεχνολογία SMT*

Για τη δημιουργία ψηφιακών συστημάτων τα τυπωμένα κυκλώματα, στα οποία έχουν συγκολληθεί τα ολοκληρωμένα κυκλώματα και άλλα εξαρτήματα, τοποθετούνται σε ειδικά κουτιά (cases) όπως δείχνεται στο σχήμα 1.15.



*Σχήμα 1.15. Τοποθέτηση PCB σε case*

## 1.4 Εργαλεία για ψηφιακή σχεδίαση

Τα σημερινά σύνθετα ψηφιακά συστήματα είναι αδύνατο να σχεδιασθούν με μολύβι και χαρτί. Για την σχεδίασή τους απαιτείται η χρήση υπολογιστών και ειδικών προγραμμάτων (εργαλείων) CAD (Computer Aided Design). Τα εργαλεία CAD εγκαθίστανται σε υψηλής απόδοσης προσωπικούς υπολογιστές ή σταθμούς εργασίας. Με τα εργαλεία CAD αυξάνεται η παραγωγικότητα και διευκολύνεται η ορθή σχεδίαση των ψηφιακών συστημάτων. Τα εργαλεία CAD διακρίνονται σε αυτά για τον σχεδιασμό ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και σε αυτά για τον σχεδιασμό τυπωμένων κυκλωμάτων. Σαν τελικό αποτέλεσμα τα εργαλεία CAD παράγουν αρχεία με δεδομένα που χρησιμοποιούνται ανάλογα από τα εργαστήρια ή τα εργοστάσια κατασκευής ολοκληρωμένων ή τυπωμένων κυκλωμάτων.

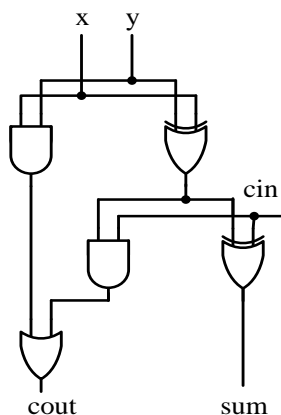
Στον σχεδιασμό ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με τα εργαλεία CAD εκτελούνται οι εργασίες που περιγράφονται στη συνέχεια:

1. Σχεδίαση του ψηφιακού κυκλώματος και προσομοίωση.
2. Σύνθεση.
3. Παραμετρική βελτιστοποίηση.
4. Φυσική σύνθεση.

Παλαιότερα η εισαγωγή της σχεδίασης των ψηφιακών συστημάτων στα εργαλεία CAD γινόταν με σχηματικό τρόπο, δηλαδή γινόταν σχηματική παράσταση του ψηφιακού κυκλώματος συνδέοντας κάποια εξαρτήματα από τη βιβλιοθήκη του εργαλείου CAD. Η σχεδίαση όμως των σύγχρονων σύνθετων ψηφιακών συστημάτων έχει επικρατήσει να γίνεται με κάποια γλώσσα περιγραφής υλικού.

Οι γλώσσες περιγραφής υλικού (*Hardware Description Languages*, ή HDL) χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την προτυποποίηση των ψηφιακών συστημάτων, αλλά στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν και για την σχεδίασή τους. Το λογισμικό σχεδίασης με HDL περιλαμβάνει HDL compiler, simulator και synthesis tools. Ο σχεδιαστής περιγράφει σε κάποια γλώσσα περιγραφής υλικού το ψηφιακό σύστημα χρησιμοποιώντας κάποιο πρόγραμμα συγγραφής (editor). Στην συνέχεια ο HDL compiler αναλύει την περιγραφή του κυκλώματος για συντακτικά λάθη. Σχεδόν πάντα ο σχεδιαστής χρησιμοποιεί την έξοδο του HDL compiler σε κάποιον simulator για τον έλεγχο ορθής λειτουργίας του ψηφιακού συστήματος. Όταν δεν υπάρχουν συντακτικά λάθη και το κύκλωμα λειτουργεί σωστά, ο σχεδιαστής χρησιμοποιεί τον ίδιο τον HDL κώδικα σαν είσοδο σε κάποιο synthesis tool για να μετατρέψει σε σχεδίαση με λογικές πύλες το ψηφιακό σύστημα που θέλει να υλοποιήσει. Διαδεδομένες γλώσσες περιγραφής υλικού είναι η VHDL (Very High Speed Integrated Circuits Description Language) και η Verilog HDL που αποτελούν πλέον βιομηχανικά πρότυπα.

Αναλυτικά με την περιγραφή ψηφιακών κυκλωμάτων με τις γλώσσες περιγραφής υλικού θα ασχοληθούμε σε επόμενο κεφάλαιο. Σαν παράδειγμα σχεδίασης στο σχήμα 1.16 δίδεται μία σχεδίαση με λογικές πύλες ενός πλήρη αθροιστή (full adder). Στο σχήμα 1.17 δίδεται η αντίστοιχη περιγραφή του πλήρη αθροιστή με την γλώσσα περιγραφής υλικού VHDL, ενώ στο σχήμα 11.18 η περιγραφή με την γλώσσα περιγραφής υλικού Verilog.



**Σχήμα 1.16.** Λογικό κύκλωμα πλήρη αθροιστή

```

LIBRARY ieee;
USE ieee.std_logic_1164.all;

ENTITY fulladd IS
    PORT (x, y, cin : IN  STD_LOGIC;
          sum, cout : OUT STD_LOGIC);
END fulladd;

ARCHITECTURE LogicFunc OF fulladd IS
BEGIN
    sum <= (x XOR y) XOR cin;
    cout <= (x AND y) OR ((x XOR y) AND cin);
END LogicFunc;

```

**Σχήμα 1.17.** Περιγραφή κυκλώματος πλήρη αθροιστή με την VHDL

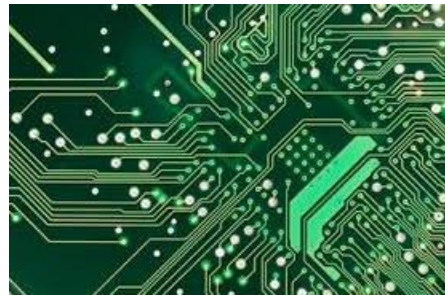
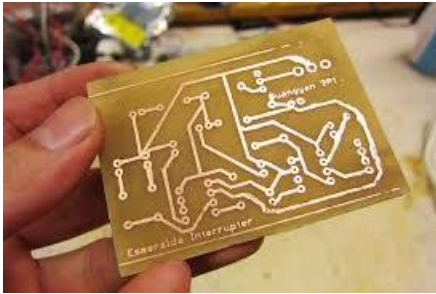
```
module fulladd(a, b, cin, sum, cout);  
input a, b, cin;  
output sum, cout;  
assign sum = cin ^ a ^ b;  
assign cout = a & b | (a ^ b)&cin;  
endmodule;
```

**Σχήμα 1.18.** Περιγραφή κυκλώματος πλήρη αθροιστή με την Verilog

## Ασκήσεις

1.1 Τι είναι ολοκληρωμένο και τι τυπωμένο κύκλωμα.

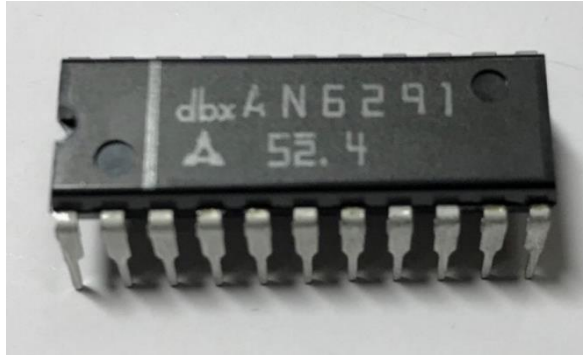
1.2 Από τα κυκλώματα που δίδονται στην συνέχεια ποιο είναι ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC) και ποιο τυπωμένο κύκλωμα (PCB).



1.3 Από τα ολοκληρωμένα κυκλώματα που δίδονται στην συνέχεια ποιο είναι through hole και ποιο SMT.



1.4 Το ολοκληρωμένο κύκλωμα που δίδεται στην συνέχεια είναι τεχνολογίας through hole ή SMT.



1.5 Το ολοκληρωμένο κύκλωμα που δίδεται στην συνέχεια είναι τεχνολογίας through hole ή SMT.



1.6 Στο wafer που δίδεται στην συνέχεια σημειώστε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα.

