

FISICA DEI CALCOLATORI: principi base delle moderne tecnologie al silicio

1. Un po' di storia.

1.1 - Apriamo un PC ...

I calcolatori sono macchine complesse in grado di elaborare qualunque tipo di informazione, come numeri, testi, suoni e immagini.

In realtà, anche le elaborazioni più complesse sono effettuate dal calcolatore dividendole in una sequenza più o meno lunga di operazioni elementari più semplici (*istruzioni*), che costituisce il cosiddetto programma.

Il "cervello" del calcolatore è costituito dalla **CPU**, unità centrale di elaborazione (o *processore*) che include, al suo interno, tutti i circuiti necessari per compiere le istruzioni elementari.

Le interfacce di ingresso/uscita (o di I/O, dall'inglese Input/Output) sono circuiti digitali che hanno il compito di consentire lo scambio di dati fra il calcolatore e i dispositivi esterni. I più comuni fra questi sono la tastiera, il mouse e il CD-ROM (dispositivi di ingresso) e i terminali video e le stampanti (dispositivi di uscita).

Altri comunissimi dispositivi sono le memorie di massa, generalmente dischi magnetici (hard-disk), nei quali vengono memorizzati i dati e i programmi non in uso nell'elaborazione corrente.

La CPU, la memoria, e le interfacce sono collegati fra loro mediante una rete di fili di interconnessione chiamata bus.



Fig. 1 – Alcuni componenti fondamentali all'interno di un calcolatore.

1.2 - ...la CPU (*Central Processing Unit*) o processore

Lo sforzo dei progettisti per raggiungere velocità di esecuzione delle istruzioni sempre maggiori ha portato alla realizzazione di processori sempre più complessi, con un numero via via crescente di moduli funzionali interni diversi (Tab.1).

I progenitori degli odierni calcolatori furono tuttavia concepiti già agli inizi del 1600, ben prima dell'invenzione dei transistor. Essi erano di tipo meccanico basati su movimenti di ruote dentate, ed erano in grado di effettuare semplici operazioni aritmetiche.

La successiva evoluzione della tecnologia si ebbe con la costruzione dei primi calcolatori elettronici, sotto la spinta delle esigenze belliche, durante la Seconda Guerra Mondiale. I

principali componenti di tali calcolatori erano interruttori elettromeccanici (i relè), ed elettronici (diodi e triodi realizzati con valvole).

L'utilizzo di questi componenti comportava alcuni limiti: i calcolatori erano, infatti, molto ingombranti (occupavano intere stanze!) e la velocità di elaborazione era limitata dai ritardi introdotti dal movimento delle parti meccaniche. Inoltre, essi consumavano molta energia e l'operazione di programmazione era laboriosa e poco affidabile.

L'utilizzo dei dispositivi a semiconduttore ha rivoluzionato molti campi della tecnologia moderna. Uno fra questi è proprio quello dei sistemi di elaborazione, cioè dei calcolatori. L'invenzione del transistor e, successivamente, lo sviluppo delle tecnologie di integrazione su chip, rivoluzionò in pochi anni la tecnologia di realizzazione dei calcolatori. I dispositivi a semiconduttore, diodi e transistor, utilizzati come interruttori elettronici, sostituirono i tubi a vuoto, che divennero ben presto obsoleti.

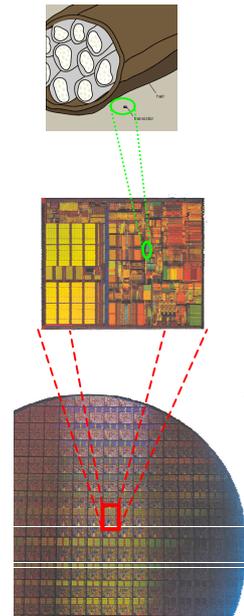


Fig. 2 – Confronto tra le dimensioni della fetta di silicio, un capello umano e un transistor.

La possibilità di utilizzare un numero sempre maggiore di componenti, a basso consumo ed affidabili, in uno spazio sempre più piccolo, ha costituito la spinta definitiva al progetto e alla realizzazione di sistemi di elaborazione sempre più complessi e potenti, quali quelli che oggi troviamo nelle nostre case.

Questa miniaturizzazione sempre più spinta (e le nuove frontiere della nanotecnologia) ha aperto la porta ad applicazioni fino ad ora impensate (elettronica, biomedica, cosmetica, ...)

I calcolatori attuali sono interamente realizzati utilizzando circuiti digitali, costituiti da un numero enorme (dell'ordine di diversi milioni) di transistor integrati su un unico chip di silicio.

Nome	Data	Transistor	um	Clock speed (MHz)	MIPS
8080	1974	6.000	6	2	0.64
8088	1979	29.000	3	5	0.33
80286	1982	134.000	1.5	6	1
80386	1985	275.000	1.5	16	5
80486	1989	1.200.000	1	25	20
Pentium	1993	3.100.000	0.8	60	100
Pentium II	1997	7.500.000	0.35	233	300
Pentium III	1999	9.500.000	0.25	450	510
Pentium 4	2000	42.000.000	0.18	1500	1700
Pentium 4	2002	> 55.000.000	0.13	> 3000	~3000

Tab. 1 – Evoluzione del numero di transistor all'interno di un chip e della corrispondente capacità di calcolo

1.3 - La scoperta dei semiconduttori e delle loro prime applicazioni.

Da una lettera che Pauli scrisse a Rudolf Peierls da New York nel 1931:

"Ueber Halbleiter sollte man nicht arbeiten, das ist eine Schweinerei, wer weiss, ob es überhaupt Halbleiter gibt"

[uno non deve lavorare sui semiconduttori, sono un pasticcio, chi sa se addirittura esistono i semiconduttori]

1782 Alessandro Volta introduce la parola "**semiconduttori**" osservando la velocità con la quale un elettrometro si scarica se uno dei suoi terminali viene toccato con materiali diversi: i metalli lo fanno istantaneamente, gli isolanti non lo scaricano e i semiconduttori lo scaricano molto lentamente.

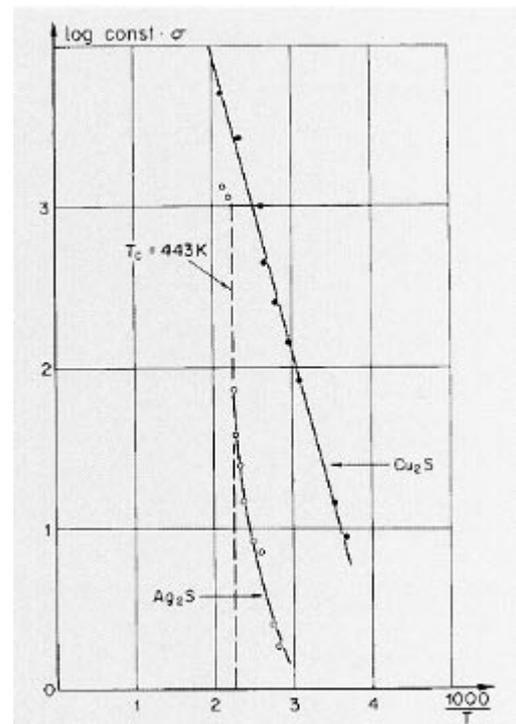


Ritratto di A. Volta

1833 Faraday nota che la conducibilità di alcuni materiali aumenta all'aumentare della temperatura



Ritratto di M. Faraday



Resistività elettrica di alcuni solfuri in funzione dell'inverso della temperatura.

1873 Willoughby Smith osserva che la conducibilità del selenio cambia se viene illuminato

1874 Ferdinand Braun (professore a Marburg, Germania) inventa i primi diodi a cristallo e determina le proprietà rettificanti di contatti a baffo di gatto tra un metallo e la galena (PbS). Questa è la prima giunzione metallo-semiconduttore e il primo diodo a semiconduttore.

1897 J.J. Thomson scopre l'elettrone.

1901 Viktor Emanuele Riecke scopre che la corrente elettrica nei metalli è dovuta al moto degli elettroni

1903 Johan Koenigsberg postula che la resistività dei semiconduttori segue la seguente formula:

$$r = r_0 e^{Q/T}$$

dove Q è una generica barriera di potenziale e T la temperatura.



Fig. - Johan Koenigsberg



Fig. - Karl Baedeker

1907 Karl Baedeker conclude che la concentrazione degli elettroni e il carattere metallico dello ioduro di rame aumentano con la temperatura

Tra il **1904-1906** vengono scoperti i diodi e i triodi a valvole che sostituiscono i diodi a semiconduttore nelle applicazioni.

1925 Julius J. Lilienfeld (Università di Brooklin) brevetta il concetto di un amplificatore a stato solido basato sul solfato di rame

1930 Gudden (Università di Gottingen) ipotizza che sostanze pure non possano essere semiconduttori e che solamente la presenza delle impurezze permetta alle sostanze di comportarsi da semiconduttori

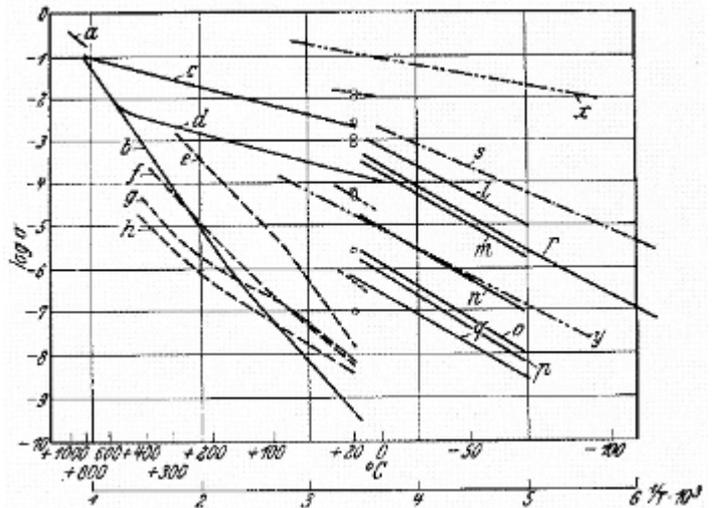


Fig. - Conducibilità elettrica dell'ossido di Rame misurata da vari autori

1931 Alan Wilson (Università di Cambridge) propone una teoria a bande dei solidi e descrive il comportamento dei semiconduttori nell'ambito di questa teoria. Introduce il concetto di impurezze donori ed accettori.



Fig. - Alan Wilson

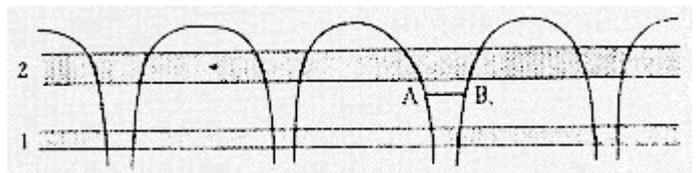


Fig. - Disegno schematico delle bande di energia di un semiconduttore drogato.

1931 Heisenberg propone il concetto di lacuna come quasi-particella di carica positiva che descrive gli stati vuoti in una banda altrimenti piena.

Alla **fine del 1930** Nevill F. **Mott** (Gran Bretagna), Alexander Sergevich **Davydov** (Unione Sovietica), Walter **Schottky** (Germania) producono una teoria della rettificazione della giunzione metallo-semiconduttore

1935 Oskar Heil propone un brevetto per un triodo ad effetto di campo (la struttura proposta è molto simile agli attuali insulate-gate FET)

1936 la ditta telefonica americana (**Bell Telephone Laboratories**) lancia un programma di ricerca volto a sostituire i commutatori elettromeccanici con commutatori a stato solido.

1938 R. W. Pohl (Berlino) dimostra teoricamente la possibilità di realizzare un'amplificazione a stato solido

Lo scoppio della seconda guerra mondiale blocca gran parte delle ricerche sui semiconduttori spostando i ricercatori su problematiche più direttamente connesse con l'industria bellica.

1.4 – La scoperta del transistor

29 dicembre 1939 Shockley scrive sul suo quaderno di laboratorio su di un dispositivo che potesse amplificare e fosse basato sui semiconduttori.

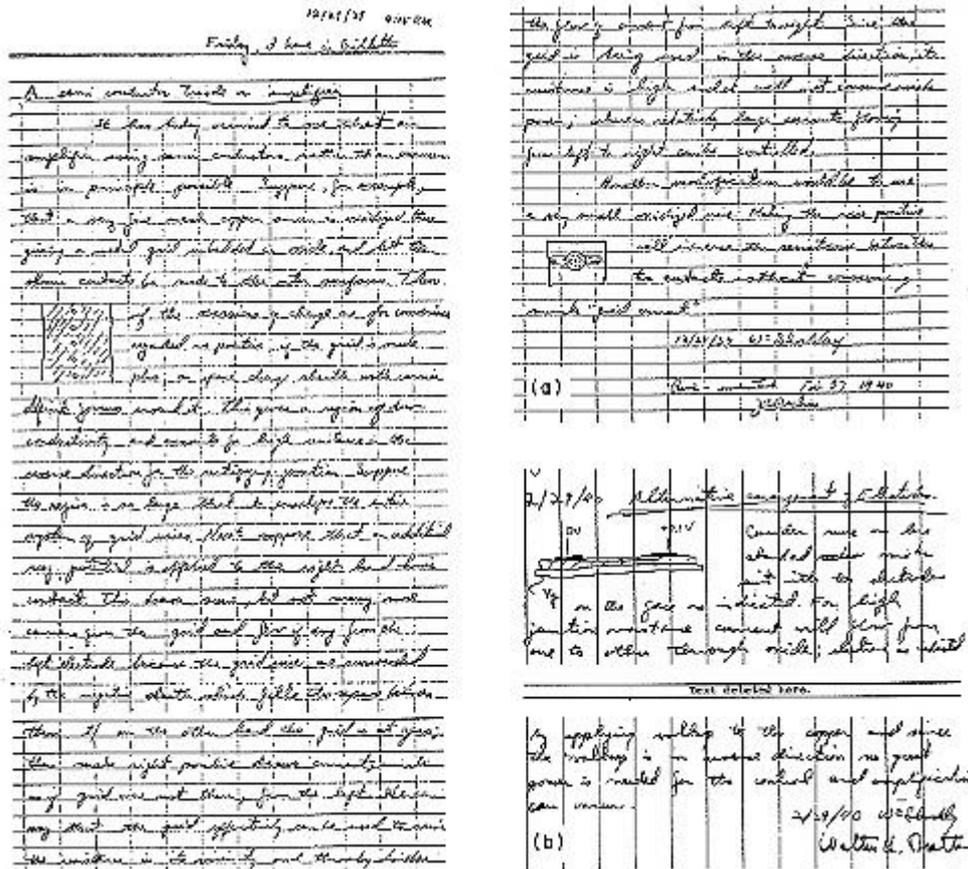


Fig. - Copia di alcune pagine del quaderno di laboratorio di Shockley datate 29/12/1939

J. H. Scaff e H. C. Theurer dei laboratori Bell producono Silicio puro e drogato mediante un processo di fusione in vuoto. Distinguono il tipo di drogaggio dall'odore (se drogato non odora di fosforo). Determinano anche che gli elementi del gruppo III drogano accettore e quelli del gruppo V drogano donore. Realizzano la prima giunzione p/n

1940 Russel S. Ohl dimostra il primo fotodiodo basato su di una giunzione p/n in silicio

Marzo 1942 viene lanciato un progetto di ricerca sui semiconduttori dall'Università di Purdue e diretto da **Karl Lerk-Horovitz**. Questo progetto parte ex-novo ed ha come obiettivo di produrre e testare diodi a semiconduttore mediante l'intensificazione della ricerca sui semiconduttori sia dal punto di vista del materiale che dei dispositivi. Viene scelto come materiale il Germanio perché precedenti studi ne hanno dimostrato un'alta affidabilità. Questa ricerca focalizzata sui raddrizzatori a diodo è motivata dalle loro applicazione come rivelatori per radar. I principali risultati di tale sforzo di ricerca furono:

- 1) studio delle proprietà fondamentali del Germanio (banda proibita, drogaggio, mobilità, proprietà ottiche, etc.)
- 2) brevetto su di un raddrizzatore per tensioni inverse molto alte (>100V)
- 3) scoperta di una serie di risultati anomali sulle proprietà dei contatti di superficie per le caratteristiche di rettificazione dei diodi

Il progetto termina nel 1946.



Fig. - Karl Lark-Horowitz con i colleghi dell'Università di Purdue nel 1942.
 Da sinistra: W. Pauli, J. Schwinger, E. Condon, J. Becker.
 Dietro: Lark-Horowitz, W. Hansen, D. Kerst.

1945 fine della guerra. Riparte il progetto sui semiconduttori dei laboratori Bell e viene nominato direttore del progetto William **Shockley**. Fanno parte di questo gruppo John **Bardeen** e Walter **Brattain**. Il gruppo parte a lavorare sull'idea di triodo a stato solido di Shockley

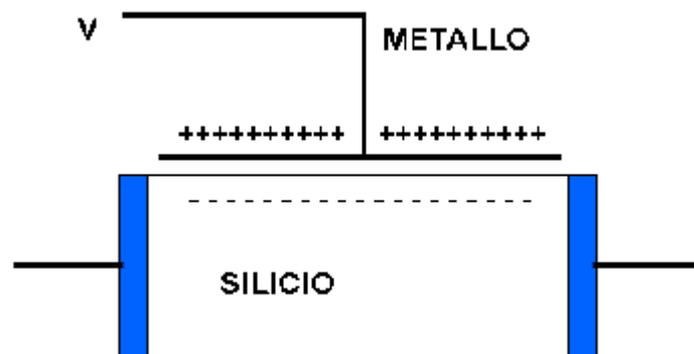


Fig. - Triodo a stato solido proposto da Shockley

19 marzo 1946 Bardeen propone che in un semiconduttore gli stati di superficie sono diversi dagli stati di volume. Alla superficie esiste una barriera dovuta all'intrappolamento delle cariche in questi stati. Si forma una giunzione p/n.

Bardeen suggerisce di usare invece del Si il Ge perché all'Università di Purdue sono stati ottenuti ottimi diodi con il Ge.

16 dicembre 1947 Invenzione del Transistor **Bardeen** propone a **Brattain** di sperimentare il seguente circuito basato sul triodo a stato solido di **Shockley**, nella speranza di riuscire ad iniettare efficacemente lacune attraverso il contatto d'oro quando questo è polarizzato negativamente rispetto al contatto a punta.

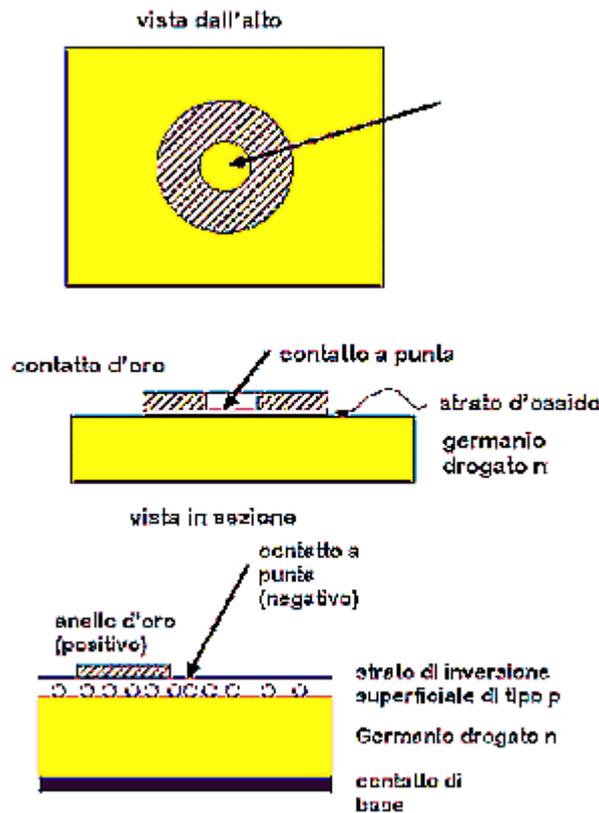


Fig. -

Nell'esperimento Brattain inavvertitamente rompe il contatto d'oro con la punta metallica ed in questo modo rompe l'isolamento dello strato d'ossido. Continua lo stesso l'esperimento.

Sorprendentemente Brattain osserva una grossa corrente quando il contatto a punta viene polarizzato negativamente rispetto al contatto d'oro. Bardeen, presente all'esperimento, spiega l'osservazione immediatamente ipotizzando che in questo modo si ha un eccesso di cariche positive che vengono iniettate nello strato di inversione e quindi realizzano un'amplificazione in tensione.

I due ricercatori hanno inventato il transistor a contatto a punta. La scoperta è anche il risultato di un errore sperimentale di Brattain!

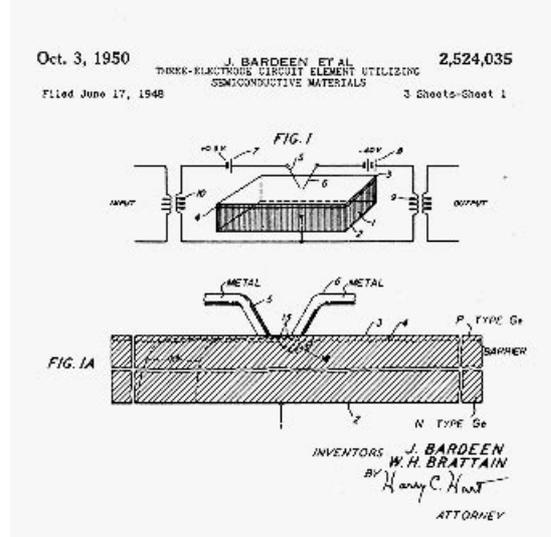
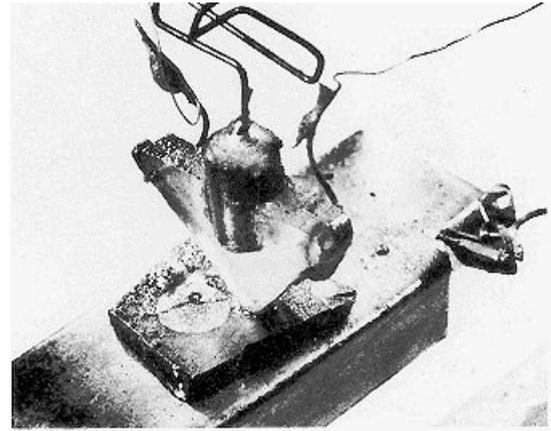
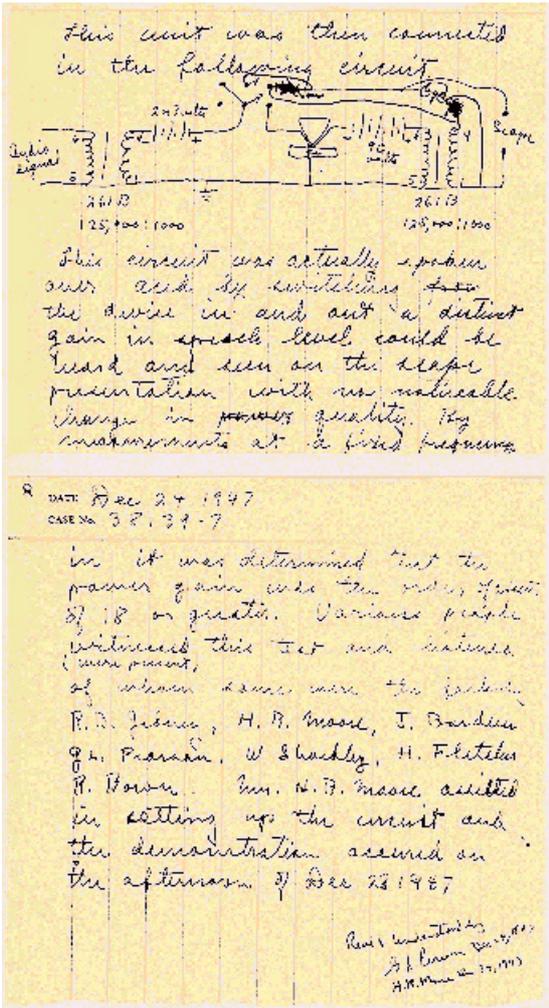


Fig. - Pagine dal quaderno di laboratorio di Brattain con data 24 dicembre 1947 dove viene riportata la dimostrazione dell'amplificazione attraverso il transistor

Fig. - Foto del primo transistor e del brevetto di Brattain e Bardeen. Il cono era un isolante coperto con un foglio metallico aperto alle estremità per formare due contatti. Il filo che assomiglia ad un fermaglio è una molla che forza il cono contro il semiconduttore.

Giugno 1948 Annuncio pubblico della scoperta e dimostrazione di una radio a transistor

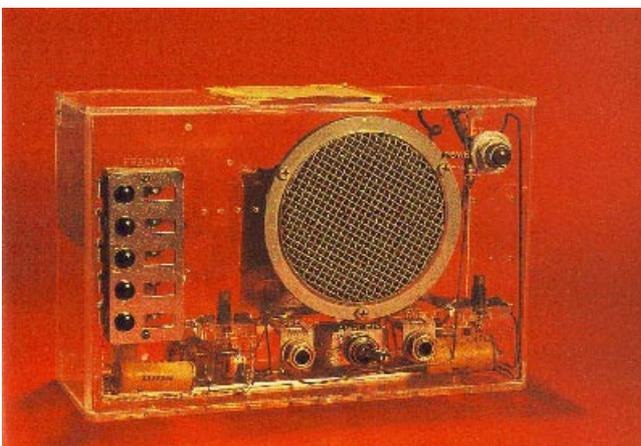


Fig. - La prima radio a transistor utilizzata per dimostrare il funzionamento del transistor come amplificatore a stato solido.

1949 Shockley propone il transistor bipolare a giunzione

Ottobre 1951 Western Electric inizia la produzione dei primi transistor commerciali che trovano applicazioni non nella radio ma come amplificatori per auricolari per sordi.

1954 Texas Instrument produce la prima radio basata su transistor....è un disastro commerciale perchè troppo costosa.

1956 Bardeen, Brattain e Shockley ricevono il premio Nobel per la scoperta del Transistor. John Bardeen è stata l'unica persona ad aver ricevuto due premi Nobel in Fisica. Il primo nel 1956 per l'invenzione del transistor ed il secondo nel 1972 per la teoria della superconduttività (Teoria BCS).

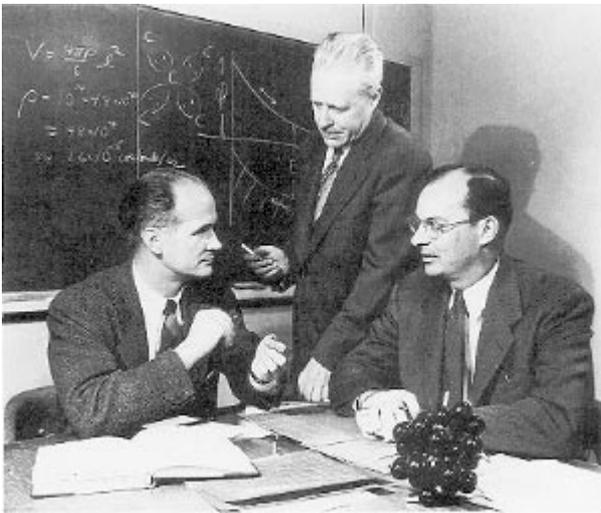


Fig. - W. Shockley, W. Brattain and J. Bardeen nel 1947



Fig. - John Bardeen (1902-1991)

1.5 – Dal transistor all'integrazione su larga scala

1948 Il primo transistor bipolare a giunzione viene sperimentato da Shive ai laboratori Bell.

1948 Shockley propone il concetto di iniezione di portatori minoritari in una giunzione p/n per spiegare il funzionamento dei diodi e dei transistor bipolari

1952

G. W. Dummer del Royal Radar Establishment (Gran Bretagna, Malvern) propone teoricamente che un blocco di semiconduttore possa essere usato per formare tutti gli elementi di un circuito elettrico [intuizione della possibilità di realizzare i circuiti integrati]

fine 1952 circuiti a transistor capaci di oscillare sopra i 300 MHz [oggi più di 300 GHz] basati su di giunzioni ottenute durante la crescita

1953 febbraio

SONOTONE pubblica i primi apparecchi acustici per non-udenti basati su di una tecnologia mista transistor-valvole [primi dispositivi commerciali basati sui transistor]

1954 Texas Instruments annuncia il primo transistor basato sul Silicio

1954 Shockley lascia i laboratori Bell e fonda la Shockley Semiconductor Laboratory. Questa è anche la data di nascita della Silicon Valley una regione della California dove si concentrano le più dinamiche ditte di semiconduttori e calcolatori

1957 General Electric's Advanced Semiconductor Laboratory in Syracuse inventa il raddrizzatore a controllo al Silicio (SRC)

1958 Stanislas Teszner del CFTH affiliata francese della General Electric inventa il transistor ad effetto di campo a giunzione (JFET)

1958 Leo Esaki della Sony corporation, inventa il diodo a tunnel che esibisce una resistenza differenziale negativa e per cui riceve il premio Nobel

a metà del 1959 RCA produce diodi a tunnel con frequenze di funzionamento dei GHz

1960 primo JFET commerciale prodotto da Crystalonics in Cambridge

Settembre 1957 Fairchild Semiconductor (Palo Alto, California) produce il primo transistor basato su di un processo planare di diffusione delle impurezze per formare la base del transistor in una struttura a isola [processo mesa]

1959

Fairchild Semiconductor lancia il processo planare di produzione dei transistor. Hoerni propone l'uso dell'ossido di silicio come strato passivante e d'isolamento [processo planare]

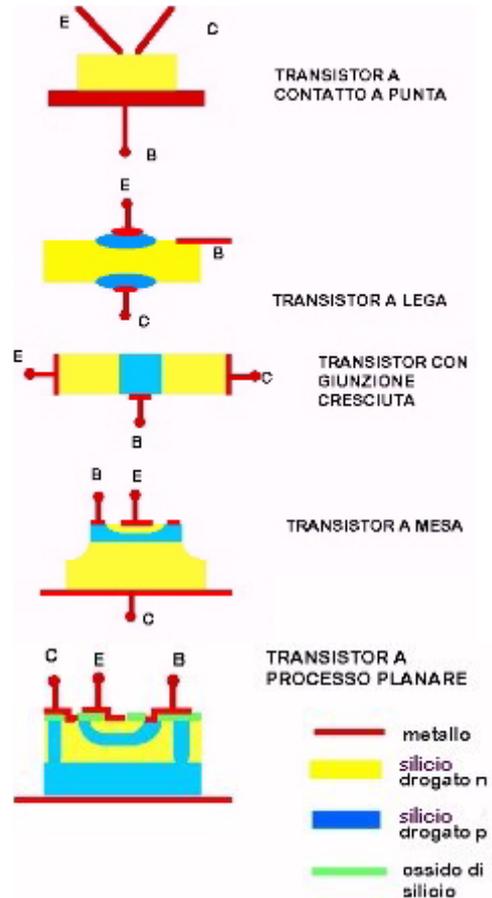


Fig. - evoluzione della tecnologia di produzione dei transistor bipolari a giunzione

1959

Jack Kilby a Texas Instruments su Germanio e Robert Noyce a Fairchild Semiconductor su Silicio producono il primo circuito integrato basato su transistor bipolari [una lunga diatriba tra le due industrie e tra i due scienziati su chi ha diritto al brevetto risolta nel 1990 a favore di Kilby]

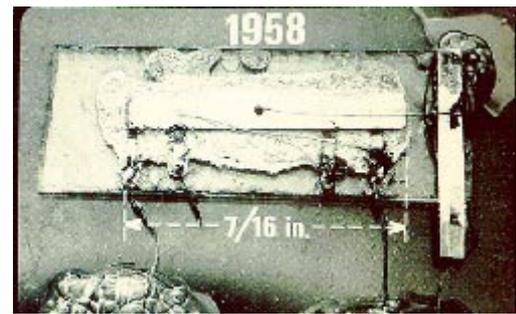


Fig. - il primo IC

1960

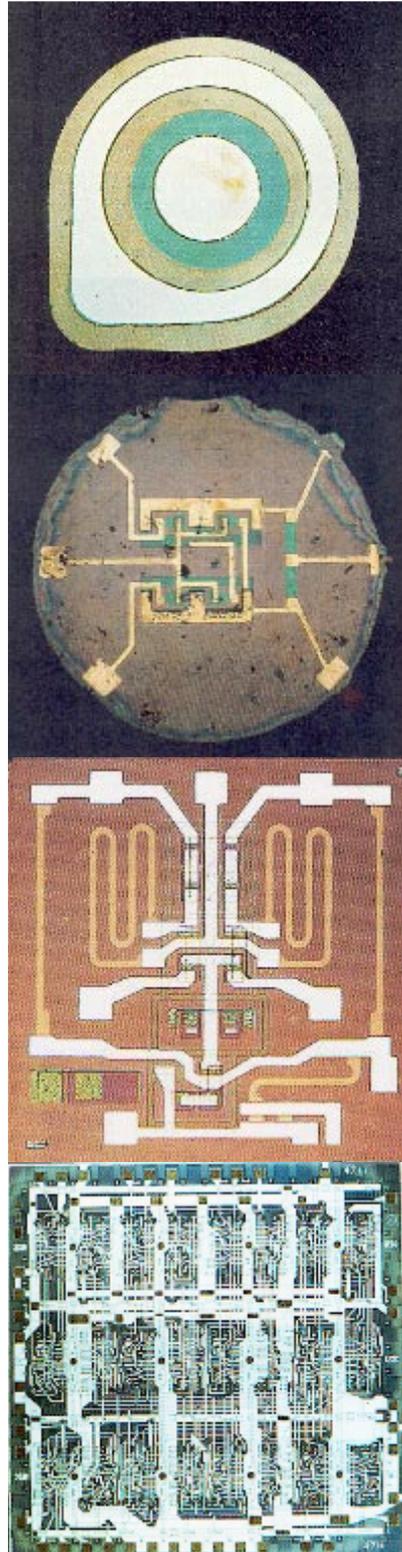
Control Data Corporation introduce un calcolatore basato su 100.000 diodi e 25.000 transistor discreti (CD 1604 computer)

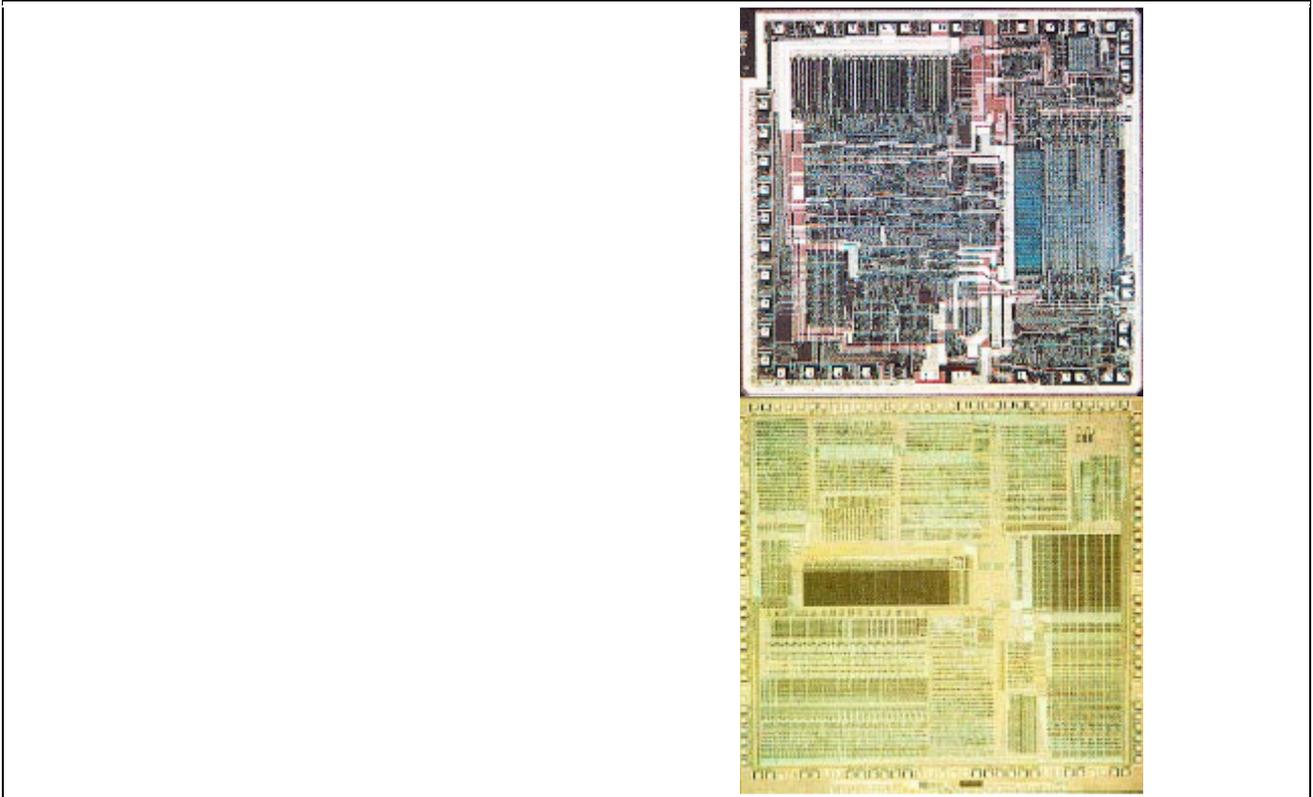
Fairchild Semiconductor annuncia il suo primo circuito integrato commerciale basato su di una logica RTL.
LEGENDA FIGURE:

La storia dell'evoluzione dei chip della Fairchild:

Febbraio 1960

- (a partire dall'alto)
 - il primo transistor planare (1959)
 - il primo circuito integrato planare (1961)
 - il primo circuito integrato lineare (1964)
 - matrice logica bipolare da 180 transistor (1968)
 - primo chip da 16 bit con CPU da 20 000 transistor (1978)
 - la CPU clipper con 132 000 transistor (1985).
- Da Le Scienze, dicembre 1987.





Marzo 1960 Texas Instruments annuncia il suo primo circuito integrato commerciale dedicato all'esercito basato su di una logica di interconnessioni metalliche evaporate

1961 standard transistor-transistor logic (TTL) proposta da James L. Buie at Pacific Semiconductors

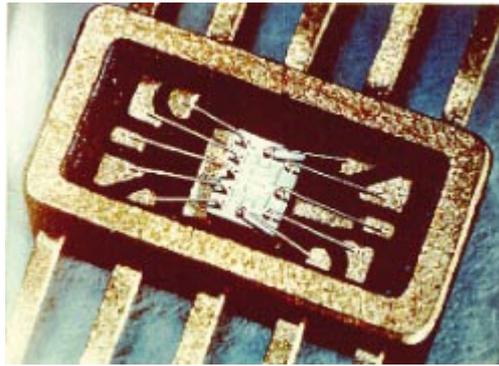
1962 prima produzione di massa di circuiti integrati (Texas Instruments per l'esercito per un programma di missilistica e Fairchild Semiconductors per la NASA). I primi circuiti integrati con poche porte logiche costano 100\$.

1962 Steven Hofstein e Fredric P. Heiman ai laboratori RCA producono il primo transistor di tipo MOSFET

fine 1962 Hofstein e Heiman della RCA producono il primo circuito integrato con 16 MOSFET

1963 C-MOS inventati da Wanlass e Sah a Fairchild [*saranno i mattoni base della ULSI degli anni 90*]

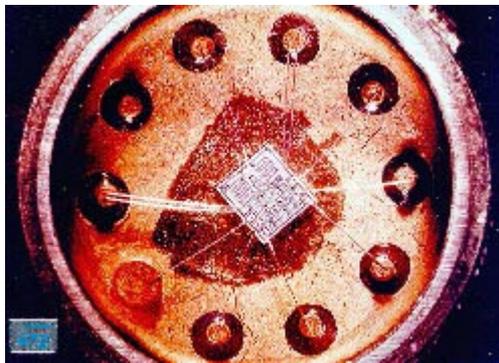
Agosto 1965 Fairchild corporation introduce il dual in-line package. Il primo standard per il "packaging" dei circuiti integrati.



Uno dei circuiti integrati bipolari utilizzati per controllare il lancio dei missili Apollo

1965 Fairchild introduce il primo amplificatore operazionale a largo spettro il $\mu A741$

1965 Schmid a Fairchild produce la prima memoria SRAM (Static Random Access Memory) da 64-bit



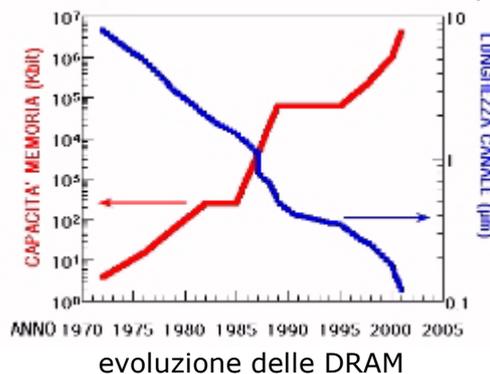
il primo circuito integrato di potenza sviluppato negli anni 70 da Bruno Murari della SGS-Thomson Microelectronics

1966 viene introdotta la plastica per incapsulare i transistor o altri componenti a semiconduttore

1967 introduzione delle prime ROM (Read Only Memory) da Fairchild (memoria a 64-bit)

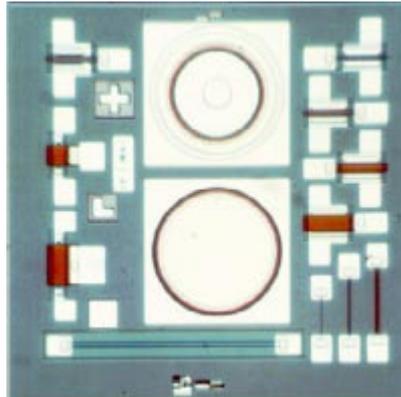
1967 Noyce, Moore [*quello della famosa legge sull'incremento della potenza di calcolo*] e altri fondano l'INTEL corporation

1968 la prima memoria DRAM (memoria ad accesso casuale dinamico) viene inventata da Dennard a IBM. Questa DRAM ha una capacità di 1K = 1024 bit.



1968 Philco-Ford annuncia una memoria ROM a 1.024 Bit (=1K)

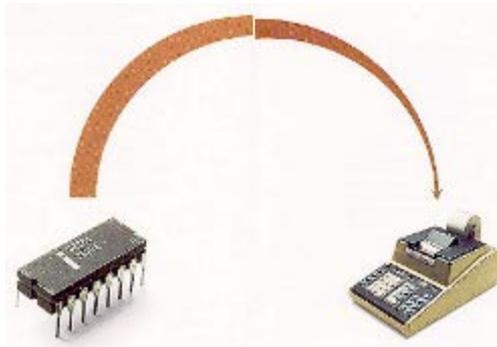
1969 BiCMOS circuito inventato da Hung-Chang Lin [*saranno i circuiti base del microprocessore INTEL Pentium*] essi sono basati sull'uso di una tecnologia bipolare per gestire gli ingressi e le uscite delle celle DRAM basate su tecnologie CMOS. E' una tecnologia integrata MOS e BJT. Nei primi anni 70 vengono introdotte le camere pulite per la produzione dei circuiti, l'impiantazione ionica sostituisce la diffusione per formare le varie strutture.



Uno dei primi chip n-MOS di produzione italiana. Prodotto dal LAMEL di Bologna

1970 W. S. Boyle e G. E. Smith dei laboratori Bell producono la prima memoria basata su CCD (charge coupled device) [*la tecnologia CCD trova applicazione nelle video camere e filtri analogici*]

1971 E. Ted Hoff, Federico Faggi e Stan Mazor di Intel inventano il microprocessore, un dispositivo che ingloba quattro circuiti integrati: una CPU, una ROM, una RAM e un chip di I/O. Il circuito è multipurpose e programmabile. Intel lancia sul mercato il primo microprocessore il 4004 (con 2300 transistor al costo di 200 \$ con una potenzialità di 64.000 operazioni al secondo).



il microprocessore INTEL 4004 sviluppato per una macchina calcolatrice da tavolo

1.6 – La rivoluzione informatica

LA PREISTORIA: FINO ALLA SCOPERTA DEL TRANSISTOR	
1821	Charles Babbage propone il primo calcolatore meccanico
1854	Georges Boole pubblica in un libro le regole del pensiero logico formale
1890	Hermann Hollerith suggerisce l'uso di una macchina per automatizzare il processo di lettura dei dati del censimento generale degli Stati Uniti d'America. Fonda anche la Tabulating Machine Company che diventerà in seguito International Bussines Machines (I.B.M.) . La macchina proposta sfrutta per la prima volta l'elettricità e registra i dati su carte perforate
1930	Vannevar Bush costruisce una macchina elettromagnetica capace di risolvere equazioni differenziali
1943	L'esercito americano fa costruire il primo calcolatore per decrittare i messaggi segreti tedeschi: conta duemila valvole termoioniche e si chiama Colossus
16 febbraio 1946	viene inaugurata la macchina che John Mauchly e Prosper Eckert in Pennsylvania hanno costruito e chiamato Electronic Numerical Integrator and Calculator (ENIAC) . L'ENIAC è composto da 18000 valvole messe in uno spazio di 140 metri quadrati. Comincia a funzionare parecchie ore dopo l'accensione, e <u>impiega mezzo secondo per calcolare un prodotto di due numeri di 10 cifre</u> . L'ENIAC verrà utilizzato fino al 1955
1945	John von Neumann introduce i principi fondamentali di costruzione dei calcolatori moderni: il software è residente sulla macchina e le decisioni logiche vengono prese dal software e non dall'operatore
1947-1970 I PRIMI ANNI: TRANSISTOR, CIRCUITI INTEGRATI E MEMORIE PROGRAMMABILI	
1964	John Kemeny e Thomas Kurtz sviluppano il linguaggio di programmazione BASIC IBM conia il termine "word processing"
1967	IBM realizza il primo floppy disk
1968	Douglas C. Engelbart propone un sistema con tastiera, tavoletta grafica, mouse e finestre grafiche, e mostra l'uso di un editore di testo, di un sistema di ipertesto e di comunicazione a distanza
1969	Kenneth Thompson e Dennis Ritchie sviluppano il sistema operativo UNIX
1970	<ul style="list-style-type: none"> • Gilbert Hyatt brevetta l'applicazione chiamata "Architettura di Calcolatore a Circuito Integrato a Chip Singolo", il primo brevetto di base riguardante un microprocessore • Intel produce il chip 1103, il primo chip di memoria RAM universalmente compatibile

1971-1976 LA NASCITA DEI MICROCOMPUTER	
1971	<ul style="list-style-type: none"> • Intel introduce il primo microprocessore con un bus a 4 bit, con il chip 4004 a 108 KHz. Il prezzo iniziale è 200 dollari. Ha una velocità di 60000 operazioni al secondo, e utilizza 2300 transistors. Può indirizzare 640 bytes • Intel presenta il primo microcomputer, il sistema MCS4. Questo fa uso del microprocessore 4004, di chip ROM 4001, chip RAM 4002, e chip shift register 4003 • Il National Radio Institute introduce il primo computer in scatola di montaggio, a 503 dollari
1972	<ul style="list-style-type: none"> • Intel realizza il chip 8008 a 108-KHz. E' il primo microprocessore a 8-bit. Dispone di 16KB di memoria. Originariamente il processore era stato sviluppato per la Computer Terminal Corporation (più tardi chiamata DataPoint). Utilizza 3500 transistor • Nolan Bushnell fonda la Atari e mette in commercio Pong, il primo videogioco commerciale • National Semiconductor introduce il microprocessore IMP-16, con bus a 16 bit
1973	<ul style="list-style-type: none"> • Gary Kildall scrive un semplice sistema operativo nel suo linguaggio PL/M, e lo chiama CP/M (Control Program/Monitor) • IBM introduce l'unità hard disk IBM 3340 noto come Winchester • Bob Metcalfe inventa il sistema di connessione Ethernet
1974	<ul style="list-style-type: none"> • Popular Electronics pubblica un articolo del MITS presentando il computer Altair 8800 in scatola di montaggio per 439 dollari. Esso usa il processore Intel 8080 • Texas Instruments lancia il microcomputer TMS1000 a un chip • Brian Kernighan e Dennis Ritchie sviluppano il linguaggio di programmazione C • Compare l'RCA 1802, che oscilla a 6.4 MHz, considerato uno dei primi chip di tipo RISC
1975	<ul style="list-style-type: none"> • Bill Gates e Paul Allen producono il primo linguaggio di programmazione per calcolatori scritto per un personal computer : il BASIC • Bill Gates e Paul Allen fondano la Micro-Soft (il trattino sarà cancellato in seguito)
1976	<ul style="list-style-type: none"> • Steve Jobs e Steve Wozniak fondano la Apple Computer Company • Appare il microprocessore SC/MP 8-bit della National Semiconductor • Arriva il Texas Instruments TMS 9900, uno dei primi veri microprocessori a 16 bit • Steve Jobs e Steve Wozniak mettono in commercio in scatola di montaggio la scheda computer Apple I • Zilog realizza lo Z-80, microprocessore a 8 bit le cui istruzioni sono una evoluzione di quelle dell'Intel 8080

1977-1980 HOME COMPUTERS	
1977	<ul style="list-style-type: none"> • Apple Computer introduce l'Apple II, equipaggiato con interfaccia grafica/testo su un display a colori, scritta in BASIC, a 1300 dollari. È il primo personal computer con grafica a colori
1978	<ul style="list-style-type: none"> • Intel realizza il microprocessore 8086, che utilizza registri e bus dati a 16 bit, 29000 transistor e dispone di 1 MB di memoria • Epson annuncia la stampante MX-80 a matrice di punti, che stabilisce un nuovo standard per le prestazioni delle stampanti a basso prezzo • Texas Instruments produce il TMS-4164, un singolo chip di memoria programmabile da 64KB alimentato a 5V
1979	<ul style="list-style-type: none"> • MicroPro realizza l'editore testo WordStar, scritto da Rob Barnaby • CompuServe inizia un servizio per gli appassionati di computer, chiamato MicroNET, offrendo riviste, banche dati e giochi. • Esce il microprocessore Motorola 68000 a 16-bit, il cui nome deriva dai 68000 transistor che usa • Atari mette in commercio il personal computer Atari 400, che dispone di 8KB, e Atari 800
1980	<ul style="list-style-type: none"> • Universal Data Systems presenta il modem 103LP 300 bps, che permette la connessione direttamente alle linee telefoniche, senza alimentazione aggiuntiva. • Hewlett-Packard completa il Progetto Capricorno, producendo l'HP-85. Con un display CRT a 32 caratteri, una piccola stampante incorporata, un registratore a cassette, e tastiera, è venduto a 3250 dollari • La Sinclair Research annuncia il computer ZX80 per il mercato nordamericano. Utilizza un microprocessore NEC Technologies 780 a 3.25 MHz a 8 bit, e dispone di 1KB RAM e 4KB ROM • IBM incarica Bill Gates di scrivere il sistema operativo per i futuri PC • L'archetipo dei giochi di fantasia ed avventura, Zork, viene portato dal mainframe del M.I.T. in tutto il mondo dei microcomputer dalla Infocom, fondata allo scopo • Il professor David Patterson dell'University of California conia il termine RISC (Reduced Instruction Set Computer) • La Sony Electronics introduce i floppy disk e i drive da 3.5 pollici, doppio lato e doppia densità, che non formattati possono contenere fino a 875KB
1981-1983 GLI AFFARI HANNO IL SOPRAVVENTO	
1981	<ul style="list-style-type: none"> • Commodore lancia il VIC-20, con una tastiera completa a 65 tasti, 5KB RAM espandibili fino a 32KB, una CPU 6502A, un display a 22 caratteri per 23 righe di testo, e grafica a colori, per 300 dollari. Durante la sua vita, la produzione toccherà le 9000 unità al giorno. • MS-DOS gira per la prima volta su un prototipo di microcomputer IBM

	<ul style="list-style-type: none"> • IBM annuncia la CGA, scheda grafica per PC, con una risoluzione 640x200 a 16 colori • IBM lancia l'IBM PC. • Ashton-Tate mette in commercio dBASE II, il nuovo programma di database su standard industriale • Intel propone il coprocessore matematico 8087 • National Semiconductor annuncia il chip 32000, il primo microprocessore a 32 bit. La famiglia 32000 include unità CPU e chip periferici
1982	<ul style="list-style-type: none"> • Commodore realizza il Commodore 64 (64KB RAM, 20KB ROM con Microsoft BASIC, suono incorporato, grafica a colori), a 600 dollari. Durante il 1983, il prezzo precipita a 200 dollari. Diventa il computer più venduto di tutti i tempi, con una stima di 17-22 milioni di unità. È il primo personal computer con un sintetizzatore di suono integrato in un chip • Sharp introduce lo Sharp PC-1500 Hand Held Personal Computer. Esce con 16KB ROM, e 3.5KB RAM. Il computer costa 300 dollari • Rod Canion, Jim Harris, e Bill Murto, tutti esperti manager della Texas Instruments, fondano la Compaq Computer Corporation. • Intel sviluppa il microprocessore 80286, che utilizza bus dati a 16 bit, 134000 transistor, dispone fino a 16 MB di memoria e permette operazioni in modalità protetta. Il prezzo iniziale è 360 dollari. • Viene fondata la Sun Microsystems • Columbia Data Products realizza il primo IBM PC clonato: l'MPC • Olivetti propone il microcomputer M20, con processore Z8001 • Compaq Computer lancia il PC Compaq Portatile: processore 8088 a 4.77MHz, 128KB RAM, monitor monocromatico a 9 pollici, un disk drive da 5.25 pollici a 320 KB; costa 3000 dollari
1983	<ul style="list-style-type: none"> • Time sceglie il microcomputer come "Uomo" dell'anno. • Lotus Development commercializza Lotus 1-2-3 Release 1.0 per MS-DOS • IBM annuncia l'IBM PC XT. Oltre a 10 MB di hard disk, ha tre slot di espansione memoria, e un'interfaccia seriale. Con 128KB RAM e un floppy drive da 360KB, costa 5000 dollari • AT&T Bell Labs sviluppa il linguaggio di programmazione C++ • National Semiconductor lancia prototipi del suo microprocessore NS32032 a 6 MHz e 32 bit • Microsoft annuncia Microsoft Windows • Microsoft presenta ufficialmente Microsoft Word • Apple Computer realizza Apple ImageWriter. • Wang produce il modulo di memoria a linea singola d'ingresso (SIMM)
1984-1986 GRAFICA PER TUTTI	
1984	<ul style="list-style-type: none"> • Apple Computer introduce Macintosh, a 2500 dollari. Utilizza la CPU Motorola 68000. 8 MHz a 32 bit, schermo B/W a 9 pollici

	<p>incorporato, grafici 512x342, floppy disk drive 3.5 pollici da 400KB, mouse, 128KB RAM</p> <ul style="list-style-type: none"> • Silicon Graphics inizia a distribuire la sua prima workstation grafica 3D • IBM lancia la Enhanced Graphics Adapter (EGA), che supporta una risoluzione fino a 640x350 in 16 colori. Con 64K, la scheda costa 524 dollari. Per la modalità 640x350x16, è richiesta un'espansione di 64KB RAM • Il numero di siti Internet raggiunge quota 1000. • Hewlett-Packard propone la stampante LaserJet, con risoluzione 300dpi, per 3600 dollari
1985	<ul style="list-style-type: none"> • Microsoft produce Microsoft Windows 1.0, per 100 dollari. Sono trascorsi due anni dalla prima presentazione ufficiale del prodotto • Nintendo propone negli Stati Uniti il Nintendo Entertainment System
1986	<ul style="list-style-type: none"> • MIPS Technologies svela la CPU R2000 a 8 MHz, 32 bit CPU. Il processore RISC con 110000 transistors, raggiunge una velocità di rating di 5 MIPS
1987-1990 LA PROSSIMA GENERAZIONE	
1987	<ul style="list-style-type: none"> • Apple Computer introduce il Macintosh II ad architettura aperta. Un sistema con 1MB RAM, floppy drive da 800k, e hard disk da 40MB: costa 5500 dollari. Il sistema è caratterizzato da una architettura plug-and-play a scheda • Apple Computer produce l'espandibile Macintosh SE con sistema a doppio floppy • IBM lancia la linea IBM Personal System/2 (PS/2), con il primo PC 386, e floppy drive da 3.5 pollici come standard. Il modello PS/2 Model 30 usa l'8086 a 8 MHz, i Modelli 50 e 60 utilizzano il processore 80286 a 10 MHz, mentre il Modello 80 gira a 20 MHz • IBM produce il Video Graphics Array (VGA) installandolo sui suoi Modello 50 e superiori della linea PS/2 La VGA offre simultaneamente 256 colori con risoluzione 320x200, e 16 colori con 640x480. I colori visualizzati hanno una profondità di 6 bit per ogni colore primario, fornendo una palette di 262144 differenti colori selezionabili • IBM e Microsoft annunciano Operating System/2 (OS/2) • Sun Microsystems introduce il suo primo sistema basato sullo SPARC, il Sun-4/260, con una potenza di 10 MIPS
1988	<ul style="list-style-type: none"> • La Spectrum Holobyte propone Tetris, il primo software di intrattenimento importato dall'Unione Sovietica • Steve Jobs della NeXT Inc. presenta il primo computer NeXT. Per 6500 dollari, esso offre: processore Motorola 68030 a 25 MHz coprocessore matematico 68882, 8MB RAM, monitor monocromatico a 17 pollici, drive magneto-ottico in lettura/scrittura da 256MB, e sistema operativo orientato agli oggetti.

	<ul style="list-style-type: none"> • Toshiba lancia il T1600, 286 a 16 MHz, portatile • Digital Equipment comincia lo sviluppo di un microprocessor a 64 bit. Il chip debutterà con l'Alpha 21064 150 MHz nel 1992 • Hewlett-Packard mette in commercio la stampante a getto d'inchiostro HP DeskJet. Prezzo: 1000 dollari
1989	<ul style="list-style-type: none"> • Digital Equipment propone la sua prima workstation basata sul sistema RISC, la DECstation 3100, utilizzando il processore R2000 MIPS Technologies a 16.7 MHz • Compare la VESA standard, che fornisce un metodo uniforme di accesso ai gruppi di chip SuperVGA • Intel sviluppa il processore 80486. Esso integra il 80386, il coprocessore matematico 80387, e aggiunge una cache primaria. Il processore utilizza 1.2 milioni di transistor. Il prezzo iniziale è 900 dollari • Motorola lancia il microprocessore 68040, che fa uso di circa 1.2 milioni di transistor • Si forma la Personal Computer Memory Card International Association (PCMCIA), per sviluppare una scheda di memoria standar per i PC • IBM svela la sua nuova linea di workstation basata su RISC, la RS/6000. L'architettura del sistema riceve il nome di POWER, che sta per Performance Optimization With Enhanced RISC
1991-1993 MATURITÀ	
1991	<ul style="list-style-type: none"> • Creative Labs introduce la Sound Blaster Pro Deluxe, la prima scheda sonora stereo per PC • Hewlett-Packard lancia il suo primo scanner immagini a colori, l'HP Scanjet IIC. La versione 400 dpi a 24 bit è venduta a circa 2000 dollari • La Hayes Microcomputer Products annuncia LANstep, un sistema operativo per network di piccoli uffici
1992	<ul style="list-style-type: none"> • Digital Equipment propone il microprocessore Alpha 21064 a 64 bit
1993	<ul style="list-style-type: none"> • Intel propone il suo processore Pentium a 60 MHz, che utilizza registri a 32 bit, con un bus dati a 64 bit, e incorpora 3.2 milioni di transistor. Prezzo di lancio: 878 dollari • Motorola Corporation mette in commercio i primi chip PowerPC 601. Il processore fa uso di 2.8 milioni di transistor, con 3 unità di esecuzione
1994-... NUOVE SPERANZE?	
1994	<ul style="list-style-type: none"> • La Apple Computer svela i suoi computer basati sul processore PowerPC 601, i Power Macintosh 6100/60, 7100/66, and 8100/80. I prezzi per i sistemi completi sono compresi tra 2000 e 4000 dollari • Intel mette in commercio il processore Pentium a 100 MHz. Il prezzo è 995 dollari

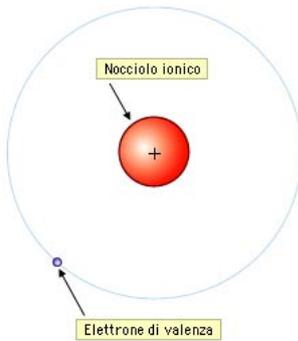
- IBM and Motorola annunciano il processore PowerPC 604 a 100 MHz . La 604 ha una unità a virgola mobile, e 3 unità integrate. Due di queste eseguono le istruzioni di ogni singolo ciclo di clock, mentre l'altra viene utilizzata per moltiplicazioni e divisioni tra interi. Il processore sfrutta 3.6 milioni di transistor
- Intel lancia il processore Pentium a 75 MHz Pentium
- Iomega Corp. presenta i suoi drive e dischi Zip, floppy disk configurabili con una capacità di 25 MB o 100 MB
- Pinnacle Micro propone Apex 4.6, un drive ottico da 5.25 pollici, in grado di contenere 4.6 GB in un singolo disco rimovibile. La velocità di trasferimento arriva fino a 6MBps, con un tempo di seek di 17 ms
- Microsoft presenta Windows 95. Più di 20,000 rivenditori al dettaglio prenotano copie da vendere. Microsoft fornisce linee di assistenza con 1600 tecnici. Solo nei primi 4 giorni vengono vendute 1 milione di copie della nuova e delle successive versioni attraverso i canali della vendita al dettaglio
- Intel realizza il microprocessore Pentium Pro, con una velocità di clock di 150-200 MHz, disponibile a un prezzo tra 974 e 1682 dollari.

2. Proprietà fisiche della materia.

I cellulari, il telecomando della TV, un puntatore laser, i lettori MP3, gli orologi al quarzo, i sensori ottici delle macchine fotografiche digitali, le videocamere, ecc., tutti questi oggetti dall'uso quotidiano, chi più chi meno, contengono componenti microelettronici.

Il funzionamento di tutti questi apparecchi è stato possibile grazie alla comprensione delle leggi della **fisica dello stato solido**, in particolare dei **semiconduttori**. Non è questa la sede per entrare nei dettagli dei concetti necessari per comprendere la **Fisica DEI computers**. Ciò non di meno daremo alcuni assaggi di come la fisica della materia e dello stato solido ha reso possibile l'implementazione della tecnologia che sperimentiamo quotidianamente, in un interessante intreccio fra curiosità intellettuale, ricerca di base e ricadute tecnologiche, anche per comprendere ed assaporare meglio i nuovi scenari per nuove applicazioni che la ricerca di base sta già delineando.

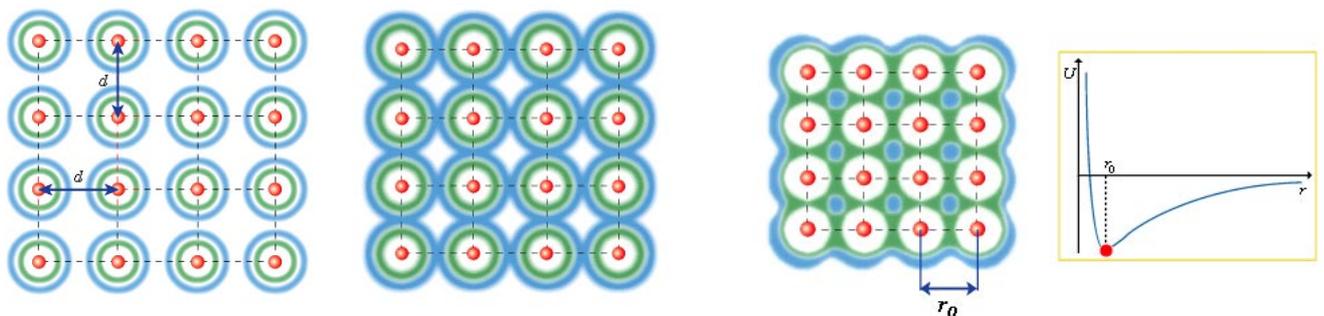
2.1 La configurazione elettronica dell'atomo: elettroni di valenza



Gli elettroni più interni che occupano sottostrati completi sono i più legati al nucleo e pertanto non prendono parte ai fenomeni fisici o chimici, se non all'emissione e all'assorbimento di **raggi X**. La struttura degli elettroni interni (che con il nucleo costituiscono il nocciolo ionico) rimane quindi inalterata anche quando l'atomo trasforma la sua nube elettronica per combinarsi con altri atomi a formare molecole o solidi.

Gli elettroni più esterni, in genere in un sottostrato incompleto, sono invece responsabili del legame chimico, dell'interazione degli atomi con la luce, quindi degli **spettri** di assorbimento e di emissione, e determinano le proprietà dei materiali. Essi sono detti **elettroni di valenza**.

Nella formazione delle molecole si ha la transizione da elettroni di valenza localizzati intorno agli atomi (**orbitali atomici**) a elettroni distribuiti su tutto lo spazio occupato dalla molecola (**orbitali molecolari**). Analogamente nella formazione dei solidi, gli orbitali atomici si fondono a formare **orbitali cristallini**, estesi a tutto lo spazio occupato dal solido. Gli elettroni di valenza nei solidi, dunque, non sono più legati ai singoli atomi, ma sono **delocalizzati**.



La sequenza (da sinistra a destra) mostra qualitativamente come cambia la distribuzione di densità elettronica quando si passa dagli atomi separati agli atomi interagenti e legati a formare un reticolo cristallino.

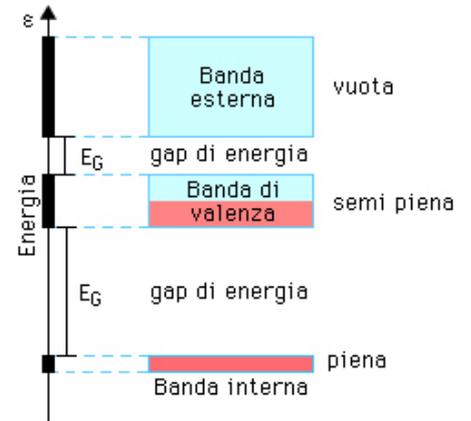
2.2 La struttura elettronica dei solidi: le bande di energia

Il cambiamento nella distribuzione della densità elettronica è associato ad una drastica trasformazione dei livelli energetici discreti degli elettroni di valenza. La struttura dei livelli energetici del solido si può ottenere partendo da quella dell'atomo isolato, separando ogni livello relativo ad elettroni di valenza dell'atomo isolato in una moltitudine di livelli molto vicini, in numero dell'ordine del numero di atomi che compongono il solido (dell'ordine del numero di Avogadro!). A questi elettroni non corrispondono più singoli livelli discreti di energia, ma moltissimi livelli con valori vicinissimi l'uno all'altro, ossia distribuiti in modo quasi continuo in un certo intervallo dell'energia. A questa distribuzione si dà il nome di **banda di energia**. Per ogni livello energetico di partenza si crea quindi una banda di energia all'interno della quale la distribuzione dei livelli è praticamente continua.

Alcune bande contigue (quelle esterne che sono più larghe) possono sovrapporsi tra loro, mentre altre rimanere separate.

La larghezza, in energia, di una banda è dell'ordine degli eV.

L'intervallo fra bande successive, detto intervallo proibito, o gap di energia, si indica con E_g . Il limite superiore della banda di valenza viene indicato con E_v .



Movie Bande_energia_2 (1' 57'')

La maggior parte delle caratteristiche fisiche dei solidi dipendono dalla tipologia di queste bande e da come sono occupate dagli elettroni.

3. Proprietà dei semiconduttori.

3.1 La struttura elettronica dei solidi: conducibilità elettrica

La conducibilità elettrica di un materiale (σ , espressa in $(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$) misura la sua capacità di trasportare cariche elettriche sotto l'azione di un campo elettrico esterno. Passando da un materiale ad un altro, la conducibilità elettrica può variare di molti ordini di grandezza. In genere è possibile individuare quattro categorie principali:

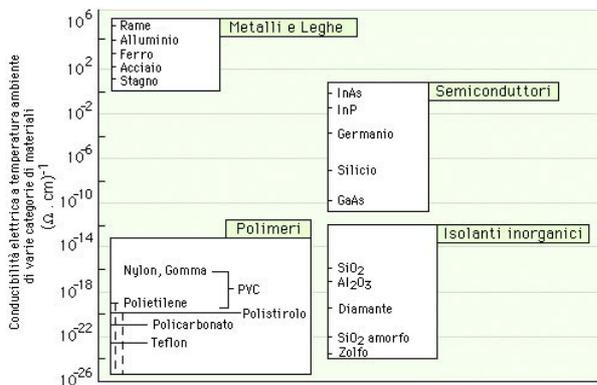
- superconduttori: σ infinita, per $T < T_c$ (temperatura critica)
- metalli: $\sigma \approx 10^6 \div 10^4 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$
- semiconduttori: $\sigma \approx 10^3 \div 10^{-6} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ (a temperatura ambiente)
- isolanti: $\sigma \approx 10^{-10} \div 10^{-20} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$

Nei solidi cristallini l'enorme variazione della conducibilità dipende dalla configurazione elettronica dello stato fondamentale del cristallo

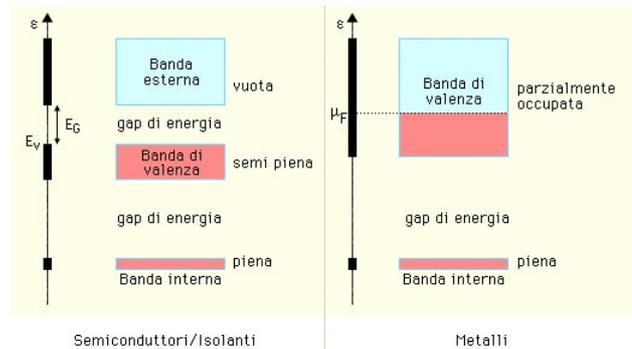
I solidi nei quali la banda di valenza e quelle più interne sono completamente occupate ed esiste un gap di energia E_g abbastanza grande, si comportano come isolanti.

Il comportamento dei solidi cambia man mano che si considerano cristalli che hanno gap di energia sempre più piccoli: semiconduttori e se le bande sono parzialmente occupate, si hanno i conduttori o metalli.

La caratteristica più significativa della conducibilità dei semiconduttori tuttavia non è il valore, ma la sua forte dipendenza dalla temperatura e dal contenuto di impurezze.



Conducibilità elettrica a temperatura ambiente di varie categorie di materiali



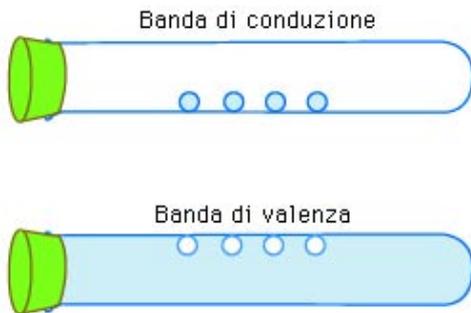
Struttura elettronica dei metalli e degli isolanti/semiconduttori

3.2 La struttura elettronica dei solidi: le lacune elettroniche

La configurazione elettronica di un solido a temperature diverse dallo zero assoluto è in generale diversa da quella corrispondente allo stato fondamentale. Nei semiconduttori ad esempio, per effetto della temperatura può accadere che la banda di valenza non sia completamente occupata.

A livello pittorico possiamo immaginare che in un livello non occupato della banda di valenza sia presente una particella immaginaria, detta "buca" o "lacuna". Una delle conseguenze inaspettate della teoria delle bande è che questa particella si comporta

come se avesse carica elettrica positiva: sotto l'azione di un campo elettrico esterno accelera nello stesso verso del campo elettrico applicato (ricordiamo che un elettrone avendo carica negativa accelera nella direzione opposta a quello che campo applicato).



3.3 Ruolo delle impurezze

La presenza di [impurezze](#), in proporzioni strettamente controllate, in un cristallo semiconduttore ne modifica il comportamento; esse consentono di controllare la concentrazione degli elettroni e delle lacune responsabili delle proprietà elettriche. Infatti la concentrazione di elettroni e lacune in un semiconduttore puro non sarebbe sufficiente a fornire le densità di corrente necessarie per gli impieghi nei dispositivi.

Le impurezze utili nei semiconduttori sono di due tipi: [donori](#) e [accettori](#). La loro presenza provoca la comparsa, all'interno del gap proibito, di livelli d'energia che possono essere occupati dagli elettroni.

Per realizzare i dispositivi elettronici donori o accettori sono aggiunti intenzionalmente al semiconduttore mediante [processi di drogaggio](#). È sufficiente una concentrazione piccola di impurezze per alterare profondamente le proprietà elettriche, ad esempio una parte per miliardo.

3.4 Ruolo delle impurezze - Donori

Donore è un'impurezza che cede facilmente ("dona") uno dei suoi elettroni di valenza alla banda di conduzione del semiconduttore.

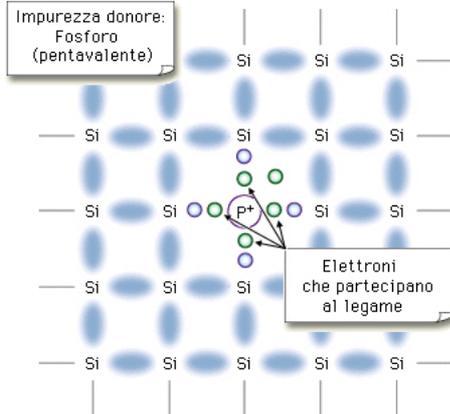
Un donore tipico è il fosforo (pentavalente) in un cristallo di silicio o di germanio (tetravalenti): quattro degli elettroni del fosforo contribuiscono al legame [tetraedrico](#) tipico degli elementi del IV gruppo, mentre il quinto elettrone non è legato agli atomi del semiconduttore adiacenti, ma è debolmente legato allo ione P^+ .

Il livello di energia dell'elettrone del P in un cristallo di silicio è all'interno del gap, 0.0044 eV ($= E_D$) al di sotto della banda di conduzione.

L'energia dell'elettrone localizzato in prossimità del fosforo è quindi molto più vicina alla banda di conduzione rispetto all'energia degli elettroni della banda di valenza. Di conseguenza è sufficiente una piccola agitazione termica per farlo saltare nella banda di

conduzione: alla temperatura ambiente le oscillazioni del reticolo hanno ampiezza sufficiente per "promuovere" gli elettroni di quasi tutti i donori alla banda di conduzione.

Il semiconduttore è detto "di tipo n ", perché i portatori sono gli elettroni, di carica negativa.



M0203011 (1' 38 ")

3.5 Ruolo delle impurezze - Accettori

Un analogo discorso vale se invece dei donori sono presenti impurezze accettori, come ad esempio il boro che è trivalente. I tre elettroni di valenza del boro sono legati in modo covalente a tre atomi di silicio adiacenti, lasciando vacante il legame con il quarto atomo. Questo equivale a dire che una lacuna sta intorno al boro. Se un elettrone della banda di valenza si muove ad occupare questo legame vacante, si crea una lacuna nella banda di valenza. Allora i portatori maggioritari sono le lacune e il semiconduttore è detto "di tipo p ", perché le lacune si comportano come particelle di carica positiva.

Nel caso generale in cui siano presenti sia donori che accettori, nel semiconduttore avviene un processo di compensazione che porta ad una concentrazione efficace di drogante uguale al modulo della differenza tra le due concentrazioni di droganti.

4. Giunzione p-n.

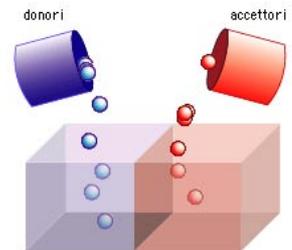
4.1 Giunzione p-n

Un semiconduttore omogeneo, ossia con caratteristiche uniformi al suo interno, ad una data temperatura si comporta come una normale resistenza, sia esso puro (intrinseco), o drogato.

Le applicazioni pratiche dei semiconduttori in generale non si basano su materiali omogenei, ma su monocristalli nei quali è stata artificialmente creata una variazione nel drogaggio più o meno brusca: una giunzione $p-n$, che separa due zone di diversa concentrazione di portatori (**elettroni o lacune**) e di cariche fisse (impurezze ionizzate).

Al campo elettrico che si crea al contatto fra le due zone con conducibilità di tipo diverso si devono le importanti caratteristiche elettriche della giunzione.

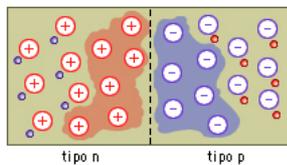
La maggior parte dei dispositivi a semiconduttore contiene giunzioni $p-n$.



4.2 Giunzione p-n - La zona di svuotamento

La zona di svuotamento o “depletion layer” è una stretta regione attorno alla superficie di separazione della giunzione $p-n$, in cui non vi sono portatori liberi di carica. Si hanno cioè **donori** senza i relativi elettroni nella parte n e **accettori** senza le relative lacune nella parte p . Ne segue che la parte n della zona di svuotamento è elettricamente carica con segno positivo, mentre la parte p è carica negativamente.

Per capire l’origine della zona di svuotamento immaginiamo di porre inizialmente il cristallo in una condizione in cui la zona n è a diretto contatto con la zona p . Questa condizione non è stabile, in quanto il processo di **diffusione** tende a spostare i portatori liberi verso le regioni di minor concentrazione. Si ha quindi un flusso di elettroni dalla zona n alla zona p , ed un flusso inverso di lacune.



Quando gli elettroni arrivano nella zona p si ricombinano con le lacune, che in questa parte del cristallo sono maggioritarie. Viceversa le lacune che attraversano la giunzione si ricombinano con gli elettroni della zona n . In prossimità della superficie di separazione rimane un doppio strato svuotato di portatori maggioritari: uno strato di donori nella zona n senza i relativi elettroni (ioni positivi) ed uno di accettori nella zona p senza le relative lacune (ioni negativi). Questo doppio strato di cariche fisse (gli ioni), non compensate elettricamente dalla presenza di portatori di segno opposto, stabilisce un campo elettrico, che

M0301041 Formazione della zona di svuotamento

gradualmente rallenta i flussi attraverso la giunzione fino a che, all'equilibrio, i flussi complessivi si annullano.

Lo spessore d dello strato di svuotamento diminuisce al crescere del drogaggio; in una giunzione tipica è di circa un μm . o anche minore, mentre il campo elettrico che si crea è elevato, dell'ordine di 10^5 Volt /cm o superiore.

Lontano dalla giunzione, oltre la zona di svuotamento, il campo elettrico interno si annulla e la concentrazione dei portatori ha gli stessi valori che si hanno nel semiconduttore di tipo p o di tipo n in assenza di giunzione.

4.3 Polarizzazione della giunzione

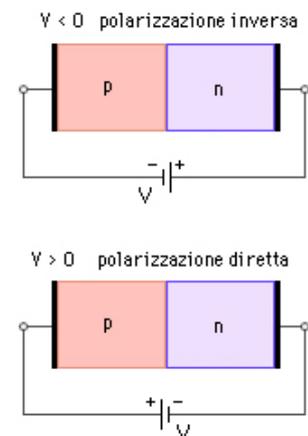
Quando alla giunzione è applicata una tensione esterna V , l'equilibrio viene alterato e attraverso la giunzione si stabilisce un flusso di portatori di carica la cui intensità dipende fortemente dal segno della tensione applicata.

Dato il carattere asimmetrico della giunzione $p-n$ sono infatti possibili due configurazioni distinte: una in cui la tensione esterna aumenta il potenziale elettrico della parte n e la condizione opposta, in cui la parte p viene posta a potenziale maggiore.

La prima condizione, corrisponde (convenzionalmente $V < 0$) alla giunzione polarizzata in modo inverso", il flusso dei portatori scende praticamente a zero ed è pressoché indipendente dal valore del potenziale applicato.

Nella condizione opposta, la giunzione è "polarizzata direttamente" ($V > 0$): la barriera è ora inferiore rispetto al caso di equilibrio e l'intensità della corrente cresce rapidamente all'aumentare del campo applicato.

Diminuire la barriera alla giunzione equivale a favorire la [corrente di diffusione](#) rispetto a quella drift. La forte asimmetria nel comportamento della giunzione, è spiegabile col fatto che, mentre la corrente di drift è proporzionale alla concentrazione dei [minoritari](#), la corrente di diffusione dipende dalla concentrazione dei [maggioritari](#) il cui valore è enormemente più grande.



5 Applicazioni della giunzione

Una struttura costituita da una giunzione $p - n$ con **contatti ohmici** agli estremi delle zone neutre p ed n è detto **diodo a giunzione** $p - n$.

La caratteristica (grafico) corrente-tensione è fortemente asimmetrica. Con **polarizzazione diretta** la corrente cresce esponenzialmente, mentre con **polarizzazione inversa** satura ad un valore I_0 molto piccolo.

La giunzione $p - n$ svolge un ruolo importante nell'elettronica e come elemento per la costruzione dei transistor. Inoltre la giunzione è l'elemento costitutivo dei dispositivi optoelettronici, per l'emissione e la rivelazione della radiazione, delle celle solari che convertono l'energia ottica in energia elettrica, e dei dispositivi a **microonde**.



Esempi di dispositivi optoelettronici. In alto fotodiodi al silicio per raggi ultravioletti. In basso immagine di un diodo laser.

5.1 Applicazioni della giunzione – Fotodiodi e celle solari

Sono costituiti da una giunzione $p - n$ impiegata come rivelatore di radiazione, e sono basati sulla **fotoconduttività** dei semiconduttori.

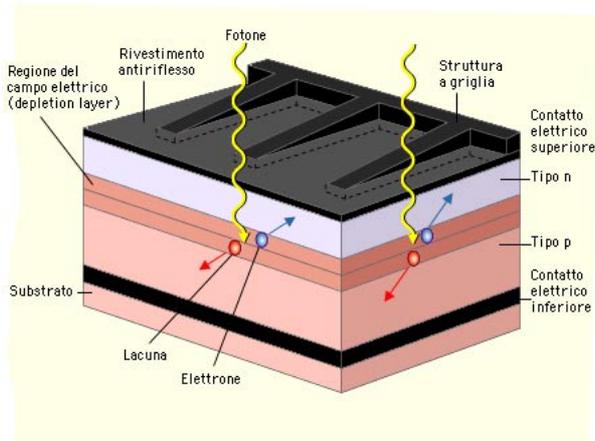
Consideriamo una giunzione polarizzata inversamente. Quando un **fotone** di frequenza superiore alla frequenza di soglia ($\nu_s = E_G / h$) viene assorbito nello strato di svuotamento della giunzione (**depletion layer**), o in prossimità di esso, la coppia elettrone-lacuna creata viene separata dal campo elettrico della giunzione; le lacune migrano verso la regione p , l'elettrone verso la regione n . Di conseguenza si ha una corrente nel circuito esterno (**fotocorrente**). In assenza di polarizzazione ed a circuito aperto si ha tensione ai capi del circuito (**effetto fotovoltaico**).

Il fenomeno è sfruttato per realizzare rivelatori di radiazione o celle solari.

La frazione dell'energia solare che si può convertire in energia elettrica dà la misura dell'efficienza della cella solare.

Sono state realizzate celle solari con vari tipi di semiconduttore. Le più convenienti si basano sul silicio amorfo, le più efficienti su composti III-V. L'efficienza va dal 10 al 30% .

E' evidente l'interesse delle celle solari, perché forniscono energia elettrica a partire da una fonte rinnovabile e non inquinante (il sole). Uno dei problemi che, ad oggi, ne limitano la diffusione, è il costo elevato, rispetto ai combustibili fossili.



Struttura di una cella solare a giunzione.

5.2 Applicazioni della giunzione - Diodo ad emissione di luce: LED

Il LED (Light Emitting Diode) è una sorgente di radiazione costituita da una giunzione $p - n$ polarizzata direttamente. Alla giunzione si ha iniezione di portatori minoritari: elettroni dalla zona n alla zona p , lacune in senso opposto. Nella depletion layer e in prossimità di essa i portatori di segno opposto si ricombinano: l'elettrone decade "spontaneamente", dal livello che occupa sul fondo della banda di conduzione, ad un livello vuoto (lacuna) della banda di valenza; l'energia perduta ΔE è emessa come fotone ($\nu = \Delta E / h$). Se il fotone esce dalla zona attiva dove è creato, il diodo funziona come sorgente di radiazione e converte il segnale elettrico in un segnale ottico.

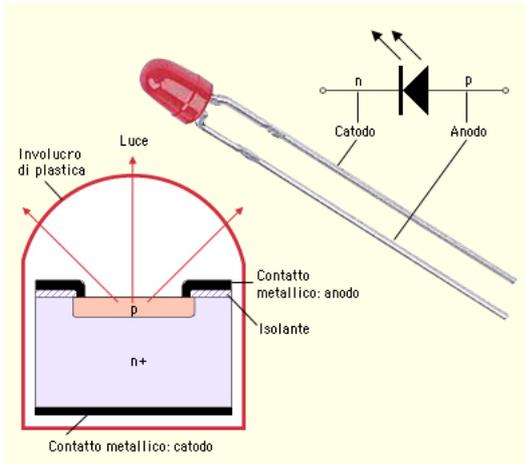
L'efficienza, ossia il rapporto fra l'energia luminosa emessa e l'energia elettrica assorbita, è dell'ordine del 5%; il limite all'efficienza è dovuto prevalentemente alla difficoltà dei fotoni ad emergere dalla superficie del dispositivo.

L'emissione dei LED, come quella delle comuni lampade ad incandescenza o a fluorescenza, si dice "spontanea" perché ogni singola ricombinazione radiativa elettrone-lacuna ha luogo indipendentemente da tutte le altre. I fotoni che risultano dalle varie ricombinazioni sono distribuiti nel tempo e in direzione senza alcuna correlazione, le fasi delle onde elettromagnetiche emesse in tutte le direzioni sono disordinate, e la radiazione emessa si dice "incoerente".

I LED di arsenuro di gallio (GaAs) emettono radiazione infrarossa ($\lambda = 890 \text{ nm}$) perché il gap è di soli 1.43 eV. In cristalli misti di arsenuro di gallio e fosforo di gallio si ha un gap maggiore ($E_G = 2.26 \text{ eV}$), quindi un'emissione nel rosso.

I LED con emissione nel visibile, tipicamente nel rosso, sono comunemente impiegati nei display numerici e come indicatori luminosi nei circuiti elettrici. Sono stati anche impiegati nella comunicazione su fibre ottiche, ma su distanze limitate

Nell'ultimo decennio sono stati sviluppati LED con emissione nel blu, basati sul carburo di silicio (SiC) e sul nitruro di gallio (GaN) ma l'efficienza è bassa e il costo di produzione elevato.



Diodo LED "standard" a cristalli misti di arsenuro di gallio e fosforo di gallio con emissione nel rosso. In alto a destra e in basso a sinistra rispettivamente, simbolo e struttura del LED.

5.3 Applicazioni della giunzione - Diodi Laser

L'emissione laser ha caratteristiche diverse da quelle di un LED, di una lampada ad incandescenza o di un tubo a scarica ([emissione di fluorescenza](#)).

Una di queste caratteristiche è la direzionalità : il raggio luminoso si propaga su grande distanza con un modesto allargamento. Per questa proprietà è possibile mandare un forte impulso fin sulla Luna e rivelare il segnale riflesso da uno specchio posizionato sul nostro satellite naturale.

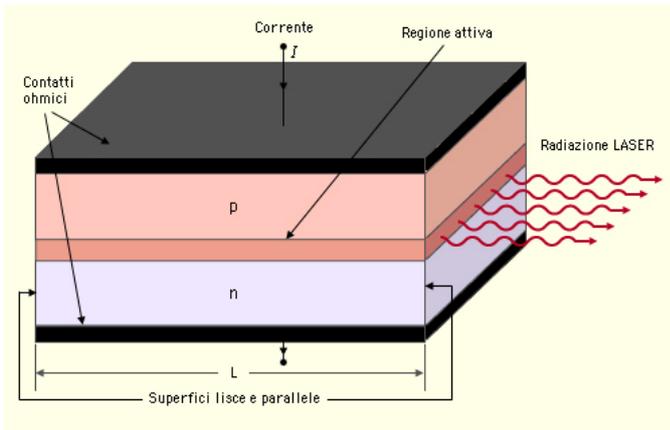
Una seconda caratteristica è la coerenza: le oscillazioni dell'onda elettromagnetica emessa hanno la stessa fase.

Esistono molti tipi di laser, a gas, a stato solido, a semiconduttore, a reazioni chimiche, ecc. Il laser a semiconduttore, come il LED, si basa sulla ricombinazione radiativa di elettroni e lacune nella zona prossima alla giunzione.

Diodi laser hanno dimensioni di qualche decimo di millimetro. Sono in genere basati su eterogiunzioni del tipo GaAs-GaAlAs, hanno correnti di soglia di 20-30 mA ed emettono luce con potenza di una decina di mW.

Sono comunemente usati per leggere le informazioni contenute nei CD, ma le applicazioni più importanti si hanno nelle telecomunicazioni su fibra ottica, perché il segnale luminoso emesso, fortemente monocromatico, può essere modulato (in ampiezza) ad alta frequenza semplicemente modulando la tensione applicata.

E' possibile procedere all'integrazione, sullo stesso chip, di componentistica elettrica ed ottica, realizzando in tal modo circuiti integrati capaci di gestire assieme segnali elettrici ed ottici e di passare da un dominio ottico a un dominio elettrico e viceversa.



Struttura di un diodo laser a giunzione.

6 Il transistor bipolare a giunzione

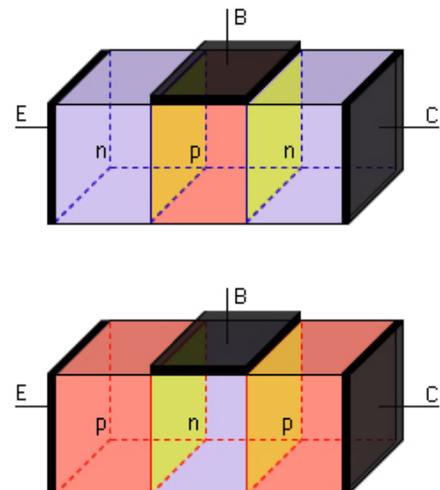
6.1 Il transistor bipolare a giunzione

Il transistor bipolare a giunzione è il primo dispositivo elettronico attivo affidabile costruito sfruttando le proprietà fisiche dei cristalli semiconduttori. Un elemento attivo è un dispositivo in grado di amplificare segnali elettrici. Schematicamente lo possiamo immaginare come un sistema che riceve in entrata un segnale elettrico di debole intensità (in tensione o in corrente) e lo trasforma in uscita in un segnale molto più forte. Questo, come è facile immaginare, non può essere realizzato con circuiti contenenti esclusivamente resistenze, bobine, condensatori o un'unica giunzione p-n (diodo a semiconduttori). Dispositivi di questo tipo sono pertanto chiamati elementi passivi.

L'importanza del transistor è dovuta soprattutto al suo impiego nell'elettronica digitale. Il transistor può essere infatti utilizzato come elemento attivo di base per fabbricare porte logiche, memorie, CPU etc. L'invenzione del transistor alla fine degli anni '40 ha provocato una vera e propria rivoluzione nel campo dell'elettronica digitale permettendo l'incredibile sviluppo dei calcolatori elettronici che ancora oggi stiamo osservando (i primi calcolatori furono ideati e costruiti ben prima dell'invenzione dei transistor).

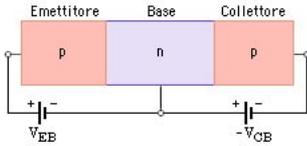
I motivi che hanno prodotto lo spettacolare successo del transistor rispetto agli elementi attivi che venivano impiegati precedentemente (valvole come triodi, pentodi etc.) sono che i transistor presentano caratteristiche diversissime: funzionano utilizzando correnti e tensioni bassissime, sono inoltre ordini di grandezza più veloci, economici e affidabili. La proprietà più importante è comunque la possibilità di fabbricare transistor di dimensioni microscopiche in forma integrata. Basti pensare che un moderno calcolatore utilizza circuiti integrati che contengono decine di milioni di transistor per centimetro quadrato.

Le tre zone del transistor a giunzione sono chiamate emettitore, base e collettore. L'emettitore e il collettore individuano le due zone del cristallo con lo stesso tipo di drogante mentre la base corrisponde alle parte del cristallo di diverso drogaggio che si trova tra le prime due. A prima vista il transistor appare come un dispositivo simmetrico in cui è possibile scambiare collettore con emettitore senza alterare le proprietà fisiche della giunzione. Questo in genere non è vero in quanto spesso l'emettitore e il collettore hanno caratteristiche differenti (livello di drogaggio, dimensioni spaziali ecc.).

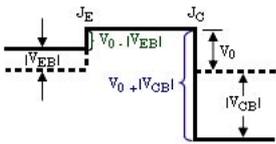


6.2 Il transistor bipolare a giunzione - Polarizzazione del transistor

In assenza di potenziale elettrico esterno, i portatori di carica si ridistribuiscono all'interno del transistor in modo da creare una condizione di equilibrio. Proprio come accade in un [diodo semiconduttore](#).



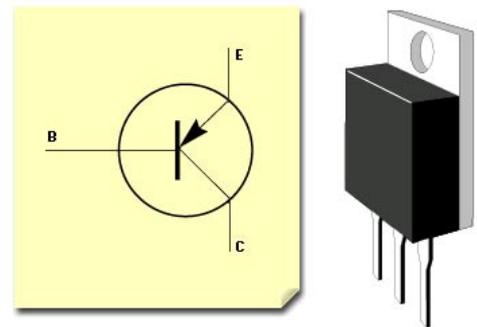
La condizione di equilibrio, può essere alterata applicando una differenza di potenziale ai capi delle due giunzioni del transistor, ovvero tra emettitore e base (V_{EB}) e tra il collettore e la base (V_{CB}).



6.3 La fisica del transistor

Il transistor polarizzato nella regione attiva funziona da amplificatore di segnali elettrici. Questo risultato è realizzato polarizzando direttamente la giunzione emettitore base e inversamente la giunzione base collettore. La polarizzazione diretta permette di aumentare enormemente il numero dei [portatori minoritari](#) della base (lacune per transistor $p-n-p$, elettroni per $n-p-n$). I portatori in eccesso diffondono nella base dove, lontano dalle due giunzioni, il campo è pressoché nullo. Giunti in prossimità della giunzione base collettore, la polarizzazione inversa spinge infine i portatori nella direzione del collettore, dove vengono raccolti e immessi di nuovo in circolo dal circuito di polarizzazione della giunzione.

Il transistor trasferisce pertanto la corrente I_E , che circola in un circuito a bassa resistenza (giunzione polarizzata direttamente), nel circuito di uscita che ha invece generalmente una resistenza molto più alta. Su questo fatto si basa il principio di amplificazione del transistor. In pratica una piccola variazione della tensione di polarizzazione diretta V_{EB} comporta una grande variazione di I_E e di conseguenza di I_C . Se all'uscita del collettore poniamo un utilizzatore con resistenza R_O la grande variazione di I_C provoca una grande variazione della tensione ai capi dell'utilizzatore. In conclusione, una piccola variazione della tensione di entrata provoca una grande variazione della tensione in uscita.



Come funziona un transistor. (1' 46")

7 Transistor ad effetto campo

Le proprietà elettriche delle giunzioni p-n e dei transistor a giunzione dipendono dalla presenza di elettroni e di lacune e per questo i dispositivi sono detti “bipolari”. Esistono tuttavia anche transistor “unipolari” che coinvolgono cioè un solo tipo di portatori. Il funzionamento di questi dispositivi si basa sull’effetto che un campo elettrico esterno ha sulla distribuzione spaziale dei portatori maggioritari. Transistor di questo tipo sono detti “ad effetto di campo” (Field Effect Transistor) o FET. A questa classe di dispositivi appartengono i FET a giunzione singola (JFET, poco usati in elettronica digitale), i MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET, o semplicemente MOS), e infine i CMOS (Complementary MOS).

I vari tipi di transistor ad effetto campo agiscono come amplificatori controllati in tensione. Presentano, sui transistor bipolari, il vantaggio di lavorare con un minimo consumo di energia, di poter essere ultra miniaturizzati, di consentire la memorizzazione di segnali, tramite la carica della capacità del gate.

Queste caratteristiche hanno favorito lo sviluppo dei calcolatori tascabili, degli orologi digitali, e soprattutto, dei circuiti a larga scala di integrazione (Very Large Scale Integration, o VLSI), quindi dei chip dei microprocessori.

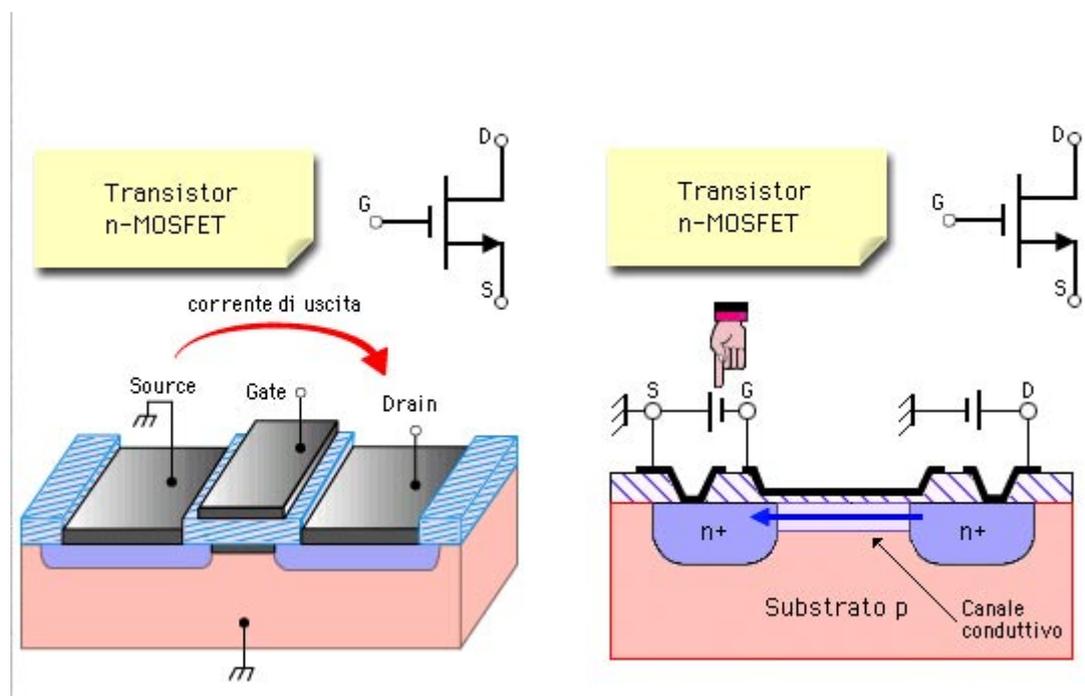


Fig. – Schema di funzionamento di un MOSFET
M0405001 (42 ”)

7.1 L'effetto campo

Un campo elettrico può essere prodotto all'interno di un semiconduttore ponendo sulla superficie del solido un elettrodo carico costituito da un strato metallico a cui è stato applicato un potenziale. Per impedire il passaggio diretto delle cariche, il metallo e il semiconduttore vengono separati da un sottile strato di isolante (ossido di silicio). L'elettrodo è il "gate" o "porta" dei dispositivi FET.

La presenza di un campo elettrico esterno, altera la struttura delle bande di energia e modifica la conducibilità del semiconduttore. Questo è "l'effetto campo" che viene impiegato per diminuire o aumentare la conducibilità di un semiconduttore. Nel primo caso, l'applicazione di un potenziale di polarità appropriata, tende ad allontanare i portatori maggioritari del semiconduttore. Si forma così in prossimità della superficie un "canale" o zona di svuotamento (depletion layer), tanto più ampia quanto maggiore è il potenziale V_G del gate.

La zona di svuotamento è caratterizzata dalla presenza di un numero trascurabile di cariche libere. Vi sono infatti solo cariche fisse dovute alle impurezze ionizzate e cariche minoritarie che hanno una concentrazione molto bassa. La conducibilità del canale risulta pertanto molto bassa. È importante osservare che variando il valore della tensione di Gate V_G , si cambia l'ampiezza della zona di svuotamento e di conseguenza la conducibilità del semiconduttore.

Quando la tensione del gate supera un valore di soglia V_T , si forma in prossimità della superficie un secondo strato caratterizzato da un'alta concentrazione di portatori minoritari. Questo è lo "strato di inversione". In pratica, sotto l'azione del campo esterno, le bande del semiconduttore si piegano al punto tale da rendere energeticamente più favorevole (ad esempio) la banda di conduzione rispetto a quella di valenza.

In questo caso i portatori minoritari risultano più numerosi dei maggioritari. In altre parole, la presenza del campo esterno altera le proprietà del semiconduttore al punto tale da "invertire" (nello strato di inversione) il "drogaggio" effettivo del solido. Lo strato di inversione può essere utilizzato come "canale" di alta conducibilità tra due semiconduttori aventi gli stessi portatori maggioritari. Questi sono rispettivamente il source e il drain dei FET.



M0405011 (1' 18") L'effetto campo e conseguenze sul moto dei portatori di carica di un semiconduttore.

I più diffusi transistor basati sull'effetto campo sono i MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET, o MOS).

Spesso i MOSFET vengono indicati dai simboli n-MOS e p-MOS. Nel primo caso si fa riferimento a MOSFET con canale di conduzione di tipo n (formatosi pertanto in un substrato di tipo p). Analogamente i p-MOS sono MOSFET con canale di conduzione di tipo p.