

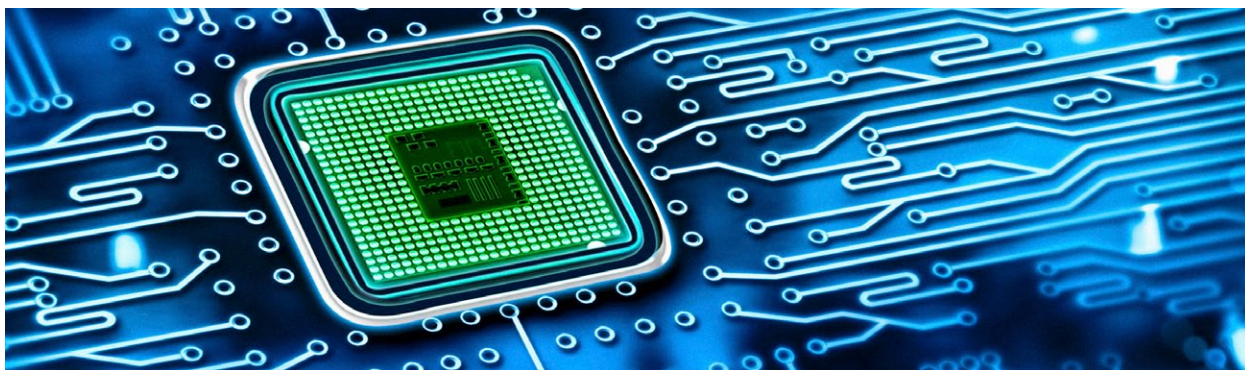
Di Davide Piumetti

ALLA SCOPERTA **TRANS**



*Entriamo nel cuore
di processori e chip grafici
per descrivervi al meglio
cosa sono e come funzionano
i transistor.*

DEI ISTOR



Cosa si cela dietro a tutti i componenti informatici, all'elettronica di consumo, agli smartphone e agli schermi 3D? Inizia un viaggio alla scoperta del transistor, della logica e della fisica che si nasconde dietro questo elemento che costituisce il cuore di ogni processore e di ogni dispositivo elettronico. In questo numero parleremo del componente, di come lavora dal punto di vista fisico ed elettrico e come, migliaia di essi, permettano di costruire la logica alla base di un processore.

Siamo ormai completamente circondati da componenti elettronici. Mai come in questa fase della civiltà umana una tecnologia aveva raggiunto un livello di integrazione tale da rendere qualunque operazione quotidiana gestita e pilotata da essa. Parlando di elettronica ci si riferisce infatti a un mondo di prodotti e componenti che vengono utilizzati per ogni scopo, virtualmente in ogni dispositivo attraversato dalla corrente elettrica è presente l'elettronica e, nella maggior parte dei casi, dei processori o dei microcontrollori basati sui transistor. Smartphone, televisori e automobili sono gli oggetti più comuni che utilizzano la tecnologia elettronica per funzionare, ma non sono i soli, anzi praticamente tutto il mondo dei servizi si basa

sull'elettronica e i transistor. Il trasporto pubblico, i servizi postali, le banche, ma anche semplicemente gli irrigatori in giardino o gli attrezzi elettrici più diffusi si basano su sistemi o semplici schede di controllo guidate da processori e transistor.

Il transistor, immaginato per la prima volta addirittura nel 1925 dal canadese Linnefeld, venne sviluppato in quella che è la sua incarnazione moderna nel 1947 all'interno dei prolifici *Bell Laboratories* da Walter Brattain e John Bardeen e, grazie anche a 50 anni di affinamenti, rappresenta l'invenzione che ha segnato e segnerà più di tutto il secolo in corso, così come la plastica (inventata nell'ottocento) è l'invenzione

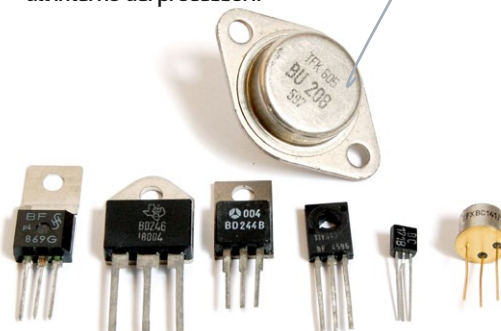
simbolo del secolo passato. Il concetto di base di un transistor è che esso permette di operare con la corrente elettrica come un interruttore comandato. La corrente fluisce o meno tra due poli principali (detti *source* e *drain*) in base allo stato del terzo polo di comando, il *gate*. Il funzionamento a stato solido, ovvero senza parti in movimento ma solo con correnti e tensioni, permette di utilizzare il transistor per realizzare logiche complesse e di conseguenza tutto quello che di elettronico ci circonda.

Per comprendere meglio come funziona un processore dobbiamo di conseguenza comprendere l'operatività di un transistor e, per farlo, inizieremo dalle basi, ovvero dalla materia e dalle sue proprietà.



I moderni processori racchiudono al loro interno alcuni miliardi di transistor.

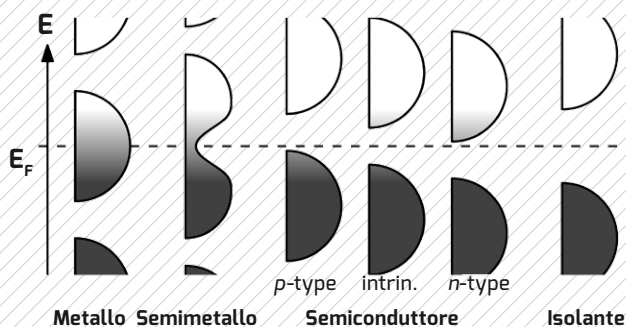
Vari tipi di transistor di potenza. Il loro funzionamento è identico ai miliardi di modelli miniaturizzati all'interno dei processori.





Un cilindro di silicio monocristallino che verrà affettato in "wafer" che fungeranno da base per la costruzione dei transistor.

BANDE DI CONDUZIONE E VALENZA



Le bande di valenza e conduzione nei diversi tipi di materiali. I metalli hanno livello di Fermi sito nel pieno della banda di conduzione, mentre gli isolanti hanno tale livello posto a metà strada tra valenza e conduzione. I semiconduttori hanno invece una delle due bande molto vicina al livello di Fermi.

CONDUTTORI, ISOLANTI E... SABBIA

Gli elementi in natura hanno alcune proprietà ben definite in base alla propria costruzione atomica. Esistono *materiali isolanti*, ovvero che non permettono la conduzione della corrente elettrica, e *materiali conduttori*, che lasciano fluire al loro interno la carica elettrica.

Questo accade perché gli elementi sono costruiti con un nucleo centrale di protoni e neutroni circondato da una nuvola elettronica disposta su diverse bande di energia. Due quelle che definiscono al meglio il comportamento elettrico di un elemento: la *banda di valenza* e la *banda di conduzione*. La banda di valenza rappresenta il livello energetico più basso completamente occupato da elettroni, mentre quella di conduzione indica il più basso non completamente occupato (o vuoto). La *banda proibita*, o band-gap, è lo spazio energetico che intercorre tra le due ed è di fondamentale importanza per i nostri fini divulgativi. Questa premessa tecnica ha una ragione ben definita e si lega al concetto di

"livello di Fermi".

Il livello di Fermi è una proprietà fisica di ogni elemento e si riferisce in buona approssimazione (perlomeno fino a qualche centinaia di migliaia di gradi centigradi) all'energia chimica totale dell'elemento. In base al valore di questo livello di Fermi rapportato alle bande di valenza e conduzione possiamo differenziare il tipo di materiale.

Nelle immagini in queste pagine potete vedere come i materiali detti *conduttori* hanno il livello di Fermi che cade direttamente all'interno di una banda, il

che rende tali materiali in grado di condurre energia elettrica senza problemi. Questo perché l'elemento, già all'energia chimica di cui è dotato, presenta elettroni liberi di muoversi. In netto contrasto i materiali *isolanti*, che hanno il livello di Fermi all'interno della

banda proibita, ovvero l'energia potenziale di cui sono dotati non permette la movimentazione degli elettroni (e la banda di conduzione si trova a grande distanza dal livello di Fermi). I *semiconduttori* sono invece materiali che si situano nel mezzo, ovvero che

risultano normalmente isolanti ma che presentano una banda proibita di dimensioni molto ridotte. I semiconduttori puri, come il silicio o il germanio, possono di conseguenza divenire dei conduttori o degli isolanti in base alle condizioni esterne alle quali sono sottoposti, una variazione del campo elettrico, magnetico o di temperatura può infatti spostare l'energia dell'elemento a sufficienza per diventare conduttore o isolante.

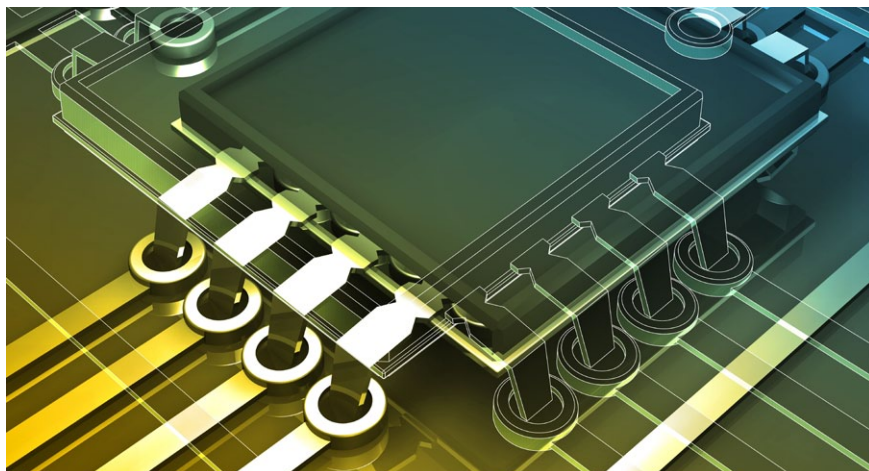
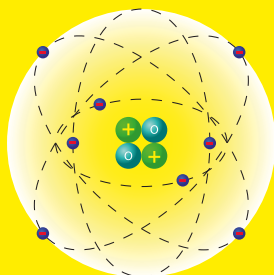
I più importanti materiali semiconduttori sono quelli appena citati, il silicio e il germanio, che appartengono a una ben definita zona della tavola periodica che li definisce anche *metalloidi*. Si situano tra i metalli del gruppo p (alluminio, gallio, stagno) e i non metalli (carbonio, fosforo, selenio). Conoscendo nella pratica questi elementi ci si rende conto come tra alluminio e fosforo sono ben pochi i punti in comune e che l'elemento che si situa a metà strada tra loro deve per forza avere proprietà molto particolari. In particolare i semiconduttori hanno una banda proibita grande all'incirca **1 elettronvolt**, mentre i materiali isolanti hanno valori superiori di almeno 2 ordini di grandezza.

Conduttori o isolanti?

I semiconduttori hanno proprietà a metà strada tra i materiali isolanti e i metalli

→ ELETTRONVOLT

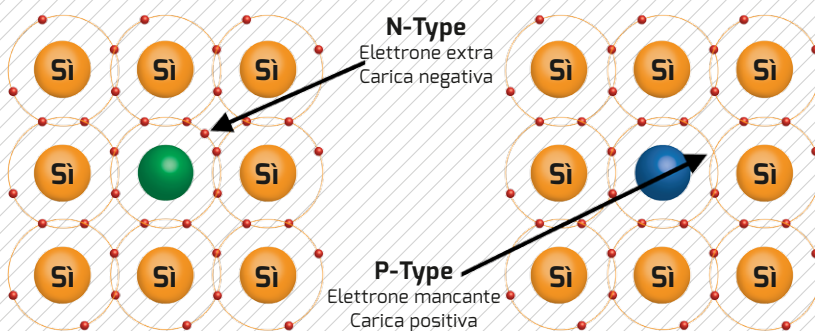
Misura della variazione dell'energia dalla carica elettrica di un singolo elettrone, quando viene spostato tra due punti in una regione in cui è presente un potenziale elettrostatico con una differenza tra i due punti di 1 volt).



The periodic table shows elements categorized by groups: Solidi (Solids), Liquidi (Liquids), Gas (Gases), and Sconosciuto (Unknown). Semiconductors are highlighted in blue, including elements like Si, Ge, As, Sb, Te, Se, and others in the 13-16 groups.

I semiconduttori nella tavola periodica fanno da spartiacque tra i metalli e i non metalli.

DROGGAGGIO DI TIPO P O N



Il drogaggio del reticolo cristallino del silicio tramite impurità dotate di un elettrone in meno (drogaggio di tipo n) o in più (drogaggio di tipo p).

I SEMICONDUTTORI NON BASTANO

Grazie ai materiali semiconduttori, e in prima analisi al solo silicio, sarebbe possibile costruire ogni cosa e, in effetti, i primi transistor sono stati creati senza ulteriori modifiche, ottenendo però prestazioni non certo eclatanti. Presto infatti si è capito che, se dal punto di vista teorico tutto era possibile, nella pratica modificare le condizioni al contorno per rendere un elemento semiconduttore un isolante elettrico o un conduttore risulta molto oneroso.

Le potenze in gioco per aumentare (o diminuire) il livello di Fermi per un semiconduttore puro in modo da fargli cambiare comportamento, sono troppo elevate. Per risolvere questo problema sono stati studiati

e in seguito realizzati nuovi tipi di semiconduttori, prendendo come base il silicio e modificandolo a seconda delle esigenze in modo da spostare le proprietà del materiale e avvicinare la banda di conduzione (o quella di valenza) al livello di Fermi, in modo che risulti necessaria solo una piccola modifica alle condizioni esterne per rendere il materiale del tutto conduttore o isolante.

Si parla infatti di *drogaggio* del materiale semiconduttore per indicare l'inserimento artificiale di alcune impurità che modificano il comportamento fisico del materiale, spostando la banda proibita a un livello superiore o inferiore. Due sono le tipologie classiche di drogaggio, che creano i semiconduttori di tipo *p* o di tipo *n*.

Il drogaggio del silicio avviene attualmente impiantando all'interno del

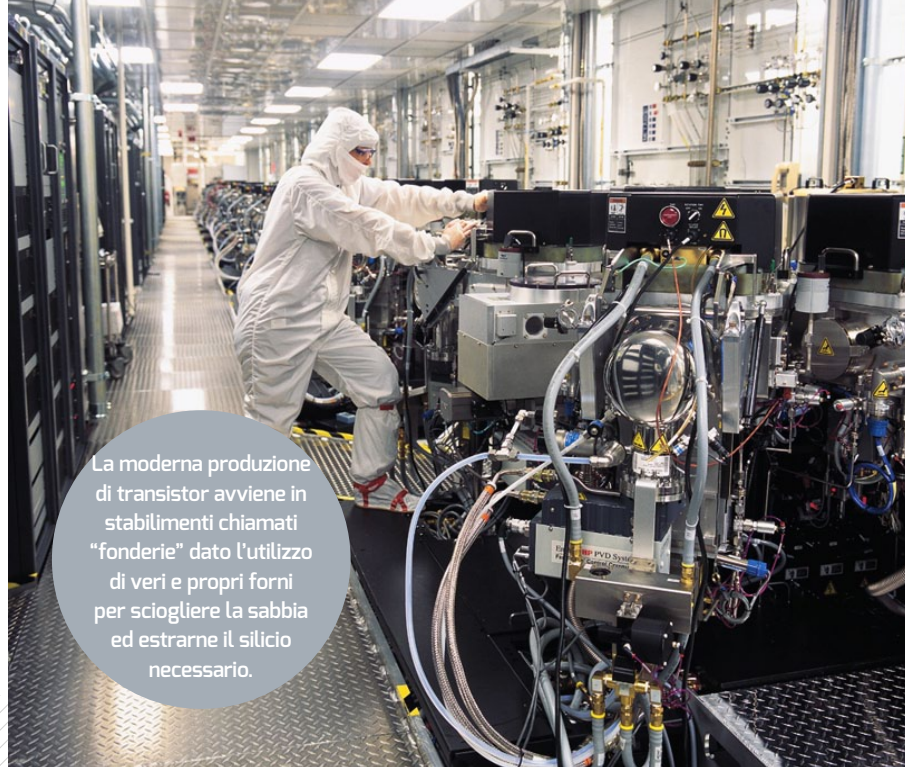
reticolo cristallino di cui è composto, un atomo appartenente a un altro gruppo atomico, ad esempio il boro (gruppo 13) o il fosforo (gruppo 15). Questi elementi hanno, rispettivamente, un elettrone in meno e uno in più del silicio nell'ultimo orbitale occupato, facendo in modo che all'interno del reticolo globale venga inserita una lacuna o un elettrone in eccesso, modificando la posizione delle bande di valenza e conduzione come richiesto.

Nello specifico nel drogaggio di tipo n l'atomo drogante dispone di un elettrone in più rispetto a quelli necessari per soddisfare i legami del reticolo cristallino del silicio, facendo sì che tale elettrone acquisti una libertà di movimento che accresce la conducibilità elettrica del materiale. Il drogaggio di tipo *p* invece prevede l'esatto opposto, ovvero l'inserimento di un elemento con un elettrone in meno rispetto a quanto necessario per completare il reticolo. Questo porta alla presenza di una lacuna che aumenta la carica positiva (l'elettrone ha carica negativa) all'interno del materiale.

Il drogaggio dei materiali avviene in percentuali molto ridotte, sia per non intaccare la struttura cristallina del silicio sia per la possibilità di modificarne grandemente le proprietà con pochi interventi mirati. Il drogaggio si misura in atomi/cm³, e assume valori mediamente bassi e ben definiti. In un cm³ di silicio sono presenti all'incirca 5x10²² atomi ovvero 50 trilioni (un trilione è pari a mille miliardi di miliardi), con un drogaggio che comporta l'inserimento di atomi di boro, fosforo o arsenico (in base alle proprietà richieste) in un numero che varia da 10¹³ atomi/cm³ fino a 10²⁰ atomi/cm³ (dallo 0,00002% al 2% del totale).

Il drogaggio si effettua in modi diversi a seconda che sia necessario modificare l'intero materiale (e allora vengono aggiunte le impurità direttamente durante la fusione del silicio) o il solo strato superficiale (in questo caso si usa l'impianto ionico, che vedremo nel dettaglio più avanti).

In questo modo è possibile avere materiali semiconduttori pronti all'uso che l'elettronica ha deciso per loro, avendo a disposizione elementi in grado di diventare conduttori (o isolanti) con una semplice modifica delle loro proprietà esterne.



La moderna produzione di transistor avviene in stabilimenti chiamati "fonderie" dato l'utilizzo di veri e propri forni per sciogliere la sabbia ed estrarne il silicio necessario.



Il primo transistor sperimentale prodotto nel 1947 dai Bell Laboratories. Rivoluzionario per l'epoca portò a una rapidissima crescita del settore.

IL TRANSISTOR

Come già accennato il primo transistor venne progettato da Lilienfeld nel 1925, immaginando un dispositivo che funzionava in maniera simile ai moderni mosfet (vedremo più avanti i vari tipi di transistor). Dopo di lui il tedesco Oskar Heil brevettò nel 1934 un prodotto equivalente, che diede il via all'informatizzazione della società moderna e che ha portato a tutti i prodotti che citavamo nell'introduzione, con alcuni prototipi che sfociarono una decina di anni dopo nell'inizio di una nuova era. Il primo vero transistor (da *TRANsconductance varISTOR*) era costruito basandosi sui materiali semiconduttori utilizzando due sottilissimi elettrodi di metallo posti a un centinaio di micron di distanza e premuti sulla superficie di una lastra policristallina di germanio purissimo drogato di tipo *n*. Realizzato nel 1947 dai ricercatori dei Bell Laboratories, ai quali dobbiamo buona

parte dei progressi post bellici nei campi dell'informatica e (soprattutto) delle telecomunicazioni, funzionava in maniera semplice più come triodo allo stato solido che come transistor moderno. L'anno successivo si ebbe infine il primo prototipo del transistor moderno, con un concetto costruttivo che, con le dovute modifiche, è giunto fino ai giorni nostri.

Nel 1948 il transistor a "sandwich" – un transistor a giunzione in cui i vari elementi sono impilati come in un panino imbottito – rappresentò il punto di partenza per una rapidissima evoluzione che, per motivi costruttivi, vide l'abbandono del germanio sostituito dal più economico, funzionale e semplice da gestire, silicio.

Concettualmente un transistor è costituito da un semiconduttore al quale sono connessi tre terminali che lo congiungono al mondo

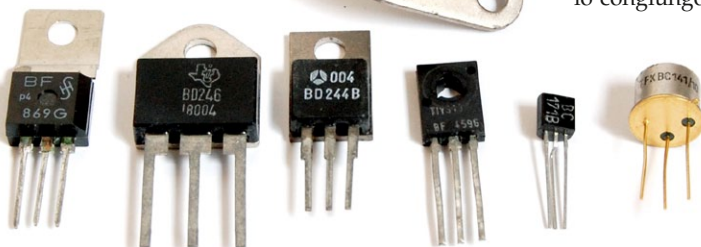
esterno. L'applicazione di una tensione elettrica a un terminale permette di regolare la quantità di corrente elettrica che lo attraversa, permettendo di funzionare sia come interruttore che in modalità di regolatore o di amplificatore.

Utilizzato in maniera analogica rappresenta infatti una delle migliori soluzioni per amplificare un segnale debole e delicato che, utilizzato come tensione di controllo, permette di modulare una tensione posta in ingresso (supportata da opportuni generatori) per ottenere una copia del segnale originale amplificata a piacere. In modalità digitale viene utilizzato come interruttore, con un significato logico binario quando aperto o chiuso.

La forma esterna dei transistor subì un'evoluzione altrettanto marcata, passando da grandi prototipi costruiti in maniera artigianale a sistemi sempre

Transistor

La parola deriva da *TRANsconductance varISTOR*, che descrive al meglio i primi modelli analogici



Evoluzione della specie, dalla valvola termoionica del 1941 alla rapidissima miniaturizzazione dei transistor. Ora i più piccoli hanno dimensioni di qualche decina di nanometri, cento volte più piccolo rispetto al diametro di un globulo rosso.

“

Per l'elettronica digitale sono utilizzati quasi esclusivamente i transistor a effetto di campo, i Fet

”

più complessi e precisi, con involucri in materiali composti, in vetro, in ceramica o in metallo, sviluppati appositamente per isolare dal punto di vista elettrico e dissipare efficacemente il calore dal punto di vista termico.

I primi transistor, a giunzione o di tipo puntiforme, sono anche detti “bipolari” (Bjt – *Bipolar Junction Transistor*) per via della loro costruzione e del fatto che il passaggio della corrente elettrica avviene utilizzando contemporaneamente i due portatori di carica, gli elettroni per quella negativa e le lacune per quella positiva. I modelli che utilizzano un solo portatore (gli elettroni) sono anche detti “unipolari” e sono rappresentati maggiormente dai transistor a effetto di campo (Fet – *Field Effect Transistor*) che, opportunamente modificati e migliorati trovano posto anche all'interno dei dispositivi moderni.

Le caratteristiche tecniche e la funzione di trasferimento dei diversi transistor rendono i modelli bipolari i più utilizzati in elettronica analogica. Le sue proprietà lineari lo rendono infatti una scelta migliore come amplificatore di segnale rispetto ai dispositivi a effetto di campo. Il funzionamento è il più semplice possibile, essendo composto dalla giunzione di tre elementi semiconduttori drogati alternativamente a formare una giunzione doppia *p-n-p*. A ognuno di questi elementi è connesso un terminale esterno, con i due ai lati che prendono il nome di *emettitore* e *collettore* e quello centrale chiamato *base*. In base alle connessioni di questi terminali, possibili infatti modelli in cui la base è elettricamente connessa a uno degli altri due, si ottiene un funzionamento diverso, preferibile in base alla modalità d'uso necessaria. Per i nostri scopi ha però un fascino decisamente maggiore il transistor a effetto

di campo, il *Fet*, utilizzato da tutti i produttori di circuiti integrati come base portante per la logica interna. Anche in questo caso sono presenti tre terminali connessi a tre elementi ben distinti, detti *source* (sorgente), *drain* (pozzo) e *gate* (porta), posizionati su un elemento comune detto *bulk* (substrato), come potete vedere dalle immagini in queste pagine.

A differenza di altri tipi di transistor in questo caso il funzionamento è pilotato esclusivamente dal gate che, posto a una determinata tensione operativa, genera un campo elettrico tale da modificare l'energia totale della parte di substrato sul quale è posizionato e di conseguenza rendere tale parte di semiconduttore (detto canale) conduttivo o meno per la corrente elettrica. Corrente che risulta di conseguenza libera di fluire da *source* a *drain* o, in transistor dal funzionamento inverso, viene bloccata completamente. Esistono infatti due grandi tipologie di questi elementi, quelli *normalmente aperti* e quelli *normalmente chiusi*. Il significato è semplice e relativo al loro stato a riposo: senza nessuna tensione applicata al gate quelli normalmente aperti non permettono il passaggio di corrente, lasciandola fluire quando sottoposti a una tensione che li “attiva”. Quelli normalmente chiusi risultano conduttivi senza una tensione applicata, diventando degli isolanti quando il gate viene alimentato. Queste proprietà derivano dal funzionamento dei semiconduttori drogati di tipo *p* o *n* come visto nelle pagine precedenti, che presentano una banda di conduzione e una di valenza spostata artificialmente

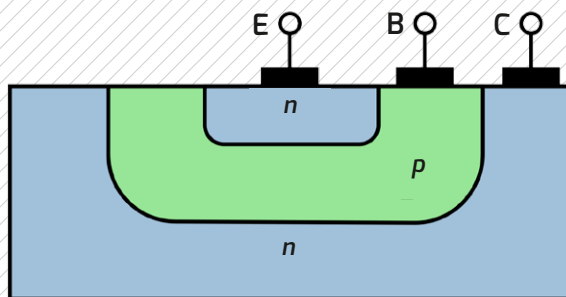
verso il proprio livello di Fermi, in modo che una piccola variazione delle condizioni al contorno permetta il loro cambiamento di proprietà elettriche da isolanti a conduttori.

Il primo transistor a effetto di campo è stato negli anni modificato soprattutto nella geometria, dato il suo quasi ottimale funzionamento dal punto di vista elettrico. Le modifiche sono relative a cambiamenti dettati dalla volontà di migliorare le prestazioni oppure per permettere una miniaturizzazione superiore. I modelli più diffusi di Fet sono i *Jfet*, i *Mosfet* e gli ultimi arrivati commercialmente parlando i *Finfet*.

I primi, *Junction-Fet*, rappresentano il tipo classico con l'aggiunta di una seconda giunzione *p-n* a scopi di stabilizzazione dell'alimentazione e furono usati agli inizi dell'era informatica fino agli anni '60, quando il loro posto fu preso dai *Mosfet* (*Metal Oxide Semiconductor Fet*), che hanno dominato la scena fino ai giorni nostri. Tutti i processori moderni costruiti fino al 2013 sono infatti basati sui *Mosfet* e solo Intel, con il processo produttivo a 22 nm, iniziò a sostituirli con la nuova generazione di *Finfet*.

Tutti gli altri produttori continuano a usare *Mosfet*. L'ultima evoluzione commerciale (*Fin Shaped Fet* – *Fet ad aletta*) ha un funzionamento identico in linea di principio, rivoluzionando però la forma e il processo costruttivo, permettendo per la prima volta uno sviluppo verticale e tridimensionale dei transistor. Di questi e di tutte le altre forme ed evoluzioni tecnologiche dei transistor ne parleremo diffusamente in uno dei prossimi numeri.

TRANSISTOR BJT



Lo schema e l'immagine di un transistor BJT, molto usato in elettronica analogica e meno in quella digitale.



IL MOSFET

Come già accennato il Mosfet è il più diffuso transistor a effetto di campo ed è costruito utilizzando un substrato semiconduttore (solitamente il silicio drogato) al quale sono connessi tre terminale con compiti differenti: source, drain e gate.

In realtà Mosfet è un termine generico che indica la tecnologia, mentre in pratica sono almeno due i dispositivi esistenti che funzionano in maniera diversa in base al drogaggio di tipo p o n del substrato. Questi prendono il nome di *pMosfet* e *nMosfet* e rappresentano i due transistor base (spesso abbreviati come pMos e nMos) utilizzati dalla logica complementare cMos (*Complementary Mos*) di cui bene o male tutti abbiamo sentito parlare almeno una volta e che è utilizzata da tutti i processori e controllori oggi in commercio. Il substrato centrale su cui sono costruiti questi transistor è, come dicevamo, il silicio drogato di tipo p o n. In realtà alcune aziende utilizzano oggi miscele più esotiche di elementi semiconduttori che migliorano le proprietà elettriche del transistor, pur mantenendone intatto il principio di funzionamento. Della realizzazione industriale di tali elementi ci occuperemo però nel dettaglio in uno dei prossimi numeri, volendoci piuttosto concentrare in queste pagine sulla logica di funzionamento che li guida, simile per tutti e motivo per cui analizzeremo nel dettaglio solo il modello più semplice.

Punto chiave della struttura è che i due elementi detti source e drain sono costituiti da un semiconduttore drogato in maniera complementare rispetto al substrato, formando di conseguenza un tritico *p-n-p* oppure *n-p-n* a seconda del tipo di Mosfet considerato. Al di sopra della zona centrale, detta *canale* è posizionato il gate, per moltissimi anni costituito da polisilicio, un materiale altamente drogato che portava il silicio ad assumere proprietà semimetalliche, pur non raggiungendo la stessa capacità conduttiva dei metalli veri e propri. Il motivo di tale scelta deriva anche in questo caso dai processi produttivi che, fintanto che non è stato raggiunto un livello di

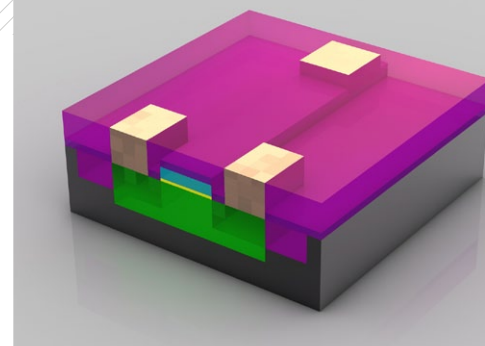
evoluzione sufficiente, non permettevano un efficace accoppiamento tra metallo e silicio. Nei modelli più recenti di Cpu (prodotti negli ultimi 5 anni) la tecnologia ha permesso la costruzione di un gate di tipo metallico, che meglio sposa le necessità di generazione del campo elettrico proprie di questo elemento.

Tra il gate e il substrato è presente uno strato di materiale isolante normalmente costituito da biossido di silicio (anche in questo campo gli ultimi anni hanno portato a grandi evoluzioni tecniche), con lo scopo di impedire che le cariche elettriche presenti nel gate fluiscano nel substrato e vadano a contaminare i segnali elettrici tra source e drain.

FUNZIONAMENTO IN PILLOLE

Le linee generali di funzionamento del Mosfet le abbiamo già elencate più volte. Ora scenderemo nel dettaglio andando ad indicare quali reazioni avvengono all'interno di un transistor che ne permettono l'uso come interruttori digitale. Il gate è il punto chiave di ogni transistor e da lui dipende il funzionamento globale dello stesso. Applicando infatti una tensione elettrica a questo elemento viene a crearsi

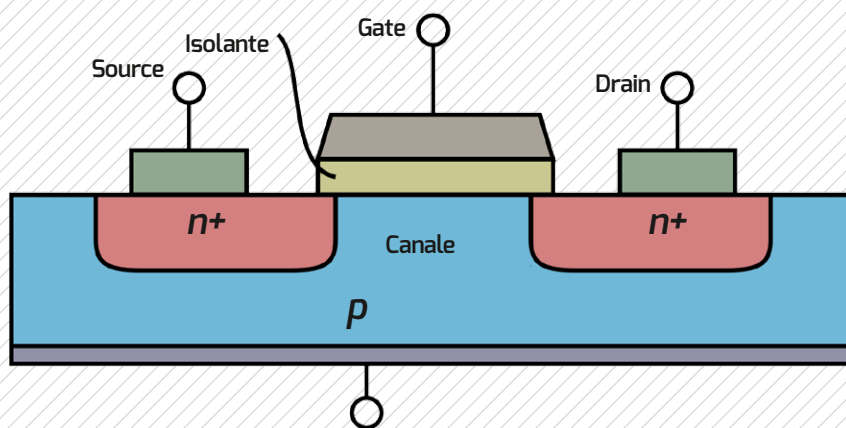
una condizione particolare all'interno della zona del substrato chiamata canale, che dipende dallo stato di source e dal valore della tensione (positiva o negativa) del gate. Quanto descriveremo nel seguito è valido per i soli nMosfet (*n-p-n*) il cui substrato è di tipo p, mentre per i pMosfet il funzionamento è esattamente complementare.



Gli stati di funzionamento del transistor sono nel complesso tre e dipendono dalla tensione applicata al gate rispetto a quella presente tra source e drain. Il primo, detto anche di *accumulazione*, si ha quando viene applicata una tensione negativa al gate.

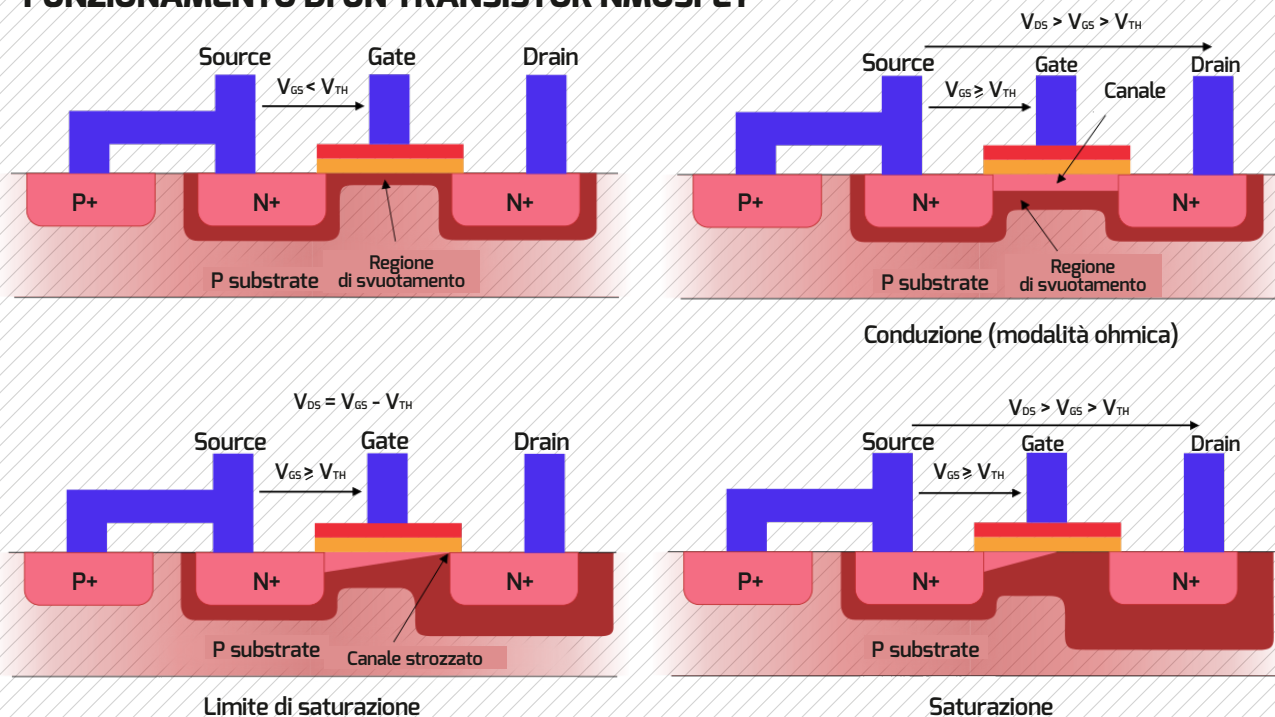
Questo comporta la creazione di uno strato di accumulo di lacune (positive) all'interno del canale del substrato, rendendolo di fatto isolante e impedendo la conduzione elettrica tra

TRANSISTOR MOSFET



Struttura base di un transistor Mosfet n-p-n. Si notino i tre contatti principali, source, gate e drain, le regioni drogate di tipo p ed n e lo strato di ossido isolante tra gate e canale.

FUNZIONAMENTO DI UN TRANSISTOR NMOSFET



I quattro stati in cui può trovarsi un Mosfet in base alle tensioni ai suoi terminali.
In senso orario: accumulo, conduzione, saturazione e saturazione finale.

source e drain. Il transistor in questo caso è, dal punto di vista logico, un interruttore aperto.

In ogni caso quando applicata una tensione positiva si parla di *svuotamento* in quanto in prima istanza la carica positiva sul gate attrae all'interno del canale le cariche negative (gli elettroni) permettendo la conduzione elettrica. Si definisce in questo caso *tensione di soglia* il valore della tensione necessaria per superare lo strato isolante del transistor ed è quella minima necessaria per la creazione del canale. Superata tale tensione la conduzione non è però immediata e dipende anche dal valore di quest'ultima tra gli altri due terminali. Applicando infatti una tensione positiva sul gate si crea un canale che non è perfettamente lineare.

Essendo anche il source caricato nello stesso modo il canale in quel punto sarà più profondo mentre, per simmetria, il drain avrà un canale molto ridotto o inesistente creando un canale a forma di "triangolo".

Aumentando la tensione del gate fino a superare il livello di conduzione (che è la somma tra quella presente tra source e drain e quella di soglia) il canale si apre completamente mandando il transistor in modalità conduttiva.

Il funzionamento fisico è dunque questo, con l'applicazione di una tensione al gate che, se negativa, blocca il passaggio di corrente e, se positiva e superiore a quella di soglia più quella tra source e drain, permette il passaggio di corrente. Al di sotto della corrente di soglia in teoria non dovrebbe esserci

passaggio di corrente, ma in realtà a causa di fenomeni molto particolari (di cui parleremo nei prossimi articoli in merito alle difficoltà produttive) esiste una piccolissima percentuale di elettroni che riescono ad assumere energia sufficiente per fluire da source a drain, generando una corrente parassita indesiderata con la quale è sempre necessario fare i conti.

Questo è uno dei motivi per cui, da qualche anno a questa parte, i maggiori produttori hanno interrotto quella corsa alla velocità di clock che ha caratterizzato il decennio scorso.

Aumentando la frequenza questo fenomeno si fa più evidente, fino a raggiungere i limiti fisici dei materiali utilizzati. Nel mezzo, dalla tensione di soglia fino a quella di conduzione, il transistor funziona in modo parziale, lasciando fluire della corrente non proporzionale alla tensione di ingresso, disperdendo molto calore in un processo che rappresenta una modalità di funzionamento utile in alcuni ambiti particolari ma di certo non nell'elettronica digitale.

“Al di sotto della tensione di soglia alcuni elettroni mantengono una carica sufficiente a superare il canale. Sono le famose correnti parassite”

L'UTILIZZO DIGITALE E LA LOGICA CMOS

Il monopolio dei transistor di tipo Mosfet nell'elettronica digitale moderna deriva soprattutto dalla logica complementare cMos che permette, impiegando sia i modelli nMos sia quelli pMos, di ottenere una logica di funzionamento binaria con uno sforzo relativamente contenuto e un processo produttivo unico e standardizzabile. Tra le molte tecnologie esistenti quella cMos è infatti tra le più facilmente realizzabili in quanto inserire i due tipi di transistor sulla stessa base è un'operazione relativamente semplice. Negli anni i processi produttivi hanno infatti portato a una grandissima miniaturizzazione di questi elementi, passando da ordini di grandezza ai quali siamo abituati (e a transistor ben visibili a occhio nudo), fino a modelli con il canale del gate largo solo poche decine di nanometri.

I progressi eccezionali della tecnica hanno spinto le fonderie al limite, impiegando processi produttivi talmente evoluti da essere in grado di rivestire alcune parti dei transistor con uno strato di silicio opportunamente drogato dello spessore di un singolo atomo. Se i primi microcontrollori cMos

potevano contare su qualche centinaio di transistor, oggi i chip più evoluti possono contenere fino a 4 miliardi di piccoli elementi in uno spazio grande quanto un francobollo. Grandi studi per la riduzione della potenza necessaria per il loro funzionamento si sono di conseguenza resi necessari per evitare che il calore generato dal dispositivo in funzione fosse troppo elevato, anche se uno dei grandi vantaggi di utilizzare una logica duale come quella cMos è che, in media, circa la metà dei transistor è sempre spenta e permette una notevole riduzione dei consumi rispetto a elementi costantemente alimentati e funzionanti.

Sempre in termine di consumo l'altro grande vantaggio della logica cMos rispetto ad altre è che, solitamente, l'uscita di un transistor è collegata al gate di un altro comandandolo, evitando però che la corrente fluisca tra tutti i transistor (il gate è un punto finale isolato) e di conseguenza non offrendo grandi consumi e surriscaldamento continuo.

Grazie anche a queste proprietà è possibile utilizzare i transistor cMos per realizzare una logica digitale avanzata e ricorsiva, ovvero utilizzare due soli

elementi per costruire qualsiasi circuito logico possibile. Tramite nMos e pMos è infatti semplice realizzare le classiche porte And, Or e Not, alla base di tutta l'elettronica digitale moderna e operanti con i valori binari logici "0" e "1". Per costruire una porta Not è sufficiente utilizzare due soli transistor, un nMos e un pMos collegati in serie (anche se è possibile usare una

sola delle due porte per costruirlo), mentre per Nand e Nor sono sufficienti 4 transistor.

Nella logica complementare cMos le porte N* sono più semplici da realizzare rispetto alle basilari And o Or, ma tutta la logica binaria può essere basata sulle tre porte N* in maniera identica a quanto accade con le porte a logica positiva.

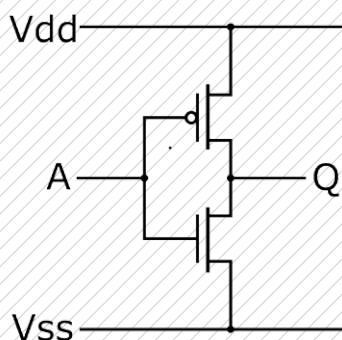
Partendo da un pugno di sabbia dal quale estrarre il silicio è di conseguenza possibile arrivare a risultati eccezionali, semplicemente unendo tra loro milioni o miliardi di questi piccoli elementi.

Nei prossimi numeri vedremo quali sono le tecniche produttive che permettono ai colossi mondiali di arrivare a produrre piccoli gioielli in grado di far funzionare tutti i nostri dispositivi elettronici. •

cMosfet
Logica complementare che comprende l'uso di nMosfet e pMosfet

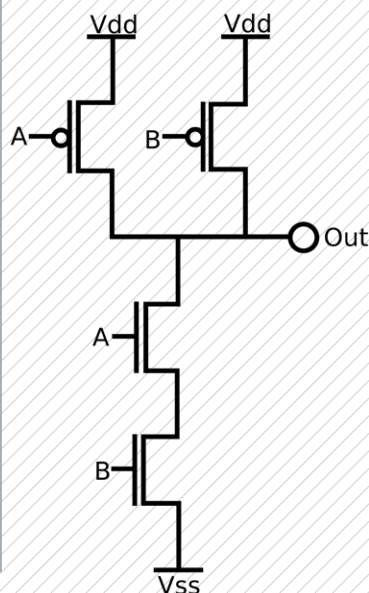
LOGICA CMOS

PORTA NOT



Le porte logiche di base sono costruite tramite la logica complementare cMos attraverso due o quattro transistor.

PORTA NAND



PORTA NOR

