



scienza attiva®

Nanoelettronica

Dott.ssa Silvia Tavazzi

Università degli Studi di Milano Bicocca
Dipartimento di Scienza dei Materiali

Introduzione

Microelettronica: primi passi

Se personaggi illustri e famosi vissuti nell'Ottocento potessero fare i turisti oggi, per qualche ora, forse la più immediata, eclatante, tangibile e intrigante novità sarebbe per loro l'uso che noi facciamo dell'elettronica. I dispositivi elettronici, di cui l'umanità non disponeva nell'Ottocento, sono gli elementi nodali della nostra quotidianità. Certamente, i dispositivi elettronici non furono presenti alla Great Exhibition, la prima esposizione universale sul tema dell'industria tenutasi a Londra e nota come EXPO 1851, ma qualcosa stava per cambiare.

In quegli anni, nel 1854, un italiano realizzò qualcosa di particolarmente importante. Si chiamava Antonio Meucci e con un rudimentale apparecchio stabilì un collegamento tra il suo laboratorio e la sua abitazione. Le sue difficoltà economiche, tuttavia, gli impedirono di salvaguardare la sua proprietà intellettuale, se non con una sorta di brevetto provvisorio, che successivamente non fu rinnovato. E qui, entrò in gioco un altro famosissimo inventore, Alexander Graham Bell, che nel 1876 brevettò un apparecchio telefonico. Sempre in quegli anni, l'altro nome famoso per i suoi esperimenti nell'invio di segnali intelligibili a distanza è Guglielmo Marconi, un altro italiano.

Per contestualizzare queste ricerche e queste invenzioni, si tenga presente che in quegli anni non erano note, ad esempio, la massa e la carica dell'elettrone (misurate dal fisico Joseph Thomson nel 1898) e che il simbolo della scienza e della tecnica alle porte del nuovo secolo stava per essere eretto a Parigi in occasione della famosissima EXPO 1889 all'entrata della zona espositiva: la Torre Eiffel.

Paradossalmente, nel periodo in cui l'elettronica era in via di definizione, il fisico tedesco Max Planck pose anche le basi della meccanica quantistica, non impedendo all'elettronica di fare il suo corso (o, per meglio dire, la sua corsa), la stessa meccanica quantistica che oggi sta entrando in gioco nel porre un freno al nostro accanimento verso l'*infinitamente* piccolo... o forse a darci un'altra possibilità.

Si ritiene che l'anno di nascita dell'elettronica fu il 1907, con l'invenzione del triodo (fig 1). Questo fu il primo componente elettronico *attivo* utilizzato per amplificare la potenza di un segnale, caratteristica che ne fece un componente chiave per la trasmissione dei segnali, poiché la possibilità di amplificarli facilitò notevolmente le comunicazioni a distanza.

Il principio di funzionamento del triodo si basa sull'effetto termoionico ovvero l'emissione di elettroni per riscaldamento di un elettrodo. Sino agli anni Sessanta, il triodo è stato impiegato in ricevitori e trasmettitori radio e televisivi e, in generale, in amplificatori di segnali elettrici, in particolare durante la seconda guerra mondiale. Anche i primi calcolatori elettronici furono costruiti impiegando valvole termoioniche. Dopo la conclusione della guerra fu realizzato ENIAC, un calcolatore costituito da quasi 20000 valvole termoioniche, che occupava un'area di circa 160 m².

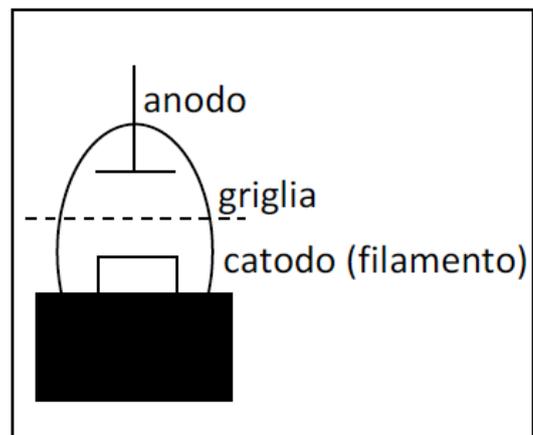


Fig. 1. Schema di un triodo



L'invenzione del dispositivo elettronico alla base del rivoluzionario sviluppo nell'uso dei computer arrivò nel dicembre 1947. Quarant'anni dopo l'invenzione del triodo, tre scienziati dei Laboratori Bell (Stati Uniti) giunsero all'invenzione del transistor. Fu la nascita della microelettronica, sancita nel 1956 dal Premio Nobel per la Fisica agli inventori John Bardeen, Walter Brattain e William Shockley.

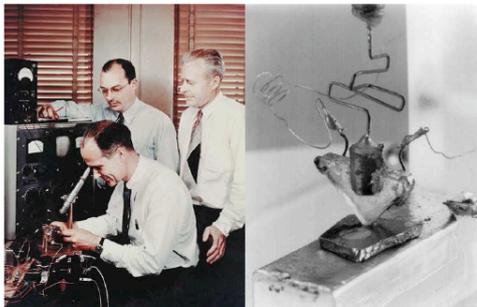


Fig. 2.
Fotografia di John Bardeen, Walter Brattain e William Shockley (a sinistra), insigniti del premio Nobel per la Fisica nel 1956 e fotografia (a destra) del loro transistor bipolare a giunzione (<http://www.radiomarconi.com/marconi/transistor.html>).

Il transistor è tipicamente usato come amplificatore di segnali elettrici o come interruttore. Il suo principio di funzionamento si basa sulle proprietà dei semiconduttori (come ad esempio il silicio), materiali che hanno una resistività intermedia tra i conduttori e gli isolanti. Se drogato con opportune impurezze (arsenico, fosforo, gallio, boro o altri), è possibile rendere il silicio più o meno conduttivo e renderlo di tipo p (nel caso di drogaggio con atomi trivalenti ovvero atomi con meno elettroni di valenza rispetto ai quattro del silicio) oppure di tipo n (nel caso di drogaggio con atomi pentavalenti ovvero atomi con più elettroni di valenza rispetto al silicio). Collegando tra loro più transistor si realizzano circuiti integrati. Esistono vari tipi di transistor, tra cui il transistor bipolare e il transistor a effetto di campo. Il transistor bipolare (BJT) è costituito da tre strati di silicio, in cui lo strato centrale (collegato a un terminale detto base) ha drogaggio opposto agli altri due strati (collegati ai terminali collettore e emettitore), in modo da formare la cosiddetta doppia *giunzione p-n*. Il principio di funzionamento si fonda sulla possibilità di controllare la corrente elettrica che attraversa il dispositivo mediante l'applicazione di una differenza di potenziale tra i suoi terminali. Il primo transistor fu di tipo bipolare e fu realizzato con due elettrodi le cui punte distanti tra loro alcuni centesimi di millimetro erano a contatto con un policristallo di germanio di tipo n . Il transistor bipolare a contatti puntiformi fu presto soppiantato dal transistor bipolare a giunzione. Il transistor a effetto di campo (FET) è una tipologia che possiede terminali detti *gate*, *source* e *drain*. Il principio di funzionamento si basa sulla possibilità di controllare la corrente che attraversa il dispositivo attraverso un campo elettrico applicato al *gate*. Tra le tipologie di FET esistono il JFET (Junction FET), il MESFET (Metal Semiconductor FET) e il MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET).

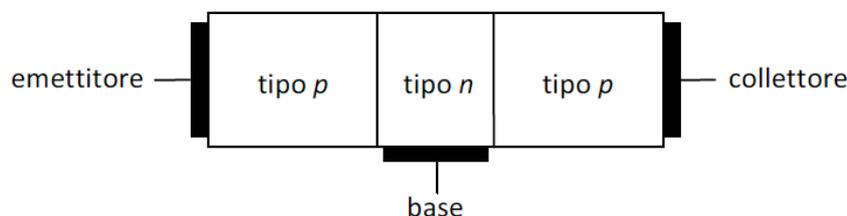


Fig. 3. Schema della struttura di un transistor a doppia giunzione $p-n$.

Microelettronica: la corsa

Nel 1965, Gordon Moore (che era a capo del settore R&D - Research & Development della Fairchild Semiconductor e tre anni dopo fondò la Intel) scrisse un famosissimo articolo, illustrando l'evoluzione nel tempo del numero di componenti elettronici integrati in un chip. L'osservazione empirica lo indusse a formulare la cosiddetta prima legge di Moore secondo cui il numero di transistor sarebbe raddoppiato ogni ventiquattro mesi. Alla fine degli anni Ottanta la legge fu riformulata con una modifica dell'intervallo di tempo da ventiquattro a diciotto mesi. Effettivamente, ancora alla fine degli anni Novanta la corsa al cosiddetto *scaling* manteneva le caratteristiche previste: passando dal processore Intel-Pentium II del 1997 (contenente circa otto milioni di transistor) al Pentium 4 della fine del 2000 (quaranta milioni di



transistors], il numero si è quintuplicato in meno di quattro anni, in accordo con le previsioni facendo le dovute proporzioni. Dai primi anni Settanta a oggi, il numero di transistor in un processore è passato dall'ordine di grandezza del migliaio al miliardo. All'inizio degli anni Settanta una memoria RAM statica aveva 256 bit. Oggi le memorie RAM statiche raggiungono 64 Mbit. Se negli anni Settanta i processi litografici alla base della realizzazione di questi dispositivi permettevano di stampare linee con dimensioni dell'ordine del micrometro, oggi si raggiungono le decine di nanometri, al punto che le memorie flash di 8 Gbit hanno oggi qualche centinaio di milioni di celle con un tempo di accesso dell'ordine delle decine di nanosecondi, integrando più di un miliardo e mezzo di transistor.

Microelettronica: il traguardo

Fino ad un certo punto, la corsa allo *scaling* è stata più industriale che scientifica. La ricerca industriale ha permesso di raggiungere dimensioni dei dispositivi elettronici dell'ordine del nanometro, ma la maggior parte degli esperti tipicamente non associa a queste strutture il termine *nanoelettronica*, perché i principi fisici su cui queste tecnologie si basano sono gli stessi, tirati all'estremo, su cui si sono basati i dispositivi microelettronici degli ultimi quarant'anni. Ora, la corsa allo *scaling* deve affrontare una problematica intrinseca, peraltro prevista, al punto che la validità della legge empirica di Moore è in discussione. Il principale problema è il raggiungimento, sulla scala dei nanometri, di limiti fisici intrinseci a causa della generazione di effetti di tipo quantistico. Poiché a tali limiti si è molto vicini, le prestazioni dei dispositivi sono state temporaneamente implementate con qualche rimedio positivo, ma provvisorio e non rivoluzionario. Ad esempio, ci si è posti il problema di come ridurre ulteriormente lo spessore dello strato di biossido di silicio in certi tipi di transistor, dal momento che scendere sotto il nanometro vorrebbe dire pagare le conseguenze dell'effetto quantistico di tunnel.* Una risposta al problema è stata la recente sostituzione dell'ossido di silicio con un isolante contenente aflatto sviluppando circuiti integrati di poche decine di nanometri. Un'altra strada percorsa recentemente per aumentare le prestazioni dei calcolatori è stata l'introduzione di una strategia alternativa, la tecnologia multicore basata sull'accoppiamento di più processori in sinergia. Si prevede che nei prossimi anni il processo di *scaling* abbia ancora un margine di miglioramento, ma i limiti intrinseci dettati dalla fisica hanno già iniziato ad affiorare, da un lato mostrando il fascino dei fenomeni quantistici che regnano alla scala del nanometro, dall'altro ponendo un freno alla nostra corsa verso l'*infinitamente* piccolo.

Nanoelettronica: la nuova intrigante sfida

Per i motivi discussi, il termine *nanoelettronica* è tipicamente riservato a qualcosa di nuovo, che si ritiene possa rappresentare la prossima età dell'elettronica, basata su materiali nuovi. Da un lato, in molti laboratori di ricerca si sta lavorando per ottenere sistemi nuovi, ma adattabili alle tecnologie e ai metodi di realizzazione già consolidati nell'industria per i dispositivi tradizionali, allo scopo di passare dalla microelettronica alla nanoelettronica in modo graduale. Dall'altro lato, altri ricercatori stanno lavorando per realizzare transistor innovativi a base organica e sistemi di interconnessione per collegare i nanotransistor e realizzare circuiti integrati. In questo paragrafo sono illustrate alcune strutture a base organica oppure inorganica, di cui potremmo potenzialmente sentir parlare molto nei prossimi anni. Si tratta di sistemi o dispositivi che hanno già un loro curriculum non trascurabile e che potrebbero diventare i protagonisti delle nanotecnologie. Tuttavia, l'effettivo sfruttamento dipende da più fattori. Da un lato, il settore della microelettronica industriale ha raggiunto livelli di sofisticazione e costi tali da non permettere, per questioni economiche, campi di rotta troppo decisi verso tecnologie troppo diverse da quelle esistenti. Dall'altro, alcune strutture nano elettroniche necessitano di ulteriori migliorie, per cui il loro sviluppo dipenderà anche dagli sforzi nella ricerca dei prossimi anni.

Elettronica molecolare

L'elettronica molecolare è quel ramo della nanoelettronica esteso alla fisica, alla chimica e alla scienza dei materiali, che si occupa dello studio e dell'applicazione dei sistemi molecolari per la fabbricazione di componenti elettronici. Le molecole organiche (polimeri a catena lunga o oligomeri a catena corta) sono

* L'effetto *tunnel* è un effetto quantistico che rende statisticamente possibile una transizione tra due stati proibita secondo la teoria classica.



tipicamente composte da carbonio e idrogeno e, talvolta, contengono anche atomi di azoto, cloro e zolfo. L'interesse verso questa disciplina per applicazioni elettroniche ha iniziato a manifestarsi più di cinquant'anni fa. Inizialmente, tutti i sistemi molecolari studiati erano parsi isolanti o, al più, semiconduttori. I primi composti organici che si rivelarono altamente conduttivi furono i cosiddetti complessi a trasferimento di carica, come ad esempio i sali di tetratriafulvalene, che hanno conduttività quasi metallica. Polimeri come il poliacetilene, il polipirrolo e la polianilina sono noti oggi per essere tra i principali polimeri conduttori. Un importante riconoscimento che ha sancito la rilevanza di questo settore è stato il premio Nobel per la Chimica nell'anno 2000 a A.J. Heeger, A.G. McDiarmid e H. Shirakawa per la scoperta e lo sviluppo dei polimeri conduttori.

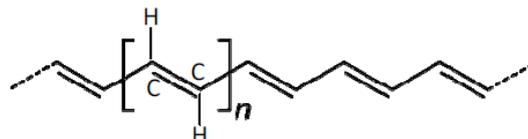


Fig. 4. Struttura chimica del polimero conduttore poliacetilene ($[C_2H_2]_n$)

La ricerca ha condotto alla realizzazione dei primi dispositivi emettitori di luce a base organica (OLED – organic light emitting device) introdotti dalla Kodak nel 1987. Attualmente, il settore organico si è ampliato notevolmente sia scientificamente sia commercialmente, arrivando anche nei settori dei transistor, delle celle solari, dei laser e non solo. Alcuni tra i vantaggi dell'elettronica molecolare sono la versatilità della chimica organica (si conta che circa il 90% dei materiali noti sia di natura organica), i minori costi di produzione e la prospettiva di riuscire a ridurre le dimensioni dei dispositivi tramite il controllo delle proprietà a livello molecolare. L'elettronica molecolare può essere divisa in due sotto discipline: (i) i materiali molecolari per l'elettronica (costituiti da polimeri o oligomeri), che utilizzano le proprietà delle molecole per incidere sulle proprietà del materiale e (ii) l'elettronica su scala molecolare, che si focalizza sulle applicazioni della singola molecola.

I dispositivi elettronici organici attivi su macro-scala sono stati descritti decenni prima di quelli su scala molecolare. Ad esempio, nel 1974 è stata riportata una delle prime dimostrazioni sperimentali di un

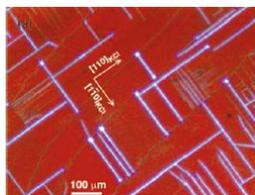


Fig. 5. Cristalli aghiformi di esafenilene su un substrato di cloruro di potassio (Adv. Mater. 13, 1453, 2001).

interruttore che controllava la tensione elettrica costituito da un polimero organico. Lo stato *on* di questo interruttore mostrava una conduttività quasi metallica. Nonostante i progressi, attualmente è ancora scarsa la velocità di commutazione dei transistor molecolari e non appare banale superare le difficoltà della produzione industriale su larga scala. Una strategia per ovviare a quest'ultimo aspetto potrebbe essere adottare la tecnica dell'auto-assemblaggio molecolare. Il metodo consente di realizzare componenti, che in condizioni adeguatamente controllate si assemblano spontaneamente per mezzo della creazione di legami chimici tra i singoli costituenti. Al contrario dei transistor, ben più diffuso è l'impiego di materiali organici in dispositivi emettitori di luce (display, OLED – organic light emitting device, FOLED – flexible organic light emitting device, e altri), con applicazioni commerciali importanti e in espansione.

Riferendosi a questi sistemi, si parla spesso di elettronica e optoelettronica della plastica. Altre applicazioni emergenti sono celle solari flessibili, vernici luminose a base di OLED, televisori a cristalli fotonici.



Fig. 6. Display flessibili
(<http://xoomer.virgilio.it/emiscot/paa/ricerca/tecnologia/flessibili/dispfless.htm>).

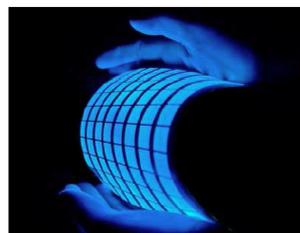


Fig. 7. FOLED – flexible organic light emitting device
(<http://www.nanopress.it/tecnologia/oled/foto/>).



Fig. 8. Pannelli fotovoltaici flessibili
(<http://www.konarka.com/index.php/power-plastic/about-power-plastic/>).

Per quanto riguarda l'elettronica su scala molecolare, una pietra miliare è stata la realizzazione di strutture nanometriche attraverso la manipolazione degli atomi con precisione atomica ottenuta dal fisico D.M. Eigler all'IBM nel 1989. Ormai famosa è la sua scrittura dell'acronimo *IBM* costituito da trentacinque atomi di xenon. La scrittura è stata possibile a bassa temperatura e in ultra-alto vuoto impiegando un microscopio a scansione a effetto tunnel (STM). Lo sviluppo del microscopio STM e, in seguito, del microscopio a forza atomica (AFM) hanno facilitato lo sviluppo dell'elettronica a singola molecola. La prima misura della conduttanza di una singola molecola è stata riportata nel 1995 ed è stata realizzata con l'uso di un microscopio STM. Nonostante i progressi, il funzionamento dei dispositivi su scala molecolare è spesso difficile da ottenere e da comprendere.

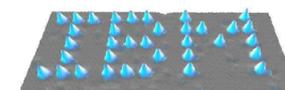


Fig. 9. Acronimo *IBM*, come scritto da D.M. Eigler nel 1989 con trentacinque atomi di xenon attraverso l'uso di un microscopio STM.

Fullerene, nanotubi e grafene

Tra le forme allotropiche del carbonio, accanto a grafite e diamante, c'è anche una scoperta del 1985: il fullerene. H. Kroto, R. Curl e R. Smalley hanno ricevuto il premio Nobel per la Chimica nel 1996 per il loro ruolo nella scoperta di questa struttura organica cava a forma di poliedro con facce costituite da esagoni e pentagoni di atomi di carbonio (tipicamente sessanta o settanta). Il suo nome fullerene deriva dal nome dell'architetto Richard Buckminster Fuller, noto per le sue cupole geodetiche, a cui questa molecola assomiglia (per cui, a volte, è anche denominata *buckyball*). A partire dai primi anni Duemila, le proprietà chimiche e fisiche dei fullereni sono state importanti oggetti di studio. Un metodo comunemente impiegato per produrre i fullereni si realizza nella trasmissione di una forte corrente fra due elettrodi di grafite in condizioni di atmosfera inerte. L'arco risultante del plasma del carbonio fra gli elettrodi si raffredda dando un residuo fulliginoso, da cui possono essere isolati i

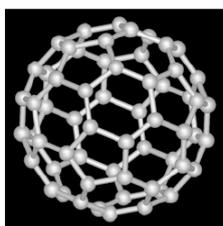


Fig. 10. Struttura della molecola di fullerene.



fullereni.

Analogamente al fullerene, i nanotubi possono essere visti come una delle forme allotropiche del carbonio. Si tratta di strutture organiche a forma di cilindro cavo costituite da atomi di carbonio (a volte anche denominati fullereni cilindrici o buckytubes). Il diametro interno è dell'ordine di grandezza del nanometro. L'elevato rapporto tra lunghezza e diametro consente di considerarli come delle nanostrutture virtualmente monodimensionali. I vari tipi di nanotubi possono essere suddividere in due tipologie:

- nanotubi a parete singola o SWCNT (Single-Walled Carbon NanoTube) costituiti da un singolo foglio di atomi di carbonio avvolto su se stesso;
- nanotubi a parete multipla o MWCNT (Multi-Walled Carbon NanoTube) formati da più fogli avvolti coassialmente.

Il nanotubo è un materiale molto resistente alla trazione meccanica. È stato calcolato che un nanotubo ideale avrebbe una resistenza alla trazione decine di volte più grande di quella di una barretta d'acciaio dello stesso peso. Inoltre, i nanotubi non sono solamente resistenti alla rottura per trazione, ma sono anche molto flessibili. L'estrema resistenza, unita alla loro flessibilità, li rende ideali per l'uso come fibre di rinforzo nei materiali compositi ad alte prestazioni, in sostituzione, ad esempio, delle normali fibre di carbonio o di altre fibre. Il nanotubo possiede, inoltre, delle interessanti proprietà elettriche. A seconda delle sue proprietà morfologiche (ad esempio il diametro) può essere un conduttore di corrente, come un metallo, o un semiconduttore, come il silicio, aprendo così le porte alla ricerca di nuovi dispositivi nel campo dell'elettronica, realizzando chip sempre più piccoli di dimensione e veloci in prestazioni. I possibili utilizzi riguardano transistor, LED, laser, attuatori, eccetera. Tuttavia, occorre sviluppare una tecnica di produzione di nanotubi di forme e dimensioni diverse e strettamente controllabili. Inoltre, la produzione su larga scala e la capacità di realizzare contatti, giunzioni e circuiti sono ancora difficoltosi. Recenti programmi di ricerca in varie università sono finalizzati alla realizzazione di nanotubi auto-assemblanti, alla realizzazione di interfacce neuro-informatiche, allo sviluppo di batterie innovative basate sui nanotubi, all'inserimento di molecole organiche foto attive all'interno di nanotubi di carbonio. Accanto a grafite, diamante, fullerene e nanotubi, c'è anche una scoperta ancora più recente (2004): il grafene. Le scoperte sul grafene e le sue applicazioni sono valse il premio Nobel per la Fisica nel 2010 a A. Geim e K. Novoselov. Il grafene è costituito da uno strato monoatomico di atomi di carbonio disposti in un reticolo esagonale, in modo simile alla disposizione nei nanotubi, ma su una superficie piatta e praticamente bidimensionale. In presenza di imperfezioni (pentagoni o ettagoni invece di esagoni), la struttura si deforma fino ad assumere una forma conica in presenza di una cella pentagonale isolata o una forma a sella a causa della presenza di una cella isolata ettagonale. L'inserimento controllato di tali celle pentagonali o ettagonali permette, quindi, la realizzazione di strutture complesse. Il grafene mostra delle caratteristiche come conduttore superiori a quelle del rame, aprendo la strada ad una sua potenziale sostituzione nei dispositivi. Questo permetterebbe di superare un limite della tecnologia corrente poiché ridurre ulteriormente le dimensioni delle interconnessioni di rame tra i transistor di un odierno circuito integrato vorrebbe dire peggiorarne le prestazioni, soprattutto per via della potenza dissipata attraverso di esse. Molto recentemente, sono stati realizzati transistor con una frequenza di più di 150 GHz che impiegano grafene.

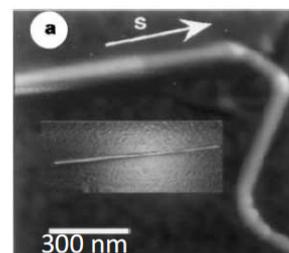


Fig. 11. Immagine al microscopio AFM di un nanotubo di carbonio (Nature 389, 582, 1997).

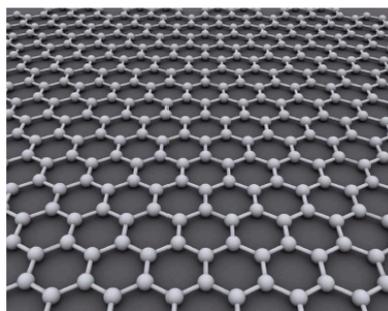


Fig. 12. Struttura bidimensionale del grafene.



SPINTRONICA

Il nostro attuale computer memorizza e tratta i dati (lettere, numeri e altro) associando a ogni dato una sequenza di bit ovvero di 0 e 1 , corrispondenti allo stato di un dispositivo elettronico, che può essere “non passa corrente” (0) oppure “passa corrente” (1). Lo *spin* dell’elettrone corrisponde a un momento magnetico, che può avere due sole configurazioni possibili (diciamo *up* o *down* ovvero 0 e 1). Pertanto, lo spin si adatta alla logica binaria. In questo senso, la *spintronica* è una tecnologia di memorizzazione e elaborazione dell’informazione che costituisce un connubio tra elettronica e magnetismo. La sua nascita può essere associata alla scoperta del 1988 della magneto-resistenza gigante. La magneto-resistenza gigante si verifica in strutture di dimensioni nanometriche e consiste in un’amplificazione della magneto-resistenza, ovvero la modulazione della resistenza elettrica per effetto di campi magnetici. Nel 2007, A. Fert e P. Grünberg hanno ricevuto il premio Nobel per questa scoperta. Su questo fenomeno, si basa un dispositivo spintronico già in uso nelle memorie ad alta densità di recenti hard-disc. I bit di dati registrati sulla superficie del disco sono associati agli stati di spin degli elettroni e generano un gradiente di campo magnetico. La lettura avviene tramite la trasformazione degli 0 e 1 in una resistenza elettrica variabile di un sensore. Un campo magnetico esterno può modificare lo stato memorizzato agendo sul momento magnetico associato allo spin degli elettroni. Un altro obiettivo della spintronica è il controllo delle correnti di elettroni spin-polarizzate, all’interno delle quali tutti i portatori presentano medesimo spin. Presupposto alla realizzazione di questa nuova generazione di dispositivi è che non si verifichino fenomeni di *spin-flip scattering* negli intervalli di tempo necessari per l’elaborazione dei dati, ovvero fenomeni che potrebbero modificare casualmente lo stato di *spin* trasformando casualmente gli 1 in 0 o viceversa. Fig. 12. Struttura bidimensionale del grafene.

COMPUTER QUANTISTICO

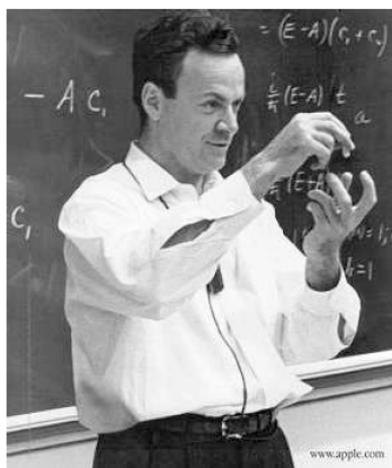


Fig. 13. Fotografia del fisico R. Feynman

Dati i limiti quantistici delle attuali tecnologie, un’altra strada per uscirne potrebbe essere *fare di necessità virtù*. Gli atomi e le molecole hanno, infatti, delle proprietà quantistiche idonee a essere utilizzate per rappresentare strutture di dati. La prima idea di computer quantistico fu proposta da R. Feynman nel 1982. Nel 1998 il fisico B. Kane propose la costruzione di un elaboratore quantistico con atomi di fosforo. Nel 2007 è stato costruito il primo computer quantistico denominato *Orion* da sedici qbit (pochi, ma sufficienti per dimostrare la fattibilità di realizzazione di questi nuovi sistemi). Nel maggio 2011 è stato annunciato un computer quantistico di 128 qbit. Un computer quantistico funziona in modo completamente diverso rispetto ai nostri attuali computer, per cui 0 e 1 significano rispettivamente “non passa corrente” e “passa corrente” all’interno di un dispositivo, senza alcuna altra possibilità oltre a 0 e 1 . Al contrario, un computer quantistico memorizza i dati in qbit. Il qbit innanzitutto è riferito a una proprietà quantistica di una particella elementare (ad esempio la polarizzazione del fotone o lo spin dell’elettrone) e, inoltre, non può assumere alternativamente solo i valori 0 e 1 , bensì può trovarsi in sovrapposizioni statistiche di due diversi stati

(definiamoli ancora 0 e 1), ciascuno *pesato* con una probabilità. Se, ad esempio, lo spin dell’elettrone può assumere due possibili valori, esso in realtà si trova in uno stato descritto dalla sovrapposizione dei due. La sovrapposizione contiene entrambi i casi, ma non equivale né a 0 né a 1 . Si è soliti indicare questa sovrapposizione con la notazione matematica $[a|0\rangle + b|1\rangle]$, che significa che un’eventuale misura della grandezza in gioco darebbe 0 con probabilità a e darebbe 1 con probabilità b . Questo principio (principio di sovrapposizione), che sta alla base della memorizzazione dei dati, costituisce il primo pilastro alla base del computer quantistico e il primo motivo per affermare che il mondo quantistico è un mondo di possibilità, non di certezze. Dato un qbit, un computer deve saper svolgere delle operazioni. Un impulso di luce di durata opportuna o un campo magnetico, ad esempio, possono provocare delle modifiche (operazioni) del sistema quantistico, che riguardano simultaneamente tutti gli stati in sovrapposizione, in una sorta di funzionamento in parallelo, da cui deriva l’espressione *parallelismo quantistico*. Questo lavoro in parallelo ha delle potenzialità in termini di ottimizzazione dei tempi di calcolo. Apparentemente, potrebbe sembrare che ne consegua una perdita di corrispondenza tra lo stato di partenza (sovrapposto ad altri stati) e il risultato del calcolo (anch’esso sovrapposto ad altri stati), ma ciò non accade perché entra in gioco l’*entanglement*, altro portento del mondo quantistico. Due qbit sono detti *entangled* se, essendo



entrambi sovrapposizione statistica di 0 e 1 , il risultato della misurazione di uno di essi è sempre correlato al risultato della misura dell'altro qbit. L'*entanglement* permette di associare un dato iniziale a uno specifico risultato. Questo fenomeno è privo di analogo classico ed è un fenomeno del tutto anti-intuitivo per chi è abituato alla scala macroscopica, ma è tipico nel mondo microscopico di elettroni, protoni, fotoni e altre particelle elementari. Una stranezza che ne deriva è la correlazione tra quantità fisiche osservabili, anche se i corrispondenti sistemi sono separati spazialmente.

Famoso, nell'ambito della meccanica quantistica è il paradosso di Einstein-Podolsky-Rosen dovuto all'*entanglement*. Si consideri un sistema quantistico costituito da due particelle *entangled* con spin opposto. Separando le due particelle l'una dall'altra, la misura di una componente di spin di una delle due particelle forza anche la particella lontana in uno stato specifico determinato. Questo fenomeno è stato definito paradossale perché potrebbe sembrare un'azione istantanea a distanza. Tuttavia, il risultato della prima misura è casuale, per cui non è possibile, attraverso l'*entanglement*, trasmettere informazione fra i due sistemi ai due estremi. Completa il quadro il principio di complementarità, secondo cui la lettura di un dato distrugge di conseguenza tutti gli altri stati sovrapposti.

CONCLUSIONI

Dopo una breve panoramica storica dai primi passi dell'elettronica, alla nascita della microelettronica, alla corsa allo *scaling* e ai segnali di un vicino traguardo, questo *focus* si è concentrato su alcuni aspetti della nanoelettronica, in certi casi sfociati in tecnologie già sfruttate commercialmente, in altri casi alla base di tecnologie emergenti. La nanoelettronica dei materiali molecolari ha già molte applicazioni, soprattutto nei dispositivi emettitori di luce. Per altri dispositivi, come il transistor, i principali limiti dei materiali organici sono le loro prestazioni ancora inferiori ai materiali tradizionali e, soprattutto, le difficoltà d'integrazione con i sofisticati processi di produzione già in uso a livello industriale. A questo proposito, alcuni ricercatori prospettano la possibilità che il carbonio possa sostituire il silicio come elemento di base per la nanoelettronica, grazie ad alcune recenti scoperte come i nanotubi e il grafene, che sembrano integrabili con la tecnologia degli attuali circuiti integrati.

In queste pagine, sono riportati solo alcuni esempi delle nuove frontiere della nanoelettronica. Ad esempio, non sono discussi sistemi cross-bar in silicio integrati con molecole organiche, che potrebbero avere applicazioni come memorie ad alta densità, sistemi molecolari definiti rotaxani, che possono assumere configurazioni morfologiche diverse a seconda della differenza di potenziale applicata oppure strutture quantiche inorganiche confinate, già in uso per la realizzazione di dispositivi optoelettronici. È stato invece fatto cenno ai dispositivi spintronici, basati sia sulla mobilità delle cariche elettriche sia sull'interazione tra un campo magnetico esterno e i portatori di carica, che hanno un momento magnetico di spin. La scala nanometrica e i principi che ne stanno alla base collocano appieno queste nanotecnologie nell'affascinante e intrigante regno della fisica quantistica. Questi dispositivi, tuttavia, non sono computer quantistici, che al contrario sono sistemi del tutto diversi e rivoluzionari, basati fondamentalmente sul principio quantistico della sovrapposizione e sul fenomeno dell'*entanglement*.

Bibliografia e letture consigliate:

- _ Gianfranco Pacchioni, *Quanto è piccolo il mondo*, Ed. Zanichelli, 2007.
- _ Dario Narducci, *Cosa sono le nanotecnologie*, Ed. Sironi, 2008.
- _ Federico Faggin, *Dalla microelettronica alla nanoelettronica*, Mondo Digitale 1, 2009.