

NANOTECNOLOGIE E ICT: POTENZIALITÀ E PROSPETTIVE

Il rapido sviluppo delle nanotecnologie apre vie alternative alla miniaturizzazione dei circuiti integrati schiudendo nuovi orizzonti al settore ICT. Queste prospettive sono inquadrare in questo articolo evidenziando concetti, metodiche e strumenti peculiari delle nanotecnologie, mettendo in luce i materiali più promettenti e innovativi. Si riportano, inoltre, alcuni esempi di nanodispositivi e nanostrutture particolarmente idonee alla realizzazione di nuovi paradigmi computazionali.

1. COSA SONO LE NANOTECNOLOGIE?

Il termine “nanotecnologie” sta acquistando sempre maggiore popolarità: esso è, infatti, impiegato per descrivere una varietà di campi di ricerca e sviluppo, spesso di carattere interdisciplinare, entro i quali ci si confronta con strutture aventi dimensioni caratteristiche inferiori a 100 nm. Si potrebbe dire che riguarda lo studio e la manipolazione di “oggetti piccoli”, da 0.1 a 100 nm. La scala spaziale caratteristica delle nanotecnologie è allora il *nanometro* (un milionesimo di millimetro, tre ordini di grandezza inferiore rispetto al *micron* che è l’unità di riferimento tradizionale per la microelettronica). Per dare un’idea si consideri che è confrontabile con la larghezza del DNA (circa 2.5 nm) ed è la lunghezza di una catena lineare costituita da 6 atomi di carbonio.

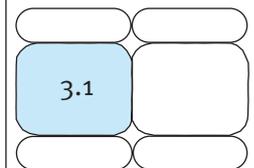
Il “nanomondo” è allora popolato da oggetti come atomi, molecole, “macchine molecolari” come il *ribosoma* (un organo cellulare che produce proteine nel corpo umano) che possono opportunamente essere assemblati in

“nanostrutture”: gli obiettivi principali delle nanotecnologie sono appunto realizzare, studiare e sfruttare le nanostrutture.

L’intuizione che si potesse giungere a manipolare e posizionare addirittura singoli atomi e molecole a questa “nanoscala” risale storicamente al fisico teorico Richard Feynman, quando, nel 1959, espose una famosa relazione dal titolo “There’s Plenty of Room at the Bottom” [7] (ovvero “C’è abbondanza di spazio là sotto”) al congresso annuale della American Physical Society. In quella occasione affermò che “i principi della fisica non sono contro la possibilità di manipolare le cose un atomo alla volta...è un qualcosa che può essere fatto”, e per illustrarne l’impatto proponeva di scrivere l’intero contenuto dei 24 volumi dell’Enciclopedia Britannica sulla punta di uno spillo! Tuttavia è solo negli anni ’80 che si registra il vero impulso alle nanotecnologie con l’invenzione del primo microscopio a effetto *tunnel* (STM, *Scanning Tunneling Microscope*) da parte di Binnig e Rohrer mediante il quale si riesce a “osservare” la materia fino ai singoli atomi [4]. Nel 1990,



Ermanno Di Zitti
Davide Ricci
Daniele D. Caviglia



si attualizza quanto prefigurato da Feynman quando alcuni ricercatori dell'IBM riescono a "scrivere" il logo aziendale impiegando un STM modificato per trascinare dei singoli atomi di xenon su una superficie di nichel [6].

È stato peraltro sottolineato [3] come lo sviluppo delle nanotecnologie abbia tratto la sua forza dall'evoluzione delle tecnologie microelettroniche a carattere *top-down*, caratterizzata dalla legge di Moore, che ha portato a una miniaturizzazione sempre più spinta dei circuiti integrati. Esse sono giunte ormai alla soglia delle nanotecnologie: infatti, il continuo miglioramento delle tecniche fotolitografiche ha consentito di realizzare dispositivi con dimensioni minime anche inferiori a 100 nm, tanto che spesso sono state congregate sotto il nome di *nanoelettronica*.

Il prezzo da pagare è però altissimo, proprio in termini di costo di realizzazione degli impianti di fabbricazione, cresciuto esponenzialmente, fino a raggiungere i miliardi di Euro.

Lo scenario delle nanotecnologie è, invece, molto più ampio: esso abbraccia le tecnologie a stato solido, le biotecnologie e le tecnologie fisico-chimiche, e vi si intravede la potenzialità di rivoluzionare sia le modalità con cui sono realizzati i materiali e i prodotti derivanti sia le funzionalità che si possono ottenere. Le tematiche d'interesse comprendono allora:

- tecniche di fabbricazione e lavorazione su scala inferiore a 100 nm;
- aspetti delle tecnologie di fabbricazione dei dispositivi elettronici, compresi laser a pozzo quantico e circuiti integrati su silicio e arseniuro di gallio, nei quali le dimensioni minime siano inferiori a 100 nm;
- microscopia a sonda di scansione e relative applicazioni, sia a scopo di caratterizzare i materiali sia per la loro nanomanipolazione;
- materiali innovativi per i quali, almeno in una dimensione, la struttura sia definita su una scala inferiore a 100 nm;
- strutture molecolari autoassemblanti o autoorganizzanti, comprendendo in esse anche i sistemi biologici e biomedici.

Pertanto, volendo delinearne i contorni, il termine nanotecnologie risulta in pratica così dilatato da apparire sfumato: per evitare questo rischio si intende in questo articolo portare l'attenzione del lettore su ciò che concerne la ricaduta delle nanotecnologie

nel contesto delle tecnologie per l'informazione, focalizzando il discorso sui materiali più promettenti e innovativi nonché sulle tecniche di nanofabbricazione di tipo alternativo rispetto a quelle impiegate nella microelettronica avanzata. In questa ottica, sono inquadrate nanostrutture e nanodispositivi con una prospettiva rivolta a future applicazioni di tipo computazionale.

2. I CONCETTI E LE METODICHE

2.1. Miniaturizzare o partire dal piccolo?

Cercare di fabbricare e interagire con strutture sempre più piccole migliorando la risoluzione e le prestazioni degli apparati macroscopici per la manipolazione dei materiali è un primo approccio che storicamente è stato condotto dall'industria microelettronica per la realizzazione di circuiti integrati a sempre più elevata complessità. La parola chiave in questo contesto è stata, infatti, "scalabilità", definendo così una metodologia prettamente di tipo *top-down*, per ottenere la quale si è lavorato soprattutto sulla progressiva riduzione della lunghezza d'onda della luce incidente nella tecnica fotolitografica, nonché sul miglioramento dei relativi materiali e dell'intero processo tecnologico. Si tratta di un tipico approccio ingegneristico che tende a produrre strutture molto definite, stabili, regolari e tipicamente planari, e che, allo stato attuale, facendo uso di radiazioni ad alta energia (raggi X, ioni o elettroni), può consentire di realizzare nanostrutture a stato solido. In questo contesto, gli strumenti delle nanotecnologie basati sui microscopi a sonda di scansione hanno consentito di sviluppare tecniche nanolitografiche a carattere complementare in grado di supportare questa metodica. Dal punto di vista concettuale, infatti, la maggior parte di queste tecniche sono basate sulla rimozione spazialmente selettiva di un polimero o mediante una deposizione/formazione locale di molecole nelle zone desiderate. Un esempio significativo è la cosiddetta *dip pen nanolithography* [15], nella quale si sfrutta la punta di un microscopio a forza atomica (AFM, *Atomic Force Microscope*), che viene ricoperta da molecole come i *tioli*, in grado di reagire chimicamente con

una superficie di oro formando forti legami covalenti con essa. Controllando il movimento della punta sulla superficie si può sfruttare una goccia d'acqua come canale per far migrare le molecole dalla punta al campione, ottenendo un processo analogo alla scrittura con una penna a inchiostro. All'interno delle nanotecnologie esiste, però, una metodologia alternativa che sta sempre più emergendo negli ultimi anni e che di fatto

è quella più caratterizzante: costruire dal basso verso l'alto (*bottom-up*). Rappresenta il tentativo di costruire entità complesse sfruttando le capacità di **autoassemblamento** o di **autoorganizzazione** dei sistemi molecolari. È pertanto un approccio di tipo chimico o biologico, potenzialmente in grado, a differenza delle tecniche fotolitografiche, di creare strutture tridimensionali complesse a basso costo e in grande quantità.

Autoassemblamento: verso un "kit" di costruzione dal piccolo

Per poter seriamente prendere in considerazione da un punto di vista commerciale la possibilità di realizzare calcolatori operanti su scala atomica o molecolare, si rende necessario mettere a punto metodi di fabbricazione a basso costo di componenti su scala nanometrica con tolleranze a livello atomico.

Le tecniche più promettenti per raggiungere questo obiettivo si basano su proprietà a livello atomico e molecolare spesso definite "auto-organizzazione" o "autoassemblamento".

In questo contesto, si può intendere autoassemblamento come la costruzione automatica di sistemi ordinati o di strutture complesse a partire da blocchi elementari attraverso un processo guidato dalle caratteristiche fisico-chimiche dei blocchi e dalla minimizzazione dell'energia complessiva del sistema, processo che termina con il raggiungimento dell'equilibrio termodinamico.

È possibile distinguere essenzialmente tre diversi tipi di autoassemblamento, ciascuno legato al tipo di costituenti elementari, vale a dire atomi, molecole e aggregati (*cluster*): autoassemblamento chimico, fisico e colloidale.

L'auto-assemblamento chimico interviene nell'ordinamento su scala molecolare di composti aventi architetture atomiche esattamente predefinite per la realizzazione di strutture funzionali con un livello dimensionale superiore.

Una caratteristica attraente di tale tecnica consiste nel fatto che, controllando la sintesi chimica delle unità elementari, si possono sintonizzare la struttura e le proprietà del sistema ordinato risultante. Le strutture autoassemblate chimicamente annoverano i seguenti vantaggi:

- ✓ sono facili da preparare e veloci da fabbricare a partire da soluzioni di molecole assemblanti (processo altamente parallelo);
- ✓ sono ordinate a livello molecolare e "robuste" in diverse condizioni di utilizzo;
- ✓ sono termodinamicamente stabili, si formano spontaneamente e tendono, quindi, a rigettare difetti;

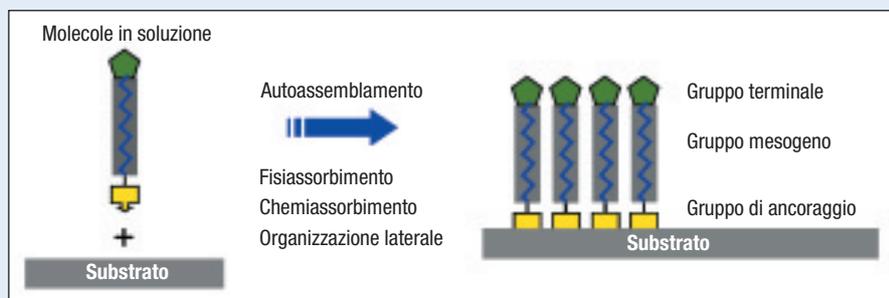
Un esempio di autoassemblamento chimico è illustrato nella figura.

L'autoassemblamento fisico viene spesso riferito al comportamento auto-organizzante a livello nanometrico di materiali inorganici durante processi di deposizione (come l'epitassia da fascio molecolare, MBE, *Molecular Beam Epitaxy* o la deposizione in fase vapore, CVD, *Chemical Vapour Deposition*) o trattamenti successivi all'accrescimento. In netto contrasto con gli obiettivi

dei processi tradizionali, che mirano a ottenere strati il più possibile continui e uniformi, queste tecniche sfruttano il comportamento dei materiali quando vengono depositati in condizioni disomogenee, quando cioè "imperfezioni" indotte ad arte su scala atomica nel substrato (vacanze atomiche, gradini, dislocazioni, disallineamenti reticolari ecc.) guidano la localizzazione o l'aggregazione delle specie chimiche depositate successivamente, dando luogo a proprietà nuove e utili ai fini delle applicazioni nanoelettroniche. Da questo tipo di processi sono state create strutture come i *quantum dot* (a tal proposito si rimanda alla lettura del riquadro su questo argomento) e *atomic wire*.

Inoltre, è da puntualizzare come, dall'associazione (contestuale o sequenziale) dell'autoassemblamento fisico con quello chimico, è stato possibile creare strutture *mono-*, *bi-* e *tri-*dimensionali su scala nanometrica aventi proprietà innovative. Gli esempi sono numerosi, quelli più noti e significativi riguardano i nanotubi di carbonio (si veda il riquadro sull'argomento) e i "nanofili" di silicio (*silicon nanowire*), ma vale la pena citare anche nanotubi di boro, di disolfuro di molibdeno, cluster metallici da aerosol ecc..

In ultimo, si cita quello che si potrebbe definire **l'autoassemblamento colloidale**, capace di produrre nanoparticelle o aggregati (*cluster*) di diversi materiali aventi dimensioni caratteristiche comprese tra 1 e 20 nm, e che manifestano proprietà di tipo ibrido, che si collocano a cavallo tra le proprietà dei singoli atomi e le proprietà di tipo "bulk" di una struttura a stato solido. In questo ambito, si ottengono significative proprietà quantistiche e di confinamento della carica per la realizzazione di nanodispositivi. Esempi significativi sono la fabbricazione di nanoparticelle semiconduttrici, conduttrici, organo-metalliche, ferromagnetiche. Partendo poi da queste si possono ottenere, su di una scala dimensionale superiore, sistemi organizzati di nanoparticelle in matrice organica isolante che possono essere parte integrante di vere e proprie nanoarchitetture autoassemblate (si veda la sezione 5.2).



Le nanotecnologie *bottom-up* nascono dal progetto di molecole o aggregati molecolari (eventualmente sintetizzati *ad hoc*) che hanno la capacità di autoassemblarsi o autoorganizzarsi in strutture di ordine più elevato (quali strutture mesoscopiche o macromolecolari). Un tale approccio può essere molto efficace impiegando le molecole che siano maggiormente adatte ad autoassemblarsi spontaneamente sotto l'azione di uno specifico agente chimico o fisico, come la variazione di pH, la concentrazione di uno specifico soluto, o l'applicazione di un campo elettrico. I meccanismi fisici che producono l'autoassemblamento, ovvero le forze pilotanti che spingono le molecole ad autoassemblarsi in strutture organizzate, sono dovuti alla termodinamica e alle interazioni competitive di tipo molecolare che comprendono forze idrofobiche/idrofiliche, legami a ponte d'idrogeno e interazioni di van der Waals, che agiscono in modo da minimizzare gli stati energetici per diverse configurazioni molecolari. È importante tenere presente che l'obiettivo diventa, allora, quello di progettare sistemi capaci di autoassemblarsi in strutture macroscopiche di ordine più elevato che presentano le proprietà di tipo chimico e/o fisico desiderate, caratteristiche del comportamento collettivo e non di quello delle singole molecole o particelle costituenti. Attualmente, questa metodologia è chiamata, "autoassemblamento guidato" (*directed self-assembly*). Il riquadro sull'autoassemblamento

illustra le principali metodiche impiegate a tal fine.

Le due metodologie descritte, che trovano applicazione nelle nanotecnologie, non sono in contrapposizione, anzi attualmente lo sforzo maggiore è ricercare tra esse la sinergia più adeguata per l'applicazione desiderata. Un esempio è la cosiddetta litografia "softice" (*soft-lithography*) [25] in cui si usa uno "stampo" realizzato con tecnologia a fascio di elettroni per poi trasferire pattern di molecole autoassemblate sulle zone desiderate del substrato.

La figura 1 riassume quanto detto e illustra come nel corso del tempo le due metodologie convergano nelle nanotecnologie da ambiti molto diversi. Si può allora comprendere come la "visione" delle nanotecnologie sia interdisciplinare e tanto articolata. Si è così coniato il termine "nanoscienze", che costituisce il punto di incontro di discipline diverse che vanno dalla fisica quantistica alla chimica supramolecolare, dalla scienza dei materiali alla biologia molecolare, e rappresentano una realtà ormai affermata nel mondo della ricerca.

2.2. Lavorare a "nanoscala"

Nell'approccio peculiare *bottom-up* si parte dall'introduzione di tipologie di nanoblocchi elementari (i "mattoni" che costituiscono un sistema) che presentano proprietà fisiche innovative a seconda della dimensione, della morfologia e della composizione chimica.

A questo proposito, nasce l'esigenza di comprendere le proprietà fondamentali delle nuove nanostrutture in modo da poter ricavare le descrizioni funzionali di ogni "nanocella". È così possibile mettere in relazione ogni nuovo concetto di nanodispositivo/nanocella con quelli noti e resi disponibili dalla tecnologia dei circuiti integrati in modo da poterli combinare efficacemente per progettare sistemi integrati di tipo innovativo. La figura 2 illustra la strutturazione di un tale approccio, dove i concetti di progetto architettonico e assemblamento gerarchico sono situati all'estremo opposto rispetto alla metodologia di progettazione strutturata VLSI, *Very Large Scale Integration*. Per quest'ultima, infatti, l'approccio top-down si traduce in una specifica di tipo algoritmico-comporta-

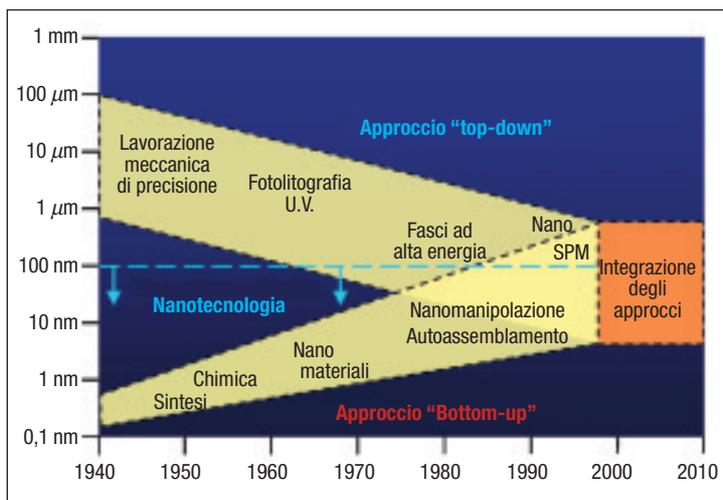


FIGURA 1

La sintesi tra metodologie top-down e bottom-up presenti nelle nanotecnologie

mentale che gerarchicamente si scompone nei livelli funzionali e strutturali (librerie di celle) che a loro volta a livello più basso si traducono nei livelli logici e circuitali fino ad arrivare alla realizzazione fisica vera e propria (*layout fisico*). È necessario allora comprendere preliminarmente le conseguenze di lavorare alla nanoscala: che cosa accade alle proprietà di un oggetto man mano che ne diminuiscono le dimensioni fino ad arrivare a quelle del nanometro?

Un parametro importante è il rapporto tra l'Area della superficie e il Volume dell'oggetto. Negli oggetti macroscopici, che hanno un piccolo rapporto Area/Volume, le proprietà chimiche e fisiche sono essenzialmente determinate dalla struttura del solido (*bulk*). Negli oggetti più piccoli, con un elevato rapporto Area/Volume, le caratteristiche della superficie diventano determinanti, influenzando fortemente le proprietà ottiche, l'adesività, la bagnabilità, l'attrito, la reattività chimica ecc.. Per comprendere numericamente su quale scala dimensionale ciò avviene, si introduce il concetto di "dispersione", ovvero il rapporto tra il numero di atomi della superficie rispetto al numero di atomi totali in una particella. Si osservi l'andamento della dispersione al variare del raggio della particella riportato in figura 3: al di sotto di un raggio pari a 1 nm, si può notare come il numero di atomi della superficie diventi confrontabile al numero di atomi totali, indicando chiaramente come la fisica e chimica delle nanotecnologie siano dominate dalle proprietà delle superfici.

È da tenere, allora, presente che uno dei maggiori ostacoli allo sviluppo delle applicazioni delle nanotecnologie risiede nelle inerenti scale di tipo spaziale e temporale secondo le quali si svolgono gli eventi chimico/fisici di nostro interesse. Esse, infatti, variano rispettivamente dal nanometro a centinaia di nanometri e dal nanosecondo al femtosecondo¹ (se si considerano le oscillazioni dei legami atomici). Essendo i blocchi molecolari manipolati su una scala così ridotta, i substrati

hanno livelli di organizzazione spaziale e/o temporale su svariati ordini di grandezza, con livelli di ordine inferiore annidati su livelli di ordine più elevato (per esempio, 6 ordini di grandezza per un dispositivo che sia strutturato su scala nanometrica ma con una struttura macroscopica sul millimetro). Pertanto, al fine di studiare ed esplorare la ricchezza e la complessità di questi sistemi, si richiedono strumenti altamente sofisticati, sia di tipo teorico che sperimentale.

2.3. Quali strumenti?

La visualizzazione, caratterizzazione e manipolazione di materiali e dispositivi a scala nanometrica richiedono sofisticate tecniche quantitative e di *imaging* con risoluzioni spaziali che vanno dal micron fino sotto il livello

FIGURA 2

La visione delle nanotecnologie: un paradigma per costruire dal basso verso l'alto

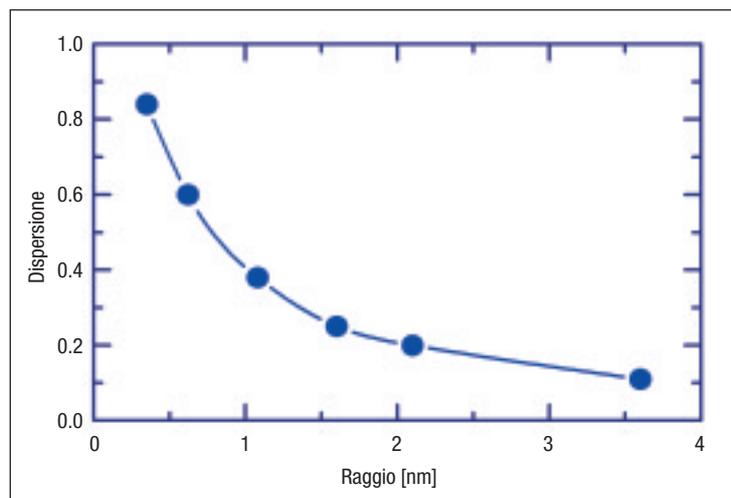
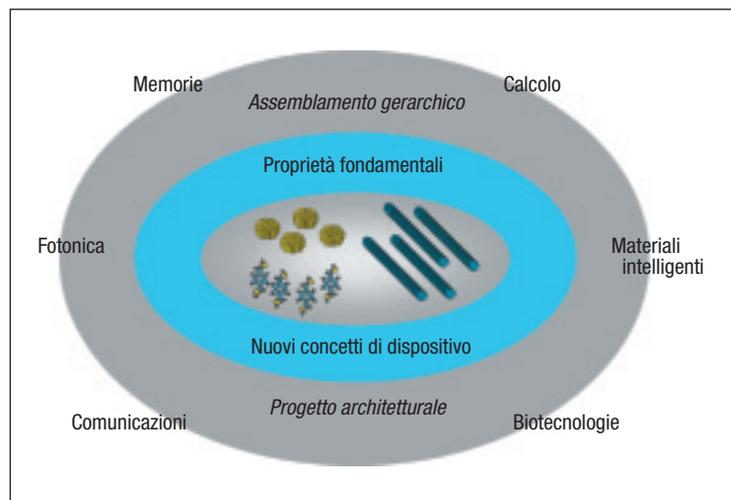


FIGURA 3

Andamento della dispersione al variare del raggio di una nanoparticella

¹ Un femtosecondo, 10^{-15} s, è 6 ordini di grandezza inferiore al nanosecondo, risultando in una unità estremamente piccola.

molecolare. Le informazioni ottenute alle diverse scale dimensionali possono così essere messe in relazione tra loro per poter comprendere le proprietà delle strutture a nanoscala e come queste possano essere convenientemente sfruttate a livello macroscopico. Esempi importanti di strumenti/tecniche al momento disponibili sono:

■ sorgenti di luce di sincrotrone altamente focalizzate (1–2 μm) per la diffrazione dei raggi X e le tecniche relative in grado di fornire dettagliate informazioni di tipo strutturale sondando direttamente il posizionamento degli atomi [10];

■ le microscopie a scansione elettronica (SEM, *Scanning Electron Microscopy*), a trasmissione (TEM, *Transmission Electron Microscopy*) e a sonda di scansione (SPM, *Scanning Probe Microscopy*), che consentono visualizzazioni topografiche bi- e tridimensionali di strutture a nanoscala;

■ tecniche di monitoraggio *in situ* che consentono di monitorare e valutare l'assemblamento e la crescita dei blocchi costitutivi elementari, quali la riflessione da diffrazione di elettroni ad alta energia (RHEED, *Reflection High-Energy Electron Diffraction*) [19]. Il principio sottostante è indirizzare un fascio di elettroni ad alta energia verso un campione a una certa angolatura, e rilevare come esso rimbalzi indietro dopo l'interazione con la struttura atomica del materiale sotto test. Dalla conformazione dei diversi pattern di elettroni riflessi che si producono su uno schermo a fosfori si possono evincere informazioni sulla struttura atomica del campione.

3. I NANOMATERIALI

Lo sviluppo delle tecnologie dell'informazione negli ultimi quarant'anni è avvenuto impiegando per i componenti attivi materiali inorganici, tra i quali il silicio ha assunto il ruolo di protagonista. Da un lato, si prevede che tale ruolo guida permanga ancora nel breve e medio termine, dall'altro esiste la concreta possibilità che il silicio possa essere progressivamente rimpiazzato da materiali di tipo organico per realizzare dispositivi particolari. La situazione che si va delineando per il lungo termine riguarda piuttosto l'impiego di silicio e materiali organici per lo sviluppo di tecnologie di tipo ibrido organico-silicio. Il fatto che rende così interessante l'utilizzo di materiali organici è la loro grande varietà e disponibilità, la possibilità di sintetizzare o funzionalizzare molecole con proprietà *ad hoc* per usi specifici e i bassi costi di produzione. Il fattore economico è, infatti, quello che appare essere la vera limitazione allo sviluppo della tecnologia dei circuiti integrati al silicio (Seconda legge di Moore [3]), per cui la sfida è sviluppare una tecnologia a basso costo basata sull'impiego di nanomateriali. Questo campo è attualmente di competenza della "nanochimica" che comprende la sintesi di nanoparticelle e di materiali nanocristallini nonché la fabbricazione di strutture policristalline a singola fase o multifase aventi dimensione caratteristica dei "grani" da 1 a 100 nm almeno in una dimensione. A seconda della dimensionalità si definiscono alcune tipologie tipiche (Tabella 1) quali:

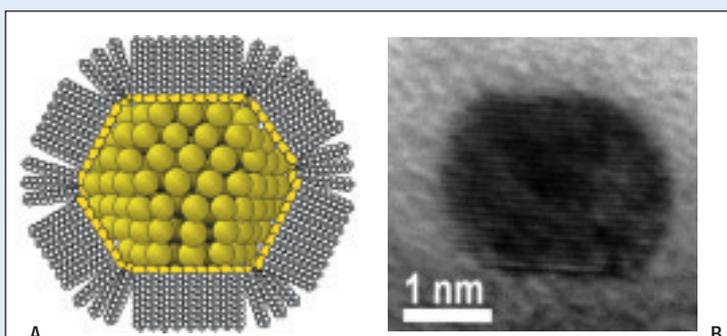
TABELLA 1
Classificazione
dei nanomateriali
al variare
della dimensionalità

Nanomateriali tipici	Dimensione	Materiali
(0-D) Nanocristalli e cluster (quantum dot)	diametro 1-10 nm	Metalli, semiconduttori, materiali magnetici
Altre nanoparticelle	diametro 1-100 nm	Ossidi ceramici
(1-D) Nanowire	diametro 1-100 nm	Metalli, semiconduttori, ossidi
Nanotubi	diametro 1-100 nm	Carbonio
(2-D) Matrici di nanoparticelle	svariati nm^2 - μm^2	Metalli, semiconduttori, materiali magnetici
Superfici e film sottili	Spessori 1-1000 nm	Materiali vari (organici e non)
(3-D) Strutture tridimensionali	diversi nm nelle 3 dimensioni	Metalli, semiconduttori, materiali magnetici

I nanocristalli

I nanocristalli sono aggregati cristallini il cui diametro arriva al massimo fino a qualche nanometro e sono costituiti da qualche decina a qualche migliaio di atomi. Possono essere sia nanocristalli semiconduttivi come quelli di silicio e germanio usati tipicamente in una matrice di SiO_2 , che nanocristalli di tipo colloidale. Questi ultimi possono essere sintetizzati a partire da materiali metallici come oro, argento o cobalto, da semiconduttori come solfuro o seleniuro di cadmio, arseniuro di gallio e da isolanti come ossido di ferro o di titanio. I nanocristalli colloidali sono dispersi in un solvente e devono essere stabilizzati in modo che non si formino agglomerati dovuti a fenomeni di *coalescenza*¹. Di particolare interesse sono i nanocristalli colloidali costituiti da nanoparticelle metalliche incapsulate da un monostrato di molecole organiche, per la loro capacità di dare origine a strutture autoorganizzate a una, due o tre dimensioni. Infatti, volendo realizzare strutture reticolari di nanocristalli, il processo può essere ottimizzato per modulare le proprietà di aggregazione e di idrofobicità in modo da ottenere la spaziatura desiderata tra i singoli nanocristalli. A titolo

di esempio si riporta nella figura a sinistra (Figura A) la rappresentazione di una nanoparticella di oro di nucleo (*core*) di diametro 2,4 nm ricoperta da un monostrato di dodecanetiolo, la cui molecola presenta una struttura con la forma di un ottaedro troncato contenente 459 atomi di oro. Nella figura a destra (Figura B) viene mostrata, invece, l'immagine corrispondente ad alta risoluzione ottenuta al microscopio a trasmissione elettronica (TEM). La qualità del processo di produzione dei nanocristalli è determinata principalmente dalla sua capacità di dare luogo a una distribuzione della loro dimensione la più stretta possibile. A tal fine, o si impiegano tecniche altamente complesse per la sintesi diretta di nanocristalli monodispersi oppure, una volta sintetizzati con metodiche più semplici, si devono approntare dei processi di selezione dei nanocristalli con svariate tecniche (*vapor transfer*, cromatografia) fino a ottenere la distribuzione desiderata.



A Schema rappresentativo di una nanoparticella di oro (diametro del nucleo 2.4 nm) ricoperta da un monostrato di dodecanetiolo (per un diametro complessivo di circa 5 nm)
B Immagine TEM ad alta risoluzione di un nanocristallo. La struttura cristallina della nanoparticella risulta evidente dalle frange di interferenza elettronica

¹ Fenomeno di aggregazione originato da fenomeni diffusivi superficiali per i quali piccoli agglomerati in fase dispersa si fondono tra loro per costituire aggregati più grandi o, al limite, una fase continua.

I **nanocristalli** (si veda il riquadro sull'argomento);

I strutture a filamento;

I strutture stratificate (monostrato o multi-strati) o lamellari;

I materiali nanostrutturati (materiali i cui elementi costitutivi quali particelle, aggregati o cavità hanno almeno una dimensione inferiore a 100 nm).

Le prime tre sono quelle più interessanti per applicazioni nell'ambito delle tecnologie dell'informazione mentre i materiali nanostrutturati possono essere utilizzati sia sotto forma di manufatti o polveri finemente divise sia come pellicole sottili (*thin film*) per rivestire superfici di materiali convenzionali.

Questi materiali, a prima vista, non differiscono dai materiali strutturati su scala convenzionale (per esempio un pezzo metallico o ceramico dove le dimensioni lineari dei "grani" costituenti possono variare tipicamente tra 0,01 e 0,1 mm), ma le loro proprietà vengono modificate manipolando le loro strutture a livello delle particelle che la compongono. Per fare alcuni esempi, le ceramiche nanostrutturate sono molto più dure e resistenti di quelle a grana grossa, metalli a nanofase hanno proprietà meccaniche migliori di quelli convenzionali, e la granulometria nanometrica presente in alcuni cosmetici rende molto più efficace l'azione di schermo nei confronti delle radiazioni solari.

Ricordando quanto si è discusso in precedenza sull'elevato rapporto tra superficie/interfaccia e volume, i nanomateriali possono essere progettati in modo da sfruttare specifici effetti legati alla dimensione (controllata) delle particelle presenti.

Si possono così evidenziare i fatti più salienti

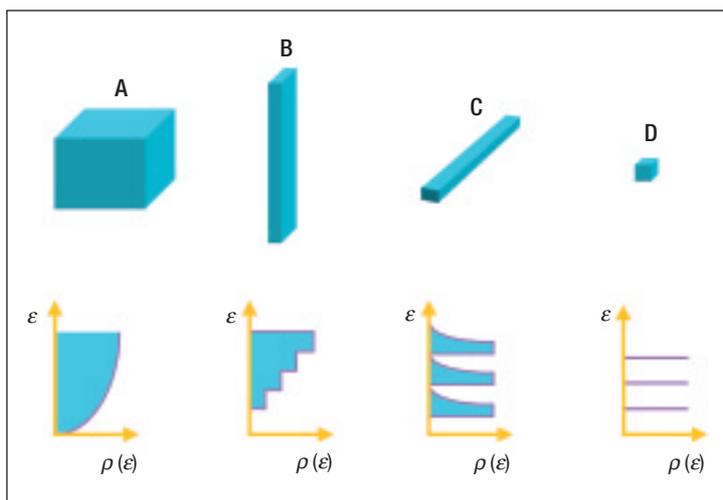


FIGURA 4

Densità di stati e confinamento quantico per diverse tipologie di nanostrutture. A Strutture 3-D tipo bulk; B pozzi quantici (2-D); C fili quantici (1-D); D punti quantici (0-D)

in relazione alle applicazioni possibili per le tecnologie dell'informazione.

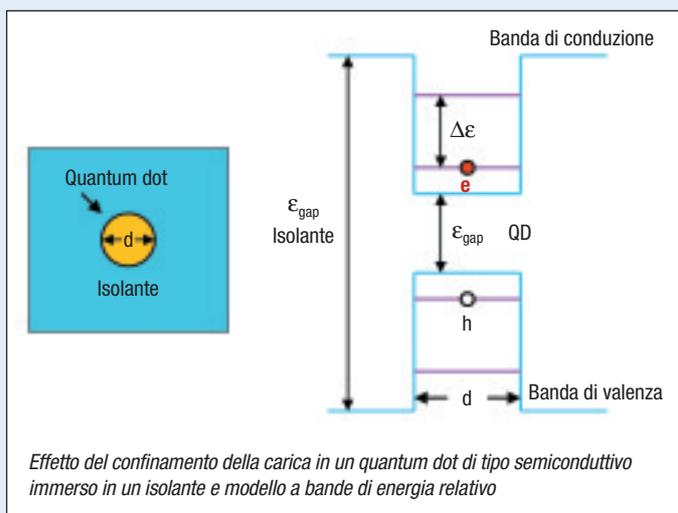
□ L'effetto di *confinamento quantico* dovuto alla diversa forma della funzione densità di stati elettronici (Figura 4) genera una discretizzazione dei livelli energetici degli elettroni nelle relative nanostrutture 2-D (pozzi quantici o *quantum well*), 1-D (fili quantici o *quantum wire*) e 0-D (punti quantici o *quantum dot*) e trova i principali sbocchi applicativi nella progettazione di eterostrutture² a semiconduttore, nell'optoelettronica e nell'ottica non lineare.

□ Le proprietà di *tunneling* (si veda il riquadro sull'**effetto tunnel**) possono essere modulate variando la lunghezza delle catene molecolari di tipo isolante disposte tra nanoparticelle/molecole conduttive; in questo modo, analogamente al caso delle eterostrutture realizzate con semiconduttori composti, si possono realizzare dispositivi e nanostrutture quantistiche.

□ A differenza dei materiali macroscopici che presentano domini magnetici multipli, tante piccole particelle ferromagnetiche formano un singolo dominio magnetico, potendo così realizzare nuovi tipi di memorie.

Quantum dot

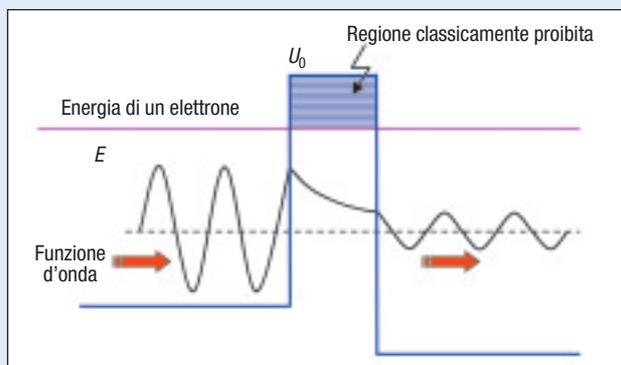
A causa della loro piccola dimensione, che è dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda di De Broglie di elettroni e lacune a temperatura ambiente, gli stati energetici dei portatori di carica nei nanocristalli sono quantizzati. Per nanocristalli sferici in cui elettroni e lacune sono confinati in tutte e tre le dimensioni il movimento dei portatori è completamente governato dalla meccanica quantistica, ed è per questo motivo che i nanocristalli sono chiamati quantum dot. Analogamente al modello della buca di potenziale, solitamente associato alle *quantum well*, si ottengono livelli elettronici discreti $\Delta\epsilon$ la cui spaziatura è funzione (inversamente proporzionale al quadrato) della dimensione d del nanocristallo. Come evidenziato nella figura, si può in questo modo modulare la variazione di energia associata alla ricombinazione di un elettrone della banda di conduzione con una lacuna della banda di valenza, potendo ottenere emissione di fotoni alla lunghezza d'onda desiderata. Un quantum dot ha anche un'altra caratteristica, chiamata *energia di caricamento*, analoga all'energia di ionizzazione di un atomo: rappresenta l'energia di repulsione elettrostatica dovuta alla carica all'interno del dot. Per tali similitudini con gli atomi reali i quantum dot sono anche detti *atomi artificiali*.



² Strutture cristalline formate dalla deposizione stratificata di regioni di semiconduttori a diverso gap come per esempio sequenze di GaAs e GaAlAs.

L'effetto tunnel

Secondo la fisica classica una particella di energia E inferiore all'altezza U_0 di una barriera di potenziale non può penetrarla in quanto la regione interna alla barriera è classicamente proibita. La natura quantistica di una particella incidente la barriera, descritta da una *funzione d'onda* (per esempio, un elettrone), fa sì che se ne osservi un decadimento esponenziale all'interno della barriera, che dà luogo a una probabilità finita di penetrazione, apprezzabile per spessori dell'ordine del nanometro. Tale fenomeno è chiamato effetto tunnel.



4. NANOELETRONICA E NANODISPOSITIVI

Le particolari proprietà fisiche e quantistiche rese disponibili dai nanomateriali hanno consentito il rapido sviluppo della nanoelettronica che attualmente riguarda lo sfruttamento delle proprietà di trasporto elettronico sia nelle nanostrutture a stato solido che in quelle di tipo molecolare o ibrido. Data la vastità e la complessità dell'argomento, che ha portato alla formulazione di una *roadmap* per la nanoelettronica [24] analoga a quella per le tecnologie dei semiconduttori, si vuole qui porre l'accento solo sui filoni principali che contengono gli archetipi dei materiali e i relativi dispositivi emergenti lasciando da parte l'evoluzione delle tecnologie MOS (*Metallo-Ossido-Semiconduttore*), con le quali è prodotta una grandissima parte dei circuiti integrati oggi sul mercato (e delle relative nanotecnologie che fanno riferimento al mondo del silicio), che rimangono comunque il riferimento con il quale confrontarsi. In tale contesto i nanocristalli [1] e i nanotubi di carbonio (nanostrutture unidimensionali a filamento) sono di particolare interesse per le tecnologie dell'informazione a causa della loro versatilità e flessibilità di impiego. I nanocristalli sono direttamente associabili alle strutture quasi zero-dimensionali dette quantum dot (si veda il riquadro), che, presentando livelli energetici quantizzati e spaziali in funzione della dimensione caratteristica, possono essere impiegati per esempio per emettere o assorbire una data lunghezza d'onda della luce variando il diametro del *dot*. Più pic-

colo è il nanocristallo, più grande è la spaziatura dei livelli, e il conseguente maggior *energy gap* consente di lavorare a lunghezze d'onda inferiori. Per esempio, un nanocristallo di CdSe di 2.5 nm ha fluorescenza sul verde, mentre uno di 7 nm la presenta sul rosso. Oltre che per applicazioni di tipo optoelettronico, tali quantum dot si prestano a essere impiegati innanzitutto per la realizzazione di memorie non convenzionali [24], in quanto un dot o un cluster di dot può essere impiegato per realizzare memorie non volatili³. Tali dispositivi sono così un esempio significativo di convergenza di tecnologie microelettroniche esistenti con nanotecnologie autoassemblanti.

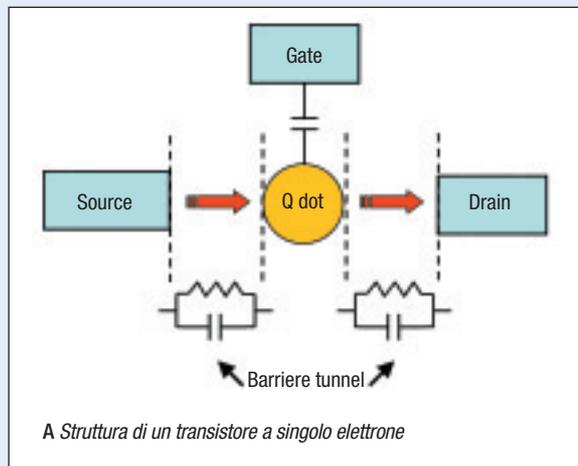
Un'altra applicazione importante riguarda la realizzazione di dispositivi a singolo elettrone [17] (si veda a tal proposito il riquadro sulla **Coulomb blockade e i dispositivi a singolo elettrone**), particolarmente attraenti in quanto conservano la scalabilità fino al livello atomico, potendo controllare il movimento anche di un solo elettrone. L'idea sottostante a questi dispositivi è quella di sfruttare un quantum dot come una piccola "isola" conduttiva separata da due elettrodi mediante sottili zone isolanti attraverso le quali un elettrone possa passare per effetto tunnel. In

³ La presenza di una carica (elettroni) aggiunta dall'esterno può impedire il passaggio di corrente in un dispositivo, creando così due possibili condizioni di risposta a seguito dell'applicazione di una tensione di lettura, in modo analogo a quanto accade in una comune memoria non volatile a tecnologia convenzionale (memoria *flash*).

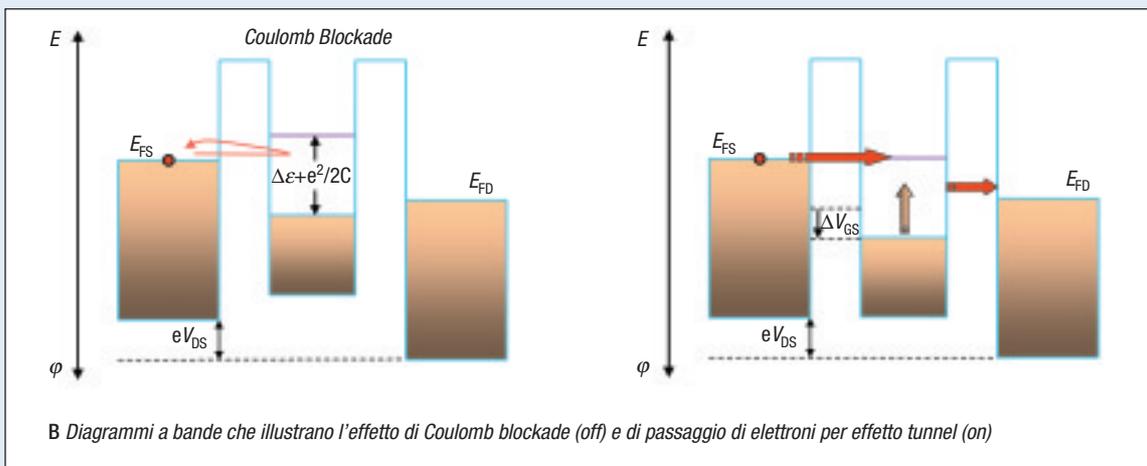
La Coulomb blockade e i dispositivi a singolo elettrone

In figura A è rappresentata la struttura tipica di un transistor a singolo elettrone. Si tratta di un'isola conduttiva (Q dot) separata da due elettrodi (source e drain) mediante due barriere tunnel e accoppiata a un elettrodo di controllo (gate) mediante una capacità. L'energia di caricamento dell'isola vale $q^2/2C$, dove q è la carica dell'elettrone e C è la capacità totale tra l'isola e il resto del sistema, e rappresenta un gap di energia tra lo stato energetico dell'ultimo (N -esimo) elettrone e il primo successivo stato disponibile ($N + 1$). Se la dimensione dell'isola è sufficientemente piccola da far sì che questo valore diventi molto superiore all'energia termica nel sistema (kT , ove k è la costante di Boltzmann e T la temperatura assoluta) ne consegue che nessun elettrone può passare per effetto tunnel nel dot o dal dot. Il valore di capacità necessario per osservare questo effetto a temperatura ambiente ($T = 300$ K) deve essere molto inferiore a 1 aF ($1 \text{ aF} = 10^{-18} \text{ F}$), corrispondente a una dimensione caratteristica di 10 nm. Per questo motivo un quantum dot realizzato con un nanocristallo di diametro dell'ordine del nanometro risulterebbe adeguato allo scopo, mentre con strutture a stato solido di dimensioni caratteristiche intorno a 100 nm si dovrebbe lavorare in condizioni di temperatura prossime allo zero assoluto, sotto 1 K.

Il diagramma a bande mostrato in figura B mostra come, nonostante la presenza di una polarizzazione V_{DS} , non ci siano nell'isola stati elettronici disponibili all'effetto tunnel, in quanto i soli stati liberi si trovano al di sopra dell'energia degli elettrodi. Questa condizione è detta *Coulomb blockade*. Tuttavia, se viene applicata una tensione a un elettrodo esterno di gate in modo da modificare la profondità del potenziale elettrostatico per accoppiamento capacitivo (in modo classico, in quanto lo spessore del dielettrico deve essere sufficiente da non consentire il passaggio di elettroni per effetto tunnel) fino a far allineare il livello libero per l'elettrone $N + 1$ con quello dell'elettrodo di source, si verifica il passaggio di un elettrone alla volta attraverso l'isola. Per questo motivo il dispositivo conseguente è chiamato transistor a singolo elettrone.



A Struttura di un transistor a singolo elettrone



B Diagrammi a bande che illustrano l'effetto di Coulomb blockade (off) e di passaggio di elettroni per effetto tunnel (on)

figura 5 è mostrato lo schema di controllo di quello che può essere considerato un condensatore "quantistico": una tensione V_g applicata al gate fa sì che un elettrone del source guadagni sufficiente energia per passare nell'isola per effetto tunnel e così caricarla negativamente. A questo punto, si genera una forza repulsiva di tipo coulombiano che impedisce il passaggio di un secondo elettrone. Questo effetto è detto Coulomb blockade. L'utilizzo di questo effetto nelle memorie flash (a tal proposito si veda anche la nota precedente) potrebbe rivelarsi particolar-

mente attraente non solo per il fatto che esso consente di conservare più a lungo la carica immagazzinata, ma anche nella prospettiva di memorizzare più bit su una stessa cella (aumentando nello stesso tempo la densità di integrazione).

Dallo schema visto, aggiungendo una seconda giunzione tunnel che consenta il passaggio di elettroni da una parte all'altra del dispositivo, deriva il transistor a singolo elettrone (SET, *Single Electron Transistor*, figura A nel riquadro) e tutti i dispositivi che ne conseguono. Anche in questo caso si prefigurano tecno-

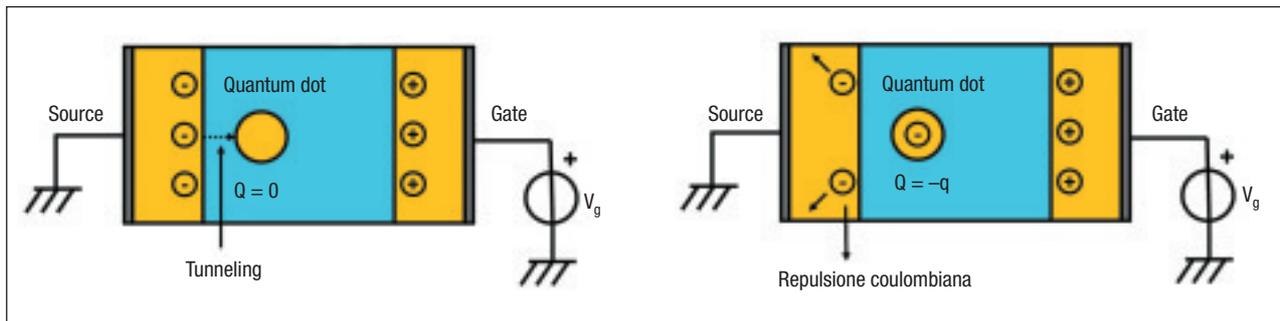


FIGURA 5

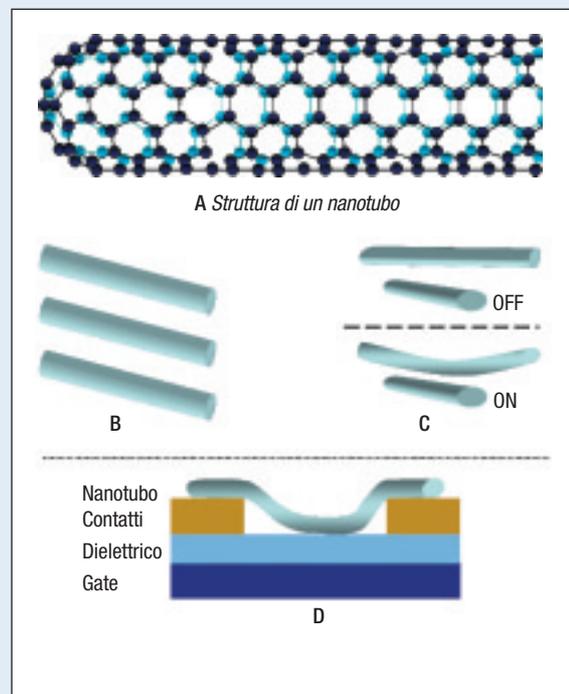
Schema concettuale di un condensatore “quantistico” che illustra la fase di carica di un quantum dot per effetto tunnel e l’effetto di blocco coulombiano dovuto alla repulsione elettrostatica

Nanotubi di carbonio per l’elaborazione dell’informazione

I nanotubi di carbonio sono nanostrutture filamentari scoperte nel 1991 da S. Iijima [13] studiando il materiale depositato su un catodo durante la sintesi dei fullereni. La scoperta di questa prima famiglia di molecole, terzo stato cristallino del carbonio, era già valsa ai ricercatori Kroto, Heath e Smalley il premio Nobel per la Chimica. I fullereni sono strutture di forma sferoidale, la più nota delle quali è il C_{60} (dove i 60 atomi di carbonio sono disposti esattamente come la geometria dei vertici degli esagoni e pentagoni di un pallone da calcio tradizionale). Iijima osservò che oltre ai fullereni durante il processo di sintesi in realtà si erano formate una ulteriore varietà di strutture mai osservate prima, strutture aventi un elevato rapporto lunghezza-diametro, i nanotubi.

I nanotubi sono strutture molto interessanti, che affascinano per le loro dimensioni (diametri dell’ordine di pochi atomi e lunghezze fino a qualche micron), per la loro forma, di fatto monodimensionale, e per le loro notevoli proprietà fisiche. Possono essere pensati come un singolo foglio di grafite (grafene) arrotolato per formare un cilindro, molto lungo e sottile, terminante con una semisfera di fullerene (Figura A). Una tale struttura corrisponde a un nanotubo a singola parete (SWNT, *Single-Wall carbon NanoTube*), mentre strutture multiple coassiali di SWNT originano i nanotubi a pareti multiple (MWNT, *Multi-Wall carbon NanoTube*).

In figura sono mostrati alcuni possibili impieghi dei nanotubi per le tecnologie dell’informazione: B Nanowire; C Unità di memoria attraverso “incroci”; D Transistore a effetto di campo a nanotubo, a configurazione di tipo backgate (avente gate in basso)



logie di tipo ibrido SET-MOS dove i transistori MOS provvedano a fornire più adeguati valori di guadagno e di pilotaggio di corrente, punti deboli dei SET. Potendo però usare nanocristalli al posto di quantum dot realizzati con tecnologie a stato solido si avrebbe il vantaggio della dimensione per usufruire di più facili condizioni operative. Infatti, la dimensione caratteristica del dot dell’ordine di pochi nanometri (1-3 nm) consente di far funzionare i dispositivi a temperatura ambiente, mentre avendo a disposizione quantum dot dell’ordine dei 100 nm si è costretti a lavorare a temperature estremamente basse a causa dei bassi

valori dell’energia di caricamento che deve restare significativamente superiore all’energia termica dell’ambiente, kT .

4.1. Dal silicio al carbonio: i nanotubi

È sorprendente constatare come dalla scoperta dei nanotubi di carbonio (CNT, *Carbon NanoTubes*) appena un decennio fa [13] si siano innescate così tante sinergiche attività di ricerca su queste nanostrutture (si rimanda al riquadro: **Nanotubi di carbonio per l’elaborazione dell’informazione**). I nanotubi hanno proprietà elettroniche particolari, potendo esibire un comportamento

metallico o semiconduttivo a seconda del loro diametro e dell'angolo secondo cui risulta avvolta la struttura esagonale del singolo foglio di grafite (grafene) che li compone (proprietà di *chiralità*). L'impiego naturale dei nanotubi metallici è la realizzazione di fili ultrasottili (*nanowire*), fatto particolarmente importante in quanto si potrebbero risolvere due fondamentali problemi nell'attuale miniaturizzazione dei circuiti, ovvero costruire piccole interconnessioni e con esse trasportare una grande quantità di corrente senza vaporizzare i fili stessi.

Come semiconduttori possono, invece, essere parte integrante di un transistor e dare origine a dispositivi di tipo ibrido carbonio-silicio compatibili con le attuali tecnologie microelettroniche. Inoltre, rispetto ad altri dispositivi di tipo quantistico (per esempio, diodi/transistori a tunneling risonante) o molecolare, una nanoelettronica basata sui nanotubi appare più promettente nell'ottica di costruire un computer. In tale ottica vale la pena considerare i seguenti aspetti:

▣ **Conduttori/interconnessioni:** un nanotubo è un dispositivo monodimensionale che conduce essenzialmente in superficie e presenta migliori proprietà di trasporto di carica rispetto ad una struttura a semiconduttore dove esse sono determinate dalla struttura cristallina di bulk. Infatti, in un nanotubo risulta considerevolmente ridotta la probabilità di *scattering* (rallentamento del movimento dei portatori di carica dovuto alle collisioni con la struttura cristallina), che aumenta la *mobilità* dei portatori. Il comportamento è, allora, quello di un eccellente conduttore adatto a realizzare le interconnessioni tra dispositivi. Si stima, inoltre, che un nanotubo a singola parete (SWNT) possa sopportare densità di corrente di tre ordini di grandezza superiori a quella del rame o dell'oro! Inoltre, un nanotubo è estremamente robusto dal punto di vista meccanico e, potendo essere reso corto fino a circa 0.4 nm [20], lo spazio per le interconnessioni può essere molto aumentato.

▣ **Interruttori/diodi:** dato che l'ampiezza della banda proibita (*bandgap*) di un nanotubo dipende dal suo diametro (maggiore è il diametro, più piccolo è il *bandgap*), mettere

insieme nanotubi di diverso diametro può dare origine a un diodo. Un modo alternativo è poi quello di drogare opportunamente un nanotubo realizzando così una giunzione pn.

▣ **FET/transistori:** è stata dimostrata la possibilità di realizzare transistori a effetto di campo con nanotubi, detti CNFET, *Carbon Nanotube Field Effect Transistors* [18]. Tali dispositivi, dal punto di vista della velocità intrinseca, appaiono superiori ai transistori MOS convenzionali per il valore effettivo di mobilità, almeno 20 volte più grande di quella del silicio. La progettazione della struttura è simile a quella di un MOSFET convenzionale, rimpiazzando il canale con un nanotubo. È anche possibile realizzare strutture di tipo *backgate* come illustrato nella figura D del riquadro a p. 13.

▣ **Unità di memoria:** i nanotubi possono formare "incroci" (*crossbar*) mediante l'applicazione di un campo elettrico. Dopo la rimozione di tale campo, sono le forze molecolari a mantenere la connessione, e si ottiene così un meccanismo per la memoria.

Si può allora comprendere come i nanotubi possano svolgere nell'ambito della nanoelettronica un ruolo simile - almeno per alcuni aspetti - a quello svolto nella microelettronica dal silicio, una volta che la loro tecnologia giunga a maturazione. Restano, infatti, alcuni problemi importanti dei nanotubi da risolvere, quali:

- ▣ controllo della *chiralità*;
- ▣ controllo della direzione di crescita e il loro posizionamento;
- ▣ resistenze di contatto piuttosto alte ($k\Omega$);
- ▣ tendenza a crescere piuttosto lunghi (mm).

5. LE NANOARCHITETTURE: VERSO NUOVI PARADIGMI COMPUTAZIONALI

I circuiti integrati convenzionali sono costituiti essenzialmente da dispositivi a commutazione e da interconnessioni: sono queste ultime, in realtà, a determinare l'occupazione di area sulla superficie del silicio, e quindi le dimensioni complessive del *chip*. Al diminuire delle dimensioni caratteristiche della tecnologia, esse costituiscono un fattore che sempre più limita le prestazioni dei circuiti. Questa visione, tipicamente le-



gata ai processi di miniaturizzazione, può essere superata nell'ambito delle potenzialità offerte dalle nanotecnologie se si cambia il modo di pensare un circuito a nanoscala, per il quale le tecniche di fabbricazione fanno riferimento a varie forme di autoassemblamento, coniando così il termine "autoassemblaggio" di circuiti. Esistono varie opportunità e sono state formulate diverse proposte in merito, non sempre però legate a un concetto di computer di tipo "general-purpose".

Prima che esistesse l'attuale disponibilità di singoli processori estremamente potenti, il tentativo di migliorare le prestazioni computazionali dei sistemi di elaborazione ha diretto la ricerca sulle architetture di tipo concorrente e/o ad elevato parallelismo nell'ottica della realizzazione VLSI. A partire dai concetti generali delle macchine SIMD e MIMD (*Single/Multiple Instruction Multiple Data*) sono state sviluppate architetture [11] quali *array* di processori, *array* sistolici e a fronte d'onda per la mappatura efficiente di specifici algoritmi. Di pari passo è proseguita la ricerca su modalità alternative per eseguire algoritmi prendendo spunto dalla biologia e dalle neuroscienze, introducendo paradigmi quali il DNA computing, le reti neurali artificiali e gli automi a celle [23]. Quanto però possono essere adatti i dispositivi nanoelettronici alla realizzazione di siffatte architetture? Nell'attuale scenario della nanoelettronica i noti concetti architettureali devono essere verificati o modificati. La verifica è necessaria in quanto i nuovi dispositivi nanoelettronici possiedono proprietà qualitativamente nuove in termini di dimensioni fisiche, dissipazione di potenza, guadagno, numero di stati stabili, frequenza di *clock* e soprattutto livello di integrazione. Lo sforzo sarà quello di ricercare la mappatura ottimale degli algoritmi sui nanosistemi disponibili o ideare nanosistemi innovativi per la soluzione degli algoritmi desiderati, dovendo contenere in entrambi i casi i costi rispetto alle soluzioni tradizionali per poter essere competitivi. Nel prosieguo del capitolo si vogliono fornire alcuni esempi significativi di nanoarchitetture prototipali in cui i nuovi concetti delle nanotecnologie possono prendere forma.

5.1. Nanoarchitetture guidate dalle interconnessioni

Al posto di considerare un computer come un insieme di interruttori connessi da fili, si potrebbe pensare, nell'ottica della progettazione, di vederlo come due fitti insieme di fili paralleli e perpendicolari tra loro la cui interconnessione può essere abilitata o meno da dispositivi dotati di una opportuna memoria⁴ posti a cavallo tra essi. L'idea non è nuova in quanto prende spunto dalle architetture regolari di tipo crossbar (Figura 6), può però trovare una realizzazione molto efficiente sfruttando in modo naturale le potenzialità (e anche i limiti) delle tecniche di autoassemblaggio; basti pensare a piccoli dispositivi molecolari che possano abilitare le interconnessioni a loro volta realizzate mediante nanowire (a stato solido) o nanotubi. Un approccio simile [5] è stato impiegato da un gruppo di ricercatori della Hewlett-Packard e dell'Università di California, Los Angeles, nell'ottica di sviluppare a scopo di ricerca un computer di tipo riconfigurabile che può tollerare la presenza di difetti facendo ricorso alla ridondanza. L'architettura, chiamata Teramac [9], sfrutta un monostrato di molecole bistabili (rotaxani) attivabili con impulsi elettrici che costituiscono le giunzioni e rappresenta un prototipo concettuale di realizzazione nanoelettronica a basso costo. Esso comprende 10^6 unità logiche pilotate a una frequenza rela-

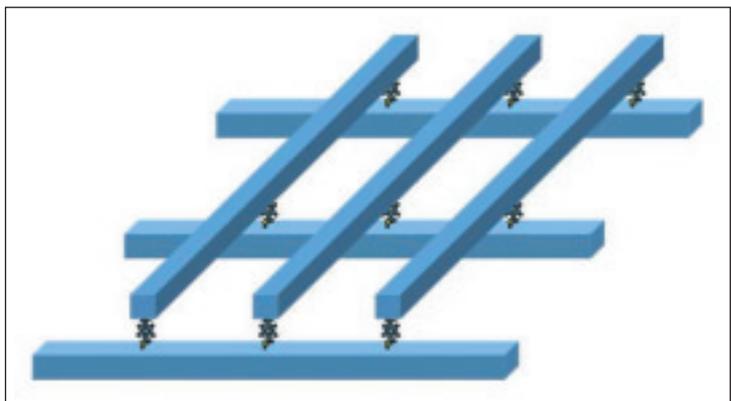


FIGURA 6

Architettura crossbar realizzata con nanowire e dispositivi bistabili molecolari

⁴ Tipicamente a due stati stabili, da cui il termine "bistabile".

tivamente bassa di 1 MHz, quindi con una potenza di calcolo equivalente a 10^{12} operazioni al secondo (da cui il nome).

Una più nota e analoga realizzazione dal punto di vista concettuale è la memoria RAM magnetica (MRAM) che si basa sullo spin dell'elettrone per ottenere l'effetto di bistabilità [8], ma si trovano altri esempi, tra cui uno significativo mediante nanotubi [21].

5.2. Nanoarchitetture a connettività locale

Un altro modo per costruire nanoarchitetture efficienti è sfruttare la *località* delle interconnessioni. Un tale approccio prende spunto dai sistemi molecolari e biologici e, come si è accennato in precedenza, il notevole *background* culturale ereditato può favorire l'impiego di opportune nanostrutture per la mappatura di classi specifiche di algoritmi. Svariate nanostrutture che dan-

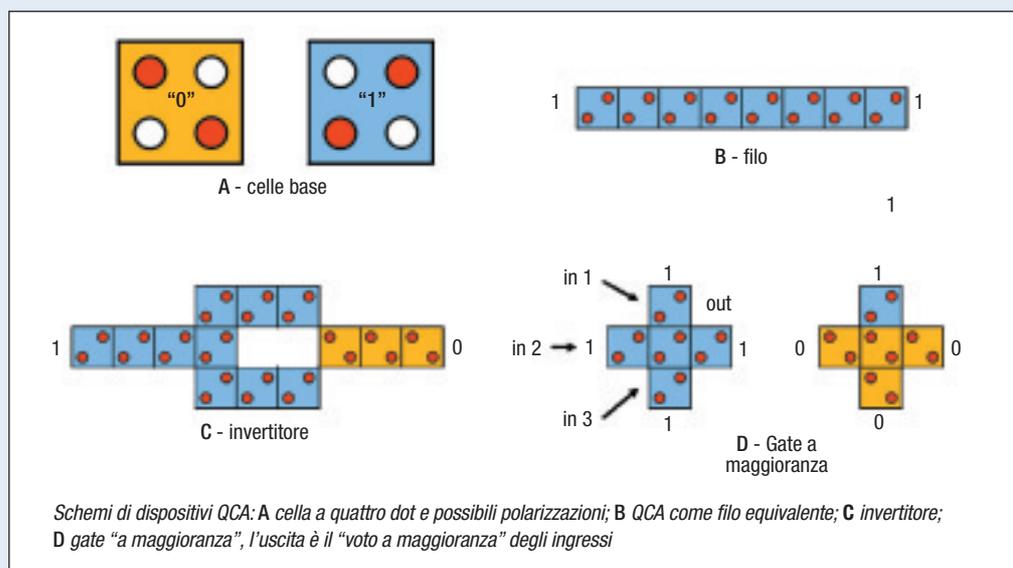
no origine a dispositivi quantistici possono essere usate per questo tipo di realizzazione, ma quelle che si prestano naturalmente a questo tipo di funzionalità sono i quantum dot.

5.2.1. AUTOMI A CELLE QUANTICI

Le configurazioni regolari di quantum dot conducono, in via naturale, al paradigma degli automi a celle, e sono pertanto chiamati Automi a Celle Quantici (QCA, *Quantum Cellular Automata*) (si veda il riquadro su **automi a celle**). L'idea è piuttosto recente e descrive un modo intelligente di realizzare automi a celle utilizzando le nanotecnologie [16], che risulta anche attraente per il fatto che l'elaborazione non dipende dalle interconnessioni né dalle correnti elettriche. Nella teoria dell'informazione e nella cibernetica gli automi a celle costituiscono

Automi a celle quantici

Un automa a celle quantico (QCA) può essere pensato come una rete infinita di piccoli e identici automi finiti, o celle, connessi uniformemente e sincronizzati. La cella elementare di un QCA consiste di quattro (o cinque) quantum dot disposti su un quadrato e separati da barriere tunnel, e comprende due elettroni (extra) che possono spostarsi per tunneling all'interno della cella ma senza lasciarne i confini. A causa dell'interazione colombiana, questi elettroni si dispongono in configurazione a minima energia su una delle due diagonali, definendo in questo modo due "polarizzazioni" associate ai due stati logici binari (Figura A). Se viene applicato un campo elettrico per variare la polarizzazione della prima cella, si provoca la propagazione dell'informazione alle celle vicine, quindi, a tutto il sistema. L'idea fondamentale che sta pertanto alla base del funzionamento dei QCA è che lo stato energetico di un insieme di elettroni, inizialmente in uno specifico stato base, viene alterato in conseguenza della variazione delle condizioni al contorno. Se la variazione negli stati di energia è condotta in modo adiabatico il risultato finale sarà un nuovo stato base che dipende solo dalle nuove condizioni al contorno. In definitiva, in questo paradigma la computazione è associata all'evoluzione verso lo *stato base* a minima energia del sistema. I dispositivi QCA si costruiscono allora disponendo le celle in un *layout* appropriato; alcuni esempi sono riportati in figura B-D, ma sono stati progettati circuiti più complessi come semplici microprocessori.



un modello computazionale molto importante, soprattutto per le applicazioni rivolte alla fisica (comportamento intrinseco distribuito e auto-organizzazione), alle scienze della vita e alle scienze sociali. La macchina di Turing è, inoltre, un caso particolare di automa a celle.

I QCA si presentano come un'alternativa radicale al transistor per l'elaborazione su nanoscala, tuttavia molta ricerca dovrà essere svolta per ripensare le nanoarchitetture appropriate per questo tipo di impostazione. Da un lato, esiste un'intensa attività di tipo teorico-simulativo, dall'altro la proposta di utilizzare strutture a stato solido di tipo singolo-elettrone in condizioni di temperatura molto bassa (*criogeniche*), in quanto per lavorare a temperatura ambiente i singoli quantum dot dovrebbero comunque essere di dimensioni inferiori a 5 nm. Tali dimensioni potrebbero consentire di immagazzinare dati in celle più piccole di 25 nm × 25 nm.

5.2.2. MATRICI DI QUANTUM DOT

Una matrice di quantum dot ognuno dei quali interagisce con i vicini e con un substrato attivo (Figura 7) può implementare un concetto più avanzato di elaborazione. L'accoppiamento con barriere tunnel e la non linearità presente nel substrato (per esempio, RTD, *Resonant Tunneling Diode* ovvero diodi a tunneling risonante) originano un interessante comportamento dinamico [22] in quanto la rete nel suo complesso possiede stati stabili multipli analogamente a una rete neurale artificiale (per esempio, una rete di Hopfield), distaccandosi così dai QCA. Tali reti potrebbero implementare efficacemente elaborazioni di immagini a basso livello e memorie associative. Queste strutture potrebbero essere realizzate sfruttando l'autoassemblamento di isole metalliche quali nanoparticelle d'oro opportunamente spaziate le une dalle altre da molecole organiche, mentre il substrato attivo potrebbe contenere eterostrutture di semiconduttori composti. A titolo di esempio la figura 8 mostra un'immagine ottenu-

ta al microscopio ad effetto tunnel di un superreticolo⁵ di nanocluster d'oro aventi il nucleo di diametro pari a $1.6 \text{ nm} \pm 0.23 \text{ nm}$ e incapsulati in una matrice organica, depositato su terrazze di oro eteroepitassiale. Non appare particolarmente problematico produrre tali superreticoli su substrati tipo GaAs, mentre la vera sfida è realizzare l'insieme di (nano)elettrodi con l'adeguato pilotaggio dei segnali.

5.3. Quantum computing

Il quantum computing [2] è un paradigma computazionale radicalmente diverso, che sfrutta le proprietà di interferenza degli stati "correlati" (ovvero di tipo *entangled*) delle particelle quantistiche per consentire a ogni

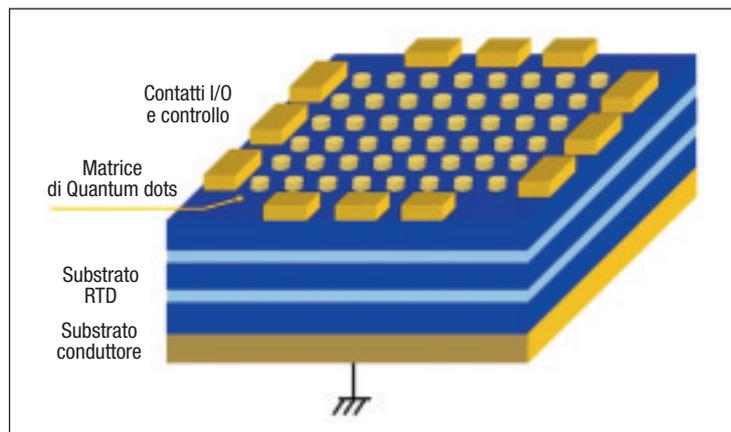


FIGURA 7

Archetipo di circuito nanoelettronico realizzato con matrici di quantum dot

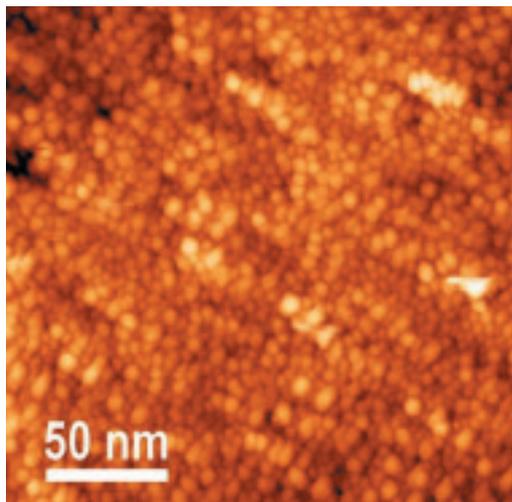


FIGURA 8

Immagine STM di un superreticolo di nanocluster d'oro in matrice organica depositati su substrato d'oro eteroepitassiale

⁵ Struttura periodica che si inserisce sopra una precedente struttura cristallina.

bit di informazione quantistica (detto *qubit*⁶) presente nel sistema di essere intimamente legato a ogni altro qubit.

Esistono anche qui alcune proposte di utilizzo di nanostrutture per il quantum computing. Per esempio, matrici di quantum dot analoghe a quelle viste in precedenza (ma realizzate confinando elettricamente gli elettroni mediante *split gate* su eterostrutture di AlGaAs e GaAs) possono essere adatte all'implementazione di qubit attraverso i singoli dot (ogni dot contenente un solo elettrone rappresenta un qubit) o coppie di quantum dot. In questo caso, risulta più appropriata l'informazione dello spin degli elettroni rispetto agli stati energetici del dot in quanto il tempo di decoerenza è superiore di vari ordini di grandezza. Tuttavia, la realizzazione di qubit [12] è estremamente difficoltosa dal momento che dovrebbero formare un nanosistema chiuso senza effetti di interferenza con il mondo macroscopico e con l'ambiente circostante (bagno termico) e la tecnologia è davvero ai primi passi.

6. OLTRE IL CMOS: COSA C'E' DIETRO L'ANGOLO?

Nel capitolo precedente sono state presentati svariati esempi di nanoarchitetture innovative per l'elaborazione dell'informazione, si vuole adesso proporre una sintesi di quelle che possono essere in prospettiva futura direzioni alternative alle tecnologie-guida CMOS (*Complementary-MOS*). Vale la pena puntualizzare che comunque per queste ultime, sotto la spinta delle nanotecnologie, migliorerebbero materiali (per esempio, materiali ad alta costante dielettrica), processi (di tipo SOI, *Silicon On Insulator*, o basati su composti silicio-germanio detti *strained silicon*) e dispositivi ultrascalati MOS: le più recenti stime Intel valutano che cambiamenti drastici non dovrebbero essere necessari fino ad arrivare a transistori di 10 nm di lunghezza di canale (recenti proiezioni

stimano che questa dimensione potrebbe essere raggiunta nel 2011), mentre la comparsa di nanotecnologie radicalmente nuove per applicazioni commerciali è prevista intorno al 2020.

Volendo allora offrire criticamente un panorama di quali approcci concettuali si possono prefigurare in prospettiva di una tale svolta, si potrebbero indicare i seguenti filoni:

■ *nanowire a semiconduttore*: possono implementare interconnessioni e funzioni logiche e sono i dispositivi a nanoscala più probabilmente disponibili a breve termine;

■ *elettronica basata su nanotubi*: l'ibridizzazione con la tecnologia MOS appare già adesso la futura evoluzione delle tecnologie microelettroniche;

■ *circuiti nanoelettronici di tipo quantistico*: è di fatto un approccio "trasversale", quantum dot e dispositivi quantistici riscuotono un interesse sempre crescente anche se non appare banale passare dalla scala mesoscopica a quella macroscopica con l'adeguata consistenza del segnale;

■ *elettronica molecolare/organica*: rimpiazzare i transistori a effetto di campo con dispositivi molecolari e/o autoassemblati appare una sfida considerevole ma possibile [14], per vincere la quale occorre risolvere il problema critico dei contatti;

■ *quantum computing*: obiettivo affascinante e di grande impatto, ma decisamente una ricerca a lungo termine il cui successo è anche subordinato alla risoluzione di problemi tecnici quali decoerenza, correzione di errori, segnali di ingresso e uscita; richiede, inoltre, il funzionamento criogenico.

Un confronto tra vantaggi e svantaggi di questi approcci è, infine, riassunto in tabella 2. Sebbene non si possa ancora individuare con chiarezza quale tecnologia possa succedere alla microelettronica a stato solido, il rapido sviluppo delle nanotecnologie registrato negli ultimi anni (anche indotto dai considerevoli finanziamenti) ha fatto crescere le relative aspettative.

⁶ Un qubit è l'informazione contenuta in un sistema quantistico a due stati, come i diversi stati di polarizzazione di un fotone, la direzione di spin degli elettroni, gli stati energetici interni di un atomo o di un quantum dot.

Nanotecnologia	Vantaggi	Inconvenienti/problemi aperti
Nanowire a semiconduttore	Facilità di manipolazione (drogaggio, contatti ohmici ecc.) Compatibilità con le tecnologie microelettroniche	Layout multistrato
Elettronica basata su nanotubi	Ottimi conduttori/interconnessioni Semplicità nello sviluppo di dispositivi a commutazione Compatibilità con le tecnologie microelettroniche	Difficoltà di controllo della chiralità Controllo del posizionamento Alte resistenze di contatto
Circuiti nanoelettronici di tipo quantistico	Autoassemblaggio guidato Elaborazione non convenzionale	Funzionamento criogenico
Elettronica molecolare/organica	Capacità di autoassemblamento Funzionamento a bassa potenza	Creazione di strutture di interconnessione Interfacciamento col mondo macroscopico
Quantum computing	Elaborazione parallela di tipo massivo e non convenzionale Azione a distanza	Funzionamento a temperature prossime allo zero assoluto Decoerenza Gestione dei segnali di ingresso/uscita

7. CONCLUSIONI

Le ricerche sulle nanotecnologie hanno aperto prospettive di grande interesse per lo sviluppo delle tecnologie dell'informazione al di là dei limiti dei processi di fabbricazione attualmente impiegati. Costituiscono, inoltre, uno stimolo a realizzare nuove classi di dispositivi nanoelettronici in grado di sfruttare effetti quantistici per un'elaborazione dell'informazione di tipo non convenzionale.

Se nel futuro più immediato il silicio appare ancora il protagonista, l'innovazione introdotta dalle nanotecnologie costituisce un elemento concreto di complemento nonché di estensione allo *scaling* e alla legge di Moore. In particolare, le possibilità offerte dai sistemi autossemblanti di tipo organico delineano uno scenario in cui si prefigurano architetture computazionali di tipo ibrido dove il silicio può costituire la piattaforma ideale per un'integrazione di tipo eterogeneo.

Le nanotecnologie rappresentano, pertanto, una svolta epocale nelle tecnologie di fabbricazione in quanto al concetto classico di miniaturizzazione si affianca quello di autoassemblaggio guidato dove i due metodi top-

down e bottom-up non sono in contrapposizione, ma possono trovare una efficace sinergia in quanto proprio le infrastrutture legate alle tecnologie microelettroniche possono alimentare l'innovazione delle nanotecnologie. Affinché si possano progettare e sfruttare in modo efficace le nanostrutture è comunque necessario lo sviluppo delle nanoscienze di base e, conseguentemente, poter disporre di una adeguata modellistica delle nanocelle che possono costituire i processori elementari di nuove architetture computazionali. Un approccio di tipo interdisciplinare sarà condizione necessaria e chiave di volta per realizzare i computer del futuro.

Bibliografia

- [1] Andres R.P., et al.: *The design, fabrication and electronic properties of self-assembled molecular nanostructures*. The Handbook of Nanostructured Materials and Nanotechnology, Nalwa HS (Ed.), Academic Press, San Diego, 1998.
- [2] Angeleri E.: Quantum computing: sogno teorico o realtà imminente? *Mondo Digitale*, n. 1, 2003, p. 36-50.
- [3] Baldi L., Cerofolini G.: La legge di Moore e lo sviluppo dei circuiti integrati. *Mondo Digitale*, n. 3, 2002, p. 3-15.

TABELLA 2

Confronto tra strategie alternative di realizzazione di nanosistemi di elaborazione

- [4] Binnig G., Rohrer Gerber Ch., Weibel E.: Surface studies by scanning tunneling microscopy. *Phys.Rev. Lett.*, Vol. 49, 1982, p. 57.
- [5] Chen Y., Jung G., Ohlberg D., Li X., Stewart D.R., Jeppesen J.O., Nielsen K.A., Stoddart J.F., Williams R.S.: Nanoscale molecular-switch crossbar circuits. *Nanotechnology*, Vol. 14, 2003, p. 462-468.
- [6] Eigler D.M., Schweizer E.K.: Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope. *Nature*, Vol. 344, 1990, p. 524.
- [7] Feynman R.P.: There's plenty of room at the bottom. *Caltech's Engineering and Science*, Vol. 23, 1960, p. 22-36. <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- [8] Gallagher W.J., Kaufman J.H., Papworth S.S., Scheuerlein R.E.: *Magnetic memory array using magnetic tunnel junction devices in the memory cells*. U.S. Patent 5 640 343 (IBM), June 1997.
- [9] Heath J.R. et al.: A Defect-Tolerant computer architecture: opportunities for nanotechnology. *Science*, Vol. 12, 1998, p. 1716-1721.
- [10] Hellemans A.: X-rays find new ways to shine. *Science*, Vol. 277, 1997, p. 1214-1215.
- [11] High-Performance VLSI Signal Processing Innovative Architectures and Algorithms, Vol. 1, Algorithms and Architectures. Ray Liu HJ, Kung Yao K (Eds), Wiley-IEEE Press, 1997.
- [12] Hofmann E.: Dal computer classico a quello quantistico: realizzabilità e potenziali applicazioni. *Mondo Digitale*, n. 4, 2003, p. 63-75.
- [13] Iijima S.: Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, Vol. 354, 1991, p. 56.
- [14] Joachim C.: Bonding more atoms together for a single molecule computer. *Nanotechnology*, Vol. 13, 2002, p. R1-R7.
- [15] Lee K.B., Park S.J., Mirkin C.A., Smith J.C., Mrksich M.: Protein. Nanoarrays generated by dip-pen nanolithography. *Science*, Vol. 295, 2002, p. 1702-1705.
- [16] Lent C.S., Isaksen B.: Clocked molecular quantum-dot cellular automata. *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 50, 2003, p. 1890-1896.
- [17] Likharev K.: Single electron devices and their applications. *IEEE Proceedings*, Vol. 87, 1999, p. 606-632.
- [18] Martel R., Derycke V., Appenzeller J., Wind S., Avouris Ph.: *Carbon nanotube Field-effect transistors and logic circuits*. Proceedings of the 39th Conference on Design Automation, 2002, p. 94-98.
- [19] Neave J.H., Joyce B.A., Dobson P.J., Norton: *Appl Phys A*, Vol. 31, 1983, p.1.
- [20] Qin L.C., Zhao X., et al.: The smallest carbon nanotube. *Nature*, Vol. 408, 2000, p. 50.
- [21] Rueckes T., Kim K., Joselevich E., Tseng G.Y., Cheung C., Lieber C.M.: Carbon nanotube-based

nonvolatile random access memory for molecular computing. *Science*, Vol. 289, 2000, p. 94-97.

- [22] Roychowdhury V.P., Janes D.B., Bandyopadhyay S.: Nanoelectronic architecture for boolean logic. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, 1997, p. 574-587.
- [23] *Solutions to Parallel and Distributed Computing Problems: Lessons from Biological Sciences*. Zomaya A.Y., Ercal F., Olariu S. (Eds), Wiley, 2000.
- [24] *Technology Roadmap for Nanoelectronics*. Editor: R. Compagno (European Commission), Luxemburg, Office for Official Publications of the European Communities, 2001.
- [25] Xia Y., Rogers J., Paul K., Whitesides G.: Unconventional methods for fabricating and patterning nanostructures. *Chem. Rev. Ed.*, Vol. 99, 1999, p. 1823-1848.

ERMANNO DI ZITTI ingegnere elettronico nel 1980 e dottore di ricerca nel 1986, è Professore Associato dal 1992 presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Genova dove insegna "Nanotecnologie" oltre a vari corsi di elettronica. La sua attività di ricerca, svolta presso il Dipartimento di Ingegneria Biofisica ed Elettronica, ha riguardato inizialmente i dispositivi a semiconduttore di potenza per proseguire nei sistemi VLSI di tipo parallelo, sfociando infine nel settore della nanoelettronica e delle nanotecnologie. È coautore di circa 50 pubblicazioni internazionali. dizitti@unige.it

DAVIDE RICCI si è laureato in Fisica nel 1989 e ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettronica ed Informatica presso l'Università di Genova. Svolge la sua attività presso il Dipartimento di Ingegneria Biofisica ed Elettronica dal 1989. Specialista in Microscopia a Sonda di Scansione, si è interessato della messa a punto di nuove tecniche di indagine submicroscopiche di superfici di sensori e sistemi biologici. Da alcuni anni, l'attività si incentra sulla realizzazione di nuovi dispositivi per l'elaborazione dell'informazione basati su nanostrutture autoassemblate accoppiate a dispositivi realizzati tramite la microelettronica tradizionale. È coautore di circa 50 pubblicazioni internazionali. davide.ricci@dibe.unige.it

DANIELE D. CAVIGLIA si è laureato in Ingegneria Elettronica nel 1980 e si è specializzato in Ingegneria Informatica nel 1982 presso l'Università di Genova. Fa parte del Dipartimento di Ingegneria Biofisica ed Elettronica dal 1984. È professore ordinario di Elettronica presso la Facoltà di Ingegneria della stessa Università dal 2000. La sua attività di ricerca ha riguardato la modellistica di transistori MOS, la progettazione VLSI, la realizzazione di architetture neurali con autoapprendimento, in particolare in tecnologia CMOS a bassa potenza. I suoi interessi sono ora nel settore della progettazione circuitale a radiofrequenza e nella realizzazione di dispositivi a nanotubi di carbonio. caviglia@dibe.unige.it