

Roberto Marani, Anna Gina Perri
 Dipartimento di Elettrotecnica ed Elettronica,
 Laboratorio di Dispositivi Elettronici, Politecnico di Bari
 Via E.Orabona 4, 70125, Bari, Italy
 Phone: +39-80-5963314/5963427 Fax: +39-80-5963410 E-mail: perri@poliba.it

IL FUTURO DELLA TECNOLOGIA: LE NANOTECNOLOGIE (THE TECHNOLOGY FUTURE: THE NANOTECHNOLOGIES)

Sommario: l'obiettivo di questo è quello innanzitutto di definire i limiti del progresso scientifico ed il conseguente ruolo determinante delle nanotecnologie, che segnano una vera e propria rivoluzione e rappresentano la soluzione possibile per non frenare il progresso stesso. Vengono inoltre esaminate le principali problematiche delle nanotecnologie attraverso un sintetico studio di alcuni fra i maggiori prodotti delle stesse di più ampio e promettente impiego, con un cenno alle possibili applicazioni/implicazioni per la vita quotidiana.

I. Introduzione

La tecnologia può essere definita come l'insieme dei processi o fasi di lavorazione necessarie per fabbricare dispositivi e sistemi di complessità qualunque.

All'avanzare della tecnologia si accompagna l'avanzare del progresso dove per progresso intendiamo tutto quanto i prodotti della tecnologia permettono di fare: dispositivi per mezzi di trasporto, domotica, applicazioni medicali, computazione, grafica, telecomunicazioni, creazione di nuovi strumenti per acquisire sapere (ricerca), educare, ecc.

Lo stato di avanzamento della tecnologia si misura dalla dimensione minima che un dispositivo può avere perché alla riduzione delle dimensioni è legato un incremento delle potenzialità o *performance* (per esempio della velocità) e delle applicazioni.

Attualmente la minima dimensione possibile è della frazione di micron (un micron è un milionesimo di metro, ovvero 10^{-6} metri).

Man mano che la tecnologia avanza, le dimensioni minime si riducono e ci si avvicina sempre più all'ordine di grandezza del nanometro (10^{-9} m ovvero un milionesimo di metro).

Tuttavia, il passaggio dalle tecnologie microme-

Abstract: the aim of this paper is to define the scientific progress limits and consequently the determinant role of nanotechnologies, which are a true revolution and the possible solution for not stopping the progress. Moreover the main drawbacks dealing with nanotechnologies are examined by a concise study of more important nanodevices, with a note about their possible applications to everyday life.

At last the unresolved problems and the hardware prospects are highlighted.

triche a quelle nanometriche (o **nanotecnologie**) non è banale bensì ricco di implicazioni.

Le nanotecnologie, infatti, segnano non una **evoluzione** ma una **rivoluzione** tecnologica e rappresentano la soluzione possibile per non frenare il progresso.

È chiaro, quindi, che hanno un ruolo determinante per il futuro dell'umanità e per questo sono oggetto di notevoli sforzi di ricerca in tutto il mondo.

Le nanotecnologie, peraltro, riguardano dispositivi sia elettronici che fotonici ed interessano numerosissime discipline del sapere umano:

1. Biologia: costruire nanosensori e manipolatori di materia biologica (stessa scala di dimensioni)
2. Medicina: monitoraggio di marcatori per il cancro, rivelatori di proteine e di virus, somministrazione selettiva di farmaci, nuovi materiali per impianto di organi, ecc.
3. Scienza dei materiali: maggiore resistenza, elasticità, proprietà strutturali ed elettriche.
4. Informazione, computazione, comunicazione:
 - miniaturizzazione dei dispositivi; memorie; microelaboratori
 - nuovi algoritmi di computing
 - display flessibili con LED organici

Passare dall'attuale tecnologia (microelettronica) alle nanotecnologie significa cambiare:

- i. **Materiali e processi di fabbricazione**, ovvero utilizzare non più solo il silicio come materiale per la fabbricazione dei dispositivi e circuiti ma ricorrere a:
 - semiconduttori composti dei gruppi III-V della tavola periodica
 - nuove strutture denominate Nanotubi di Carbonio (CNT)
 - strutture molecolari
- ii. **Architettura dei dispositivi elementari**, ovvero passare dai tradizionali dispositivi a giunzione a semiconduttore ad altre tipologie completamente nuove:
 - dispositivi molecolari (quantistici, elettromeccanici, fotoattivi)
 - Single-Electron Transistor (SET)
 - Resonant Tunneling Devices (RTD)
 - Quantum Dots (QD)
 - Quantum Cellular Automata (QCA)
- iii. **Algoritmi computazionali**: i nuovi dispositivi nanometrici lavorano secondo le leggi della fisica quantistica e non della fisica classica oppure sono basati sui fenomeni di scambio molecolare per cui richiedono nuove "procedure" o algoritmi di calcolo:
 - Tactile Computing (dispositivi molecolari)
 - Quantum Computing (dispositivi atomici).

L'obiettivo di questo articolo è quello innanzitutto di definire i limiti del progresso ed il conseguente ruolo determinante delle nanotecnologie per lo stesso progresso.

Inoltre si fornirà una visione d'insieme della rivoluzione nanotecnologica con un cenno alle possibili applicazioni/implicazioni per la vita quotidiana.

2. Le nanotecnologie ed i limiti del progresso scientifico

Oggi parlare di progresso sembra quasi fuori luogo, tanto ne siamo travolti nella vita quotidiana.

Infatti, non ci accorgiamo di come la sempre più massiccia presenza di chip elettronici nelle apparecchiature di ogni genere, per uso domestico, professionale, amatoriale, nelle autovetture, ecc., sia il risultato di un galoppante avanzamento della tecnologia: quello che si definisce comunemente

"progresso".

Sorge allora immediata, per il comune "consumatore" del progresso, la domanda: c'è un limite per il progresso e fino a quando potrà avanzare? Prima ancora di questa domanda, però, gli studiosi se ne sono posta un'altra un po' più tecnica, che può sfuggire al sentire comune del consumatore del progresso: con quale rapidità può avanzare il "progresso"?

Ovvero: cosa dobbiamo aspettarci fra uno o dieci o venti anni?

Già nel 1965 Gordon Moore, tra i pionieri della progettazione dei circuiti integrati (più sinteticamente denominati "chip", area di silicio delle dimensioni dell'ordine del mm quadrato), in un articolo sulla rivista "Electronics" tentò una risposta a questa seconda domanda. Moore, infatti, associò una misura del progresso alla capacità di miniaturizzare i dispositivi elementari (transistori) e, quindi, di integrarli in un singolo circuito integrato ed ipotizzò che il numero di transistori integrabili (fabbricabili) in un singolo chip sarebbe raddoppiato ogni 12 mesi.

Alla fine degli anni '80 lo stesso Moore corresse questa previsione sulla base dei dati inerenti il progresso effettivo registrato negli anni precedenti, ipotizzando che si sarebbe avuto un raddoppio del numero di transistori integrabili in un singolo chip ogni 18 mesi.

Questa supposizione si è rivelata sorprendentemente corretta per molti anni, da cui il nome di **Legge di Moore** dato a quella che inizialmente era soltanto una supposizione e studiosi della INTEL asseriscono che tale legge continuerà a rimanere valida almeno per 15 anni circa.

Questo significa che nei prossimi 18 mesi ipotizziamo un progresso pari a quello che si è avuto nei precedenti 37 anni.

Nel 2009 si prevede di realizzare transistori delle dimensioni minime di 15 nanometri, ovvero molto più piccoli di un virus (cfr. Figg. 1 e 2).

Sorge, pertanto, un'altra domanda: se il progresso è legato alla capacità di miniaturizzare i dispositivi elementari di cui sono composti i chip, come fare a raddoppiare, o più in generale ad incrementare, il numero di transistori contenuti in ogni singolo chip?

La risposta è semplice: occorre ridurre le dimensioni dei transistori.

La continua miniaturizzazione presenta numerosi vantaggi ma anche molti problemi.

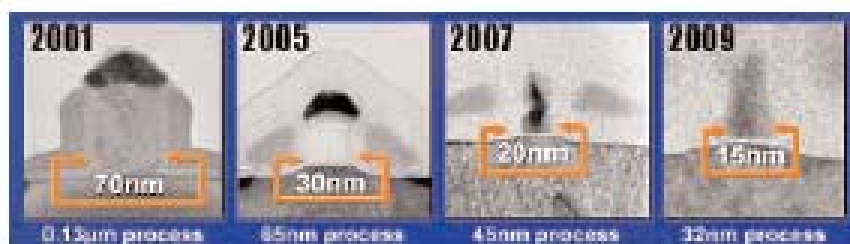


Fig. 1 - Transistori realizzati dalla INTEL visti al microscopio elettronico. Viene evidenziata la minima dimensione del dispositivo che indica il tipo di tecnologia realizzativ.

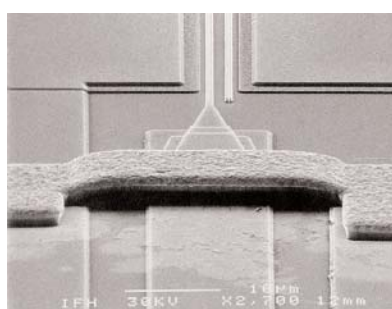


Fig. 2 - Transistore contenuto in un chip di telefonini cellulari.

Ad esempio, all'incremento del numero di transistori per chip si associa una riduzione drastica dei prezzi: circa 40 anni addietro un transistoro costava 8 dollari; oggi con un dollaro si possono acquistare circa un milione di transistori (senza "custodia" o package).

Questa riduzione dei costi (si parla di transistori a costo zero) è la ragione della enorme diffusione dell'elettronica integrata nelle apparecchiature di ogni genere, nelle autovetture, nei sistemi di sicurezza, nei computer ma anche nelle chiavi elettroniche, nei telecomandi, nei giocattoli, ecc., insomma, nella vita di tutti e di ogni giorno.

Queste previsioni sarebbero molto affascinanti se prive di problemi correlati alla miniaturizzazione e proprio questi problemi costituiscono la risposta all'altra domanda di cui prima: c'è un limite per il progresso?

Man mano che si riducono le dimensioni dei dispositivi elementari si innescano fenomeni fisici incontrollabili e che, spesso, non rispettano le leggi della meccanica classica bensì di quella quantistica; aumentano i rischi di malfunzionamento ed i fenomeni di surriscaldamento dei chip ponendo serie difficoltà affinché la legge di Moore continui ad essere rispettata.

Dunque, lo sviluppo tecnologico rischia di arrestarsi.

Ad esempio, alla densità attuale di integrazione il chip raggiunge una densità di potenza termica (W/cm^2) pari a quella di un reattore nucleare e alla densità di integrazione prevista per il 2009 la dissipazione di potenza termica raggiungerà i $2.000 W/cm^2$ ovvero la temperatura di picco raggiunta da un chip sarebbe circa $1200 ^\circ C$, che è quella degli ugelli di un razzo ed in grado di fondere lo stesso chip (cfr. Fig.3).

Nel 2015, poi, la dissipazione termica per singolo chip sarebbe quella della superficie solare, $10.000 W/cm^2$.

Appare evidente che non ha molto senso continuare a miniaturizzare i dispositivi, ovvero ad aumentare la densità di integrazione, senza aver progettato soluzioni valide per risolvere il problema della dissipazione di potenza termica.

Purtroppo il problema termico non è l'unico o fattore di rischio di malfunzionamento dei chip. Sussistono, infatti, anche problemi di alimentazione (energia) da fornire al chip così "ricco" di transistori, problemi di progettazione delle piste su cui viaggiano i segnali nel chip, soprattutto i segnali di

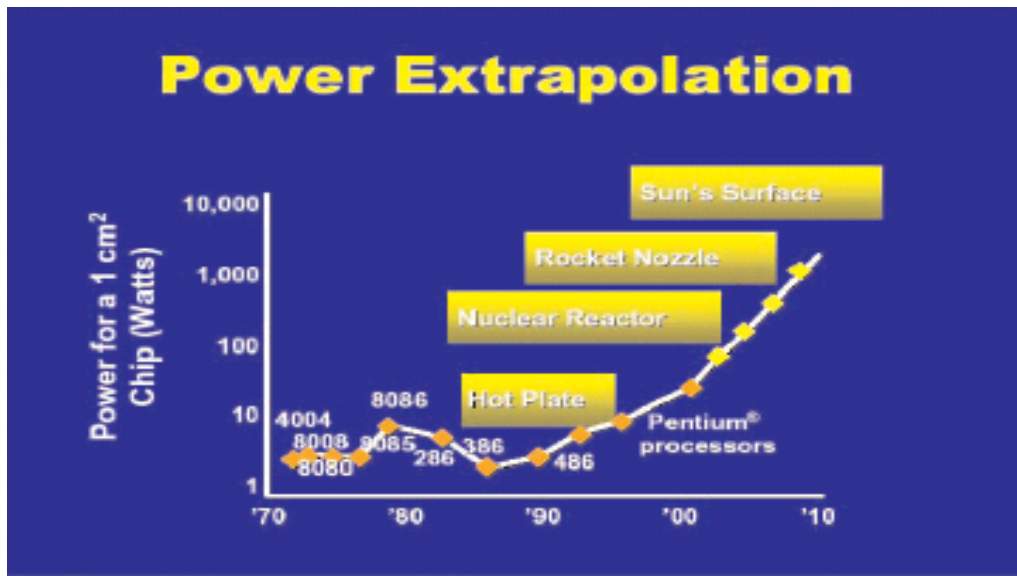


Fig. 3 – Grafico della densità di potenza termica raggiunta dai chip all'aumentare della densità di integrazione tra gli anni 70 ed il primo decennio degli anni 2000.

sincronismo (clock), problemi di affidabilità per tecnologie così spinte, problemi di innesco di effetti cosiddetti del second'ordine ovvero fenomeni parassiti (non voluti e non controllabili) e limiti fisici ovvero ci sono dimensioni al di sotto delle quali fisicamente non è consentito arrivare per limitazioni intrinseche alla struttura della materia.

Inoltre, con la miniaturizzazione i transistori saranno sempre più simili ad un'atomo e, in futuro, ad una parte di atomo, per cui si porranno non solo problemi di manipolazione per entità così piccole (basti pensare alla difficoltà di praticare saldature) ma, in più, questi dispositivi obbediranno non più alle leggi della meccanica classica, quella che sperimentiamo nella vita quotidiana, ma a quelle molto più complesse della meccanica quantistica.

Ne consegue che il progresso, in senso lato, rischia di arrestarsi o, almeno, di rallentare in maniera molto significativa, smentendo la legge di Moore, finché non si trovano soluzioni ai numerosi e delicati problemi accennati.

E' pur vero che attualmente nei laboratori di ricerca si studiano e sviluppano sistemi che forse troveranno ampia diffusione solo fra alcune decadi (da dieci a venti anni almeno) per cui tale rallentamento si avverterà non prima di 20 anni.

Tuttavia il rischio c'è ed è concreto.

Le nanotecnologie rappresentano, attualmente, l'unica speranza per far fronte a questo rischio.

3. Dispositivi nanometrici, strutture di base e applicazioni

Avendo definito le nanotecnologie ed il ruolo determinante per il futuro del progresso dell'umanità, esaminiamo ora in maniera molto sintetica alcuni fra i maggiori prodotti delle nanotecnologie di più ampio e promettente impiego, accennando anche alle relative applicazioni.

3a. Materiali a bandgap fotonico (PBG) e dispositivi fotonici [1 - 28]

Si tratta di strutture sensibili a fasci luminosi, ottici appunto, e di microonde e non solo a fasci di elettroni (nel qual caso si parla di dispositivi puramente elettronici).

In particolare, i materiali a bandgap fotonico, noti con l'acronimo di PBG (cfr. Fig.4), hanno la proprietà di filtrare, modulare, trasmettere, fasci luminosi (ovvero elettromagnetici) solo e soltanto con proprietà desiderate.

Si parla di fasci con elevata purezza spettrale. Peraltro, essendo materiali porosi realizzati artificialmente (con celle di dimensioni nanometriche), variano le loro proprietà in relazione alla sostanza che riempie i pori, per cui trovano numerosissime applicazioni che vanno dalla cura dei tumori alla



Fig. 4 – Struttura PBG. I pori che si intravedono sono celle fabbricate artificialmente di dimensioni nanometriche.

realizzazione di sensori biochimici a quella di sorgenti laser ad altissima purezza spettrale.

Altri dispositivi fotonici realizzati con le nanotecnologie sono gli schermi ultrapiatti e le cosiddette lampade fredde, ovvero LED (Light Emitting Diode, cfr. Fig. 5), che emettono luce molto intensa (si possono realizzare fari per illuminare le strade, fari per automobili, semafori, lampade per uso domestico, ecc.) con un consumo energetico estremamente ridotto rispetto alle lampade ad incandescenza di uso comune.

3b. Nanotubi di Carbonio (CNT, CarbonNanoTube, cfr. Fig. 6) [29 - 31]

Si tratta anche in questo caso di strutture fabbricate artificialmente, definibili come strati bidi-



Fig. 5 – Esempi di diodi LED che emettono luce verde, rossa e blue.

mensionali (fogli) di grafene arrotolati su se stessi (da cui la forma di “tubi”). La formazione di tali strutture è stata scoperta davvero per caso quale prodotto di scarto della lavorazione del carbonio per tutt'altri scopi.

Ricordiamo che la grafite (la comune matita) è costituita da una sovrapposizione di strati di grafene che, a sua volta, insieme al diamante, è una delle

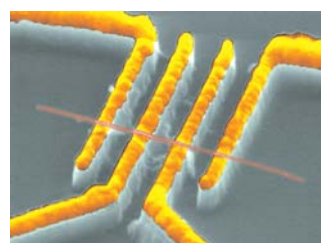
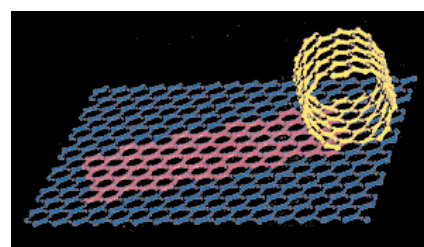
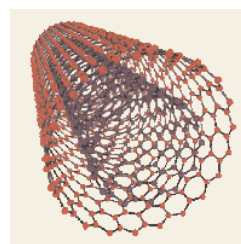


Fig. 6 - Nanotubi di carbonio singoli e realizzati in strutture più complesse

forme allotropiche in cui si trova il carbonio in natura.

I nanotubi di carbonio (spesso contraddistinti dal solo acronimo CNT) sono strutture nanometriche, che rivestono un interesse enorme nel campo della ricerca e delle nanotecnologie perché trovano applicazioni quasi ovunque, in ogni ambito, grazie alle loro sorprendenti proprietà che, peraltro, variano in base alla struttura specifica del nanotubo ovvero, per esempio, in base all'angolo secondo cui il foglio di grafene viene ripiegato su se stesso per dare vita al nanotubo.

Le difficoltà tecnologiche (è una tecnologia ancora da laboratorio, ancora poco affidabile per pensare ad una diffusione su larga scala) ed i costi attualmente proibitivi, legati anche alla non ancora raggiunta maturità della tecnologia, ne impediscono attualmente la diffusione commerciale ma il futuro è molto promettente perché i nanotubi di carbonio sono in grado di sostituire praticamente qualunque materiale presentando proprietà notevolmente migliori: si possono realizzare metalli, semiconduttori, transistori, fili conduttori, circuiti integrati, sensori, materiali sintetici, carrozzerie anti urto e autoricictrizzanti di auto e mezzi di

trasporto in genere (aerei, navicelle spaziali,..), ecc.

Le caratteristiche principali dei nanotubi sono:

- Diametro: da 0,6 a 1,8 nanometri (le piste di un circuito stampato non sono di diametro inferiore ai 50 nanometri).
- Corrente: la capacità di trasporto viene stimata in un miliardo di ampere per centimetro quadro (i cavi di rame fondono a un milione di ampere per centimetro quadro).
- Emissione di campo: sono in grado di attivare fosfori da 1 a 3 volt per micrometro (una punta al molibdeno richiede da 50 a 100 volt).
- Calore: trasmettono 6000 watt per metro per kelvin (il diamante puro trasmette 3320 watt per metro per kelvin).
- Densità: da 1,3 a 1,4 grammi per centimetro cubo (l'alluminio ha una densità pari a 2,7 per centimetro cubo).
- Resistenza: 45 miliardi di pascal (la miglior lega di acciaio si frattura a 2 miliardi di pascal).
- Stabilità: fino a 2800 gradi C nel vuoto (i microchip fondono fra i 600 e i 1000 gradi C).
- Costi: 1500 dollari al grammo alla BuckyUSA di Huston (l'oro costa circa 10 dollari al grammo).

Le applicazioni dei nanotubi di carbonio, come accennato, sono molteplici:

- Sensori chimici e biosensori
- Eliminazione di gas tossici
- Fibre ultrasensibili ed ultraleggere per abbigliamento, automobili, applicazioni spaziali
- Coclea artificiale: nanotubi come cellule cigliate
- Celle per immagazzinare idrogeno e ioni di litio (batterie)
- Nanomolle e nanobalance per pesare atomi
- Cannoni elettronici per schermi al plasma ad altissima risoluzione
- Catodi freddi in apparecchi a raggi X
- Nanotubi antibatterici e nanorobot chirurgici, antiaggreganti e distributori di farmaci
- Muscoli artificiali perfettamente biocompatibili (senza rischio di rigetto)
- Sonda per microscopi ad effetto tunnel (scanning tunnelling), ecc.

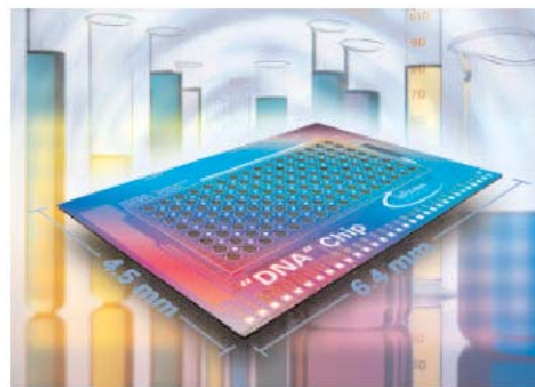
3c. Nanobiosensori e biochip (cfr. Fig. 7) [30 - 31]

Le applicazioni delle nanotecnologie nell'ambito della sensoristica sono di enorme rilevanza e sono candidate ad un'ampia diffusione a breve termine oltre a rappresentare uno dei pochi prodotti delle nanotecnologie già quasi maturi per il mercato.

Uno dei settori trainanti per questo tipo di applicazioni è quello biomedico.

Infatti, un biochip di DNA, per esempio, è attualmente piuttosto diffuso nell'ambito della ricerca biomedica per riconoscere sequenze di DNA ovvero per stabilire la mappa genetica di un soggetto e, sulla base di questa, conoscere la propensione verso determinate malattie (utile a scopo preventivo), eventuali malattie latenti in atto, la reazione soggettiva ai farmaci (utilissima per effettuare un dosaggio ad hoc, personalizzato, di qualunque farmaco), per intraprendere terapia genica per combattere determinate malattie, ecc.

Si prevede che nell'arco di un decennio il chip di DNA possa essere di uso comune tanto quanto un termometro per misurare la temperatura corporea o uno stick per l'autocontrollo della glicemia. I nanosensori, tuttavia, rivestono anche un ruolo determinante per creare nuovi sistemi (sistemi microelettromeccanici, denominati con l'acronimo MEMS, in grado di integrare su in singolo chip le potenzialità di un intero laboratorio di analisi chimiche, per questo detti anche **lab on a**



Chip photo of a 16 x 8 array.

Fig. 7 - Nanobiosensori e biochip

chip), che consentirebbero di eseguire analisi ematochimiche in tempo reale, possibilmente per uso domestico (senza, cioè, doversi recare in un laboratorio di analisi, almeno questa è la prospettiva e la speranza). Tali biosensori chimici, organizzati in biochip, consentono anche il monitoraggio ambientale in tempo reale e questo è utile non solo ai fini

di monitorare gli inquinanti presenti nell'ambiente ma anche eventuali gas invisibili ed inodore provenienti da attacchi chimici terroristici, per esempio.

3d. Dispositivi quantistici e molecolari e quantum computing [32]

I dispositivi quantistici nascono dalla necessità di risolvere un problema molto delicato che è quello di far fronte all'insorgere di effetti quantistici, incontrollabili e dannosi, nei dispositivi elettronici tradizionali, perfettamente funzionanti se fabbricati su scala submicrometrica ma non proprio nanometrica.

Gli artifici progettuali e tecnologici per risolvere tali problemi talvolta non sono sufficienti a garantire un funzionamento affidabile e stabile nel tempo e, in più, spesso implicano un proibitivo innalzamento dei costi.

Pertanto, gli studi di base nell'ambito dei dispositivi elettronici si sono rivolti agli effetti quantistici intesi non solo come problemi da risolvere bensì anche come effetti fisici utilizzabili per la creazione di nuovi dispositivi, quelli quantistici, appunto, basati sui principi non più della fisica classica ma della meccanica quantistica.

Questa "rivoluzione" ha implicato una concezione totalmente nuova, in termini di struttura, architettura, dei dispositivi stessi.

Pertanto sono stati creati:

1. **dispositivi basati sull'effetto tunnel** (è quel fenomeno quantistico in base al quale una particella può superare una barriera energetica "perforandola" ovvero pur non avendo una energia sufficiente per "scavalcarla" come invece ci aspetteremmo dalle leggi della fisica classica) di dimensioni nanometriche;
2. **dispositivi basati sullo spin degli elettroni** (lo spin è un indice del verso di rotazione di un elettrone intorno al proprio asse), da cui il nome di spintronica a questa disciplina;
3. **dispositivi basati sulla cattura e rilascio di singoli elettroni** a mezzo di "pinze" costituite da energia potenziale (transistore a singolo elettrone, pozzi quantici, dispositivi ad intrappolamento di ioni);
4. **dispositivi basati sulla polarizzazione di un fotone** (un fotone è un'onda elettromagnetica, ovvero un'onda costituita da un campo elettrico e da un campo magnetico; la pola-

rizzazione è indice della direzione nello spazio dei due campi rispetto alla direzione di propagazione dell'onda stessa).

A questi dispositivi si associano anche nuovi algoritmi di calcolo che danno origine al cosiddetto **Quantum Computing**.

Una delle caratteristiche più sorprendenti ed affascinanti del Quantum Computing è la incredibile potenza di calcolo, perché consente di implementare un vero e proprio parallelismo, ovvero un computer quantistico si comporta come se milioni di attuali computer "classici" lavorassero insieme, contemporaneamente, alla risoluzione di un problema. Per avere un'idea, la fattorizzazione di un numero di 250 cifre richiederebbe da un normale computer (posto che riesca ad eseguirla) un tempo di gran lunga superiore all'età dell'universo mentre un computer quantistico sarebbe in grado di eseguirla in un tempo di frazioni di secondo (nel 1994 è stato condotto un esperimento in tal senso facendo eseguire la fattorizzazione di un numero di 129 cifre impiegando 1600 potentissimi computer che lavoravano contemporaneamente ed il risultato è stato ottenuto dopo 8 mesi...).

Un'altra applicazione cui si candida il Quantum Computing è la crittografia, ovvero la sicurezza nello scambio dei dati attraverso canali pubblici di comunicazione, consentendo probabilità di decrittaggio praticamente nulle.

Lo scenario sarebbe oltremodo affascinante e stimolante se non vi fossero mille problemi correlati tali che, addirittura, alcuni studiosi si mostrano totalmente scettici sulla possibilità che il Quantum Computing possa diventare una realtà alla portata di tutti.

Tra i problemi più seri, come al solito, la temperatura.

In particolare, affinché possiamo essere in grado di controllare i fenomeni quantistici e sfruttarli per creare dispositivi elettronici, occorre che questi funzionino a temperature bassissime, dell'ordine del grado kelvin, K, (ricordiamo che 0 K corrisponde a -273 °C) e questo è evidentemente impensabile al momento.

Pertanto, insieme ai dispositivi elettronici quantistici, si stanno studiando, come possibile alternativa, i **dispositivi molecolari**, da cui il nome di **elettronica molecolare**.

Tali dispositivi sono basati sull'impiego, appunto, di catene di molecole omogenee o eterogenee (cfr. Fig. 8) per far scorrere in maniera controllata

una corrente di elettroni (un dispositivo elettronico o molecolare che sia non è altro che una struttura all'interno della quale siamo in grado di controllare il flusso di elettroni ovvero di corrente).

4. Conclusioni

Le nanotecnologie appaiono l'unica reale alternativa alla tecnologia attuale per garantire la evoluzione tecnologica in futuro secondo le previsioni della legge di Moore.

Tuttavia, esistono diversi punti interrogativi e problematiche che ne rendono quanto mai incerta la reale diffusione commerciale:

- Sono richieste basse temperature di funzionamento (dispositivi quantistici)
- Risulta molto complessa e costosa la tecnologia di realizzazione, le procedure di carat-

terizzazione sperimentale e la manipolazione dei nanodispositivi

- E' richiesto lo studio e la creazione di nuovi algoritmi computazionali (quantum computing) stabili ed affidabili
- Risulta molto complesso l'interfacciamento con il mondo esterno, ovvero lo scambio di informazioni dal "nanomondo" al macro-mondo
- Sono richieste nuove strategie di marketing

Tante problematiche ancora aperte non rappresentano certo un deterrente bensì uno stimolo in più per la ricerca, che fa di ogni problema una opportunità.

Le prospettive rivoluzionarie che darebbe una nanotecnologia di ampia diffusione conferiscono ulteriore spinta verso una ricerca sempre più difficile ma importante per il futuro dell'umanità.

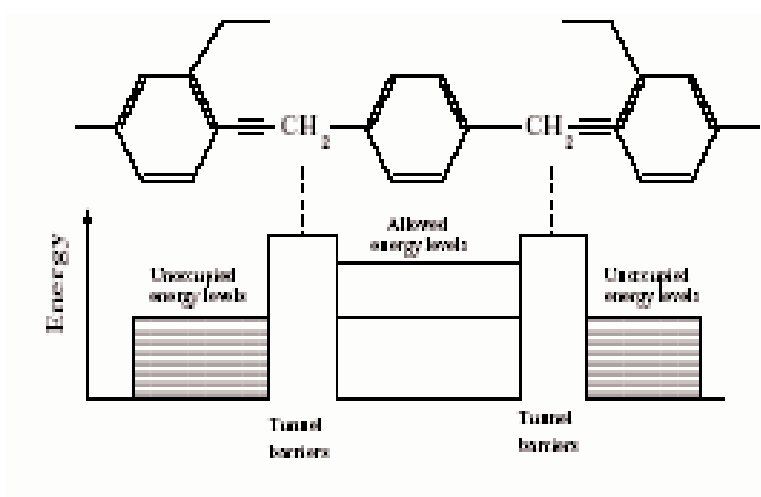


Fig. 8 - Esempio di catena di molecole che consente la creazione di una configurazione di energia potenziale che permette il controllo del flusso di elettroni e, quindi, la creazione di un dispositivo elettronico molecolare.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Giorgio, A.G. Perri, M.N. Armenise: "Modelling Waveguiding Photonic Band-Gap Structures by Leaky Mode Propagation Method"; *Electronics Letters*, 21st June 2001, vol.37, no.13, pp.835 – 836.
- [2] A.G. Perri: "Modelling of 1-D Multilayer Periodic Structure Deeply or Fully Etched using the Leaky Mode Propagation Method"; *EuMC 2001 Conference*, Londra, 24 –28 settembre 2001, vol.2, pp.169 – 172.
- [3] A.G. Perri: "Analysis and Design of Waveguide Photonic BandGap Devices"; *GAAS 2001 Conference*, Londra, 24 –28 settembre 2001, pp. 535 - 539.
- [4] A. Giorgio, A.G. Perri, M.N. Armenise: "Very fast and accurate modelling of multilayer waveguiding photonic band-gap structures"; *IEEE/OSA, International Journal of Lightwave Technologies*, vol. 19, n. 10, ottobre 2001, pp. 1598 – 1613.
- [5] A. Giorgio, A.G. Perri, M.N. Armenise: "Fast Modelling of Deeply and Fully Etched Gratings based on the Bloch-Floquet Theorem"; *International Journal of Numerical Modelling*, vol.14, n.6, novembre- dicembre 2001, pp.507 - 522.
- [6] A. Giorgio, A.G. Perri, M.N. Armenise: "Modeling of Fully Etched Waveguiding Photonic Band-Gap Structures "; *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol.38, n.6, giugno 2002, pp.630 – 639.
- [7] A. Giorgio, A.G. Perri: "Design of Photonic Band-Gap Devices Using the Leaky Mode Propagation Method "; *Proceedings of GAAS 2002*, Milano, Italia, 23 – 27 Settembre 2002.
- [8] A. Giorgio, A.G. Perri, M.N. Armenise: "Design of Guided –Wave Photonic Band-Gap Devices by using the Bloch-Floquet Theory"; *Optical Engineering*, vol. 42 (4), pp.1100, 1108, aprile 2003.
- [9] A. Giorgio, A.G. Perri: "Modelling of Photonic Band-Gap Devices by the Leaky Mode Propagation Method "; *International Journal of Numerical Modelling*, vol.16 (3), pp.219 – 238, maggio – giugno 2003.
- [10] A. Giorgio, D. Pasqua, A.G. Perri: "Photonic Crystals: Operation Principles and Applications"; prima parte; *LA COMUNICAZIONE Note Recensione & Notizie*, Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione, Roma, anno 2003, vol.LII, pp.173 – 183.
- [11] A. Giorgio, A.G. Perri: "Modelling of Photonic Band-Gap Structures having Multiple Defects"; *9th International Workshop on Computational Electronics (IWCE-9)*, Monte Porzio Catone (Roma), 25 – 28 Maggio 2003.
- [12] A. Giorgio, A.G. Perri: "Design and Modelling of Photonic Band-Gap Resonance Cavity"; *9th International Workshop on Computational Electronics (IWCE-9)*, Monte Porzio Catone (Roma), 25 – 28 Maggio 2003.
- [13] A. Giorgio, A.G. Perri: "Design of Photonic Crystals Devices with Defects"; *GAAS 2003, European Gallium Arsenide and other Compound Semiconductors Application Symposium*, Monaco, Germania, 6 – 10 ottobre 2003.
- [14] A. Giorgio, A.G. Perri: "Modelling of Photonic Band-Gap Structures having Multiple Defects"; *Journal on Computational Electronics*, vol.2, pp. 397 - 401, 2003.
- [15] A. Giorgio, A.G. Perri: "Design and Modelling of Photonic Band-Gap Resonance Cavity"; *Journal on Computational Electronics*, vol.2 , pp.403 - 406 , 2003.
- [16] A. Giorgio, D. Pasqua, A.G. Perri: "Multiple Defect Characterization in Finite-Size Waveguiding Photonic Band-Gap Structure "; *IEEE- Journal of Quantum Electronics*, dicembre 2003, pp. 1537 – 1547.
- [17] A. Giorgio, A.G. Perri: "Modelling PBG Devices to DWDM Filters Design"; *International Journal of Numerical Modelling*, vol.17, 2004, pp.85 – 103.
- [18] A. Giorgio, R. Diana, A.G. Perri: "A Method to Design DWDM Filters on Photonic Crystals"; *11th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS 2004)*, Tel-Aviv, Israele, 13 – 15 Dicembre 2004.
- [19] A. Giorgio, R. Diana, A.G. Perri: "Design of Waveguide Photonic Bandgap Devices by using the Block-Floquet Theorem"; *11th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS 2004)*, Tel-Aviv, Israele, 13 – 15 Dicembre 2004.
- [20] A. Giorgio, D. Pasqua, A.G. Perri: "Photonic Crystals: Operation Principles and Applications"; seconda parte; *LA COMUNICAZIONE Note Recensione & Notizie*, Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione, Roma, anno 2004, vol.LIII, pp.173-190.
- [21] R. Diana, A. Giorgio, A.G. Perri: "Theoretical Characterization of Multilayer Photonic Crystals having a 2D periodicity"; *International Journal of Numerical Modelling*, vol.18, 2005, pp.365 -382.
- [22] A. Giorgio, R. Diana, A.G. Perri: "Photonic crystals: operation principles and applications", X Capitolo del libro internazionale "Silicon Photonics", pubblicato da Research Signpost, Kerata, India, 2006, ISBN:81-408-0077-2.
- [23] R. Diana, A. Giorgio, A. Convertino, A. G. Perri : "A new model of microwave quasi 3D PBG-based devices", *International Conference on Signals and Electronic Systems 2006, ICSES '06*, Lodz, Polonia, 17 – 20 Settembre 2006.
- [24] R. Diana, A. Giorgio, E. Scivittaro, A. Convertino, A. G. Perri : "Optimal Design of Microwave Photonic Crystal based Accelerators", *International Conference on Signals and Electronic Systems 2006, ICSES '06*, Lodz, Polonia, 17

– 20 Settembre 2006.

[25] R. Diana, A. Giorgio, S. Giusto, A. G. Perri : "Accurate modelling of microwave PBG-based Devices for Particle Accelerator Design", EOS (European Optical Society) Annual Meeting 2006 on Nanophotonics, Metamaterials and Optical Microcavities (TOM3), Parigi, Francia, 16 – 19 Ottobre 2006.

[26] R. Diana, A. Giorgio, R. Marani, V. M. N. Passaro, A. G. Perri : "A Model to Optimize a Microwave PBG Accelerator Based on Generic Unit Cell", JEOS, Journal of European Optical Society, Rapid Publications, vol.2, 07006, 2007.

[27] A. Giorgio, R. Marani, A.G. Perri: "Progetto e caratterizzazione di acceleratori adronici su materiali a PBG per adroterapia dei tumori"; LA COMUNICAZIONE Note Recensioni & Notizie, Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione, Roma, anno 2007, vol.LV, pp. 97-106.

[28] R. Diana, A. Giorgio, R. Marani, A. Convertino, A. G. Perri: "Optimization of microwave PBG-based hadron accelerator with square cell"; Asia Pacific Microwave Conference (APMC 2007), Bangkok, Thailand, 11 – 18 Dicembre 2007.

[29] A.G. Perri, A. Giorgio: "I nanotubi di carbonio: caratterizzazione delle proprietà elettroniche ed applicazioni"; LA COMUNICAZIONE Note Recensioni & Notizie, Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione, Roma, anno 2005 - 2006, vol.LIV, pp.95 – 116.

[30] A. G. Perri: "Introduzione ai dispositivi micro e nanoelettronici"; vol. 1, Edizioni Biblios, Bari, pp. 1 - 473 , settembre 2007, ISBN 978-88-6225-000-9.

[31] A. G. Perri: "Introduzione ai dispositivi micro e nanoelettronici"; vol. 2, Edizioni Biblios, Bari, pp. 1 - 356, settembre 2007, ISBN 978-88-6225-000-9.

[32] A. Giorgio, R. Marani, A. G. Perri: "Il Quantum Computing: un nuovo scenario dell'elettronica"; LA COMUNICAZIONE Note Recensioni & Notizie, Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione, Roma, anno 2007, vol.LV, pp. 57-66.



Anna Gina Perri. Nata a Cosenza, il 16.12.1952, si è laureata in Ingegneria Elettrotecnica (Orientamento Comunicazione Elettriche) presso l'Università degli Studi di Bari il 25.2.1977, con la votazione di 110/110 e lode. Dopo aver ricoperto i ruoli di Ricercatore Universitario e di Professore Associato, attualmente è Professore Ordinario di Elettronica presso il Politecnico di Bari. I suoi interessi scientifici, a partire dal 1977, hanno riguardato lo studio e progetto di sistemi ottici di telecomunicazioni, il progetto automatico di amplificatori a microonde a basso rumore, il "modelling" dei dispositivi elettronici e la caratterizzazione degli effetti termici, lo studio di dispositivi optoelettronici basati su strutture PBG (Photonic BandGap) ed il progetto di microresonatori su PBG per acceleratori di particelle in adroterapia dei tumori. Attualmente è impegnata nel progetto, realizzazione e test di sistemi elettronici per il monitoraggio della salute, nonché nello studio e caratterizzazione di dispositivi elettronici nanometrici, FET su nanotubi di carbonio, dispositivi quantistici e per il quantum computing. Dal 2000 la Prof. Perri, in qualità di consulente, collabora con l'ALENIA SPAZIO di Roma, alle attività di ricerca riguardanti il progetto di MMIC per applicazioni spaziali ed alte rese di produzione. E' Revisore di prestigiose Riviste Internazionali quali IEEE Transaction on Electron Devices, IEEE Transaction on Microwave and Wireless Components Letters, Solid State Electronics e IEEE Electronic Letters. E' la Responsabile Scientifica del Laboratorio di Ricerca di "Dispositivi Elettronici" presso il Dipartimento di Elettrotecnica ed Elettronica del Politecnico di Bari. E' inserita dal 2003 nell'Unità INFN di Napoli nell'ambito del progetto TEGAF: "Teorie Esotiche per Guidare ed Accelerare Fasci". E' autrice di 9 libri riguardanti la teoria, le applicazioni, il progetto con l'ausilio del calcolatore di dispositivi elettronici in Si ed in GaAs e la progettazione di circuiti integrati per la microelettronica e di circa 200 articoli, apparsi su riviste internazionali e presentati a Congressi Internazionali.



Roberto Marani nato a Trani (BA) il 27.03.1985, ha conseguito la laurea di I livello in Ingegneria Elettronica il 20.07.2006 presso il Politecnico di Bari con la votazione di 110/110 e lode. Nel suo lavoro di tesi dal titolo "Progetto di dispositivi ottici con l'uso di tecniche BPM", ha condotto uno studio di dispositivi e componenti optoelettronici basati su strutture PBG, focalizzando l'attenzione sulla realizzazione di programmi volti all'analisi di queste strutture periodiche. Attualmente collabora con il Laboratorio di Dispositivi Elettronici del Politecnico di Bari, dove svolge ricerche nell'ambito del progetto, realizzazione e test di sistemi elettronici nanometrici, dispositivi quantistici e FET su nanotubi di carbonio.

E' autore di circa 20 articoli, apparsi su riviste internazionali e presentati a Congressi Internazionali.