
Le nuove frontiere per la (nano)elettronica

Anna Grazia Monteduro, Silvia Rizzato, Giuseppe Maruccio

Omnics Research Group, Dipartimento di Matematica e Fisica (Università del Salento) and CNR-Istituto di Nanotecnologia

Il notevole processo di miniaturizzazione dei componenti elettronici ha rivoluzionato il nostro modo di vivere, la nostra quotidianità, come ci rapportiamo col mondo e le persone che ci circondano. Oggi la presenza dei circuiti integrati non si limita più ai computer ma si estende a *smartphone*, orologi ed elettrodomestici. Viviamo in un mondo connesso ed in continua evoluzione. Tali avanzamenti sono stati finora possibili grazie ad un approccio "classico", partendo da un campione di silicio e migliorando le tecniche litografiche impiegate per la sua lavorazione. Ma sarà così ancora per le prossime decadi? Ebbene una serie di limitazioni fisiche e tecnologiche si addensano oggi come nubi all'orizzonte delle attuali tecnologie, rendendo sempre più difficile continuare questo trend. Allo stesso tempo, però, emergono nuovi paradigmi ed architetture sfruttando materiali innovativi ed ulteriori gradi di libertà e fenomeni fisici. Di seguito verranno introdotti i concetti alla base di nanoelettronica, elettronica molecolare e spintronica, saranno discussi alcuni conseguimenti chiave ed infine si accennerà alle prospettive aperte dalla ricerca sulla computazione quantistica.

Introduzione

La nostra quotidianità è supportata da un'innumerevole quantità di prodotti elettronici, che sfruttano la tecnologia CMOS (*complementary metal-oxide semiconductor*) basata sul silicio. A partire dagli anni '70, siamo stati testimoni di un notevole processo di miniaturizzazione dei transistor nei circuiti integrati descritto dalla cosiddetta *Legge di Moore* (Fig.1). Si pensi che nell'arco di circa 40 anni si è passati dalla soglia dei $3\ \mu\text{m}$ a meno di 30 nm: le dimensioni si sono quindi ridotte di 100 volte mentre la densità di integrazione è aumentata di ben 4 ordini di grandezza con conseguente miglioramento delle prestazioni. Tuttavia con il raggiungimento della scala nanometrica, la moderna elettronica si trova a fronteggiare diversi limiti fisici (limite termico, quantistico, di dissipazione di potenza) e tecnologici (litografia tradizionale non più sufficiente) che ne impediscono l'ulteriore miniaturizzazione [1, 2]. Ad esempio, la fabbricazione dei dispositivi mediante litografia diventa complicata, in quanto le dimensioni delle strutture realizzate non possono essere inferiori alla lunghezza d'onda d'impressionamento a causa del limite dettato dalla diffrazione. Questo implica che per realizzare strutture con dimensioni attorno ai 100 nm o inferiori, non si può più utilizzare la tradizionale lampada UV al mercurio (436 nm o 365 nm), ma bisogna ricorrere a sorgenti laser ad

eccimeri (es. KrF 248 nm e ArF 193 nm), litografia ad immersione o costose litografie di nuova generazione che prevedono l'utilizzo di raggi-X oppure fasci elettronici o ionici [3].

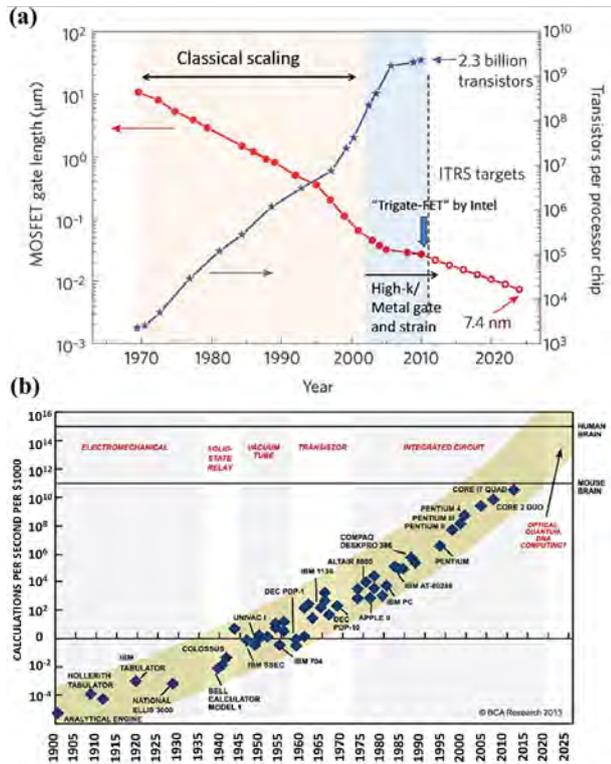


Figura 1: Evoluzione temporale (a) della lunghezza del gate nei dispositivi MOSFET nei microprocessori (adattata da [4]) e (b) della potenza di calcolo (riprodotta da [5]).

Per superare questi ostacoli e permettere lo sviluppo di piattaforme sempre più performanti, la ricerca si è focalizzata principalmente su due fronti. Nel primo, noto come *More Moore*, oltre che sullo sviluppo di nuove litografie, la ricerca si focalizza sullo studio di materiali ad alta costante dielettrica (i cosiddetti dielettrici $high - \kappa$) compatibili con il silicio e il suo processamento per sostituire l'ossido di silicio (SiO_2) nei dispositivi CMOS, limitando la corrente di dispersione (*leakage*) che per *tunneling* attraversa il *gate*. Difatti, l'invenzione dei circuiti integrati e la scelta del silicio come materiale semiconduttore per i transistor sono stati centrali per lo sviluppo della moderna elettronica, ma la miniaturizzazione dei transistor ad effetto di campo (MOSFET) (Fig.2) comporta un minor spessore dell'ossido di *gate* con conseguente aumento delle correnti di dispersione attraverso l'ossido di silicio tradizionalmente impiegato. Poiché la corrente di

tunneling diminuisce esponenzialmente all'aumentare dello spessore, una soluzione al problema potrebbe essere la sostituzione del SiO_2 con un nuovo ossido con costante dielettrica maggiore che permetterebbe di avere lo stesso valore di capacità, necessario per il funzionamento del dispositivo, ma con uno strato più spesso e quindi più isolante [6, 7, 8]. L'importanza dei dielettrici $high - \kappa$ può essere chiaramente compresa tramite la seguente equazione, che definisce lo spessore di ossido equivalente (EOT, acronimo di *equivalent oxide thickness*)

$$EOT = \frac{\epsilon_{SiO_2} * t_{high-k}}{\epsilon_{high-k}} = \frac{3.9 * t_{high-k}}{\epsilon_{high-k}}$$

ossia lo spessore teorico di SiO_2 necessario per avere la stessa capacità di *gate* [9]. Questa quantità è usata per confrontare le performance dei *gate* dei dispositivi MOS realizzati con dielettrici $high - \kappa$ con quelli ottenuti utilizzando il SiO_2 . Per esempio, 1 nm di SiO_2 può essere sostituito con 10 nm di un dielettrico con costante dielettrica relativa di 39. In pratica, lo spessore può essere aumentato di un fattore pari a $\epsilon_{high-k} / \epsilon_{SiO_2}$ rispetto al SiO_2 . Di conseguenza, i dielettrici $high - \kappa$ hanno attratto molta attenzione, sebbene la ricerca di un materiale che sostituisca il SiO_2 non sia una sfida semplice perché l'ossido di silicio è facile da realizzare e modellare su scala nanometrica, è amorfo, ha pochissimi difetti elettronici e forma un'ottima interfaccia con il silicio. La ricerca in questo settore trae comunque beneficio dallo sviluppo di nuove tecniche di crescita (quali PLD, MBE, ALD) che permettono la deposizione di ossidi non solo binari ($Ta_2O_5, HfO_2, Al_2O_3...$) ma anche complessi ($CaCu_3Ti_4O_{12}, BTO, PZT, STO, BFO, ...$), caratterizzati da una varietà di strutture e proprietà fisiche (alta permittività, ferroelectricità, multiferroicità) che li rendono attraenti anche nello sviluppo di sistemi ed eterostrutture con funzionalità innovative.

Il secondo approccio è conosciuto come *Beyond Moore* e riguarda l'esplorazione di nuovi fenomeni e gradi di libertà per la messa a punto di tecnologie non convenzionali e paradigmi alternativi al CMOS. L'avvento di materiali su scala nanometrica con peculiari proprietà così come lo sfruttamento di fenomeni quantistici e ulteriori gradi di libertà (come lo spin) hanno infatti forn-

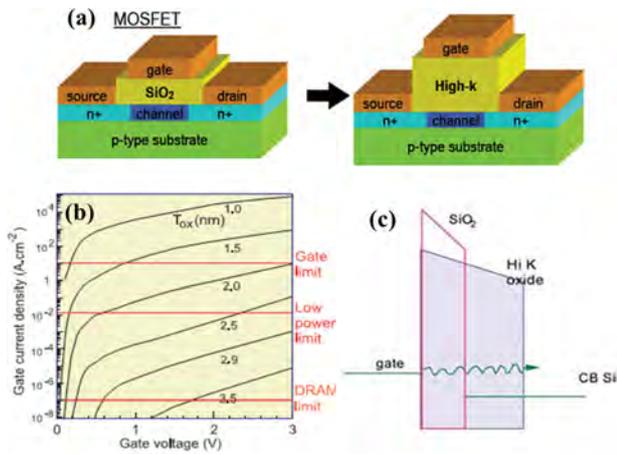


Figura 2: (a) Schemi dei MOSFET con ossidi di gate di SiO₂ e high-κ. Nel secondo caso può essere impiegato uno strato più spesso, pur mantenendo la stessa capacità [10]; (b) Corrente di Leakage vs. voltaggio al variare dello spessore di SiO₂; (c) Schema del tunneling attraverso SiO₂ e ossido high-κ [9].

to significative opportunità di sviluppo in termini di maggiori versatilità, funzionalità, velocità di commutazione, minore dissipazione di potenza e alto grado di integrazione in un singolo chip. Di seguito, ci soffermeremo ad introdurre il lettore principalmente a questi approcci, descrivendo la recente ricerca in nanoelettronica, elettronica molecolare e spintronica ed infine accennando anche alle prospettive della computazione quantistica allo stato solido [3].

Nanoelettronica

Tra fine Ottocento ed i primi anni del Novecento, lo sviluppo della fisica quantistica ha cambiato il modo in cui vediamo il mondo. Questo avviene in particolare sulla scala microscopica, motivo per cui fino a quel tempo non se ne aveva avuta evidenza. Uno dei frutti di tali studi è l'evidenziarsi del dualismo onda-particella, due concetti fino a quel momento distinti in fisica. In quegli anni, per la prima volta, le onde elettromagnetiche mostrano caratteristiche corpuscolari (fotoni), mentre particelle come l'elettrone esibiscono caratteristiche ondulatorie. Perché tale disgregazione? Ebbene, quando si miniaturizzano materiali e dispositivi elettronici su scala nanometrica, le dimensioni diventano comparabili con la lunghezza d'onda dell'elettrone e si evidenziano effetti quantistici che possono essere sfruttati per la realizzazione di nuove tecnologie. La nanoelettronica si occupa di questo.

tati per la realizzazione di nuove tecnologie. La nanoelettronica si occupa di questo.

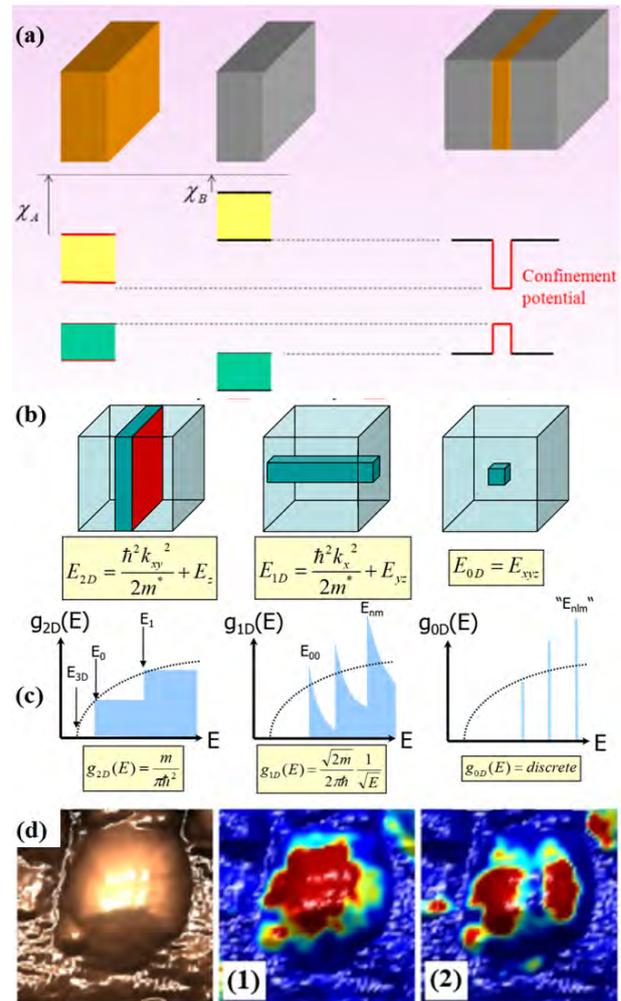


Figura 3: (a) Rappresentazione schematica di una quantum well e della relativa struttura a bande ottenuta alternando due semiconduttori con diversa band gap. (b, c) Livelli energetici permessi e densità degli stati in funzione dell'energia nei sistemi a diversa dimensionalità 2D, 1D e 0D (da sinistra verso destra). (d) Immagine topografica e mappe della densità degli stati superficiale di un quantum dot ottenute tramite microscopio a scansione a effetto tunnel (STM) [11].

Oggi, grazie allo sviluppo di tecniche di crescita epitassiale, come la Molecular Beam Epitaxy (MBE), è possibile realizzare sistemi a bassa dimensionalità (2D, 1D, 0D). Ad esempio, combinando semiconduttori con differente ampiezza di banda proibita (band gap), si può creare una buca di potenziale che confina gli elettroni in stati localizzati come illustrato in Fig.3a [3]. A causa di questo confinamento spaziale (quantum size effect), la densità degli stati (DOS), una gran-

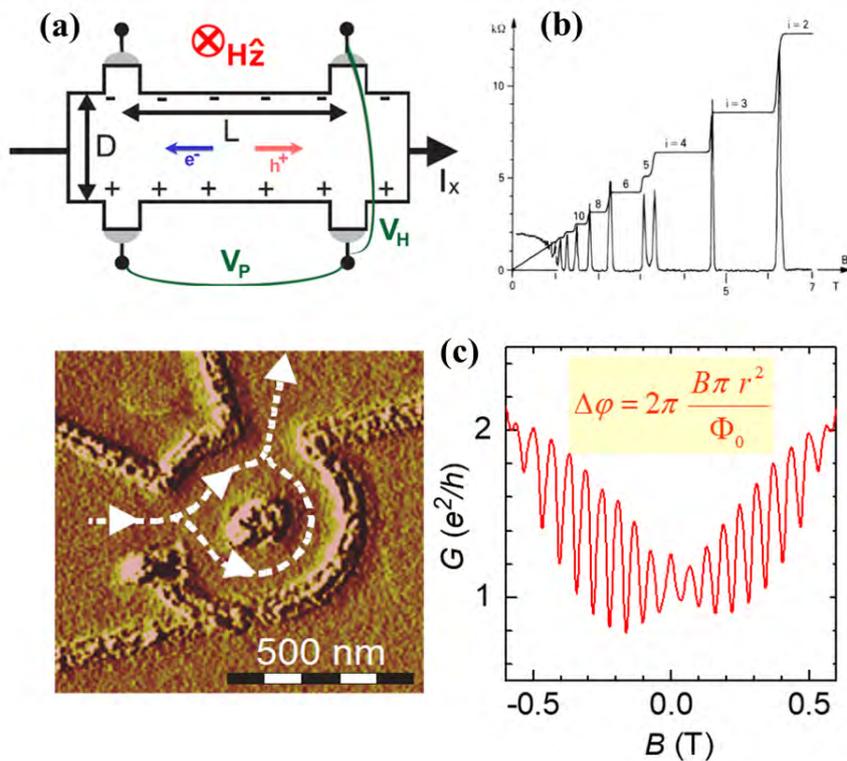


Figura 4: (a) Schema di un dispositivo per misure di effetto Hall; (b) Evidenza dell'effetto Hall quantistico intero osservato in strutture 2D di AlGaAs/GaAs; (c) Effetto Aharonov-Bohm osservato in una struttura ad anello [16].

dezza che ci indica quanti stati sono disponibili per ogni data energia, viene modificata significativamente rispetto al caso 3D (Fig.3b, c). In un sistema 2D (pozzo quantico), la DOS del gas di elettroni ha un andamento a gradini al variare dell'energia degli stati permessi piuttosto che seguire un andamento parabolico del tipo $(E)^{1/2}$ tipico del caso 3D. In particolare, un nuovo gradino si presenta ogni qual volta l'energia è sufficiente a popolare una nuova sottobanda corrispondente ad un diverso livello confinato E_z nella buca di potenziale creata lungo la direzione di crescita z .

In un sistema 1D (filo quantico), la DOS mostra invece delle divergenze in corrispondenza delle energie degli stati confinati E_{yz} , mentre nel caso 0D (punto quantico) essa diventa una funzione delta di Dirac diversa da zero solo in corrispondenza delle energie degli stati elettronici permessi E_{xyz} che in assenza di degenerazione (negli altri casi dovuta al moto nelle direzioni trasversali k_{xy} per 2D e k_x per 1D) risultano discreti come in uno spettro atomico. Questo è il motivo per cui i sistemi 0D vengono anche detti atomi artificiali e tra l'altro presentano simmetrie degli stati confinati simili a quelle atomiche con orbitali di tipo s e p , come illustrato in Fig.3d [11, 12, 13].

Lo studio del trasporto di carica nei sistemi mesoscopici a bassa dimensionalità ha portato alla scoperta di interessanti nuovi fenomeni fisici. Ad esempio studiando un sistema 2D come quello all'interfaccia $GaAs/AlGaAs$ a temperature di circa 1K e con campi magnetici di diversi Tesla, si registra un andamento a *plateau* (gradini) della resistenza di Hall in funzione del campo magnetico piuttosto che la dipendenza lineare osservata da Edwin Hall in sistemi 3D (Fig.4a, b) [3]. In corrispondenza dei *plateau*, la resistenza risulta avere un valore quantizzato ($R_H = h/(ie^2)$, ($i=1,2,3..$)), da cui il nome effetto Hall quantistico intero attribuito a questo fenomeno che ha portato all'assegnazione del premio Nobel per la Fisica 1985 a von Klitzing [14]. A tal riguardo, è notevole notare come questo valore sia universale e non dipenda da parametri del materiale con significative implicazioni metrologiche. In condizioni di misura ancora più estreme (temperature $<1K$ e campo magnetico $>10T$), si può invece osservare l'effetto Hall quantistico frazionario in cui il parametro i nell'espressione di R_H può essere un numero razionale poiché il sistema va descritto mediante fermioni composti costituiti da elettroni e quanti di flusso magnetico (premio Nobel per la Fisica 1998) [15].

Da un punto di vista applicativo, sistemi a gas

bidimensionale sono impiegati per realizzare laser a pozzo quantico e transistor ad alta mobilità elettronica (HEMT). Oggi i laser quantistici sono ampiamente utilizzati in sistemi di comunicazione ottica, scanner di codici a barre, *array* di laser e lettori/scrittori di dischi ottici; mentre gli HEMT sono utilizzati in ricevitori a basso rumore, circuiti integrati digitali e circuiti a microonde. D'altra parte, sistemi 2D sono stati anche studiati per realizzare un'elettronica quantistica in cui si sfruttano le proprietà ondulatorie degli elettroni [3]. Ad esempio, nel trasporto in un circuito costituito da un canale di ingresso ed uno di uscita connessi da una struttura ad anello, si può accumulare una differenza di fase tra le onde elettroniche che si propagano nel ramo superiore ed inferiore dell'anello che risulta essere funzione del campo magnetico applicato e dà luogo a oscillazioni dovute ad interferenza (elettronica) costruttiva e distruttiva. Questo fenomeno è noto come *effetto Aharonov-Bohm* (Fig.4c) [16]. Analogamente sono stati realizzati anche interferometri elettronici Mach-Zehnder con cui Rolleau et al. nel 2013 misurarono la lunghezza di coerenza degli stati di bordo nel regime Hall quantistico intero [17, 18].

Quando le dimensioni del sistema sono confrontabili con il libero cammino medio dei portatori, il trasporto delle cariche non avviene più in regime diffusivo, ma balistico, ovvero senza che il portatore subisca collisioni e conservando il proprio momento. In sistemi con confinamento 1D, ad esempio *nanowire* o *quantum point contact*, la conduttanza è trattata come un fenomeno di *scattering* attraverso il conduttore (modello di Landauer-Büttiker) [19, 20, 21]. La conduttanza risulta così essere quantizzata con un contributo per ogni sottobanda i attiva esprimibile mediante la formula

$$G_i = T_i \frac{e^2}{h}$$

dove $\frac{e^2}{h}$ è il quanto di conduttanza e T_i rappresenta la probabilità che gli elettroni vengano trasmessi nel sistema 1D nella sottobanda i [3]. Se $T_i=1$, la conduzione è balistica (assenza di *scattering* nel campione). Tale comportamento può essere osservato in un dispositivo *Quantum Point Contact* (QPC), che consiste in una stretta costrizione tra due regioni elettricamente conduttive (Fig.5). QPC sono stati realizzati per la prima

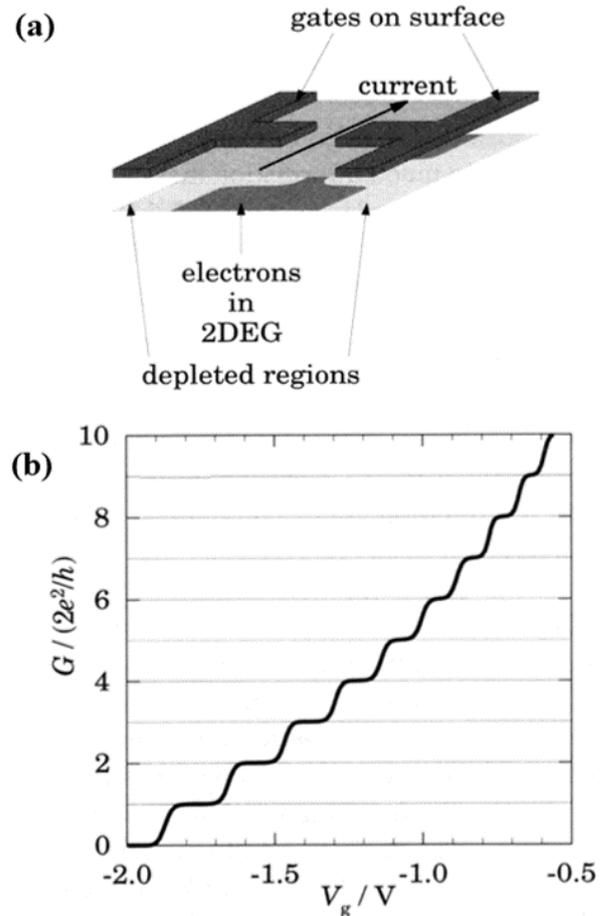
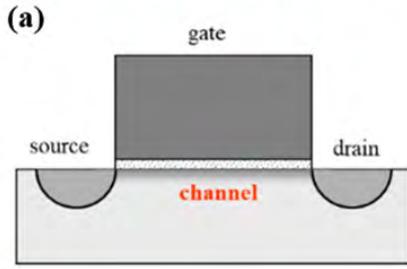


Figura 5: (a) Schema di un dispositivo *Quantum Point Contact* (QPC), realizzato definendo elettrostaticamente una piccola costrizione su una eterostruttura 2DEG. (b) Quantizzazione della conduttanza in un QPC al variare del potenziale di gate (l'elettrodo posto al di sopra del 2DEG permette il controllo della densità di portatori).

volta nel 1988 da Van Wees et al. [22] e, indipendentemente, da Wharam et al. [23] definendo elettrostaticamente piccole costrizioni su una eterostruttura 2D all'interfaccia *GaAs/AlGaAs*. Applicando un voltaggio mediante elettrodi di opportune geometrie, il gas di elettroni può essere localmente svuotato permettendo il confinamento in una seconda direzione. Un altro modo per realizzare delle strutture 1D consiste nel fabbricare dei nanofili (*nanowire*) [24]. Se la larghezza della costrizione è più piccola del libero cammino medio, il trasporto è balistico, la resistenza è determinata solo dalla geometria del *point contact* ed il confinamento nella direzione trasversa ha come risultato la quantizzazione del moto lungo tale direzione.

Infine, gli elettroni possono essere confinati nel-

Field effect transistor (FET)



Single electron transistor (SET)

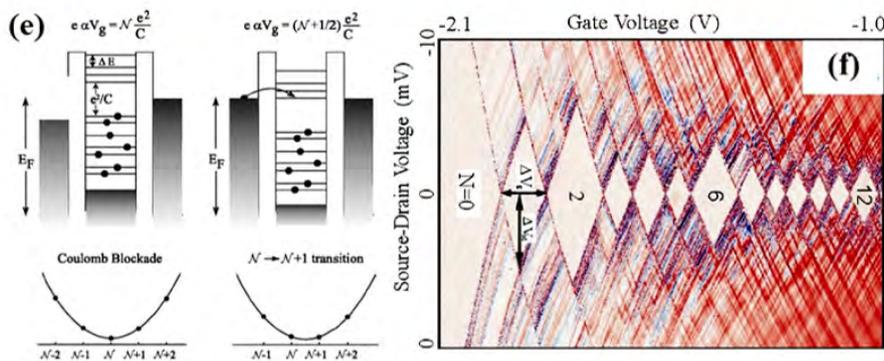
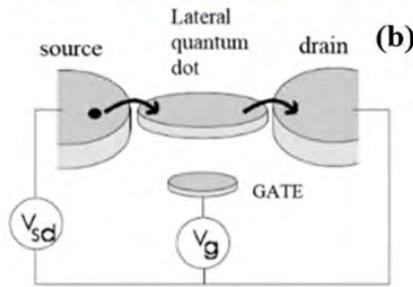


Figura 6: Confronto tra le strutture di (a) un transistor ad effetto di campo (FET) e (b) un transistor a singolo elettrone (SET), si osserva che in quest'ultimo il canale è stato sostituito da un quantum dot separato dagli elettrodi source e drain mediante barriere tunnel. (c, d) Due scene tratte dalla natura per spiegare il Coulomb blockade che caratterizza un quantum dot in un SET, nella prima l'elettrone (lupo) è bloccato, nella seconda invece vi sono le condizioni per il tunneling e può saltare dentro e fuori dall'isola. (e) Principio di funzionamento di un SET: sono illustrate, in alto, la configurazione elettronica con livelli di Fermi negli elettrodi e livelli confinati nel dot ed, in basso, l'energia elettrostatica in regime di Coulomb blockade o in corrispondenza di una Coulomb oscillation. (f) Diagramma a diamante di Coulomb che descrive il tipico andamento della conduttanza in un SET in funzione dei voltaggi drain-source V_{ds} e di gate V_G .

le tre direzioni spaziali all'interno di sistemi 0D, come *quantum dots* a semiconduttore e nanocristalli colloidali ma possono essere considerati tali anche molecole o difetti in strutture 1D. Si possono così realizzare i cosiddetti transistor a singolo elettrone (SET, acronimo di *Single Electron Transistor*) [3]. I primi risalgono già al 1987, ma da allora il loro funzionamento è stato esteso ad altri sistemi materiali, ulteriori funzionalità e fino a temperatura ambiente. Un SET consiste in un'isola o *Quantum Dot* (QD) intesa come una regione estremamente piccola di spazio che può essere occupata da elettroni o lacune e connessa ai terminali di *source* e *drain* mediante giunzioni *tunnel*, che consentono lo scambio di tali portatori, come indicato dalle frecce in Fig.6b. Il terminale di controllo, detto *gate*, è invece accoppiato in maniera elettrostatica o capacitiva all'isola e permette un controllo sull'energia degli stati confinati nel QD. In assenza di accoppiamento con *source* e *drain*, il

QD agisce da isola per gli elettroni e, considerate le piccole dimensioni, possiamo ritenere la carica sull'isola quantizzata e pari a N volte la carica del singolo elettrone. In presenza di accoppiamento, il numero di elettroni N sull'isola può variare per *tunneling* verso *source* o *drain* e si adatta fino a quando l'energia dell'intero circuito non risulta minimizzata.

Sorprendentemente forse, si può analizzare il funzionamento di un transistor a singolo elettrone mediante classiche considerazioni elettrostatiche [3]. Se consideriamo un'isola metallica caratterizzata da una capacità C e con carica totale confinata pari a $Q = Ne$ (dove e è la carica dell'elettrone), l'energia elettrostatica classica totale è data da:

$$E_N = \frac{(Ne)^2}{2C} - NeV_{ext} = \frac{(Q - Q_{ext})^2}{2C} + const,$$

dove $Q_{ext} = CV_{ext}$ è la carica indotta dall'esterno in seguito all'applicazione di un potenziale

elettrostatico V_{ext} . A causa del piccolo numero N di elettroni nel QD, i possibili valori di energia sono quindi punti discreti su una parabola, come illustrato in Fig.6e. Se l'isola è piccola, la differenza energetica tra configurazioni con diversi numeri di elettroni diventa significativa e può essere maggiore dell'energia termica $k_B T$ dando luogo ad effetti osservabili. In tal caso, infatti, l'energia termica non è sufficiente per consentire ad un altro elettrone di entrare o uscire nel QD. Di conseguenza, la carica sul *dot* risulta essere fissata e siamo nel cosiddetto regime di *Coulomb Blockade*, in cui il trasporto viene bloccato (Fig.6c). Se però si riesce a fornire in altro modo l'energia necessaria, è possibile passare ad una configurazione che consente il trasporto di carica per *tunneling* di singoli elettroni. Tale fenomeno avviene quando si portano i livelli con N ed $N+1$ ad essere degeneri, cioè ogni qual volta:

$$E_{N+1} = E_N$$

da cui si ricava che:

$$V_{ext,N} = \frac{e(2N+1)}{2C} \Rightarrow \Delta V_{ext} = \frac{e}{C}$$

Il risultato è l'osservazione di picchi di conduttanza in funzione di V_{ext} che sono noti come *Coulomb Oscillations* e presentano una separazione pari a $\frac{e}{C}$. L'energia richiesta per aggiungere un elettrone, ossia l'energia di caricamento pari a $\frac{e^2}{C}$, può essere fornita sia variando il voltaggio *drain-source* che quello di *gate*, dando origine al famoso *diagramma a diamante* (Fig.6f) che descrive il tipico comportamento di un transistor a singolo elettrone. In questa figura è significativo notare come alcuni diamanti abbiano dimensioni maggiori per particolari numeri "magici" in corrispondenza dei quali una *shell* viene completata. Le condizioni necessarie per osservare questo fenomeno sono (i) una temperatura sufficientemente bassa tale che $k_B T \ll \frac{e^2}{C}$; (ii) una resistenza R_t della barriera tunnel più alta della resistenza quantica $\frac{h}{e^2} = 25,813 \text{ k}\Omega$ in modo da avere un numero definito di elettroni nell'isola sulla scala temporale della misura in quanto il principio di Heisenberg richiede che

$$\Delta E \Delta t = \frac{e^2}{C} R_t C > h \Rightarrow R_t > \frac{h}{e^2}$$

Recentemente, sono stati realizzati sistemi di QD doppi definiti elettrostaticamente su un 2DEG con l'intento di sviluppare una computazione quantistica basata sullo spin [70], argomento su cui torneremo dopo.

Elettronica molecolare

I progressi nella miniaturizzazione dei circuiti integrati sono avvenuti secondo un approccio *top-down*, lavorando su un substrato di silicio di grandi dimensioni e sfruttando i continui miglioramenti nelle tecniche litografiche. Tuttavia, nonostante l'altissima risoluzione attualmente raggiunta, tale strategia non è più sostenibile, a causa delle restrizioni imposte dalla diffrazione e delle limitazioni tecnologiche che sorgono quando la dimensione dei componenti integrati scende sotto i 100 nm e si avvicina a quella di atomi e molecole. Di conseguenza, un approccio *bottom-up* rappresenta un'interessante alternativa, proponendosi di costruire nanodispositivi a partire da singole molecole, aventi dimensioni già in partenza dell'ordine di pochi nanometri.

Proposta per la prima volta nel 1974 in un lavoro di Aviram e Ratner [26], l'elettronica molecolare ha come obiettivo finale l'utilizzo di singole molecole per eseguire le funzioni base dell'elettronica digitale ed ha attratto molto interesse, come possibile alternativa all'odierna tecnologia basata sul silicio [1, 27]. Lo sviluppo dell'elettronica molecolare è stato accelerato dall'avvento delle tecniche a scansione di sonda e della chimica supramolecolare. Le prime permettono di investigare e manipolare singole molecole (premio Nobel per la Fisica 1986). La seconda gioca un ruolo centrale nell'approccio molecolare, in quanto fornisce ai blocchi di costruzione molecolari proprietà di auto-assemblaggio e auto-riconoscimento guidate termodinamicamente (premio Nobel per la Chimica 1987).

La proposta originaria di Aviram and Ratner si basava sull'utilizzo di sistemi molecolari formati da una struttura donore-spaziatore-accettore ($D - \sigma - A$), posizionati tra due elettrodi per ottenere un diodo molecolare con comportamento rettificante in quanto lo stato eccitato $D^+ - \sigma - A^-$ è più facilmente accessibile rispetto allo stato opposto $D^- - \sigma - A^+$ che si trova ad energia maggiore. Metzger et al. [28] fornirono la pro-

va sperimentale della validità della proposta di Aviram-Ratner realizzando monostrati e multi-strati molecolari di questo tipo mediante la tecnica Langmuir-Blodgett e riportando fattori di rettificazione $RR = I(+V)/I(-V)$ fino a 26 (rapporto tra correnti a voltaggio $+V$ e $-V$). Idealmente, si può pensare di usare la parte centrale di una molecola come regione attiva per conduzione, rettificazione, *switching*, memorizzazione, mentre i gruppi funzionali alle estremità possono fornire i siti di legame con gli elettrodi mediante auto-assemblaggio [1, 3, 27].

Un ulteriore passo cruciale per l'elettronica è stata la dimostrazione di un transistor molecolare in cui fosse possibile controllare la conduttanza di una molecola mediante un campo elettrico. Un esempio significativo è il SET molecolare dimostrato da Park et al.[29] impiegando una singola molecola contenente un atomo di cobalto al centro e con due gruppi tiolici ($-SH$) terminali capaci di legarsi ai contatti metallici. Come illustrato in Fig.7, la conduzione risulta assente fino ad un voltaggio V_{ds} di soglia che a sua volta dipende dal voltaggio di *gate* V_g . Questo particolare comportamento è legato ai fenomeni di trasporto a singolo elettrone, attraverso l'atomo di cobalto che fa da tramite per il trasporto e l'accumulo di carica cambiando il suo stato di ossidazione in base alla tensione di *gate*. Si ha passaggio di corrente quando un elettrone guadagna energia tale da permettergli di giungere sull'isola/ione per *effetto tunnel*. Per tali caratteristiche, questo dispositivo è stato anche denominato transistor a singolo atomo. Inoltre, in tale dispositivo, è stato anche evidenziato un comportamento peculiare della conduttanza noto come *effetto Kondo* [3].

Sistemi molto interessanti per l'elettronica molecolare sono le biomolecole, come il DNA e le proteine, per le loro proprietà di riconoscimento, autoassemblaggio, pompaggio ionico e catalisi, che le rendono utili per diverse applicazioni che includono anche *DNA-computing* ai biosensori [27]. Transistor ad effetto di campo basati su basi di DNA modificate e proteine sono stati riportati nei nostri laboratori [30, 31].

Un altro filone molto promettente riguarda l'utilizzo di nanotubi di carbonio (CNT, 1D) e grafene (2D) (Fig.8). In particolare, il grafene è costituito da un singolo piano atomico fatto da atomi di carbonio con ibridazione sp^2 e legati tra

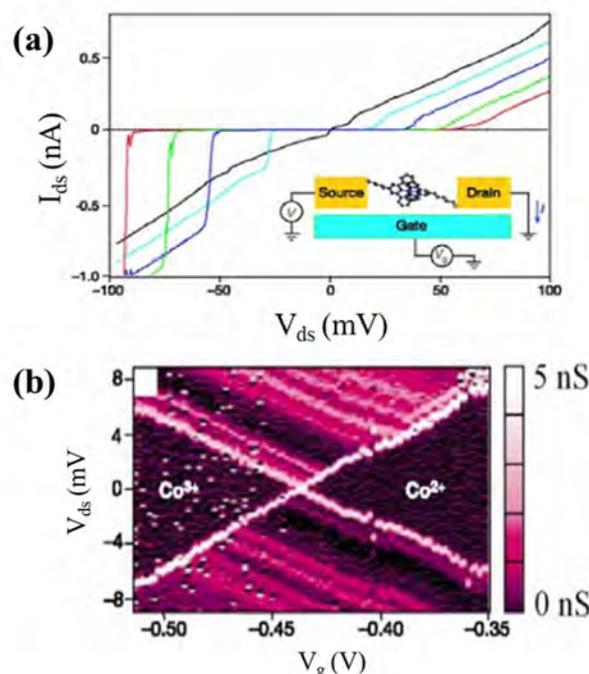


Figura 7: (a) Rappresentazione schematica e andamento della corrente in funzione del voltaggio di un transistor a singolo atomo per diversi valori della tensione di *gate* da 0.4 V (curva rossa) a -1.0 V (curva nera). (b) Mappa della conduttanza differenziale - numericamente estrapolata derivando le curve I-V- in funzione dei potenziali di drain-source e *gate*, con la chiara presenza di Coulomb diamond associati a tunneling di singoli elettroni attraverso lo ione metallico al centro della molecola [29].

loro a formare una struttura esagonale. Sebbene inizialmente si credesse che il grafene non potesse esistere isolato, Geim e Novoselov riuscirono ad isolarlo da un campione di grafite utilizzando semplice nastro adesivo. I loro successivi studi li condussero al premio Nobel per la Fisica 2010 e dimostrarono sperimentalmente le peculiari proprietà elettroniche di questo materiale che presenta bande di conduzione e valenza che si toccano in 6 punti, a tre a tre equivalenti, che sono detti *punti di Dirac* (Fig.8c) [32, 33, 3]. Ebbene, il grafene può essere definito un semimetallo perché in tali punti i portatori possono passare tra le due bande e trasformarsi da elettroni a lacune. Inoltre a differenza dei tradizionali fermioni di Schrodinger della materia condensata, con dispersione parabolica, in questo caso i portatori si comportano come fermioni di Dirac privi di massa, e sono descritti in modo analogo alle particelle di Dirac ultra-relativistiche tipiche della fi-

sica delle particelle elementari studiata al CERN (Fig.8c). Tali proprietà rendono il grafene bipolare, cioè capace di trasportare sia elettroni che lacune, presentando un massimo di conduttanza in funzione del potenziale di *gate* (Fig.8d). “*Arrotolando*” un foglio di grafene, si ottiene invece un nanotubo di carbonio (CNT) che può esser preparato in diversi modi e presentare caratteristiche sia metalliche che da semiconduttore (Fig.8b) oltre ad avere, tra l’altro, eccezionali caratteristiche meccaniche.

Dal punto di vista tecnologico, diversi gruppi hanno dimostrato l’applicabilità di grafene e nanotubi in dispositivi elettronici [4, 34, 35, 36]. I FET (transistor ad effetto di campo) realizzati con CNT sono attraenti a causa dell’elevata mobilità dei portatori di carica e delle ridotte dimensioni. Ad esempio, Tans et al. hanno dimostrato il funzionamento a temperatura ambiente di un transistor a singolo nanotubo di carbonio [37] in cui all’aumentare del voltaggio di *gate* appare e si sviluppa intorno a $V_{ds}=0V$ una regione con bassa conduttività, con una variazione di circa sei ordini di grandezza fino ad un voltaggio di *gate* pari a 10V a causa della modulazione della struttura a bande del nanotubo indotta dai voltaggi applicati. Nel 2001, circuiti logici sono stati anche realizzati utilizzando dispositivi a nanotubi di carbonio (come anche *nanowire* a semiconduttore) [38, 39]. Tuttavia, punti cruciali nella tecnologia dei CNTs riguardano la capacità di controllare l’energia della banda proibita e la chiralità dei nanotubi, nonché il loro posizionamento affinché il circuito funzioni correttamente (una difficoltà condivisa col settore dell’elettronica molecolare, nonostante la possibilità di funzionalizzare le molecole e la loro capacità di auto-organizzazione). Anche la deposizione di un dielettrico di *gate* e la formazione di contatti elettrici a bassa resistenza sono aspetti che presentano criticità tecnologiche.

Da parte sua, il grafene offre notevoli opportunità quando è richiesto un elettrodo ultrasottile ed ha trovato applicazione in dispositivi touch screen, celle solari, batterie, biosensori. Inoltre la sua elevatissima mobilità elettronica ($10.000 - 15.000 cm^2 V^{-1} s^{-1}$) lo rende adatto per transistor RF [40, 41, 42] ed apre la possibilità di realizzare dispositivi con canali estremamente sottili, permettendo la realizzazione di transi-

stor a velocità più elevate senza incontrare gli effetti avversi del canale corto che limitano le prestazioni delle attuali tecnologie. Inizialmente i FET realizzati con grafene utilizzavano grafene esfoliato come canale per il transistor, mentre recentemente sono state ottimizzate tecniche per ottenere grafene epitassiale su substrati di SiC [43, 44].

Come si accennava, il grafene è caratterizzato da una particolare struttura a banda, senza gap energetico, per cui le mobilità degli elettroni e delle lacune sono simili (natura bipolare) (Fig.8). Una conseguenza del trasporto bipolare è però che i rapporti tra le correnti nello stato acceso e spento sono molto piccoli. Per ovviare a tale limitazione, sono stati proposti diversi metodi per introdurre una banda proibita, ad esempio realizzando nano-nastri (*nanoribbon*) di grafene [45] ed oggi il mondo dei materiali 2D si è arricchito di nuovi membri come i dicalcogenuri di metalli di transizione, con caratteristiche simili al grafene e gap variabili [46, 3].

L’elettronica molecolare è quindi senz’altro un campo stimolante. Tuttavia, per pensare di passare alla produzione di massa a livello industriale di dispositivi ibridi su scala molecolare, vi sono ancora notevoli sfide da superare in particolare per quanto riguarda durata di vita e riproducibilità [55]. La dipendenza della conduzione dalla disposizione molecolare e dalle proprietà dell’interfaccia organico-inorganico è ancora oggi troppo alta e limita la riproducibilità del dispositivo. In particolare, la forte dipendenza delle proprietà di trasporto dalla fase di auto-assemblaggio - a causa di cambiamenti locali nell’organizzazione delle molecole - potrebbe essere ridotta utilizzando strati molecolari legati in modo covalente mediante l’impiego di processi, che sfruttano diversi gruppi funzionali (sistemi auto-assemblati basati sulle deboli interazioni sono troppo influenzati da perturbazioni esterne come il cambiamento di solvente, pH, ecc.). Inoltre, la degradazione durante il funzionamento è un grave inconveniente intrinseco ai dispositivi molecolari. Potenzialmente i problemi sembrano più tecnici che concettuali ma il raggiungimento di riproducibilità e stabilità nel tempo rappresenta la sfida principale dell’elettronica su scala molecolare, al di là dei dispositivi realizzati con film molecolari, polimeri, grafene e nanotubi su

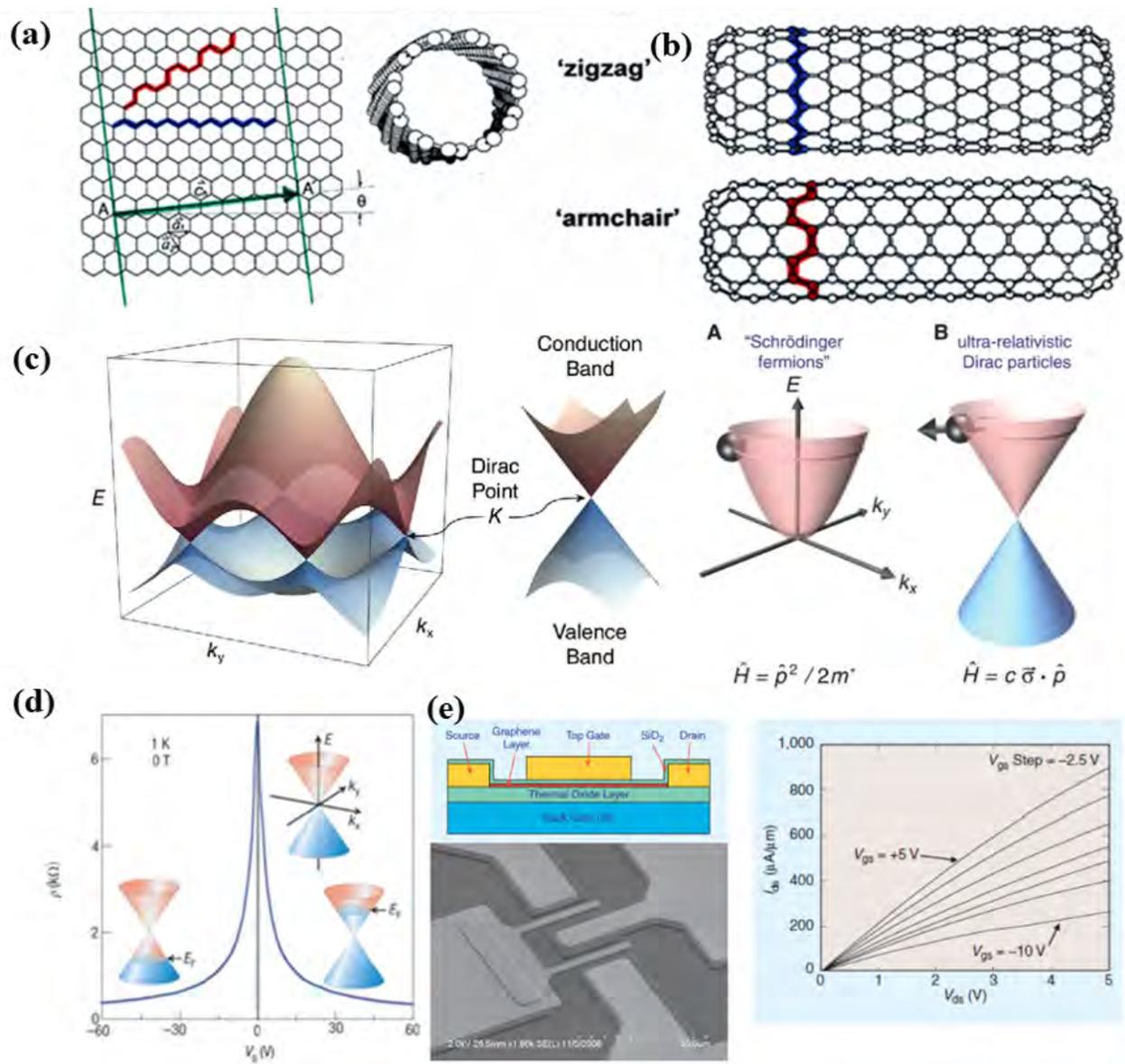


Figura 8: (a) Schema del grafene e (b) dei nanotubi di carbonio (CNT); (c) a destra, struttura a bande del grafene che evidenzia la presenza di 6 punti di Dirac in cui bande di conduzione e valenza si toccano; a sinistra, confronto tra portatori nel grafene, fermioni di Dirac e particelle di Dirac ultra-relativistiche; (d) natura bipolare del grafene dimostrata dalla dipendenza della resistenza dal potenziale di gate [33]; (e) schema e immagine SEM di un transistor ad effetto di campo a due gate realizzato con grafene e sua risposta elettrica [34].

scale maggiori.

A conclusione di tale analisi delle prospettive, è utile menzionare come oltre al trasporto di carica anche l'informazione possa essere codificata su scala molecolare utilizzando molecole bistabili e cambiamenti strutturali in macchine molecolari (vedasi l'articolo di Credi e Balzani in questo stesso numero di Ithaca) o molecole con proprietà magnetiche ben definite e controllabili (quali i magneti molecolari o i cosiddetti sistemi *spin crossover* menzionati nel paragrafo seguente).

Spintronica

Oltre agli approcci volti alla miniaturizzazione discussi finora, una strategia alternativa per migliorare le prestazioni riguarda l'utilizzo di ulteriori parametri fisici / gradi di libertà per codificare e manipolare l'informazione. In tale ambito, la spintronica (da *SPIN electRONICS*) si propone manipolazione, immagazzinamento e trasferimento dell'informazione mediante lo spin, in aggiunta o al posto della carica elettrica [48, 3]. Infatti se i CMOS sfruttano la carica elettrica per

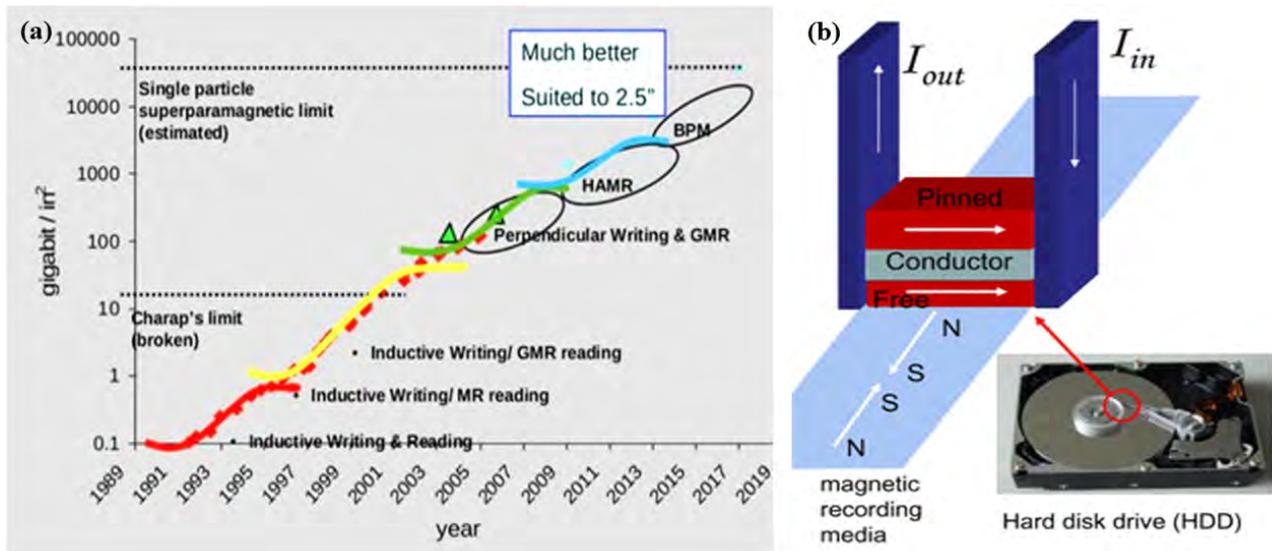


Figura 9: (a) Evoluzione temporale della densità di memorizzazione dei dati in funzione del tempo (Kryder Law, riprodotta da [47]), con riferimento all'introduzione delle nuove tecnologie magnetoresistive; (b) schema di una testina di lettura a spin valve in un hard disk.

codificare l'informazione e i livelli logici (bits binari "0" e "1") corrispondono a valori distinti di corrente, nei dispositivi spintronici si sfrutta lo spin dell'elettrone, bistabile in campo magnetico, per definire i bits "1" (*spin-up*) e "0" (*spin-down*). Tenendo conto che l'energia dissipata durante lo *spin flip* (evento di *switching* logico) è pari alla differenza di energia tra i due stati di polarizzazione, ne consegue anche una significativa riduzione della dissipazione per *effetto Joule*. A questo si aggiunge la possibilità di integrare assieme gli elementi di computazione e memorizzazione, di realizzare sensori ultrasensibili e memorie non volatili ad alta densità e di sviluppare tecnologie per la computazione quantistica.

La nascita della spintronica può essere ricondotta alla scoperta della magnetoresistenza gigante (GMR) ad opera di A. Fert e P. Grunberg, in strutture costituite da multistrati (ferro)magnetici separati da film metallici non magnetici [49, 50]. Se gli strati magnetici hanno magnetizzazioni allineate, la struttura ha una bassa resistenza, mentre se sono anti-parallele, la resistenza è considerevolmente più alta. Il motivo è semplice. La magnetizzazione di uno strato metallico magnetico è strettamente collegata alla presenza di una popolazione maggioritaria di portatori con uno specifico spin. Poiché nel trasporto di carica, gli elettroni tipicamente tendono a preservare lo spin (in assenza di interazioni di *scattering*), ne

segue che un orientamento parallelo delle magnetizzazioni corrisponde a molti elettroni con un determinato spin nello strato magnetico di partenza che possono facilmente trasferirsi nello strato successivo senza cambiare spin in quanto sono anche lì presenti molti stati per loro disponibili. Viceversa, se gli strati adiacenti hanno magnetizzazioni antiparallele, allora per trasferirsi gli elettroni devono cambiare il loro spin mediante qualche tipo di interazione/*scattering* esterno che comporta un loro "rallentamento" ed una diminuzione della conducibilità. In particolare, Fert e Grunberg registrarono valori di magnetoresistenza del 50% a bassa temperatura in multistrati di *Fe/Cr* [49, 50]. L'impatto enorme sulla ricerca nel settore è tale che nel 2007 i suoi scopritori furono insigniti del premio Nobel per la Fisica. La struttura GMR è stata poi migliorata bloccando la magnetizzazione di uno degli strati ferromagnetici, detto *fixed layer*, accoppiandolo (per *exchange-bias*) ad un film antiferromagnetico, mentre l'altro ferromagnete costituisce la regione attiva del sensore, in quanto è sufficiente un basso campo per invertire la sua magnetizzazione (circa 10 Oersted) ed è per questo detto *free layer*. Tale struttura è nota come *spin-valve* ed è stata alla base della rivoluzione che ha interessato la testina di lettura degli hard disk magnetici (Fig.9). In una struttura TMR (*tunnel magnetoresistance*), anche detta MTJ (*magnetic tun-*

nel junction), sostituendo lo *spacer* metallico non ferromagnetico con un film isolante è possibile ottenere valori di magnetoresistenza ancora maggiori a temperatura ambiente grazie al fatto che con la presenza del film più resistivo è possibile indurre una corrente trasversale. Attualmente è stata raggiunta sperimentalmente una magnetoresistenza del 604% a temperatura ambiente in giunzioni *tunnel* costituite da *CoFeB/MgO/CoFeB*. In entrambe le strutture, GMR e TMR, alle due configurazioni con alta e bassa resistenza è possibile associare i bit 0 e 1 per la memorizzazione o lettura dei dati. Ad esempio è possibile realizzare memorie RAM magnetoresistive (le cosiddette MRAM, *magnetoresistive random access memory*), che consentono di immagazzinare l'informazione negli stati magnetici ed accendere un computer come un qualsiasi elettrodomestico senza dover caricare sistema operativo e software nella RAM. Inoltre, l'introduzione della tecnologia TMR per le testine di lettura ha permesso lo sviluppo di supporti ad alta densità di memorizzazione, permettendo il raggiungimento di 1Tbit*inch², data la maggiore sensibilità raggiunta nella rivelazione di campi magnetici.

L'innovazione portata dall'introduzione delle testine GMR e TMR ha consentito di compiere un notevole passo in avanti rispetto alle tecnologie precedenti, tuttavia il trend descritto dalla *legge di Kryder* (Fig.9, analogo della *legge di Moore* ma riferito alle prestazioni dei sistemi di immagazzinamento dati) è destinato a rallentare man mano che ci si avvicina al limite fisico dei supporti di memorizzazione magnetica dovuto principalmente a due fattori. Il primo è rappresentato dal cosiddetto *limite superparamagnetico* [3], in quanto continuando a ridurre le dimensioni dei singoli bit magnetici essi diverranno assimilati a nanoparticelle magnetiche e come tali saranno costituiti da un singolo dominio di Weiss la cui magnetizzazione risulterà ad un certo punto instabile a temperatura ambiente e quindi non più impiegabile per memorizzare informazione. Il secondo limite è dettato dal carattere non locale del campo magnetico utilizzato per la scrittura, che comporterebbe la perturbazione dei bit adiacenti a quello d'interesse. Per ovviare a questo problema da un lato si stanno sviluppando nuove architetture, quale ad esempio le memorie STT-MRAM (*spin transfer torque MRAM*) e dall'altro

si sta investigando l'impiego di materiali multifunzionali come i materiali multiferroici magnetoelettrici [3].

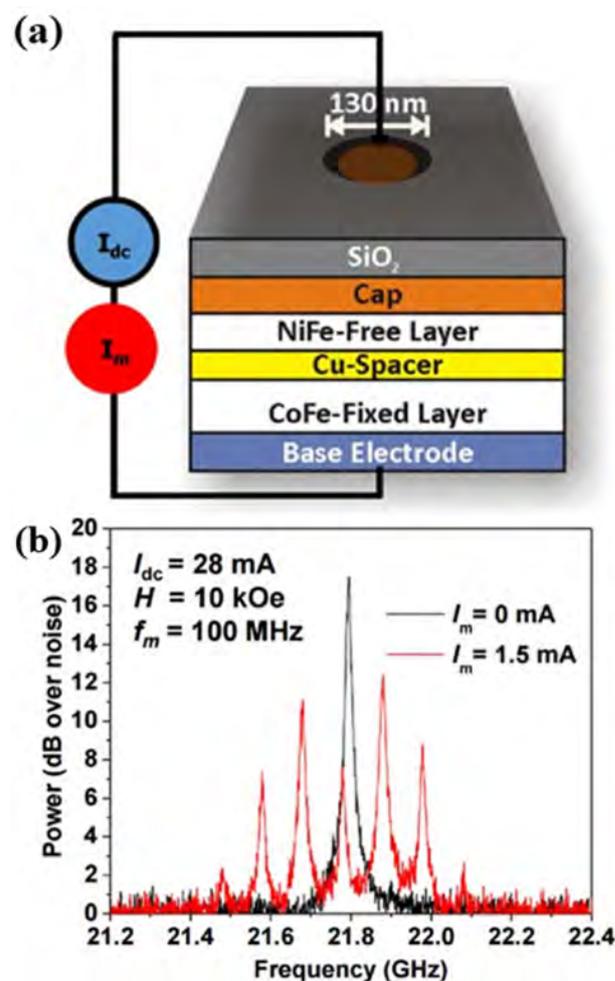


Figura 10: (a) Rappresentazione schematica della struttura di un nano-oscillatore spin torque alimentato con correnti DC e RF. (b) Spettro caratteristico del dispositivo con e senza modulazione RF [51].

Nelle memorie STT-MRAM, l'informazione codificata viene modificata iniettando una corrente spin polarizzata nella giunzione magnetoresistiva per invertire la magnetizzazione della regione attiva, sfruttando un fenomeno noto come *spin-torque*. Oltre alla scalabilità, l'STT-MRAM ha il vantaggio del basso consumo di energia rispetto alle memorie MRAM che sfruttano campi magnetici per la scrittura. Per comprendere la maturità e le potenzialità delle memorie STT-MRAM basti sapere che quest'anno nel corso dell'*International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, Intel ha annunciato di essere pronta per la produzione su larga scala di STT-MRAM integrabili all'interno

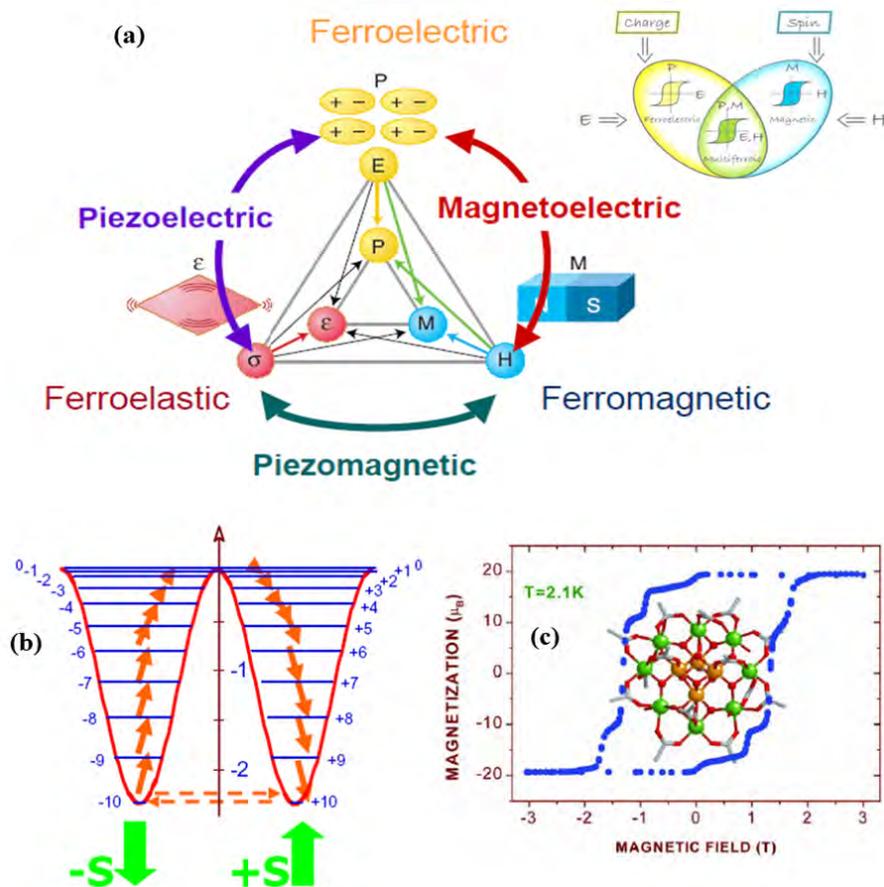


Figura 11: (a) Materiali multiferroici che presentano la coesistenza di due o più ordini ferroici primari (ferromagnetismo, ferroelectricità o ferroelasticità) con possibili accoppiamenti tra essi (magnetoelastico, piezoelettrico o piezomagnetico). (b) Schema dei livelli energetici del multipletto fondamentale $S = 10$ di un magnete molecolare in campo nullo, con tunneling quantistico della magnetizzazione tra livelli degeneri indicato da frecce tratteggiate e visibile nella (c) curva di isteresi magnetica di un cristallo di Mn_{12} a 2.1 K nella forma di caratteristici step e plateau.

di chip e SoC e che a giugno *Everspin Technologies* ha completato l'attività di sviluppo ed avviato la produzione pilota di 1-Gigabit (Gb) STT-MRAM, avendo come target principale le infrastrutture aziendali e i *data center* che possono utilizzare la tecnologia MRAM per aumentare l'affidabilità e le prestazioni.

Inoltre, sfruttando strutture simili e la combinazione tra fenomeni spintronici e nanomagnetici (quali STT, GMR, TMR e onde di spin), è oggi possibile realizzare oscillatori nanoscopici, noti come *Spin Torque Nano-Oscillator* – *STNO* che sono integrabili su chip con i CMOS e possono generare microonde (MW) ampiamente tunabili in frequenza. In pratica, in una tipica struttura STNO costituita da un *trilayer* di *NiFe/Cu/CoFe*, l'elemento attivo è rappresentato dal film di *NiFe* (tipicamente di 2-5 nm) in cui un'onda di spin è eccitata dall'iniezione di un'alta densità di corrente. Il *fixed layer* di *CoFe* (tipicamente di 10-20 nm) ha la funzione di permettere lo *spin torque transfer* nel film di *NiFe* mediante la riflessione degli elettroni all'interfaccia *Cu/CoFe*. Gli elettroni riflessi saranno polarizzati in spin in direzione opposta a quella del *CoFe* e, nel caso in cui la ma-

gnettizzazione di entrambi i layer *NiFe* e *CoFe* è parallela, la corrente di polarizzazione riflessa avrà direzione opposta anche a quella del *NiFe*. Pertanto l'interazione della corrente riflessa con l'interfaccia *NiFe/Cu*, tenderà a destabilizzare la magnetizzazione del *NiFe* inducendo, se la corrente è abbastanza alta, uno stato auto-oscillante stazionario, caratterizzato dalla generazione di un'onda di spin la cui frequenza può essere modulata agendo sull'intensità del campo magnetico applicato e sulla densità di corrente. Siccome la struttura è del tipo GMR, l'oscillazione della magnetizzazione del *NiFe* si rifletterà in un'oscillazione della resistenza del dispositivo alla stessa frequenza, determinando la generazione di un potenziale oscillante nel range delle microonde attraverso la struttura. Di conseguenza l'*STNO* permette di convertire un segnale di corrente DC in uno RF.

L'introduzione di materiali magnetoelettrici in strutture tunnel magnetiche può invece consentire lo sviluppo di memorie magnetiche RAM in cui l'informazione può essere registrata elettricamente (*MERAM*, *MagnetoElectric Random Access Memory*). Recentemente i materiali multiferroici

ci hanno attratto notevole attenzione per la loro caratteristica di combinare diverse proprietà ferroiche quali ferromagnetismo, ferroelettricità o ferroelasticità assieme ed in modo intercorrelato tramite accoppiamenti di tipo piezoelettrico, piezomagnetico o magnetoelettrico [52, 53, 3]. In particolare, in quest'ultimo caso è possibile controllare le proprietà magnetiche (elettriche) mediante l'applicazione di un campo elettrico (magnetico), aprendo nuove frontiere applicative. Ad esempio, M. Bibes e A. Barthélémy hanno proposto la realizzazione di un'architettura ME-RAM, in cui depositando una struttura *spin-valve* (GMR o TMR) su un film di $BiFeO_3$ (BFO, film multiferroico magnetoelettrico) è possibile invertire la magnetizzazione di un ferromagnete (FM) agendo sulla polarizzazione elettrica del film di BFO [54]. In particolare, invertendo la direzione di polarizzazione elettrica, cambiano le proprietà antiferromagnetiche del multiferroico e, di conseguenza, la configurazione magnetica della spin valve passa da parallela ad antiparallela per *exchange bias*. I vantaggi risiedono in particolare nella possibilità di miniaturizzare in modo molto più semplice il campo elettrico impiegato per il controllo della risposta del dispositivo, al posto di un campo magnetico che richiede una struttura in cui fluire una corrente.

Un altro filone di ricerca molto attivo nel settore riguarda la spintronica molecolare e l'implementazione nei dispositivi di strati organici e molecolari [3, 56]. Oltre ai vantaggi tecnologici dell'elettronica organica con la possibilità di sviluppare componenti flessibili e a basso costo di produzione, un aspetto fisico rilevante risiede nel basso accoppiamento spin-orbita nei materiali organici dovuto alla loro composizione in termini di atomi di peso ridotto come carbonio e idrogeno (l'interazione spin orbita infatti scala con Z^4 , dove Z è il numero atomico). Inoltre bassa è anche l'interazione iperfine tra gli spin dei portatori mobili e quelli nucleari (il principale isotopo del carbonio non ha spin nucleare). Di conseguenza, lo spin dei portatori interagendo debolmente nella materia può mantenere l'informazione codificata per un periodo più lungo (il tempo di rilassamento è dell'ordine del μs più grande che negli inorganici dove è tipicamente dell'ordine del ns). È inoltre possibile immagazzinare l'informazione su scala molecolare impiegando le

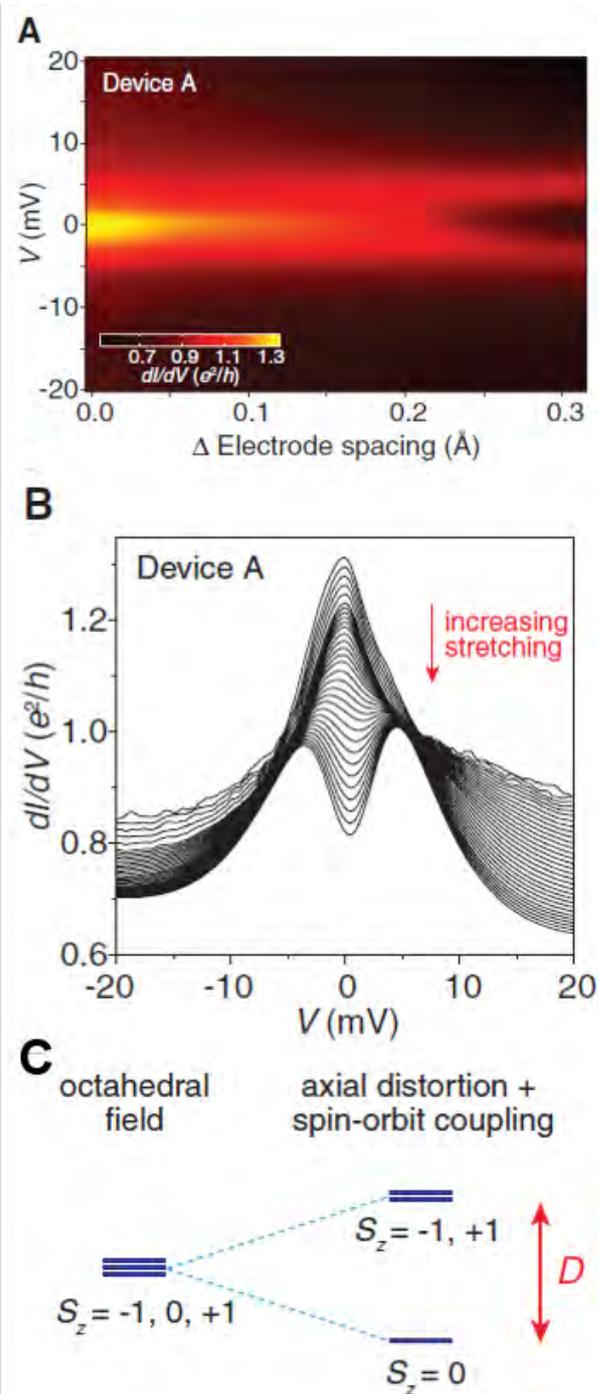


Figura 12: (A, B) conduttanza differenziale in funzione del voltaggio e della spaziatura tra gli elettrodi che evidenzia la presenza e scomparsa dell'effetto Kondo in seguito al (C) passaggio da uno stato a basso spin ad uno ad alto spin in seguito alla variazione del campo molecolare per l'applicazione di una pressione/deformazione meccanica (riprodotta da [57]).

proprietà peculiari dei cosiddetti Magneti a Singola Molecola (o *Single Molecule Magnets*, SMM) costituiti da un nucleo interno magnetico con una *shell* circostante di ligandi organici. I SMM

sono caratterizzati da uno stato fondamentale ad alto spin, anisotropia magnetica, deboli interazioni intermolecolari, ed evidenziano fenomeni di bistabilità magnetica, utili per immagazzinamento dell'informazione. Inoltre, i SMM presentano fenomeni fisici unici come il *tunneling* quantistico macroscopico della magnetizzazione, che è all'origine del comportamento a gradini del ciclo di isteresi, caratterizzante questi materiali. Tutte queste caratteristiche li rendono idonei per numerose applicazioni ed anche come *qubits* per la computazione quantistica oltre l'immagazzinamento dati su scala molecolare. Altri sistemi molecolari particolarmente rilevanti sono i cosiddetti *spin crossover*, caratterizzati dalla possibilità di poter variare il loro stato fondamentale tra due configurazioni magnetiche (ad alto e basso spin) mediante stimoli esterni quali luce, campo elettrico, temperatura e pressione. Recentemente è stata investigata da vari gruppi la loro integrazione in spin transistor molecolari, aventi una risposta controllabile definendo lo stato fondamentale con uno stimolo esterno. Ad esempio, Parks et al. [57] li hanno introdotti in nanogiunzioni controllabili meccanicamente dimostrando lo *switching* tra stato ad alto o basso spin con la conseguente attivazione e scomparsa dell'effetto Kondo in conseguenza dell'applicazione di una deformazione meccanica (Fig.12).

Paradigmi alternativi di computazione

Transistor e tecnologie CMOS sono stati protagonisti dell'evoluzione della potenza di calcolo negli ultimi decenni. Andando più indietro nel tempo però diverse erano le basi per la computazione, dai dispositivi elettromeccanici ai *solid state relay* ai *vacuum tubes* (Fig.1). Via via le tecnologie sono state cambiate quando si incontravano difficoltà di miniaturizzazione o dissipazione di potenza. Oggi siamo nuovamente in queste condizioni e nuovi paradigmi di computazione sono proposti ed esplorati con l'obiettivo di superare tali limiti adottando nuove architetture. Prima di descriverle, è utile introdurre alcuni concetti legati alla complessità computazionale al fine di comprendere meglio le motivazioni delle ricerche condotte ed i potenziali vantaggi delle nuove

strategie avanzate.

In teoria della complessità computazionale, si distinguono due principali classi di complessità [58, 59]. Un problema decisionale è detto di *tipo P* se può essere risolto con una macchina di Turing deterministica mediante un algoritmo polinomiale in grado di fornire una risposta di tipo *si/no*; in tal caso il tempo di risoluzione risulta anch'esso polinomiale rispetto alla dimensione dei dati di ingresso. Un problema è detto invece di *tipo NP* quando soluzioni positive possono essere verificate in tempo polinomiale, o, equivalentemente, la soluzione può essere trovata in tempo polinomiale con una macchina di Turing non deterministica. Due famosi problemi di questo tipo sono la fattorizzazione in numeri primi (impiegata anche per la realizzazione di chiavi crittografiche) ed il problema del commesso viaggiatore. Infatti è ad esempio molto facile verificare se un dato insieme è costituito da divisori di un numero n assegnato, viceversa identificare i divisori conoscendo solo tale numero n richiede un tempo che aumenta molto velocemente col numero di cifre di cui n è composto.

Tra i nuovi paradigmi proposti, è particolarmente significativa l'idea del matematico Leonard Adleman di una computazione molecolare. Nel suo famoso lavoro del 1994, Adleman dimostra come sia possibile risolvere il problema del commesso viaggiatore (o più esattamente un *Hamiltonian path problem* a sette punti) utilizzando DNA, biochimica e hardware biologico anziché tecnologie a base silicio [60]. Date un certo numero di città, di connessioni per viaggiare tra esse, una città di partenza ed una di arrivo, il problema consiste nel trovare (se esiste) un percorso per visitarle tutte, una sola volta, tenendo conto dei vincoli assegnati. La complessità di tale problema è non polinomiale e lo rende non risolvibile se il numero di città è alto. L'elegante soluzione proposta da Adleman è di codificare il nome di ogni città attraverso una specifica sequenza di basi di DNA ed i possibili tragitti tra esse come sequenze complementari alla parte finale (iniziale) della sequenza della città di partenza (arrivo) (Fig.13). In tal modo, mescolando tali sequenze, si può sfruttare il loro numero (dell'ordine del numero di Avogadro quindi 10^{23}) e le probabilità statistiche per far sì che tutte le possibili combi-

nazioni si auto-assemblino grazie alle capacità di riconoscimento ed ibridazione di catene complementari di DNA. A quel punto, per trovare la soluzione serve "solo" pescare tra le sequenze ottenute se vi sono quelle con le giuste caratteristiche (città di partenza e di arrivo, lunghezza della sequenza correlata al numero di città visitate ed assenza di città/sequenze ripetute) e sequenziarle per avere l'eventuale soluzione. Come dimostrato da Adleman, questo è possibile impiegando metodi di biologia molecolare. Dopo tale prima dimostrazione concettuale, vi sono stati successivi progressi con la costruzione di varie macchine di Turing [61]. Per tale idea ed i suoi lavori Adleman ha ricevuto il premio Turing 2002, spesso definito il premio Nobel della *Computer Science*.

Un'ulteriore interessante proposta è quella nota col nome di *quantum cellular automata*, acronimo QCA [3], che ha attratto notevole attenzione sia per le dimensioni ridotte (eventualmente anche su scala molecolare come nella proposta di Lent [64]) che per le caratteristiche di consumo energetico estremamente basso. Infatti si tratta di un modello non basato sul trasporto di carica con bit codificati nel passaggio di corrente, bensì su una redistribuzione di carica su *dot* o siti molecolari redox-attivi. Come illustrato in Fig.14, l'unità base è un sistema in cui le cariche possono disporsi in quattro diverse posizioni ma tendono ad occupare una diagonale per minimizzare la repulsione elettrostatica. I bit "1" e "0" corrispondono quindi a due configurazioni alternative con due cariche disposte lungo l'una o l'altra delle diagonali. Una catena di tali unità permette di trasferire l'informazione senza passaggio di carica (e conseguente dissipazione) perché ogni cella influenza elettrostaticamente la successiva portando le cariche a distribuirsi lungo la medesima diagonale. Si può inoltre realizzare un QCA *inverter* sdoppiando il segnale su due linee parallele che poi interagiscono con la cella di *output* inducendo un'orientazione lungo la diagonale opposta delle cariche in essa. Il gate logico di base nella computazione QCA è poi il cosiddetto *majority gate* (Fig.14) in cui tre celle si incontrano in corrispondenza di una cella di output il cui valore è determinato dalla maggioranza degli input. È significativo sottolineare come tale *ga-*

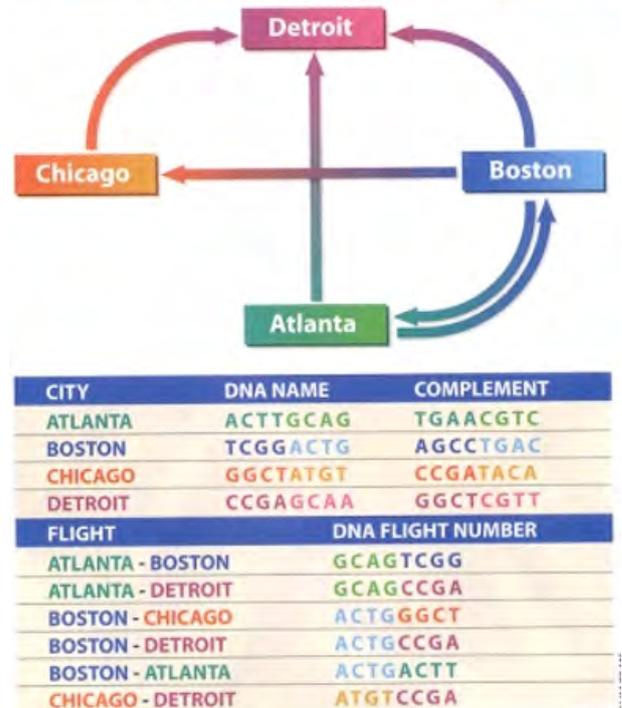


Figura 13: DNA computing. Tale approccio ha permesso la risoluzione del problema del commesso viaggiatore, un tipico problema di complessità non polinomiale [60, 3]. Figure riprodotte da [62, 63].

te possa essere impiegato come un *gate AND/OR* programmabile, fissando uno dei tre input. Infatti modificando l'input A, si può impostare la funzionalità tra $B \text{ AND } C$ e $B \text{ OR } C$. La possibile combinazione di *inverter* e *majority gate* fornisce completezza logica all'architettura QCA.

Il settore più promettente per conseguire un significativo miglioramento delle prestazioni appare quello della computazione quantistica [65, 66, 67, 3] su cui si stanno concentrando notevoli finanziamenti e fondi, basti pensare alla *Quantum Technology Flagship* adottata in Europa ed ai notevoli investimenti di aziende come *Intel* o *Google*. In un computer quantistico, i bit classici "0" e "1" sono sostituiti da bit quantistici (o *qubit*,

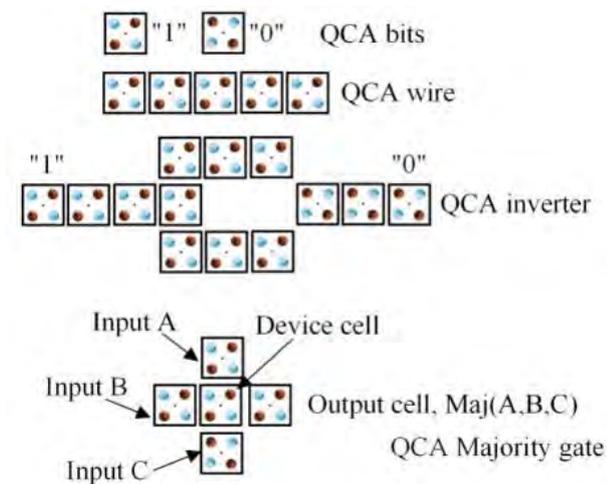


Figura 14: Elementi base della computazione con quantum cellular automata. [1, 3, 64].

vedasi Fig.15) che, come conseguenza delle leggi della fisica quantistica, possono assumere stati $|0\rangle$ o $|1\rangle$ o trovarsi in una combinazione lineare di essi rappresentabile sulla cosiddetta *sfera di Bloch*. Il vantaggio di tale approccio è il parallelismo intrinseco nell'utilizzo di *qubit*. Difatti, se un singolo qubit può valere uno, zero o una sovrapposizione di essi, due *qubit* possono trovarsi in una sovrapposizione quantistica di 4 stati ($|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$ o $|11\rangle$) che diventano 8 per tre *qubits* e corrispondono a ben 2^N bit classici nel caso di N *qubit*. Quindi le capacità di un computer quantistico crescono esponenzialmente fornendo un elevato grado di parallelismo. Utilizzando *gate* quantistici corrispondenti ad operatori che agiscono sugli stati di input per generare quello di output, si è così dimostrata la possibilità di implementare algoritmi quantistici quale l'algoritmo di Shor per la fattorizzazione in numeri primi in un tempo polinomiale rispetto al numero di cifre e la capacità quindi di oltrepassare metodi crittografici RSA (Rivest–Shamir–Adleman). Nel 2001, tale algoritmo è stato implementato usando la risonanza magnetica nucleare [68].

Per implementare protocolli di computazione quantistica, bisogna innanzitutto dare ai *qubit* una rappresentazione fisica robusta, nella forma di sistemi a due stati. Rappresentazioni attrattive sono sistemi atomici a due livelli, fotoni o spin. Nell'interessante articolo di rassegna [66] si fa un quadro dettagliato della situazione al 2010 con una discussione su vantaggi e svantag-

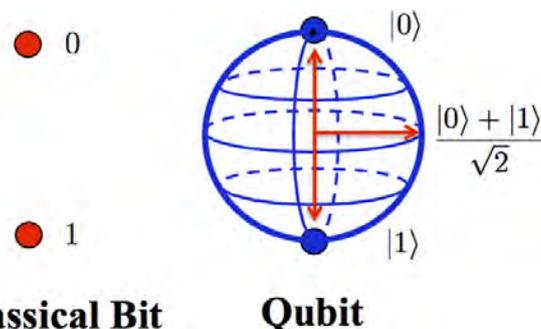


Figura 15: Confronto tra bit classico e qubit rappresentato sulla sfera di Bloch.

gi di tali diverse implementazioni. In generale, un aspetto cruciale riguarda la decoerenza del sistema (ed il suo tempo caratteristico) che comporta inevitabilmente una perdita di informazione. Complessivamente, le condizioni necessarie per implementare un computer quantistico sono riassunte nei famosi criteri di DiVincenzo [67]: scalabilità, possibilità di inizializzare il sistema, lunghi tempi di decoerenza, un set universale di *gate* quantistici e la capacità di misura del *qubit*. A questi poi ne sono stati aggiunti altri due per le *quantum communication*: interconvertibilità tra *qubit* fisici e possibilità di trasmettere fedelmente *qubit* volanti.

Nel settore della computazione quantistica, quantum dots e spin assumono nuovamente un ruolo chiave per implementare approcci allo stato solido, che rappresentano un'estensione obbligatoria rispetto a sistemi atomici isolati per questioni di scalabilità. I quantum dots sono interessanti per la possibilità di isolare dall'esterno il *qubit* codificato [69], inoltre possono essere realizzati su strutture 2D con configurazioni definite (es. doppi quantum dots accoppiati) ed elettrodi opportunamente posizionati per controllarne gli stati confinati. La codifica dell'informazione quantistica in *spin-qubit* in QDs è invece promettente per gli alti (rispetto agli *charge-qubit*) tempi di rilassamento dello spin dell'ordine dei ms ed incrementabili riducendo le interazioni spin-orbita ed iperfini ad esempio mediante l'utilizzo di campioni isotopicamente purificati [70]. Inoltre sono oggi stati dimostrati vari protocolli per inizializzazione, lettura e scrittura dello stato di spin mediante conversione di segnali da spin a carica ed utilizzo di campi elettrici, magnetici ed *electron spin resonance* [70]. Ad esempio, Petta et

al. hanno dimostrato la manipolazione coerente di spin di elettroni in sistemi a doppio quantum dot accoppiati utilizzando un QPC per la lettura dello stato ed agendo sui potenziali applicati agli elettrodi per portare inizialmente i due elettroni sullo stesso dot in modo da preparare uno stato di singoletto e poi separandoli per manipolarli, lasciarli evolvere e riportarli sullo stesso dot per misurare la probabilità di singoletto (Fig.16) [72]. Oltre allo spin di elettroni confinati elettrostaticamente, anche lo spin nucleare di un'impurezza donore può essere adoperato [71, 73], come ad esempio atomi di fosforo in matrice di silicio che (preparando campioni isotopicamente purificati) hanno consentito il conseguimento di eccellenti tempi di coerenza $>1s$ [74, 75].

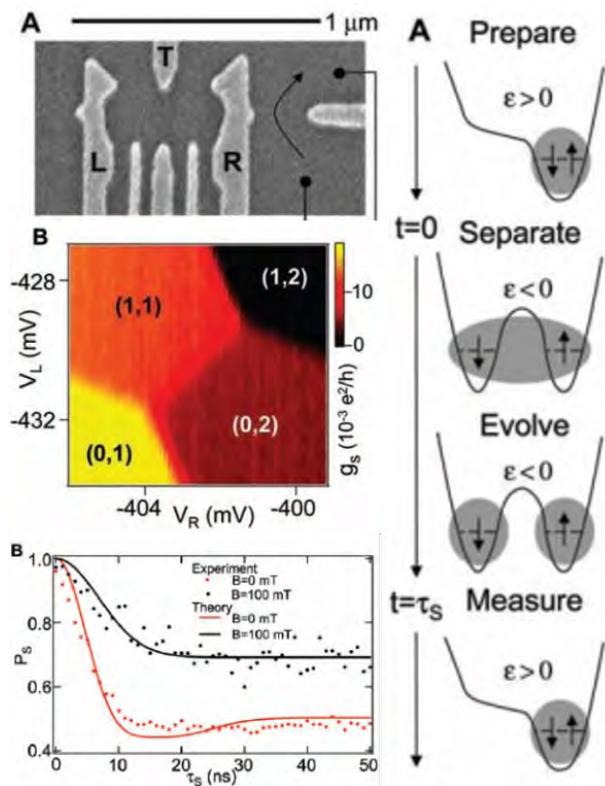


Figura 16: Manipolazione coerente di spin di elettroni in sistemi a doppio quantum dot [72].

Anche centri di colore NV (*nitrogen vacancy*) nel diamante possono essere impiegati per *spin-qubit* con lunghi tempi di coerenza (~ 1 ms per spin elettronico e >1 s per spin nucleare) anche a temperatura ambiente. Lo stato fondamentale di un centro NV è caratterizzato da uno stato di tripletto con sublivello $m_s = \pm 1$ due volte degenerare e frequenza di transizione tra $m_s = 0$ e $m_s = \pm 1$

di 2.87 GHz, che cade nel regime di frequenza di lavoro dei *superconducting qubit* cui il sistema può essere accoppiato. Inoltre, il centro di colore può essere eccitato tramite un laser ad uno stato eccitato che conserva m_s per inizializzare il sistema nello stato $|0\rangle$ a causa di una diversa efficienza del processo non radiativo di rilassamento. Di conseguenza, i centri di colore possono essere accoppiati sia a frequenze ottiche che alle microonde, per cui possono essere utilizzati come un'interfaccia quantistica tra sistemi ottici ed a stato solido (quali *superconducting qubit*) rendendo possibili studi quantistici tra centri NV distanti tra loro, l'interferenza quantistica tra due fotoni ottici polarizzati prodotti da due NV situati in campioni diversi di diamante e fenomeni di *quantum entanglement* tra un fotone ottico polarizzato e un NV qubit [76].

Recentemente, la combinazione di differenti eccitazioni fondamentali costituisce un nuovo trend per applicazioni in computazione quantistica, come premessa per lo sviluppo di tecnologie e protocolli quantistici ibridi [77, 78, 79]. Infatti, codificare l'informazione in diversi sistemi fisici può essere vantaggioso per superare le strette limitazioni in termini di scale temporali di decoerenza e capacità di processamento dell'informazione, che possono essere difficili da combinare assieme. A tal riguardo, un aspetto fondamentale è la capacità di raggiungere un regime di accoppiamento forte (*strong coupling*) tra le rispettive eccitazioni fondamentali nei diversi sistemi in modo da poter trasferire l'informazione tra essi. Recenti lavori dimostrano la capacità di ottenere una robusta ibridazione tra quanti di luce e diverse eccitazioni fondamentali con atomi intrappolati, *nitrogen vacancy centers, qubit* a superconduttore e impurezze di spin. In generale per conseguire un accoppiamento forte si utilizzano cavità risonanti o guide d'onda. Rispetto a sistemi di spin paramagnetici, una nuova direzione riguarda l'accoppiamento con sistemi ferro/ferri-magnetici ed onde di spin, che per la maggior densità di spin facilitano un accoppiamento forte [79, 80]. Per implementare protocolli di trasporto a lunga distanza di *spin-qubit* possono essere impiegate come *quantum bus* anche altre onde viaggianti come le onde acustiche di superficie (SAW). Infine recenti studi stanno investigando i potenziali

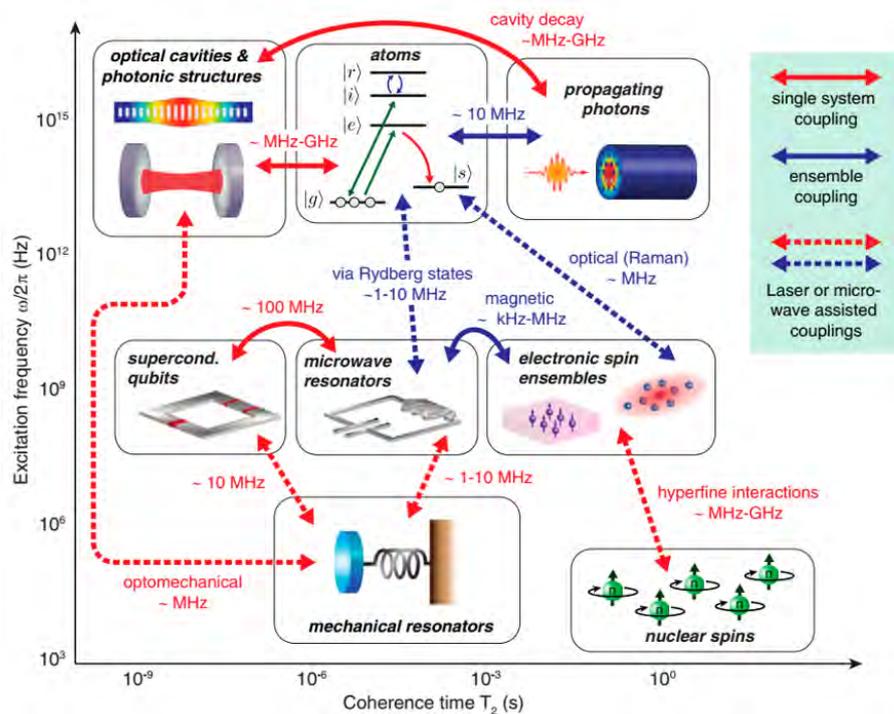


Figura 17: Panoramica dei sistemi quantistici ibridi (HQS, acronimo di Hybrid Quantum System). Il diagramma mostra una selezione di sistemi fisici che rappresentano i componenti di HQS con diverse funzionalità. I singoli sistemi sono posizionati nel diagramma in base alle loro frequenze di eccitazione caratteristiche (asse verticale) e ai tempi di coerenza (asse orizzontale). Le frecce indicano i possibili meccanismi di accoppiamento e le corrispondenti forze di accoppiamento che possono essere realisticamente ottenute. Le frecce rosse e blu rappresentano l'accoppiamento tra singoli sistemi e l'accoppiamento a/e tra insiemi, rispettivamente. Gli accoppiamenti rappresentati da linee tratteggiate sono assistiti da laser o microonde per colmare l'apparente disallineamento delle energie di eccitazione [77].

vantaggi dell'utilizzo di isolanti topologici per implementare una *topologically-protected quantum computation*.

Conclusioni

In conclusione, l'approccio classico alla (nano)elettronica evidenzia importanti limiti concettuali e tecnologici per la continuazione del processo di miniaturizzazione ed un ulteriore incremento delle prestazioni dei dispositivi. Tuttavia, nuove architetture e paradigmi si affacciano all'orizzonte per lo sviluppo delle tecnologie future.



[1] G. Maruccio, R. Cingolani and R. Rinaldi: "Projecting the nanoworld: Concepts, results and perspectives of molecular electronics", *J. Mater. Chem.*, **14** (2004) 542-554.

[2] S. Kumar, S. Karmakar, A. Bramanti, R. Rinaldi and G. Maruccio: *Nanofabrication for Molecular Scale Devices*. In Tech d.o.o., 2011 ().

[3] G. Maruccio: *Physics of Nanostructures - Lecture notes*. <http://www.omnics.it/home/teachingmethods/>, 2008-2019 ().

[4] F. Schwierz: "Graphene transistors", *Nature nanotechnology*, **5** (2010) 487-496.

[5] <https://www.colleaga.org/article/moores-law>

[6] G. He, L. Zhu, Z. Sun, Q. Wan and L. Zhang: "Integrations and challenges of novel high-k gate stacks in advanced CMOS technology", *Progress in Materials Science*, **56** (2011) 475-572.

[7] J. Robertson: "High dielectric constant gate oxides for metal oxide Si transistors", *Rep. Prog. Phys.*, **69** (2006) 327.

[8] G. D. Wilk, R. M. Wallace and J. Anthony: "High-k gate dielectrics: Current status and materials properties considerations", *J. Appl. Phys.*, **89** (2001) 5243-5275.

[9] J. Robertson: "High dielectric constant oxides", *The European Physical Journal Applied Physics*, **28** (2004) 265-291.

[10] N. Izyumskaya, Y. Alivov and H. Morkoc: "Oxides, oxides, and more oxides: high-k oxides, ferroelectrics, ferromagnetics, and multiferroics", *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, **34** (2009) 89-179.

[11] G. Maruccio and R. Wiesendanger: *Scanning Tunneling Spectroscopy of Semiconductor Quantum Dots and Nanocrystals, Quantum Materials, Lateral Semiconductor Nanostructures, Hybrid Systems and Nanocrystals*. , 2010 ().

[12] G. Maruccio, M. Janson, A. Schramm, C. Meyer, T. Matsui, C. Heyn, W. Hansen, R. Wiesendanger, M. Rontani and E. Molinari: "Correlation effects in wave function mapping of molecular beam epitaxy grown quantum dots", *Nano Lett.*, **7** (2007) 2701-2706.

[13] G. Maruccio, C. Meyer, T. Matsui, D. V. Talapin, S. G. Hickey, H. Weller and R. Wiesendanger: "Wave-function Mapping of Immobilized InP Semiconductor Nanocrystals", *Small*, **5** (2009) 808-812.

- [14] D. R. Yennie: "INTEGRAL QUANTUM HALL-EFFECT FOR NONSPECIALISTS", *Reviews of Modern Physics*, **59** (1987) 781-824.
- [15] H. L. Stormer: "Nobel Lecture: The fractional quantum Hall effect", *Reviews of Modern Physics*, **71** (1999) 875-889.
- [16] Y. Aharonov and D. Bohm: "Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory", *Physical Review*, **115** (1959) 485-491.
- [17] P. Roulleau, F. Portier, P. Roche, A. Cavanna, G. Faini, U. Gennser and D. Mailly: "Direct measurement of the coherence length of edge states in the integer quantum hall regime", *Phys. Rev. Lett.*, **100** (2008) 126802.
- [18] I. Neder, M. Heiblum, Y. Levinson, D. Mahalu and V. Umansky: "Unexpected behavior in a two-path electron interferometer", *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006) 016804.
- [19] S. Datta: *Electronic transport in mesoscopic systems*. Cambridge university press, 1997 ().
- [20] M. Büttiker, A. Prêtre and H. Thomas: "Dynamic conductance and the scattering matrix of small conductors", *Phys. Rev. Lett.*, **70** (1993) 4114.
- [21] R. Landauer: "Spatial variation of currents and fields due to localized scatterers in metallic conduction", *IBM J. Res. Dev.*, **1** (1957) 223-231.
- [22] B. Van Wees, H. Van Houten, C. Beenakker, J. G. Williamson, L. Kouwenhoven, D. Van der Marel and C. Foxon: "Quantized conductance of point contacts in a two-dimensional electron gas", *Phys. Rev. Lett.*, **60** (1988) 848.
- [23] D. Wharam, T. Thornton, R. Newbury, M. Pepper, H. Ahmed, J. Frost, D. Hasko, D. Peacock, D. Ritchie and G. Jones: "One-dimensional transport and the quantisation of the ballistic resistance", *Journal of Physics C: Solid State Physics*, **21** (1988) L209.
- [24] H. Ohnishi, Y. Kondo and K. Takayanagi: "Quantized conductance through individual rows of suspended gold atoms", *Nature*, **395** (1998) 780-783.
- [25] R. Hanson, L. P. Kouwenhoven, J. R. Petta, S. Tarucha and L. M. K. Vandersypen: "Spins in few-electron quantum dots", *Reviews Of Modern Physics*, **79** (2007) 1217-1265.
- [26] A. Aviram and M. A. Ratner: " ", *Chem. Phys. Lett.*, **29** (1974) .
- [27] R. Rinaldi and G. Maruccio: *Molecular Electronics*. John Wiley and Sons, Inc., 2006 ().
- [28] B. C. R.M.Metzger, U. Hopfner, M. V. Lakshmikantham, D. Vuillaume, T. Kawai, X. Wu, H. , T. V. H. Tachibana, H. Sakurai, J. W. Baldwin, C. Hosch, M. P. Cava, L. Brehmer and G. J. and Ashwell: "Unimolecular Electrical rectification in Hexadecylquinolinium Tricyanoquinodimethanide", *J. Am. Chem.Soc.*, **119** (1997) 10455-10466.
- [29] J. Park, A. N. Pasupathy, J. I. Goldsmith, C. Chang, Y. Yaish, J. R. Petta, M. Rinkoski, J. P. Sethna, H. D. Abruña, P. L. McEuen and D. C. Ralph: "Coulomb blockade and the Kondo effect in single-atom transistors", *Nature*, **417** (2002) 722-725.
- [30] G. Maruccio, P. Visconti, V. Arima, S. D'Amico, A. Biasco, E. D'Amone, R. Cingolani, R. Rinaldi, S. Masiero, T. Giorgi and G. Gottarelli: "Field effect transistor based on a modified DNA base", *Nano Lett.*, **3** (2003) 479-483.
- [31] G. Maruccio, A. Biasco, P. Visconti, A. Bramanti, P. P. Pompa, F. Calabi, R. Cingolani, R. Rinaldi, S. Corni, R. Di Felice, E. Molinari, M. R. Verbeet and G. W. Canters: "Towards protein field-effect transistors: Report and model of prototype", *Adv. Mater.*, **17** (2005) 816-822.
- [32] A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov and A. K. Geim: "The electronic properties of graphene", *Reviews of Modern Physics*, **81** (2009) 109-162.
- [33] A. K. Geim and K. S. Novoselov: "The rise of graphene", *Nat. Mater.*, **6** (2007) 183-191.
- [34] Y.-M. Lin, H.-Y. Chiu, K. A. Jenkins, D. B. Farmer, P. Avouris and A. Valdes-Garcia: "Dual-Gate Graphene FETs With fT of 50 GHz", *Electron Device Letters, IEEE*, **31** (2010) 68-70.
- [35] A. Javey, J. Guo, Q. Wang, M. Lundstrom and H. J. Dai: "Ballistic carbon nanotube field-effect transistors", *Nature*, **424** (2003) 654-657.
- [36] J. Appenzeller, J. Knoch, V. Derycke, R. Martel, S. Wind and P. Avouris: "Field-modulated carrier transport in carbon nanotube transistors", *Phys. Rev. Lett.*, **89** (2002) art. no.-126801.
- [37] S. J. Tans, A. R. M. Verschueren and C. Dekker: "Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube", *Nature*, **393** (1998) 49-52.
- [38] A. Bachtold, P. Hadley, T. Nakanishi and C. Dekker: "Logic circuits with carbon nanotube transistors", *Science*, **294** (2001) 1317-1320.
- [39] Y. Huang, X. F. Duan, Y. Cui, L. J. Lauhon, K. H. Kim and C. M. Lieber: "Logic gates and computation from assembled nanowire building blocks", *Science*, **294** (2001) 1313-1317.
- [40] D. Waldmann, J. Jobst, F. Speck, T. Seyller, M. Krieger and H. B. Weber: "Bottom-gated epitaxial graphene", *Nat. Mater.*, **10** (2011) 357-360.
- [41] L. Liao, Y.-C. Lin, M. Bao, R. Cheng, J. Bai, Y. Liu, Y. Qu, K. L. Wang, Y. Huang and X. Duan: "High-speed graphene transistors with a self-aligned nanowire gate", *Nature*, **467** (2010) 305-308.
- [42] I. Meric, M. Y. Han, A. F. Young, B. Ozyilmaz, P. Kim and K. L. Shepard: "Current saturation in zero-bandgap, top-gated graphene field-effect transistors", *Nature nanotechnology*, **3** (2008) 654-659.
- [43] S. Bae et al.: "Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes", *Nature Nanotechnol.*, **5** (2010) 574-578.
- [44] M. C. Lemme, T. J. Echtermeyer, M. Baus and H. Kurz: "A graphene field-effect device", *Electron Device Letters, IEEE*, **28** (2007) 282-284.
- [45] X. Li, X. Wang, L. Zhang, S. Lee and H. Dai: "Chemically derived, ultrasmooth graphene nanoribbon semiconductors", *Science*, **319** (2008) 1229-1232.

- [46] K. S. Novoselov, A. Mishchenko, A. Carvalho and A. H. C. Neto: "2D materials and van der Waals heterostructures", *Science*, **353** (2016) 7.
- [47] https://www.theregister.co.uk/2014/11/10/kryders_law_of_ever_cheaper_storage_disproven/?page=2
- [48] C. Chappert, A. Fert and F. N. Van Dau: "The emergence of spin electronics in data storage", *Nat. Mater.*, **6** (2007) 813-823.
- [49] G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach and W. Zinn: "Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange", *Phys. Rev. B*, **39** (1989) 4828.
- [50] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. N. Van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich and J. Chazelas: "Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices", *Phys. Rev. Lett.*, **61** (1988) 2472.
- [51] T. Chen, R. K. Dumas, A. Eklund, P. K. Muduli, A. Houshang, A. A. Awad, P. Dürrenfeld, B. G. Malm, A. Rusu and J. Åkerman: "Spin-Torque and Spin-Hall Nano-Oscillators", *Proceedings of the IEEE*, **104** (2016) 1919-1945.
- [52] H. Béa, M. Gajek, M. Bibes and A. Barthélémy: "Spintronics with multiferroics", *Journal of Physics: Condensed Matter*, **20** (2008) 434221.
- [53] L. W. Martin, S. P. Crane, Y. H. Chu, M. B. Holcomb, M. Gajek, M. Huijben, C. H. Yang, N. Balke and R. Ramesh: "Multiferroics and magnetoelectrics: thin films and nanostructures", *Journal of Physics: Condensed Matter*, **20** (2008) 434220.
- [54] M. Bibes and A. Barthélémy: "Towards a magnetoelectric memory", *Nat. Mater.*, **7** (2008) 425-426.
- [55] G. D. Harzmann, R. Frisenda, H. S. J. van der Zant and M. Mayor: "Single-Molecule Spin Switch Based on Voltage-Triggered Distortion of the Coordination Sphere", *Angewandte Chemie International Edition*, **54** (2015) 13425-13430.
- [56] G. Maruccio: "Spintronics at the Molecular Scale—Progresses and Opportunities", *Journal of Spintronics and Magnetic Nanomaterials*, **1** (2012) 1-8.
- [57] J. J. Parks et al.: "Mechanical Control of Spin States in Spin-1 Molecules and the Underscreened Kondo Effect", *Science*, **328** (2010) 1370-1373.
- [58] <http://www.federica.unina.it/ingegneria/ricerca-operativa-ing-2/teoria-complessita-computazionale/>
- [59] https://it.wikipedia.org/wiki/Classi_di_complessità_P_e_NP
- [60] L. M. Adleman: "Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems", *Science*, **266** (1994) 1021-1024.
- [61] https://en.wikipedia.org/wiki/DNA_computing
- [62] <https://theconversation.com/fr/topics/dna-computing-19965>
- [63] <https://fossbytes.com/dna-computer/>
- [64] C. S. Lent, B. Isaksen and M. Lieberman: "Molecular quantum-dot cellular automata", *J. Am. Chem. Soc.*, **125** (2003) 1056-1063.
- [65] C. H. Bennett and D. P. DiVincenzo: "Quantum information and computation", *Nature*, **404** (2000) 247-255.
- [66] T. D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura, C. Monroe and J. L. O'Brien: "Quantum computers", *Nature*, **464** (2010) 45-53.
- [67] D. P. DiVincenzo: "The Physical Implementation of Quantum Computation", *Fortschritte der Physik*, **48** (2000) 771-783.
- [68] L. M. K. Vandersypen, M. Steffen, G. Breyta, C. S. Yannoni, M. H. Sherwood and I. L. Chuang: "Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance", *Nature*, **414** (2001) 883-887.
- [69] D. Loss and D. P. DiVincenzo: "Quantum computation with quantum dots", *Physical Review A*, **57** (1998) 120-126.
- [70] R. Hanson, L. P. Kouwenhoven, J. R. Petta, S. Tarucha and L. M. K. Vandersypen: "Spins in few-electron quantum dots", *Reviews Of Modern Physics*, **79** (2007) 1217-1265.
- [71] B. E. Kane: "A silicon-based nuclear spin quantum computer", *Nature*, **393** (1998) 133-137.
- [72] J. R. Petta, A. C. Johnson, J. M. Taylor, E. A. Laird, A. Yacoby, M. D. Lukin, C. M. Marcus, M. P. Hanson and A. C. Gossard: "Coherent manipulation of coupled electron spins in semiconductor quantum dots", *Science*, **309** (2005) 2180-2184.
- [73] J. J. Pla, K. Y. Tan, J. P. Dehollain, W. H. Lim, J. J. L. Morton, D. N. Jamieson, A. S. Dzurak and A. Morello: "A single-atom electron spin qubit in silicon", *Nature*, **489** (2012) 541-545.
- [74] J. T. Muhonen, J. P. Dehollain, A. Laucht, F. E. Hudson, R. Kalra, T. Sekiguchi, K. M. Itoh, D. N. Jamieson, J. C. McCallum, A. S. Dzurak and A. Morello: "Storing quantum information for 30 seconds in a nanoelectronic device", *Nature Nanotechnology*, **9** (2014) 986-991.
- [75] M. Veldhorst, J. C. C. Hwang, C. H. Yang, A. W. Leenstra, B. de Ronde, J. P. Dehollain, J. T. Muhonen, F. E. Hudson, K. M. Itoh, A. Morello and A. S. Dzurak: "An addressable quantum dot qubit with fault-tolerant control-fidelity", *Nature Nanotechnology*, **9** (2014) 981-985.
- [76] G.-Q. Liu, X. Feng, N. Wang, Q. Li and R.-B. Liu: "Coherent quantum control of nitrogen-vacancy center spins near 1000 kelvin", *Nature Communications*, **10** (2019) 1344.
- [77] G. Kurizki, P. Bertet, Y. Kubo, K. Mølmer, D. Petrosyan, P. Rabl and J. Schmiedmayer: "Quantum technologies with hybrid systems", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **112** (2015) 3866.
- [78] Z.-L. Xiang, S. Ashhab, J. Q. You and F. Nori: "Hybrid quantum circuits: Superconducting circuits interacting with other quantum systems", *Reviews of Modern Physics*, **85** (2013) 623-653.

- [79] A. Leo, S. Rizzato, A. G. Monteduro and G. Maruccio: *Strong Coupling in Cavity Magnonics*. Jenny Stanford Publishing, 2019 ().
- [80] A. Leo, A. G. Monteduro, S. Rizzato, L. Martina and G. Maruccio: "Identification and time-resolved study of YIG spin wave modes in a MW cavity in strong coupling regime", *ArXiv*, (2019) submit/2660257.



Anna Grazia Monteduro: Ricercatrice presso il Dipartimento di Matematica e Fisica dell'Università del Salento, associata al CNR-Istituto di Nanotecnologia di Lecce e membro del gruppo di ricerca Omnics. Nella sua attività di ricerca si occupa di nanoelettronica, spintronica e nanomagnetismo, sensoristica e materiali funzionali.

Silvia Rizzato: Ricercatrice presso il Dipartimento di Matematica e Fisica dell'Università del Salento, associata al CNR-Istituto di Nanotecnologia di Lecce e membro del gruppo di ricerca Omnics. Nella sua attività di ricerca si occupa di spintronica, sensoristica, litografia e dispositivi ad onde acustiche superficiali

Giuseppe Maruccio: Professore Associato presso il Dipartimento di Matematica e Fisica dell'Università del Salento ed associato al CNR-Istituto di Nanotecnologia di Lecce, dirige il gruppo di ricerca Omnics e si occupa di spintronica e nanomagnetismo, nanoelettronica, biosensori e lab on a chip, microscopia a scansione. GM è stato finanziato su vari bandi competitivi (UE, FIRB, PRIN, FISR e MAE), ed anche da aziende (IBM, Ekuberg Pharma s.r.l., Sensichips).