

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

Corso di Laurea Triennale in Fisica

**CREAZIONE DI UN SITO WEB
PER UN ESPERIMENTO DI
NANOTECNOLOGIE**

Tesi di laurea di:
RICCARDO DI SIPIO

Relatore:
Prof. MARCO CUFFIANI

Correlatore:
Dott. FABRIZIO ODORICI

Anno Accademico 2003 - 2004
II Sessione

Per Eleonora.

*Non si guadagna mai nulla senza perdere
qualcos'altro.*

(H. D. Thoreau)

Indice

Introduzione	7
1 Il Progetto NanoChanT	9
1.1 Il rivelatore Nanochannel Active Layer	11
1.2 La realizzazione pratica	12
2 I Nanotubi di Carbonio	17
2.1 Cosa sono	17
2.2 Proprietà	21
2.2.1 Proprietà elettriche	21
2.2.2 Proprietà meccaniche	25
2.3 Applicazioni	26
2.3.1 Elettronica	26
2.3.2 Sensori	28
2.3.3 Ulteriori possibilità	30
2.4 Metodi di Produzione	31
2.4.1 Scarica ad arco	32
2.4.2 Ablazione laser	32
2.4.3 Deposito catalitico di vapori chimici (CVD)	33
3 Il Sito Web	37
3.1 La scelta user-friendly	37
3.1.1 Lo stato dell'arte sul web	37
3.2 Il progetto	41
3.2.1 Il database	42
3.2.2 Problematiche relative alla sicurezza	44
3.3 Il software utilizzato	45

3.3.1	Open Source: pro e contro	45
3.3.2	MySQL	47
3.3.3	PHP	48
	Conclusioni	49
	Appendice: Esempi di codice	51
	Bibliografia	55
	Elenco delle figure	58
	Ringraziamenti	59

Introduzione

Al giorno d'oggi si sente sempre più spesso parlare di nanotecnologie, e per rendersene conto basta inserire il termine *nanotechnology* nel motore di ricerca Google: le corrispondenze trovate sono circa 1,600,000. In senso abbastanza generale, la nanotecnologia è l'arte ($\tau\epsilon\chi\nu\eta^1$) di manipolare la materia su scala atomica. Questa disciplina utilizza concetti di chimica, fisica, ingegneria e biologia, e le applicazioni possibili o immaginabili in questi campi sembrano davvero molteplici. Non basta poter operare con gli atomi (cosa che tutto sommato facciamo già da tempo), ma occorre anche poterli manipolare e collocare dove si vuole. Questo significa che una branca della scienza, per potersi permettere il prefisso di nano-, deve avere a che fare con strutture di grandezza compresa tra 1 e 100 nm (più in là si entra nel campo della *microtecnologia*), e deve poterli produrre in maniera sistematica e non casuale. Un aspetto sicuramente affascinante delle nanotecnologie è il fatto che ci permettono di operare in una zona di confine tra la fisica classica e quella quantistica, e infatti molti dispositivi nanotecnologici sfruttano proprio queste loro particolari proprietà.

Le nanotecnologie hanno una data di nascita: il 29 Dicembre 1959 Richard Feynman tenne una conferenza al *California Institute of Technology* (Caltech) dal titolo "*There's plenty of room at the bottom*"². Ebbe a dire:

Considerate la possibilità che anche noi, come la biologia molecolare, siamo in grado di costruire oggetti piccolissimi, che facciano quello che vogliamo: allora potremmo anche produrre macchine che manovrano a quel livello [...] Non ho paura di dire che la questione decisiva sarà se alla fine saremo capaci di disporre gli atomi nel modo da noi voluto. Sì, giù giù, proprio sino agli atomi.

¹*Techné* è un termine greco che in italiano ha una traduzione più 'ambigua' di quanto possa sembrare. Significa *arte* oppure *tecnica*, che nella nostra lingua sono due concetti piuttosto separati. A sua volta, però, *tecnica* deriva dal greco *techné*.

²"C'è un sacco di spazio là in fondo".

Tuttavia, solo nel 1974 Norio Taniguchi coniò il termine *nanotecnologia*, per descrivere questo tipo di ingegneria a scala sub-micrometrica, all'epoca ancora al di là da venire. In seguito, nel 1986, Eric Drexler, ricercatore del MIT, pubblicò il libro *"Engines of creation"*³, in cui fantasticava delle possibili applicazioni delle nanotecnologie. Nello stesso anno Richard Smalley, della Rice University, scoprì il *fullerene*, una molecola di forma sferica costituita da 60 atomi di carbonio, precursore dei nanotubi, dei quali si parlerà diffusamente in questa tesi di laurea. Smalley ricevette nel 1996 il premio Nobel per la chimica, insieme a Harold Kroto e Robert Curl.

Sempre nella metà degli anni '80, Gerd Binnig e Heinrich Rohrer all'IBM di Zurigo inventarono il *microscopio a scansione a effetto tunnel*, strumento che per la prima volta poté fornire immagini della materia a scala atomica. Furono insigniti del premio Nobel per la fisica nel 1986. Infine, nel 1991 Sumio Iijima, del NEC Fundamental Research Laboratory di Tsukuba, Giappone, osservò con questo tipo di microscopio dei filamenti nanoscopici fatti di puro carbonio. Queste molecole altamente regolari, simmetriche e lunghe furono battezzate *nanotubi di carbonio*, e da allora sono oggetto di intensi studi e differenti tentativi di ingegnerizzazione. È necessario sottolineare che i nanotubi di carbonio sono solo un esempio di nanotecnologia, seppure importante, ma ne esistono molti altri.

Questa tesi riguarda il progetto NanoChanT, la cui finalità è quella di costruire un nuovo tipo di rivelatore di radiazione a stato solido, e in particolare sarà descritto il sito web di questo esperimento, realizzato dal laureando.

³"Motori della creazione".

Capitolo 1

Il Progetto NanoChanT

Le nanotecnologie hanno applicazione in molti campi come la medicina, la produzione di nuovi materiali, l'elettronica, ma anche la fisica sperimentale può trarne vantaggio. Infatti, c'è una possibilità per migliorare le prestazioni di rivelatori di particelle e radiazione. Ad esempio, i rivelatori a stato solido per la posizione delle particelle potrebbero aumentare la risoluzione spaziale se si potesse rendere più sottile lo strato attivo (ad esempio, di silicio), entro i limiti dettati dalla necessità di mantenere una sufficiente efficienza dell'apparato (uno strato troppo sottile potrebbe non generare abbastanza carica da far attivare l'elettronica di lettura). Così facendo, però, verrebbe meno la resistenza meccanica dell'apparato. È stato proposto di utilizzare, come interfaccia tra lo strato sensibile ed il *read out*, uno stampo di materiale rigido ed isolante elettrico, contenente dei nanoconduttori (ad esempio, nanotubi di carbonio, ma esistono anche altre possibilità) che dovrebbe conferire la giusta resistenza meccanica al rivelatore.

Nel 1999 è stata messa a punto una tecnica per la fabbricazione di matrici uniformi di nanotubi di carbonio tra loro paralleli e con una densità altamente uniforme. L'accrescimento dei CN avviene su uno stampo di ossido di alluminio (Al_2O_3) nanoporoso, comunemente detto *alumina template*, ottenuta per anodizzazione di alluminio iperpuro. È possibile controllare lunghezza, diametro e densità dei pori aggiustando opportunamente i parametri del processo di anodizzazione dell'allumina. I pori hanno un diametro di 10-100 nm e lo spazio che li separa è di 20-200 nm. A questo punto, i CN vengono fatti crescere all'interno di questi nanocanali tramite un processo denominato *chemical vapour deposition* (CVD)[1].

Ciò che rende questa tecnica interessante è la possibilità di costruire matrici di CN molto regolari e uniformi, su superfici dell'ordine del cm^2 .

Lo scopo del progetto NanoChanT (*NanoChannel Template*), che coinvolge alcuni ricercatori del Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna, della sezione INFN di Bologna e della sezione IMM-CNR di Bologna, è di usare questa tecnica per costruire un rivelatore di posizione di particelle che possa migliorare la risoluzione spaziale di circa un ordine di grandezza rispetto agli strumenti attualmente a disposizione.

Il rivelatore è formato da tre strati sovrapposti, di cui quello superiore è un diodo di silicio polarizzato inversamente, come nei comuni rivelatori a stato solido. Lo strato intermedio, che rappresenta l'innovazione che questo progetto vuole apportare, è costituito dall'allumina nanoporosa contenente i *carbon nanotubes* (di qui in avanti verranno indicati come CN), e il suo scopo principale è quello di trasportare la carica dallo strato superiore verso quello inferiore dove è situata l'elettronica di lettura (*read out*).

I vantaggi nell'utilizzo dello strato contenente i nanotubi di carbonio sono molteplici: la struttura di allumina, conferendo robustezza meccanica all'apparato, permette allo strato superiore di silicio di rimanere confinato in uno spessore ridotto (circa $5\mu\text{m}$), in modo da ridurre quanto possibile l'effetto di *allargamento della carica*, prodotta per ionizzazione dalla particella incidente, che è proprio ciò che limita attualmente la risoluzione spaziale. L'allumina isola elettricamente i vari CN tra loro, e quindi in linea di principio la risoluzione ottenibile è dello stesso ordine della distanza tra i pori della matrice, anche se non può essere ancora considerato del tutto trascurabile l'allargamento della carica che avviene nello strato di silicio. In effetti, ci sono algoritmi per ottenere il "centroide" della carica: anche se la distribuzione è più ampia del passo dei pori, la risoluzione è minore dell'ampiezza della distribuzione.

I CN che vengono utilizzati in questo progetto presentano una bassa resistenza e possono sopportare densità di corrente molto elevate, nell'ordine di $10^9 \div 10^{10}$ A/ cm^2 .

Infine, nello strato inferiore, l'elettronica CMOS è deputata allo stadio di *read out*. Questa, attualmente, non permette una miniaturizzazione sufficiente da ottenere una granularità almeno paragonabile allo spazio tra i nanocanali della

matrice di allumina. Tuttavia, miglioramenti futuri potrebbero ovviare a questo problema[1].

1.1 Il rivelatore Nanochannel Active Layer

Una volta che tutte queste tecniche saranno disponibili per un uso pratico, sarà possibile passare alla realizzazione del rivelatore vero e proprio (Fig. 1.1).

Figura 1.1: Il progetto di rivelatore Nanochannel Active Layer.

Il diodo di silicio dovrebbe essere spesso $5\mu\text{m}$, e lo strato di allumina circa $50\mu\text{m}$. I CN avranno un diametro di 40nm e la distanza tra di essi sarà di 100nm . Lo strato n^+ del diodo, posta nella parte inferiore di esso, verrà segmentata in *pixel*, in modo da raccogliere la carica in regioni localizzate del rivelatore. Inoltre,

questa configurazione diminuisce l'effetto capacitivo. Uno strato di ossido di silicio, posto alla base della matrice di allumina, conterrà l'elettronica di lettura e delle *strip* metalliche atte a raccogliere la carica trasportata dai CN. In questo modo dovrebbe essere possibile ricostruire la posizione di una particella in una data dimensione, e la risoluzione dipende dalla distanza tra i CN. Una distanza di 500nm corrisponderebbe a 20000 canali di lettura per cm^2 [1].

1.2 La realizzazione pratica

Una componente fondamentale del progetto NanoChanT è la base di allumina. Si parte da un foglio di alluminio estremamente puro ($\sim 99.999\%$), spesso circa $100\mu\text{m}$ e di lati $2\text{cm} \times 2\text{cm}$, che viene anodizzato in una cella elettrolitica. Sotto condizioni controllate, la corrente crea spontaneamente dei fori nell'allumina, che si organizzano autonomamente in una struttura esagonale a nido d'ape (Fig. 1.2 e Fig 1.3). I parametri critici del processo sono il tipo di acido, la temperatura, il voltaggio di polarizzazione, e la durata. Tipicamente, utilizzando una soluzione 0.3 molare di acido ossalico, con un voltaggio di 40V, si ottiene una separazione tra i pori di 100nm. Con acido fosforico e 190V, questo valore cresce fino a 200nm, e il diametro dei pori cresce in proporzione (80-100nm).

Figura 1.2: Immagine SEM di un campione di allumina porosa.

Figura 1.3: Nanopori in allumina. Notare passo e diametro in base alla scala di 200nm.

A questo punto bisogna far crescere i CN all'interno dei canali tramite CVD. Il primo passo consiste nel porre nanoparticelle di catalizzatori metallici (Ni, Fe, Co) alla base dei pori, e questo viene realizzato tramite *elettrodeposizione*: il catalizzatore favorisce la sintesi dei CN durante il processo CVD. Poi un idrocarburo (etilene, acetilene o metano) viene decomposto in un apposito reattore a pressione atmosferica e ad una temperatura di 700-800°C. Durante il processo, gli atomi di carbonio rivestono le pareti dei nanocanali, e la temperatura e il tipo di idrocarburo determinano le caratteristiche morfologiche ed elettriche del nanotubo[1]. Al momento uno dei problemi incontrati risulta essere quello di realizzare uno strato di allumina che abbia una superficie superiore ad 1 cm². Infatti, quando la temperatura aumenta fino ad un valore idoneo per la sintesi dei CN, l'allumina tende a piegarsi su sè stessa. Un metodo per ovviare a questo problema è stato recentemente perfezionato.

In alternativa ai CN come collettori di carica è stato proposto di utilizzare dei nanofili metallici. Questi verrebbero creati sempre all'interno dei nanopori della matrice di allumina per elettrodeposizione di metalli. Al momento è stato possibile far crescere dei nanofili di cobalto lunghi fino a 5µm (Fig. 1.4), e si sta valutando la possibilità di farli crescere lungo tutto il nanoporo[2].

Bisogna tuttavia ricordare che per la crescita dei CN non è strettamente necessaria la presenza dello stampo di allumina. Prima di provare la crescita confinata in allumina, si ottimizzano alcuni parametri del processo CVD (temperatura, flusso di acetilene, etc.), con una crescita di CN su substrati piatti (spessore di circa

Figura 1.4: Nanofili di cobalto. Potrebbero essere una alternativa ai nanotubi di carbonio nella funzione di conduttori elettrici.

350nm) con strati di particelle di catalizzatore (spessore di circa 4nm) disposte in una configurazione desiderata, e queste fungono da 'seme' per la crescita di CN. Come substrato sono stati utilizzati per ora silicio, diossido e nitruro di silicio, silicio poroso. Come catalizzatori vengono utilizzate nanoparticelle di metalli di transizione, e la tecnica di sintesi è la già citata CVD. In questo modo è stato possibile ottenere un 'tappeto' di nanotubi di carbonio allineati verticalmente (Fig. 1.5), ognuno con un diametro di 50-75nm e lunghezza di circa 20 μ m.

Figura 1.5: Nanotubi di carbonio sintetizzati senza stampo di alumina. Diametro 50nm, lunghezza 20 μ m.

Come risulta evidente guardando l'immagine qui proposta (Fig. 1.6, realizzata con un microscopio elettronico a scansione), sulla sommità di ogni nanotubo di carbonio è possibile osservare la particella di catalizzatore.

Un altro problema tecnico consiste nel *bonding*, ovvero nel collegare elettricamente il diodo di silicio con la matrice di nanotubi, e la matrice di nanotubi alle *strip* di *readout*. Per quanto riguarda il collegamento diodo-CN è in corso una sperimentazione di crescita di CN su una base di silicio sulla quale è stato deposto un film (spessore $\sim 200\text{nm}$) di titanio. Dalla letteratura è noto che, alle temperature di sintesi dei CN, carbonio e titanio formano carburo di titanio, un materiale conduttore elettrico, che dovrebbe fornire il collegamento ohmico voluto.

Un aspetto assolutamente critico della matrice di CN è la sua efficienza nel raccogliere la carica e trasferirla all'elettronica di lettura. Quindi, le proprietà dei nanotubi devono essere ottimizzate a questo scopo, come anche i contatti tra essi e i due strati che li circondano. Per misurare questa efficienza si opererà esponendo l'apparato ad un flusso (noto) di particelle α , che vengono assorbite dal silicio, generando nel processo delle coppie elettrone - lacuna. Gli elettroni prodotti vengono quindi convogliati dai nanotubi di carbonio verso l'elettronica di *read out*. È così possibile quantificare l'efficienza del rivelatore come rapporto tra la carica misurata dal rivelatore e quella entrante (ionizzazione dovuta alle particelle α)[1].

Figura 1.6: Nanotubi di carbonio. Sulla sommità sono evidenti i catalizzatori metallici.

Capitolo 2

I Nanotubi di Carbonio

Nel progetto NanoChanT sono impiegate fondamentalmente tre nanotecnologie:

- Produzione di allumina nanoporosa;
- Deposizione di nanoparticelle di catalizzatori metallici;
- Sintesi dei nanotubi di carbonio.

Poichè i nanotubi di carbonio sono una delle nanotecnologie attualmente più sfruttate, nonchè apparentemente una delle più promettenti, sembra opportuno spiegare più approfonditamente cosa sono, quali sono le loro proprietà (e quindi perché sono così interessanti), alcune delle possibili applicazioni e i metodi per produrli.

2.1 Cosa sono

I nanotubi e le nanofibre di carbonio sono filamenti di grafene di diametro usualmente compreso tra 0.4 e 500 nm, e di lunghezza che varia da alcuni micrometri al millimetro. I metodi di produzione saranno discussi in seguito, ad ogni modo essi si basano sulla diffusione di atomi di carbonio che accrescono queste strutture tramite l'intervento di un catalizzatore (usualmente metallico).

Sono noti tre tipi strutturali dei filamenti, caratterizzati da un diverso angolo tra l'asse del filamento e il foglio di grafene. Sono comunemente denominati *stack*, *herringbone* (spina di pesce) e *nanotubo*. Nella forma *stack* i fogli di grafene sono posti perpendicolarmente all'asse, in quella *herringbone* presentano un angolo,

in quella tubolare sono paralleli. Nella letteratura le prime due forme sono note come *nanofibre*, mentre si riserva il termine *nanotubi* per la terza, questo perché la struttura a nanotubi ha particolari proprietà che la distingue da quella a nanofibra (vedere in seguito il paragrafo dedicato).

Ancora, nei nanotubi si possono distinguere due configurazioni: single wall (SWNT) e multiwall (MWNT). Un nanotubo single wall è costituito da un unico foglio di grafene arrotolato attorno ad un asse, in modo da costituire un cilindro (Fig. 2.1).

Figura 2.1: Arrotolamento di un foglio di grafene.

La configurazione multiwall invece presenta un certo numero di fogli arrotolati concentricamente e coassialmente, con uno spazio di *intershell* che varia da 0.34 nm a 0.39 nm.

Ogni foglio di grafene ha una struttura a nido d'ape, ovvero è costituito da esagoni, nei cui vertici sono posti gli atomi di carbonio (Fig. 2.2). Il foglio può essere arrotolato lungo uno degli assi di simmetria, ottenendo un tubo 'a zig-zag' lungo l'orizzontale o 'a poltrona' lungo la diagonale a 45°, oppure lungo un asse arbitrario (arrotolamento 'chirale'), come mostrato schematicamente in Fig 2.3. Nella pratica, nessuna di queste tre varietà sembra essere favorita nella formazione[3].

I nanotubi possono essere chiusi ai capi da semisfere simili al fullerene[4], che contengono sia esagoni che pentagoni. Usualmente i SWNT presentano chiusure molto vicine alla sfericità, mentre i MWNT sono di forma più poliedrica (Fig. 2.4).

Figura 2.2: Foglio di grafene schematizzato (abaco di de Heer) e assi di arrotolamento. Per realizzare un tubo (n,m) bisogna spostarsi dal punto di origine n volte lungo a_1 e m volte lungo a_2 , quindi arrotolare il foglio in modo che i due punti finali coincidano.

Figura 2.3: I tre tipi di nanotubi di carbonio.

Figura 2.4: Multiwall Nanotube. Le shell più interne tendono a chiudersi con una semisfera di fullerene.

Normalmente sono presenti delle irregolarità nel *pattern* del nanotubo, causate principalmente dalla presenza di pentagoni o eptagoni al posto degli esagoni. I pentagoni causano una curvatura positiva, mentre gli eptagoni negativa. A volte si osservano delle zone in cui queste irregolarità sono più addensate, e vengono chiamate *giunzioni* (Fig. 2.5).

Figura 2.5: Rappresentazione di una giunzione.

Le irregolarità possono provocare variazioni nelle proprietà dei nanotubi. L'argomento verrà trattato più approfonditamente nel prossimo paragrafo, ma possiamo anticipare che le variazioni riguardano soprattutto le proprietà meccaniche, mentre quelle elettriche risultano praticamente inalterate.

2.2 Proprietà

Nonostante il fatto che nanofibre e nanotubi fossero già stati sintetizzati a partire dagli anni '60, è solo dal 1991 che l'attenzione dei ricercatori si è rivolta con particolare interesse verso questo settore. In quell'anno, infatti, Iijima[5] mostrò che i nanotubi avevano una struttura coassiale con interno cavo, e che quindi queste strutture altamente cristallizzate dovevano ereditare diverse importanti caratteristiche del grafene *intraplanare*. In particolare, una elevata conduttività elettrica e termica, nonché resistenza meccanica lungo il suo asse. Inoltre, i legami liberi sono molto pochi, per cui i nanotubi risultano essere pressochè inerti e le sostanze tendono ad essere assorbite dalle pareti di grafene piuttosto che reagire con esse. Infine, i legami covalenti tra gli atomi di carbonio sono molto resistenti e permettono al nanotubo di essere operativo in condizioni stabili per un lungo periodo di tempo senza risultare danneggiato.[6]

Queste proprietà rendono i nanotubi particolarmente versatili per un gran numero di importanti applicazioni tecnologiche, alcune delle quali verranno citate nei seguenti paragrafi.

2.2.1 Proprietà elettriche

Gli studi teorici indicano che i legami tra gli atomi di carbonio sono di tipo sp^2 , e che la curvatura e le simmetrie inducono il nanotubo a comportarsi in maniera piuttosto differente rispetto alla normale grafite. Per esempio, a seconda del diametro e dell'elicità, la struttura può comportarsi sotto l'aspetto elettrico come un metallo o come un semiconduttore nel caso dei SWNT (Fig. 2.6), mentre i MWNT presentano solo il comportamento metallico. Esperimenti mostrano che i nanotubi presentano una bassa resistività ($100 \div 200 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) ed elevata densità di corrente ($10^9 \div 10^{10} \text{A}/\text{cm}^2$).

Gli studi sperimentali sono effettuati, tra i vari metodi, con esperimenti di spettroscopia a effetto tunnel. Tale tecnica permette di osservare la chiralità del nanotubo, ma anche la corrente che circola in funzione del voltaggio applicato, e quindi di scoprire se il comportamento è metallico o da semiconduttore.

A basse temperature i SWNT si comportano come cavi quantistici coerenti, e la conduzione avviene attraverso stati elettronici discreti su scale macroscopiche. Esperimenti mostrano che la coerenza viene mantenuta lungo tutta la lunghez-

Figura 2.6: Sinistra: spettroscopia ad effetto tunnel: misure di conduttività. Destra: band-gap in funzione del diametro del nanotubo. Verificata la dipendenza $1/d$.

za del CN, e che le imperfezioni nella struttura del nanotubo hanno pochissima influenza sulla conduzione elettrica. Questo però non avviene nei SWNT semiconduttori, che presentano una lunghezza di coerenza molto minore.[3]

C'è inoltre una forte evidenza di un ulteriore singolare comportamento dei SWNT, che era già stato predetto per conduttori unidimensionali. In un sistema unidimensionale l'interazione coulombiana dovrebbe portare ad un gas di elettroni fortemente correlato, chiamato *liquido di Luttinger*, invece del comune gas di Fermi. Recenti esperimenti mostrano appunto questo particolare comportamento nei SWNT[3].

Nonostante le dimensioni maggiori, i MWNT mostrano le stesse proprietà dei SWNT, ma l'ulteriore possibile accoppiamento elettronico tra fogli adiacenti provoca caratteristiche proprie dei MWNT. Questo però risulta evidente solo a temperature sufficientemente basse da indurre una conduzione coerente degli elettroni, e questo viene ricondotto all'effetto Aharonov-Bohm. Inoltre, questi effetti sono maggiormente pronunciati nelle shell più esterne.

La conduttività elettrica del MWNT aumenta con *step* discreti con l'aumentare del numero di nanotubi che entrano in contatto con un conduttore quando circola corrente. Questo comportamento viene detto *balistico* (Fig. 2.7).

Figura 2.7: Frank et al., set-up sperimentale, con un esempio della conduttanza in funzione della posizione verticale della fibra: la conduttanza incrementa in passi discreti più il nanotubo viene posto in contatto con un liquido conduttore. Frank et al., Science 280 (1998) 1744 .

Se un MWNT viene posto in contatto con un conduttore, ed è immerso in un campo magnetico che viene fatto variare trasversalmente al suo asse, quando viene applicata differenza di potenziale la resistenza varia periodicamente con il campo (Fig. 2.8, 2.9). Queste oscillazioni sono causate da un effetto quantistico legato alla propagazione degli elettroni nel nanotubo. La separazione tra i picchi suggerisce che la conduzione è diffusiva invece che balistica, ma nonostante ciò è stata misurata una corrente piuttosto elevata (fino ad 1 mA)[3].

Figura 2.8: Nanotubo posto su dei contatti metallici.

Figura 2.9: Variazione periodica della resistenza con un campo magnetico variabile.

2.2.2 Proprietà meccaniche

I nanotubi di carbonio sono fogli di grafene arrotolati, e il grafene è uno dei materiali più resistenti quando soggetto a deformazione parallela al piano del foglio. Per cui, non bisogna meravigliarsi se i nanotubi mostrano proprietà meccaniche eccezionali.

Sono stati eseguiti esperimenti per misurare il modulo di Young di nanotubi, utilizzando un microscopio a forza atomica (Fig. 2.10). Il nanotubo viene posto su una base ceramica porosa, e il microscopio applica una forza trasversale. Misurando la deflessione, si ha una stima del modulo di Young. Il valore ottenuto è di circa 800GPa, piuttosto vicini a quello del singolo foglio di grafene, approssimativamente 1.06TPa. Questo valore decresce molto rapidamente con l'aumentare delle imperfezioni nel reticolo. Esperimenti simili mostrano che per deformazioni tensili la rigidità varia da 11 a 63 GPa, mentre il modulo di Young delle shell più esterne dei MWNT varia da 270GPa a 950 GPa[3].

Figura 2.10: Modulo di Young. Stimato dal coefficiente angolare è di circa 800 GPa. J.-P. Salvetat et al., Adv. Mater. 11 (1999) 161 .

2.3 Applicazioni

Vengono di seguito presentate alcune delle possibili applicazioni dei nanotubi di carbonio.

2.3.1 Elettronica

Poichè le proprietà dei nanotubi dipendono dalla geometria piuttosto che dalla concentrazione di impurità, la loro particolare stabilità termica li rende candidati ideali per un utilizzo nell'elettronica.

Un SWNT semiconduttore può essere utilizzato per connettere due elettrodi metallici, formando così in pratica una barriera Schottky. Applicando una differenza di potenziale all'elettrodo di gate, il nanotubo da conduttore diventa isolante, anche a temperatura ambiente[3] (Fig. 2.11).

Un'altra soluzione per creare dispositivi nanoelettronici potrebbe essere la seguente: quando un nanotubo viene deflesso di qualche grado rispetto all'asse rettilieo in modo da formare un ginocchio, esso si comporta come un diodo, mentre i nanotubi a forma di Y¹ funzionano da transistor[1].

Figura 2.11: La curva I-V mostra un comportamento ohmico per voltaggio negativo sul gate, mentre un voltaggio positivo porta ad una forte diminuzione della corrente. La conduttanza varia su almeno sei ordini di grandezza. S.J. Tans et al., Nature 393 (1998) 49.

¹È possibile creare nanotubi a forma di Y inserendo appositamente altre nanoparticelle di catalizzatore *durante* il processo di accrescimento.

Le piccole dimensioni dei nanotubi di carbonio donano loro una particolare proprietà quantistica, grazie alla quale il flusso di elettroni può essere controllato con precisione: si tratta del *blocco di Coulomb*, per il quale gli elettroni si oppongono all'inserimento in un nanotubo di più di un elettrone per volta. Tale fenomeno può rendere agevole la costruzione di transistor a elettrone singolo, considerato il limite ultimo per l'elettronica sensibile[7].

Altri dispositivi potrebbero in futuro essere fabbricati congiungendo nanotubi semiconduttori e contatti metallici, prima però bisognerà superare un certo numero di ostacoli sperimentali. Tuttavia la strada intrapresa sembra promettente, e in linea di principio un gran numero di componenti elettroniche (collegamenti, dispositivi bipolari, FET) potrebbero essere convertite a questa nuova tecnologia.

I nanotubi possono essere utilizzati per elementi luminosi, ovvero per produrre luce bombardando una superficie ricoperta di fosforo con elettroni. Questo effetto è ottenuto applicando tra il nanotubo e un anodo una differenza di potenziale, che lo induce ad emettere elettroni. Essendo molto appuntiti, i nanotubi emettono elettroni ad un potenziale inferiore rispetto agli elettrodi costruiti con materiali convenzionali (emissione di campo), e i forti legami degli atomi di carbonio che li compongono permettono loro di operare per lunghi periodi di tempo senza subire danni.

Fink et al. hanno sviluppato un microscopio elettronico in cui gli elettroni vengono estratti applicando una differenza di potenziale tra il campione e un MWNT emettitore.

L'emissione di campo è stata vista come una tecnologia potenzialmente rivoluzionaria per rimpiazzare schermi di televisori e computer con display piatti, sottili, efficienti e anche più luminosi di quelli oggi in commercio. Attualmente gli emettitori di campo risultano essere troppo 'fragili', e i nanotubi sono i candidati ideali per risolvere questo problema: se si mescolano dei nanotubi a dei particolari materiali plastici, e poi si pone il tutto a contatto di un elettrodo, alcuni nanotubi punteranno verso l'elettrodo opposto ed emetteranno elettroni. Tecniche più raffinate permettono di far accrescere i nanotubi perpendicolarmente rispetto ad un substrato, e quindi di aumentare l'efficienza dell'emissione di campo[7].

Inizialmente erano stati proposti dei display come alternativa ad altri emettitori a film. Nel giro di tre anni fu possibile produrre display 32x32 a matrice di diodi. La Samsung è riuscita a costruire un display 9" a colori con una risoluzione di 576x242 pixel (Fig. 2.12).

Figura 2.12: Display a nanotubi Samsung 4.5" full-color.

Un tubo catodico (detto *jumbotron lamp*) è stato sviluppato da Saito et al. ed è attualmente disponibile in commercio. La luminosità è tipicamente più alta di un fattore 2 comparata ad un convenzionale emettitore termoionico, e sembra un dispositivo indicato per schermi giganti da usare in ambienti aperti. È stato dimostrato che questi dispositivi possono funzionare per almeno 8000 ore[3].

2.3.2 Sensori

Esperimenti hanno dimostrato che è possibile costruire dei sensori chimici basati su SWNT. Infatti, quando un nanotubo semiconduttore viene esposto ad un gas, la sua resistenza elettrica varia molto rapidamente, aumentando oppure diminuendo, a seconda dei casi (Fig. 2.13). A temperatura ambiente il tempo di risposta è più breve rispetto agli attuali sensori a stato solido, ed inoltre è possibile riconoscere vari tipi di molecole, impostando opportunamente il contatto elettrico in modo da rendere inizialmente il nanotubo semiconduttore oppure isolante[3].

Figura 2.13: Risposta elettrica di un SWNT semiconduttore a molecole di NO_2 . La variazione della conduttanza col tempo dipende fortemente dal flusso di gas. J. Kong et al., Science 287 (2000) 622.

I nanotubi hanno trovato applicazione anche nel campo della biologia. È stato proposto di ricoprire i nanotubi di proteine al fine di costruire nuovi biosensori o comunque materiale bioelettronico a scale nanometriche. Balavoine et al. hanno cristallizzato la proteina *streptavidina* attorno ad un MWNT (Fig. 2.14). Analisi di microscopia elettronica hanno evidenziato come questa si sia organizzata elicoidalmente attorno al nanotubo, e si ritiene che l'orientazione delle molecole è tale da permettere applicazioni biotecnologiche[3].

Figura 2.14: Schema della cristallizzazione e analisi dell'elica di streptavidina formatasi sul nanotubo. La trasformata di Fourier, l'immagine sperimentale e il modello tridimensionale mostrano l'avvolgimento in senso antiorario.

2.3.3 Ulteriori possibilità

Allo stato attuale delle cose, ci sono anche altre proposte che sembrano essere promettenti.

Una prima riguarda lo stoccaggio di idrogeno per celle a combustibile. All'inizio si era pensato di ottenere risultati eccellenti, ma i risultati sperimentali sono contraddittori[3].

Una seconda sfrutta la lunghezza di coerenza molto elevata dei MWNT. Non contenendo impurità magnetiche, si è pensato di utilizzare i nanotubi per la *spintro-nica*, ovvero una computazione binaria basata sullo stato di spin degli elettroni[3]. Ad ogni modo, in linea di principio questa caratteristica potrebbe essere sfruttata anche per costruire dei rivelatori dello stato di spin delle particelle.

2.4 Metodi di Produzione

Attualmente è possibile produrre nanotubi e nanofibre essenzialmente in tre modi diversi: *scarica ad arco*, *ablazione laser*, *deposito catalitico di vapori chimici* (CVD). I primi due possono essere classificati come metodi ad alta temperatura (>3000 K) e breve tempo di reazione (μs - ms), mentre la CVD è a media temperatura (700 - 1400 K) e lungo tempo (da minuti ad ore).

La tecnica CVD risale agli anni '60, ma la maggior parte dei lavori compiuti, svoltisi negli anni '90, è stata eseguita su nanotubi prodotti con scarica ad arco o ablazione laser. Questo perché i metodi ad alta temperatura permettono di creare nanotubi con meno irregolarità. Tuttavia, i nanotubi creati con questi due metodi richiedono una ulteriore purificazione, e non possono essere prodotti direttamente su un substrato. Nel corso degli anni è stata così raffinata la tecnica CVD, e ora è possibile produrre con essa SWNT e MWNT direttamente su un substrato, allineati orizzontalmente o verticalmente rispetto alla superficie del substrato, sia singolarmente che in gruppo, controllando diametro e lunghezza, ed è infine possibile utilizzarli direttamente senza il bisogno di ulteriori purificazioni[8].

Il diametro e la lunghezza dei filamenti è strettamente correlata con le dimensioni fisiche delle particelle di catalizzatore metallico. Si pensa che questo effetto sia dovuto alla capacità delle particelle del catalizzatore di legarsi ai vapori di carbonio per formare stati metastabili, e alle modalità di diffusione del carbonio attraverso le particelle metalliche.

Si ritiene che l'idrogeno giochi un ruolo fondamentale nella formazione di nanofibre oppure di nanotubi. Infatti, se questo elemento è presente in abbondanza tende a legarsi con gli atomi di carbonio posti al perimetro dei fogli di grafene, mentre se questi legami restano liberi si formano i nanotubi di carbonio, che risultano essere più stabili. Dalzeit et al. hanno mostrato che modificando l'abbondanza relativa di idrogeno è possibile trasformare le strutture in formazione da nanotubi a nanofibre, e alte concentrazioni di idrogeno favoriscono queste ultime[8].

2.4.1 Scarica ad arco

In un ambiente a pressione costante (400mbar) riempito di elio, un plasma di carbonio viene posto tra due elettrodi di grafite (Fig. 2.15). Si ottengono così dei MWNT, paralleli all'asse del tubo in cui vengono creati. Si è osservato che utilizzando un catodo contenente catalizzatori metallici (Fe, Ni, Co) misti a polvere grafitica si possono produrre SWNT[3].

Figura 2.15: Scarica ad arco.

2.4.2 Ablazione laser

L'apparato di produzione è costituito da un tubo, posto orizzontalmente, contenente gas inerte e un blocchetto costituito da grafite e catalizzatori metallici (Fig. 2.16). Il tubo viene riscaldato fino a 1200°C, quindi il blocchetto viene colpito da un raggio laser. SWNT vengono creati dall'evaporazione causata dal laser, e vengono raccolti da un collettore posto nel fondo, lontano dalla zona riscaldata dal laser[3].

Figura 2.16: Ablazione laser.

2.4.3 Deposito catalitico di vapori chimici (CVD)

Questo metodo si basa sulla decomposizione termica di un vapore di idrocarburi e sulla seguente cristallizzazione, favorita dalla presenza di catalizzatori metallici su un supporto. Per sintetizzare MWNT viene comunemente utilizzato l'acetilene, e l'ambiente viene portato a 600-800°C, mentre per i SWNT vengono introdotti monossido di carbonio oppure metano, ad una temperatura tipicamente più elevata (900-1200°C). Infatti, i SWNT hanno una energia di formazione maggiore rispetto ai MWNT, e in questo caso la CO o il metano presentano maggiore stabilità ad alte temperature rispetto all'acetilene[3].

La configurazione più utilizzata è quella della *fornace orizzontale* (Fig. 2.17, 2.18), ma, come si può facilmente intuire, esiste anche una tecnica di sintesi con *fornace verticale*.

Fondamentalmente, la fornace orizzontale è costituita da un tubo di quarzo, contenente il catalizzatore, che viene riscaldato. Al suo interno viene immesso un gas inerte (usualmente argon oppure azoto), e alle volte anche idrogeno, che riduce gli ossidi del catalizzatore durante la fase di riscaldamento. Alla temperatura opportuna viene introdotto il gas contenente carbonio. Le reazioni vengono fatte avvenire di solito ad una temperatura inferiore ai 1000°C in modo da ridurre

Figura 2.17: Deposito catalitico di vapori chimici (CVD).

la formazione di residui di carbonio amorfo, che si genera dalla *pirolisi* (decomposizione *termica*) del gas, mentre i nanotubi si formano per decomposizione *catalitica*[8].

In genere bisogna raggiungere un compromesso tra l'ottenere nanotubi molto puri o altamente cristallini. L'aumento della temperatura migliora la cristallinità della struttura, ma se supera una certa soglia si formano i depositi di carbonio amorfo per pirolisi. Per porre rimedio a questo problema si ricorre ad un flusso molto rapido del gas, in maniera da ridurre il tempo di contatto tra questo e il substrato. In maniera analoga si può invece decidere di diluire l'idrocarburo nel gas inerte. Normalmente si osservano delle proporzioni ottimali, come per esempio nel caso di acetilene al 9% e il rimanente diviso tra azoto e una piccola quantità di idrogeno.

Bisogna ricordare che l'uso della fornace non è strettamente necessario per generare il calore necessario per la formazione dei nanotubi. È possibile far crescere i nanotubi attorno a dei fili conduttori nei quali viene fatta passare corrente, oppure utilizzando plasma o riscaldando il gas con radiofrequenze.

La fornace verticale è utilizzata maggiormente per la produzione continua di nanotubi e nanofibre. Il catalizzatore viene lasciato cadere dall'alto, e i nanotubi si accrescono durante la sua discesa e vengono raccolti nel fondo. Oltre alla pos-

Figura 2.18: Apparato per CVD utilizzato per il progetto NanoChanT.

sibilità di produrre nanotubi senza interruzioni, un ulteriore vantaggio è dato dal non dover purificare o rimuovere il substrato. Questo apparato è stato messo in commercio per la produzione di massa (diverse tonnellate per anno) di MWNT. La maggior parte di essi viene impiegata come elettrodi nelle batterie a ioni di litio oppure come materiale riempitivo in polimeri conduttori.

Anche se, al momento, il progetto NanoChanT non prevede di far uso di questa tecnica, pare opportuno descrivere anche la produzione tramite *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition* (PECVD), che è molto diffusa. Un plasma è un gas ionizzato, e in questo caso particolare vengono utilizzati i cosiddetti *plasma freddi*, generati tramite eccitazioni dc, rf oppure microonde. Un filo conduttore riscaldato dal passaggio di corrente favorisce la formazione di nanotubi e nanofibre attorno a sé. Durante la crescita dei CN, il gas contenente carbonio (spesso C_2H_2) viene continuamente decomposto dal plasma ad un tasso maggiore rispetto alla pirolisi, e questo crea dei depositi di carbonio amorfo. Viene quindi introdotto del NH_3 nel plasma per dissolvere questi depositi. Un rapporto ottimale tra le due sostanze ($C_2H_2:NH_3$ 40:200) a $700^\circ C$ bilancia la produzione e il dissolvimento dei depositi di carbonio amorfo, rendendo il substrato privo di questi.

La PECVD viene utilizzata per produrre nanotubi e nanofibre allineate verticalmente rispetto al substrato. L'allineamento è un effetto indotto dal plasma, ed è probabilmente causato dal campo elettrico che si crea attorno ai fili conduttori. Il campo elettrico viene stimato nell'ordine di $0.1\text{V}/\mu\text{m}$.

Capitolo 3

Il Sito Web

Per mostrare alla comunità dei ricercatori (e a chiunque sia interessato all'argomento) lo stato del progetto NanoChanT, oltre alla consueta pubblicazione di articoli è stato deciso di creare un sito web. Questo sito, oltre a presentare i risultati ottenuti e i progetti futuri, servirà anche da *database* per gli articoli che i partecipanti all'esperimento hanno utilizzato o che ritengono essere strettamente correlati alla loro attività. Per questioni relative al diritto d'autore solo utenti autorizzati potranno effettuare il *download* degli articoli desiderati tramite un *link* interno al sito, ma tutti potranno effettuare ricerche nell'indice e poi procurarsi eventualmente una copia digitale (o cartacea) degli articoli.

Verranno di seguito esposte le motivazioni che hanno condotto lo sviluppatore, cioè il laureando, a programmare il sito così come lo si può visitare sul web¹.

3.1 La scelta user-friendly

3.1.1 Lo stato dell'arte sul web

Sul web è facile imbattersi in database interfacciati. Per esempio, quando vogliamo acquistare un DVD recentemente messo in commercio, ci colleghiamo al sito di un rivenditore e immettiamo il titolo desiderato in un modulo di ricerca. Il browser invia la richiesta al webserver remoto, il quale esegue appunto una ricerca nel catalogo dei film a disposizione, e fornisce una risposta, possibilmente abbastanza semplice da interpretare, contenente le corrispondenze trovate.

¹Attualmente si trova in <http://www.bo.infn.it/nanochant>

Il meccanismo è semplice da utilizzare, tuttavia per arrivare a poter fare una cosa simile sul web sono occorsi anni di progressi nell'ingegneria del software. Infatti, esistono ancora molte interfacce molto meno elaborate di quella appena descritta, che mostrano all'utente semplicemente una riga vuota in cui inserire un comando di ricerca (interfaccia *a riga di comando*). Spetta al visitatore del sito imparare le *regole di interrogazione* del database, le quali sono usualmente molto poco intuitive. Alcuni siti che raccolgono collezioni di articoli scientifici si presentano in questo modo.

In realtà i moduli di ricerca non fanno altro che assemblare automaticamente le regole di interrogazione, evitando questa 'fatica' all'utente. Per cui, in definitiva, il risultato finale è lo stesso. Comunemente si indica col termine *user-friendly* questa scelta da parte dei programmatori di semplificare l'uso di un software per gli utenti finali 'nascondendone' il reale funzionamento. Questa è la tendenza attuale, fatte dovute notevoli eccezioni di cui si parlerà a breve.

Data la situazione, si può essere indotti a credere che le interfacce a riga di comando siano vestigia di un web 'del passato', che sono rimaste tali per indolenza dei programmatori, per mancanza di fondi da parte dei gestori del sito, o per altre ragioni (per esempio, gli utenti che frequentano abitualmente quel sito non ritengono di trarre particolari vantaggi da tale cambiamento). In alcuni casi è così, ma ad un esame più attento si nota che, ad esempio, il sito più 'cliccato' del mondo, il motore di ricerca Google, è tutt'altro che user-friendly (Fig. 3.1).

Figura 3.1: Il motore di ricerca Google. Un esempio di come la mancanza di *user-friendliness* non è necessariamente accompagnata da scarsa efficienza. In una pagina collegata vengono comunque date le 'istruzioni per l'uso'.

Si capisce dunque che la scelta dell'interfaccia non può essere lasciata solo al gusto degli sviluppatori, ma deve essere indirizzata anche dall'analisi di almeno quattro fattori fondamentali: *efficienza*, *calcolabilità*, *prevedibilità* e *controllo*[9]:

- **Efficienza** Anche se si tratta di un concetto abbastanza generico, è facile capire di cosa si tratta: fornire all'utente ciò che desidera nel modo migliore possibile. Ad esempio, un motore di ricerca dovrebbe essere caricato nel più breve tempo possibile, perché il navigatore è interessato ai *risultati* della ricerca e non a chi gli permette di arrivarci. Allo stesso modo, questi dovrebbero essere disposti sullo schermo in maniera leggibile in modo da individuare il link cercato a colpo d'occhio, o comunque molto rapidamente. Per ricerche molto complesse, che potrebbero fornire *troppi* risultati, un'interfaccia che permetta di definire campi molto precisi potrebbe essere un fattore determinante per l'efficienza del sito.
- **Calcolabilità** Riguarda gli aspetti puramente quantitativi della gestione. Soprattutto in ambienti commerciali, è di fondamentale importanza poter calcolare il numero di accessi al sito², perché questa è in definitiva una stima del successo del sito. Anche non considerando gli aspetti strettamente economici, una valutazione del numero di *cross-reference* (o di link sul web) fornisce comunque indicazioni su quanto un'opera venga apprezzata.
- **Prevedibilità** Si tratta di un punto davvero cruciale. Gli utenti si aspettano che i servizi offerti siano sempre gli stessi, indipendentemente dal tempo e dal posto in cui li richiedono, in modo da non avere sorprese. Molti trovano estremamente fastidioso il fatto che uno stesso sito presenti impaginazioni differenti a seconda del browser utilizzato. Questo problema è in effetti attualmente superato, ma in passato si è rivelato essere talmente grave da indurre il W3C³ a pubblicare nel 1997 una serie di requisiti funzionali per l'estensione del linguaggio HTML, tra i quali c'era la richiesta esplicita di standardizzare HTML sulla base dei browser Netscape Navigator 3.0 e Microsoft Internet Explorer 3.0 (attualmente un problema analogo affligge le codifiche di compressione video *divx*).

²si utilizzano dei programmi chiamati *access counter*.

³*World Wide Web Consortium*, gestito dal *Laboratory for Computer Science* del MIT. In collaborazione con il CERN e l'INRIA, questi enti hanno un ruolo fondamentale nello sviluppo di standard e specifiche per il *World Wide Web*. Vedere <http://www.w3c.org>

È una tendenza abbastanza generale quella di aspettarsi che non solo lo stesso sito, ma un'intera categoria di siti, si presenti all'utente con una interfaccia pressochè identica. Questo è facilmente verificabile visitando diversi motori di ricerca (Google, Altavista, Yahoo!), siti commerciali che vendono materiale audio (Amazon, CDflash), video (DVD.it, Amazon) e cartaceo (BoL, Amazon), aste on-line (E-bay).

- **Controllo** Un sito web raramente è collocato da solo su un server dedicato (questo è vero per i siti più importanti, ma non sempre), per cui difetti di programmazione o anche di organizzazione possono far diminuire drasticamente le prestazioni non solo del sito stesso, ma anche di tutti quelli che sono fisicamente presenti sulla stessa macchina. Per meglio spiegare il concetto, si prenda ancora ad esempio un motore di ricerca. Il computer sul quale è in funzione il programma che effettua le ricerche compie un numero estremamente elevato di operazioni al secondo e, come già sottolineato in precedenza, la velocità di esecuzione è di cruciale importanza. Se i visitatori passano molto tempo sulla pagina cercando di capire cosa e dove devono inserire per eseguire le richieste, si moltiplicano anche i 'tempi morti' del server, che rimane semplicemente in attesa dei comandi. Tecnicamente si dice che vengono 'sprecate risorse', nel senso che l'elaboratore nel frattempo potrebbe fare altro, nello specifico fornire servizi ad altri utenti. Al giorno d'oggi, anche questo problema è stato notevolmente circoscritto⁴.

In definitiva, nei *search engine* si cerca di indurre l'utente ad un comportamento analogo a quello che adotterebbe in un *fast-food*: consumare in fretta ed andarsene. Invece, nei siti commerciali (come è facile immaginare) gli sforzi sono mirati soprattutto a *trattenere* l'utente, a farlo navigare tra le pagine nel tentativo di convincerlo ad acquistare altro materiale al quale probabilmente in principio non aveva neanche pensato. In seguito verrà fatto esplicito riferimento ad un altro sito (non commerciale) dal quale quello del progetto NanoChanT trae ispirazione.

Il controllo dovrebbe permettere (o almeno si spera) di evitare anche altri danni più pericolosi da parte di hacker e cracker. Infatti, una interfaccia spesso fornisce all'utente solo un sottoinsieme di tutte le possibili interro-

⁴Questo grazie all'ottimizzazione della gestione dei processi nei sistemi operativi che permettono il multithreading, operazione eseguita comunemente dai kernel più recenti.

gazioni che è possibile fare al database, e quelle escluse normalmente non sono ritenute importanti per un utilizzo da parte degli utenti finali. Con queste sarebbe possibile ottenere per esempio informazioni sul sistema che gestisce il database⁵, ed è ovviamente auspicabile che ciò non avvenga.

3.2 Il progetto

Fatte le precedenti considerazioni, bisogna applicarle al caso in questione. Il sito del progetto NanoChanT è di natura scientifica e non commerciale, e dovrebbe permettere ai ricercatori di trovare le informazioni cercate (gli articoli) in un tempo relativamente breve, ma deve anche fornire gli strumenti per eseguire una ricerca dettagliata.

Un sito che fornisce questi servizi nelle modalità indicate è per esempio *arXiv.org*⁶, per cui si è deciso di prenderlo a modello per la parte relativa al database di articoli. Questo sito, originariamente gestito dal *Los Alamos National Laboratory* (LANL) raccoglie numerosi *preprint* di articoli scientifici, principalmente di fisica e matematica.

Nel sito del progetto NanoChanT l'organizzazione grafica è tripartita, con due sezioni fisse e una variabile a seconda della pagina selezionata. In alto viene posto un titolo, che oltre a indicare sempre che sito si sta visitando⁷, aiuta anche il lettore ad orientarsi. Sulla sinistra è situata una *navbar* (*navigation bar*, 'barra di navigazione'), cioè un'area sulla quale sono poste in evidenza le sezioni visitabili. Questo permette facilmente di aggiungere o togliere in futuro delle sezioni, senza dover modificare i link in ogni pagina. Infine, al centro, vengono visualizzate tutte le pagine.

È stato deciso di utilizzare la lingua inglese per permettere a chiunque nel mondo di usufruire dei servizi messi a disposizione senza barriere linguistiche. Si ritiene che il target di utenza abbia generalmente una conoscenza basilare di questo idioma.

⁵Si pensi alla funzione *phpinfo()* di PHP.

⁶Vedere <http://it.arxiv.org> o uno dei suoi numerosi *mirror*.

⁷Può essere utile se si tengono aperte contemporaneamente più pagine, o se ci si arriva tramite un link

3.2.1 Il database

È costituito semplicemente da una tabella, in cui ogni record contiene le informazioni ritenute fondamentali per identificare un articolo.

1. Numero identificativo interno al database;
2. Titolo;
3. Autori;
4. Istituti di appartenenza degli autori;
5. Rivista che ha pubblicato l'articolo;
6. Anno di pubblicazione;
7. Parole chiave (*keywords*);
8. Commenti da parte dei gestori del sito;
9. Argomenti trattati. Possono essere una o più parole chiave tra *porous alumina*, *CN*, *CN in alumina*, *nanowires*, *bonding*, *field emission*.

È stato poi aggiunto un ulteriore campo che contiene il nome del file dell'articolo per un eventuale download, ma questo non è considerato un campo di ricerca in quanto collegato in maniera univoca con l'articolo stesso.

È possibile eseguire ricerche su tutti questi campi legando tra loro le proposizioni con implicazioni logiche AND/OR. Ad esempio⁸:

```
cerca tra articoli dove (titolo = <titolo dell'articolo> AND autori = <autori>)  
OR Keyword = <parola chiave>
```

Il software utilizzato permette una ricerca anche più raffinata. Molti articoli sono scritti da più di una persona, per cui è utile inserire per esempio due cognomi e aspettarsi che la ricerca venga effettuata considerando l'AND di questi. Tale caratteristica è stata implementata per i campi *titolo*, *autori*, *istituti*, *rivista*, *keywords*, *commenti*.

⁸L'esempio viene fornito in un metalinguaggio.

Figura 3.2: Pagina di ricerca di un articolo nel database del sito del progetto NanoChanT.

Figura 3.3: La pagina per l'inserimento di un nuovo articolo nel database del sito del progetto NanoChanT.

3.2.2 Problematiche relative alla sicurezza

È stato ritenuto necessario limitare alcune funzionalità del sito web ai soli utenti autorizzati. Per esempio, soltanto i gestori possono inserire nuovi articoli, oppure modificare o cancellare quelli precedentemente inseriti. Inoltre, dal momento che gli articoli conservati sono protetti da diritto d'autore, il download è consentito soltanto ai membri del dipartimento che ha sottoscritto l'abbonamento alle riviste che pubblicano questi articoli. La decisione di chi debba ricevere le autorizzazioni necessarie viene lasciata ai gestori del sito.

Per implementare questa funzionalità è stata aggiunta una tabella contenete i seguenti campi:

1. User Id
2. Password
3. Livello di autorizzazione (uno tra '*generico*', '*registrato*', '*sviluppatore*')
4. Attivato

Un utente generico può eseguire ricerche nel database senza dover inserire password, ma spetta poi a lui procurarsi gli articoli. Un utente registrato, invece, può anche eseguire il download. Infine, lo sviluppatore oltre a questo può anche modificare il database e gestisce i permessi. Il codice PHP è responsabile del riconoscimento dei permessi, dopo che l'utente si sia eventualmente registrato in un'apposita pagina (*Login area*). Il campo 'Attivato' permette ai gestori del sito di sospendere momentaneamente un *account* (i motivi per farlo possono essere molteplici), senza però cancellare i dati relativi all'utente in questione.

3.3 Il software utilizzato

Navigando sul web risulta evidente che le interrogazioni ai database remoti sono ormai diffusissime. C'è quindi da aspettarsi che diverse case produttrici di software si siano messe d'accordo per fornire agli sviluppatori degli strumenti potenti ed affidabili per portare a termine i loro progetti. Sebbene case come Microsoft e Oracle propongono il loro software sul commercio, molti sviluppatori preferiscono utilizzare il cosiddetto *quartetto LAMP*, cioè Linux - Apache - MySQL - PHP. Essi rappresentano un gruppo di prodotti diventati un riferimento nello sviluppo di siti web in internet[10].

3.3.1 Open Source: pro e contro

Il software utilizzato per lo sviluppo di questo sito internet (a parte il sistema operativo) è distribuito con licenza *open source* (letteralmente 'codice sorgente aperto'). Questa politica di distribuzione fa riferimento all'omonimo movimento di pensiero che persegue l'obiettivo di far sì che nel mondo il software sia distribuito in modalità *freeware* per tutti. Il termine *freeware* non significa *gratis* ma *libero*⁹. La licenza open source prevede che il software venga fornito sia nel formato compilato che in quello sorgente. Sul sorgente chiunque può effettuare modifiche e, nel caso in cui lo faccia, è tenuto a distribuire il nuovo sorgente insieme con il programma in forma eseguibile. I vantaggi del software *open source* sono diversi:

- **Chiunque può vedere dal sorgente cosa fa realmente il software, senza timore che possano essere eseguiti codici 'maligni';**
- **Chiunque può intervenire modificandolo, sia per correggere eventuali errori, sia per personalizzarlo per i propri scopi;**
- **Dato che esiste la disponibilità del sorgente, ci sarà sempre la possibilità di aggiornare il software senza rischiare di trovarsi nella situazioni in cui chi lo vende un giorno decidesse di non supportarlo più;**
- **Poter studiare il sorgente è un'occasione di imparare nuove tecniche di programmazione.**

Inoltre, il software *open source* non richiede il pagamento di somme di denaro, a parte l'eventuale rimborso delle spese per i materiali impiegati nella fornitura: confezione, CD o DVD, manuale, trasporto.

⁹Il software open source è di solito distribuito nella modalità GPL, *GNU Public License*, del progetto GNU fondato da Richard Stallman. Vedere <http://www.gnu.org>

Sul web le pagine dei siti 'dinamici' vengono spesso create - e questo è anche il caso in questione - con HTML e PHP in funzione sul server, che interfaccia i dati di un database MySQL. Le pagine vengono inviate ai browser da un webserver Apache, che il più delle volte è installato su macchine con sistema operativo Linux. Esistono tuttavia versioni di MySQL, PHP e Apache per altri sistemi operativi (nel caso specifico è stato utilizzato per lo sviluppo *Microsoft Windows XP*).

È opinione diffusa nell'ambiente scientifico, e il laureando si dichiara in accordo con essa, che la filosofia di base del software libero sia concorde con i principi che dovrebbero ispirare la ricerca. In fondo, ogni esperimento deve essere riproducibile da qualunque altro ricercatore, e i risultati possono essere migliorati per il bene della comunità (da intendersi in un senso piuttosto ampio).

Sembra comunque opportuno ricordare che non tutti utilizzano software *open source*. G. Bezroukov, docente di informatica alla Fairleigh Dickinson University (New Jersey) nonché membro attivo della 'comunità' *open source* osserva, soprattutto grazie alla sua attività accademica, che si sta diffondendo una visione eccessivamente ottimistica e scarsamente realistica della pur positiva realtà del software libero. Le notizie, filtrate dalla stampa, spesso danno risalto soltanto ai traguardi raggiunti ed ai progetti di successo, mancando però di riportare i fallimenti, le difficoltà ed i progetti abortiti. Bezroukov muove la propria critica analizzando il testo di Eric S. Raymond "The Cathedral and the Bazaar". Prima di tutto, sostiene, bisogna considerare la comunità *open source* come un'altro tipo di comunità scientifica: lo sviluppo di Linux va visto non come un nuovo modello rivoluzionario, ma come la logica continuazione del Progetto GNU, che all'inizio era legato al *Massachusetts Institute of Technology*. Questo collegamento sarebbe stato alla base del successo del Progetto GNU, così come quello con l'Università di Helsinki lo è stato per Linux¹⁰.

Inoltre Bezroukov si trova in disaccordo con le seguenti affermazioni di Raymond:

- **La Legge di Brooks¹¹ non si può applicare al modello di sviluppo distribuito basato su Internet.** Questo assunto non viene smentito, e anzi l'utilizzo di Internet favorisce l'interazione tra gli sviluppatori. Secondo Raymond, invece, aggiungere programmatori porta sostanzialmente ad un ritardo nello sviluppo.

¹⁰Il 'padre' di Linux, Linus Torvalds, lavorava lì.

¹¹Frderick Brooks nel suo "The Mythical Mammouth" afferma che la complessità ed i costi di comunicazione di un progetto aumentano in ragione del quadrato del numero degli sviluppatori, mentre i costi aumentano solo linearmente.

- **Se ci sono abbastanza occhi che cercano errori, gli errori sono di poco conto.** Per progetti molto complessi, le statistiche indicano che ogni due o tre errori corretti se ne può generare un altro. Il debugging parallelo non coordinato può portare ritardi nello sviluppo, ma oggi i Progetti tendono a dotarsi di sistemi di *bug tracking*¹².
- **Linux appartiene al modello *a Bazaar*.** Questa metafora di sviluppo centralizzato contro sviluppo decentralizzato, oltre a sembrare semplicistica, è anche intrinsecamente sbagliata poichè, ad esempio, il *kernel* di Linux viene sviluppato da un gruppo abbastanza ristretto (un centinaio) di programmatori.
- **Il modello di sviluppo del software *open source* porta automaticamente migliori risultati.** Lo stesso Linus Torvalds afferma che ciò non è vero se non si applica il modello con le giuste condizioni. La qualità media del software libero è effettivamente superiore a quella del software proprietario, ma vi sono dei campi in cui essa è estremamente bassa in quanto l'iniziativa alla programmazione è legata alla necessità e alla voglia dei singoli (o dei gruppi) e non alle logiche di mercato.

3.3.2 MySQL

Questo RDBMS (*Relational DataBase Management System*) è stato creato da TcX, una società svedese che aveva la necessità di lavorare con un database, le cui caratteristiche prevalenti fossero velocità e flessibilità. Non avendo trovato nulla di simile sul mercato, decise di sviluppare questo database e di metterlo a disposizione di tutti con licenza GPL. Le sue caratteristiche, oltre che a università ed enti pubblici, sono molto gradite al mercato aziendale, il che spesso determina il successo o l'insuccesso di un prodotto software. Dal 2001 il software è diventato di proprietà di MySQL AB, società che continua a sostenere la politica dell'open source, ma prevede anche una licenza d'uso commerciale a pagamento nel caso in cui il software venga integrato in applicazioni realizzate per attività che ne traggono un profitto. Grazie agli introiti di queste licenze, e alle consulenze e alle assistenze che fornisce, MySQL AB continua a sviluppare nuove versioni di MySQL con licenza GPL.

¹²Un sottogruppo di programmatori ha il compito di coordinare il *debug*.

3.3.3 PHP

PHP è un linguaggio di programmazione che consente di arricchire le pagine web di codice *script* che sarà eseguito sul server, permettendo la generazione dinamica del codice HTML. Il motore di esecuzione di PHP è open source e si presenta come un modulo da affiancare ad un webserver, di solito Apache. Il nome PHP significa *PHP: Hypertext Preprocessor*¹³, anche se alcuni per ragioni storiche preferiscono attribuire il significato di *personal* alla prima P.

Nel 1994 Rasmus Lerdorf scrisse PHP/FI (Personal Home Page/Form Interpreter), poi a seguito del successo di questo software rilasciò una seconda versione alla quale aveva aggiunto il supporto per miniSQL. Dalla versione 4 è stata aggiunta l'architettura *Object Oriented*.

Poiché uno script PHP è una pagina HTML all'interno della quale viene inserito codice di scripting, PHP viene definito un linguaggio *HTML - Embedded*.

Il codice PHP viene eseguito dal motore presente sul server *prima* che la pagina venga inviata al browser: quest'ultimo riceverà esclusivamente il codice HTML generato dinamicamente, e non avrà alcuna possibilità di accesso al codice PHP, aumentando notevolmente la sicurezza.

PHP è una valida alternativa a linguaggi come Perl, Python, Java, VBScript o C#, ed ha una sintassi molto simile a quella di C/C++, Java e Perl[11].

¹³Si tratta di una definizione ricorsiva. Anche GNU è una definizione di questo tipo: 'GNU: GNU's Not Unix'.

Conclusioni

Nel 1945 fu costruito ENIAC, il primo calcolatore elettronico. La sua potenza si misurava in cavalli, come per le automobili, pesava 30 tonnellate, occupava un'intera stanza e gli uomini potevano camminarci dentro¹⁴. Negli anni '50 gli scienziati prevedevano che entro trent'anni si sarebbe arrivati a costruire computer grandi come un'automobile, e che avrebbero consumato circa 20 cavalli. Negli anni '80, invece, furono messi in commercio i primi *personal computer*, che ancora oggi possono essere posti su una scrivania, e ora esistono palmari che entrano comodamente in tasca e sfruttano una batteria da 1.5V. Tutto questo grazie ai transistor e alla microtecnologia.

Molti ritengono che ci troviamo oggi al limite di un ulteriore 'cambio di paradigma' tecnologico, in cui la microelettronica cederà il passo alla nanoelettronica, con tutti i vantaggi che ne conseguiranno. Anche la fisica sperimentale potrà trarre giovamento dalle novità messe a disposizione dalle nanotecnologie: nuovi rivelatori, come quello ideato dal progetto NanoChanT, dovrebbero permettere ai ricercatori di ottenere risultati più precisi di circa un ordine di grandezza, con l'obiettivo di consolidare e migliorare la nostra conoscenza del mondo delle particelle e, perché no, la speranza di osservare qualche nuovo fenomeno.

Il contributo del laureando si limita per ora nel mettere a disposizione della comunità scientifica (ma in effetti a tutti gli interessati) un strumento, si spera utile, per effettuare la ricerca di articoli riguardanti le nanotecnologie.

Per completare il panorama, potrebbe essere una interessante curiosità il fatto che le nanotecnologie non sono un 'fenomeno' legato al solo mondo scientifico, ma anche quello artistico ne è rimasto affascinato. Ricordiamo ad esempio i casi celebri della serie tv "*Star Trek: The Next Generation*", e del romanzo "*Preda*" di Michael Crichton, noto

¹⁴È noto, per altro, che gli errori di un programma sono chiamati *bug*, dall'inglese 'insetto', perché alcuni errori di calcolo commessi dall'ENIAC erano dovuti a degli scarafaggi che usavano le valvole termoioniche come tana.

scrittore di fantascienza e non¹⁵. Bisogna registrare tuttavia che in questi due casi le nanotecnologie non sono utilizzate propriamente a fin di bene. Come purtroppo ci insegna la storia del XX secolo, anche le scoperte più sensazionali possono portare terribili disastri se usate senza giudizio. Forse questo dovrebbe indurre tutti noi a riflettere e a non dimenticare.

¹⁵Nel 1993 il film "Jurassic Park", tratto da un suo romanzo, fece 'scoprire' ai non addetti al lavoro l'ingegneria genetica. Dovremmo augurarci un effetto simile per le nanotecnologie?

Appendice: Esempi di codice

Di seguito verranno mostrati degli esempi di codice ritenuti particolarmente interessanti, in quanto evidenziano l'integrazione tra i linguaggi HTML, PHP e MySQL. Poichè questa è una sezione tecnica, verrà illustrato *cosa fa* l'algoritmo, senza soffermarsi sulla definizione per esempio dei TAG HTML o sulla grammatica di PHP. Ci si aspetta che il lettore abbia una certa confidenza con questi linguaggi, o, almeno per analogia grammaticale, con C/C++ oppure Java.

Prima di mostrare una parte del file *find_paper.php* è necessario introdurre il significato di alcune variabili, costanti e funzioni speciali. Poichè in PHP ogni variabile deve essere preceduta dal simbolo \$, per alleggerire la lettura verrà omissa nei commenti, a meno che non sia necessario per evitare ambiguità.

La variabile `dbresult` è booleana, e indica se la funzione `mysql_query()` ha condotto l'operazione di query al database correttamente. In caso di errore la funzione `errore()` ne illustra i motivi. Il numero di record trovati viene estratto tramite `mysql_affected_rows()`, mentre ogni campo viene inserito nell'*array row* mediante `mysql_fetch_row()`. Il programma gestisce una variabile globale denominata `user_lvl` che indica il tipo di permesso che ha l'utente, cioè uno tra `'generic'`, `'registered'`, `'programmer'`. Il significato di questi permessi è stato illustrato nel capitolo 3. Ogni istanza del *browser* ha associata una stringa identificativa detta *session identifier*, memorizzata nel codice nella variabile `user_SID`. La funzione `session_is_registered()` controlla che questo valore non sia nullo, per evitare che qualcuno (intenzionalmente o no) acceda direttamente a questa pagina PHP senza passare per un controllo di identità. In caso questa variabile sia nulla, l'utente viene considerato 'generico'. Infine la funzione `mysql_free_result()` libera lo spazio in memoria.


```
        ");
    }
    print("<br></li>\n");
}
print("</ol>\n");
mysql_free_result($dbresult) or die(errore());
}
else
{
    print("No article found!\n");
    print(errore());
}
```

Il programma effettua prima una connessione al database, quindi lo interroga. La variabile `query` viene passata alla pagina PHP dalla pagina di ricerca, ed è una stringa contenente le istruzioni MySQL per effettuare una *query*. Ad esempio:

```
SELECT * FROM papers WHERE (titolo = 'titolo dell'articolo' AND
autori = 'autori') OR keywords = 'parola chiave';
```

Viene quindi visualizzato il numero di record trovati ('Papers found'). Ora viene visualizzata una lista numerata (TAG ``) degli articoli. Ogni punto corrisponde ad un articolo, quindi verrà eseguito un ciclo `for` con tante iterazioni quanti sono gli articoli. Ogni volta per prima cosa viene estratto l'array dei campi tramite

```
$row = mysql_fetch_row($dbresult)
```

Quindi viene controllato se l'utente ha il permesso di scaricare il file contenente l'articolo. In caso positivo, il titolo viene reso link ipertestuale con riferimento all'indirizzo di questo file. È stato aggiunto un breve *javascript* che visualizza una scritta (Download `<titolo articolo>`) nella *status bar* del browser.

Poi vengono stampati gli altri campi, infine viene controllato se l'utente è uno dei gestori del sito. In caso affermativo, vengono aggiunti per ogni record i link ipertestuali per modificare o cancellare la referenza. Questi puntano ad apposite pagine PHP. Anche in questo caso sono stati aggiunti dei *javascript* che specificano il significato dei link.

```
print(
"<a href=
aggiornamento.php?id=$row[0]
onMouseOver=
window.status='Modify $row[1]'; return true
> modify</a>&nbsp;&nbsp;  <a href="
```

```
cancella.php?id=$row[0]
onMouseOver=
window.status='Remove $row[1]'; return true
» remove</a><br>
n ');
```

Bibliografia

- [1] R. Angelucci, F. Corticelli, M. Cuffiani, G.M. Dallavalle, L. Malferrari, A. Montanari, C. Montanari, F. Odorici, R. Rizzoli, C. Summonte, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **125** (2003) 164.
- [2] R. Angelucci, F. Corticelli, M. Cuffiani, G.M. Dallavalle, L. Malferrari, A. Montanari, F. Odorici, R. Rizzoli, G.P. Veronese. A novel position detector based on nanotechnologies: the NanoChanT project, In corso di pubblicazione su Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) .
- [3] IPE Nanotube Primer, <http://ipn2.epfl.ch/CHBU> .
- [4] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl, R. E. Smalley, Nature **318** (1985) 162.
- [5] S. Iijima, Nature **354** (1991) 56.
- [6] R. Angelucci, R. Rizzoli, F. Corticelli, A. Parisini, V. Vinciguerra, F. Bevilacqua. Carbon Nanotubes: synthesis and applications, Nota CNR.
- [7] P. G. Collins, P. Avouris, Le Scienze Dossier **11** (2002) 24.
- [8] K. B. Teo, C. Singh, M. Chhowalla, W. I. Milne, Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology **Vol. X** (2003) 1.
- [9] G. Ritzer, *Il mondo alla McDonald's*, Il Mulino, 1997.
- [10] S. Rubini, *MySQL Pocket*, Apogeo, 2004.
- [11] M. Canducci, *PHP5 Pocket*, Apogeo, 2004.

Elenco delle figure

1.1	Il progetto di rivelatore Nanochannel Active Layer.	11
1.2	Immagine SEM di un campione di allumina porosa.	12
1.3	Nanopori in allumina. Notare passo e diametro in base alla scala di 200nm. 13	
1.4	Nanofili di cobalto. Potrebbero essere una alternativa ai nanotubi di carbonio nella funzione di conduttori elettrici.	14
1.5	Nanotubi di carbonio sintetizzati senza stampo di alumina. Diametro 50nm, lunghezza 20 μ m.	14
1.6	Nanotubi di carbonio. Sulla sommità sono evidenti i catalizzatori metallici. 15	
2.1	Arrotolamento di un foglio di grafene.	18
2.2	Foglio di grafene schematizzato (abaco di de Heer) e assi di arrotolamento. Per realizzare un tubo (n,m) bisogna spostarsi dal punto di origine n volte lungo a_1 e m volte lungo a_2 , quindi arrotolare il foglio in modo che i due punti finali coincidano.	19
2.3	I tre tipi di nanotubi di carbonio.	19
2.4	Multiwall Nanotube. Le shell più interne tendono a chiudersi con una semisfera di fullerene.	20
2.5	Rappresentazione di una giunzione.	20
2.6	Sinistra: spettroscopia ad effetto tunnel: misure di conduttività. Destra: band-gap in funzione del diametro del nanotubo. Verificata la dipendenza $1/d$	22
2.7	Frank et al., set-up sperimentale, con un esempio della conduttanza in funzione della posizione verticale della fibra: la conduttanza incrementa in passi discreti più il nanotubo viene posto in contatto con un liquido conduttore. Frank et al., Science 280 (1998) 1744	23
2.8	Nanotubo posto su dei contatti metallici.	24
2.9	Variazione periodica della resistenza con un campo magnetico variabile. 24	

2.10	Modulo di Young. Stimato dal coefficiente angolare è di circa 800 GPa. J.-P. Salvetat et al., Adv. Mater. 11 (1999) 161	25
2.11	La curva I-V mostra un comportamento ohmico per voltaggio negativo sul gate, mentre un voltaggio positivo porta ad una forte diminuzione della corrente. La conduttanza varia su almeno sei ordini di grandezza. S.J. Tans et al., Nature 393 (1998) 49.	26
2.12	Display a nanotubi Samsung 4.5" full-color.	28
2.13	Risposta elettrica di un SWNT semiconduttore a molecole di NO ₂ . La variazione della conduttanza col tempo dipende fortemente dal flusso di gas. J. Kong et al., Science 287 (2000) 622.	29
2.14	Schema della cristallizzazione e analisi dell'elica di streptadivina formata sul nanotubo. La trasformata di Fourier, l'immagine sperimentale e il modello tridimensionale mostrano l'avvolgimento in senso antiorario.	29
2.15	Scarica ad arco.	32
2.16	Ablazione laser.	33
2.17	Deposito catalitico di vapori chimici (CVD).	34
2.18	Apparato per CVD utilizzato per il progetto NanoChanT.	35
3.1	Il motore di ricerca Google. Un esempio di come la mancanza di <i>user-friendliness</i> non è necessariamente accompagnata da scarsa efficienza. In una pagina collegata vengono comunque date le 'istruzioni per l'uso'.	38
3.2	Pagina di ricerca di un articolo nel database del sito del progetto NanoChanT.	43
3.3	La pagina per l'inserimento di un nuovo articolo nel database del sito del progetto NanoChanT.	43

Ringraziamenti

Vorrei innanzi tutto ringraziare il prof. Marco Cuffiani e il dott. Odorici, che mi hanno seguito fino alla fine con attenzione ed una non trascurabile disponibilità. Inoltre, si sono coraggiosamente affidati ad uno studente per la realizzazione del sito del progetto NanoChanT invece che ad un programmatore professionista. Spero che in futuro non si presentino sorprese inaspettate: come noto, un computer può fare solo quello che è programmato per fare; purtroppo, non sempre il codice corrisponde alle intenzioni del programmatore.

Un grazie particolare va ai miei genitori e ai miei parenti di Milano, che incoraggiano sempre i miei studi in ogni occasione, e che quando passo gli esami sono più felici di quanto lo sia io stesso. Mio padre in questi anni sta scrivendo un dizionario etimologico scientifico (che personalmente ritengo di dubbia utilità): mi domando cosa abbia scritto alla voce 'nanotecnologie'. Per fortuna è aiutato nel lavoro da un fisico nucleare, suo amico.

Come potrei non salutare tutti gli amici che ho nella mia città: non elenco i nomi perché non mi sembra il caso di fare distinzioni, e poi perché sono onestamente troppi (lo si nota facilmente il Sabato sera, quando andiamo in una pizzeria senza aver prima prenotato). Sono i migliori al mondo - almeno, quella parte di mondo che conosco.

In questi anni a Bologna ho conosciuto un'infinità (numerabile) di persone, quattro delle quali hanno finito per rientrare nella categoria degli amici di casa, quindi hanno già avuto il loro spazio. Per quanto riguarda gli altri, penso che ognuno, leggendo questa pagina, sappia riconoscere in cuor suo se senta di far parte di quelli che posso chiamare amici, oppure no. Questi li ringrazio, perché non so come abbiano potuto sopportarmi, gli altri li saluto con affetto.

Infine, vorrei ringraziare due persone speciali che mi sono state vicine in un periodo in cui ero un po' giù di morale. Mi hanno fatto capire che sono situazioni che capitano a tutti, e che bisogna sempre affrontare le difficoltà che incontriamo con un atteggiamento positivo e "combattivo" (l'espressione non è mia).

