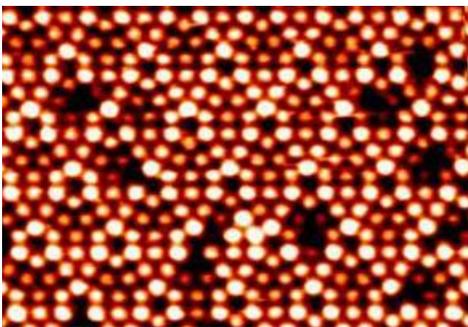
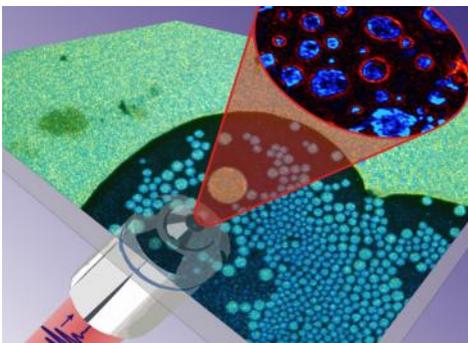
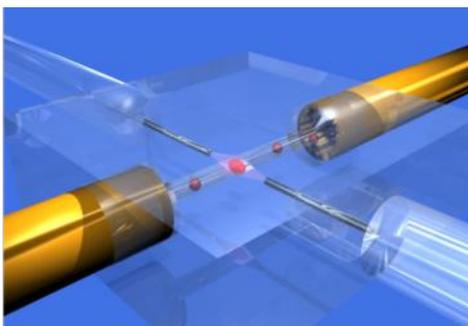


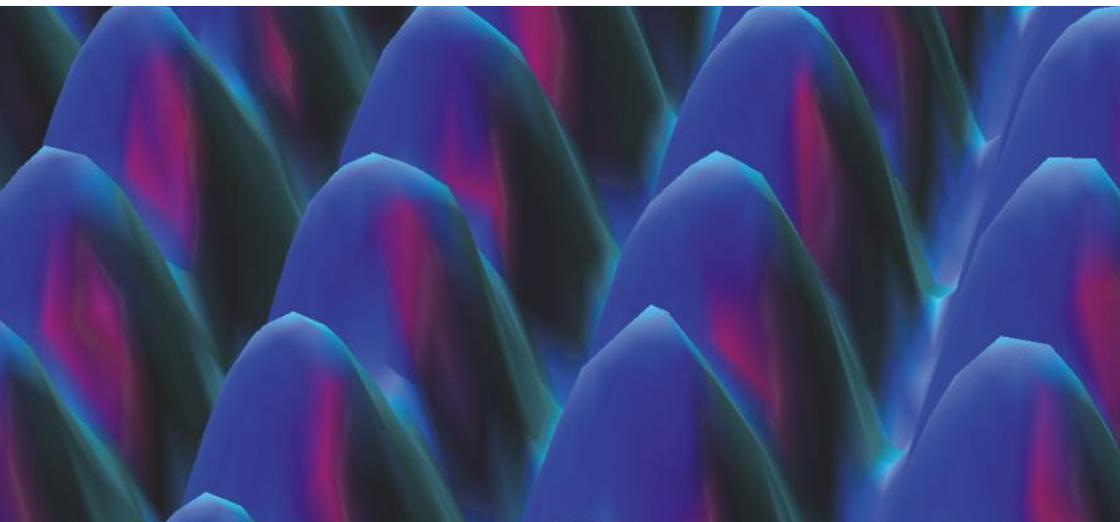
Il mondo dell'Ingegneria Fisica



POLITECNICO
MILANO 1863

DIPARTIMENTO DI FISICA

INTRODUZIONE



Il corso di studi in Ingegneria Fisica del Politecnico di Milano é nato nel 2001 con lo scopo di formare ingegneri capaci di contribuire allo sviluppo delle applicazioni piú moderne delle tecnologie in campo fisico e ottico.

In questo opuscolo vogliamo illustrare alcuni grandi risultati raggiunti grazie alla scoperta di fenomeni fisici sofisticati. I fenomeni scoperti nei laboratori di ricerca sono stati la premessa per invenzioni industriali che hanno a volte rivoluzionato il mondo. L'ingegnere fisico ha le conoscenze necessarie a inserirsi nell'attività di ricerca, nel trasferimento tecnologico al mondo industriale, e nell'attività di sviluppo industriale destinato alle applicazioni vere e proprie.

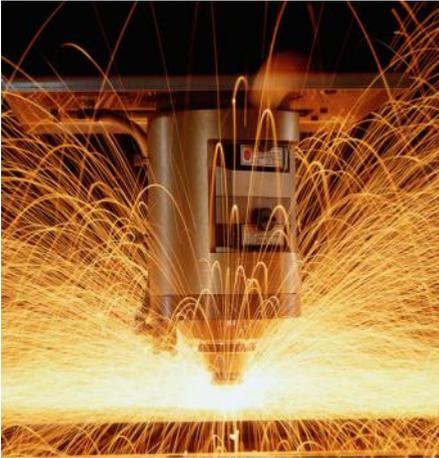
Al momento del conseguimento della laurea triennale, l'ingegnere fisico sar  in grado di lavorare sia in laboratori di ricerca che nel mondo industriale. Il biennio che conduce alla laurea magistrale permetterà di acquisire un livello di conoscenza piú elevato e di approfondire l'istruzione e le capacit  in settori scelti tra un ampio ventaglio di tematiche.

Dopo la laurea magistrale si pu  accedere

a una specializzazione ulteriore attraverso un dottorato di ricerca – in genere il primo passo verso la carriera nel mondo della ricerca – oppure entrare nel mondo industriale, inserendosi in industrie operanti nel settore della ricerca e sviluppo. Il percorso di studi dell'ingegnere fisico riguarda i settori delle Tecnologie Ottiche e Fisiche.

Le Tecnologie Ottiche si basano sui fenomeni di ottica e di fotonica e abbracciano i fenomeni fisici e i dispositivi associati alla generazione, trasmissione, manipolazione e utilizzazione della luce (o dei fotoni). Questo campo   stato aperto con l'invenzione del laser, le cui applicazioni sono ora vastissime: dalla scienza e tecnologia dell'informazione alla cura della salute dell'uomo, dai sensori ottici alle applicazioni nell'industria manifatturiera, alle svariate applicazioni scientifiche in settori quali la Fisica, la Chimica, la Biologia e la Medicina (a tutt'oggi, una ventina di scienziati legati al campo dell'ottica e dei laser sono stati insigniti del premio Nobel).

L'Ottica e la Fotonica rivestono ormai un ruolo molto importante sia in campo



scientifico che tecnologico. Dato il carattere pervasivo e strategico di queste nuove tecnologie, è probabile che le sorprese maggiori debbano ancora arrivare.

Appare pertanto ragionevole la previsione che l'Ottica e la Fotonica possano giocare, nel XXI secolo, un ruolo paragonabile a quello già ricoperto dall'Elettronica nel secolo appena trascorso.

Le Tecnologie Fisiche riguardano lo studio e l'applicazione di proprietà di materiali dalle caratteristiche particolari, e il controllo di fenomeni che avvengono nella materia su piccola scala, fino alla manipolazione dei singoli atomi.

Le applicazioni e gli ambiti in cui le scoperte procedono a grande velocità sono innumerevoli e così importanti da pervadere il mondo quotidiano.

L'importanza di tali scoperte è tale da avere condotto negli ultimi anni a una ventina di premi Nobel. Un esempio di queste innovazioni sono le memorie magnetiche usate nei computer (vedi la scheda su questo argomento nelle prossime pagine).

Queste memorie hanno avuto uno sviluppo enorme dovuto al rapido trasferimento alla tecnologia delle recenti scoperte sul trasporto di carica elettrica in particolari solidi magnetici – che sono valse al loro scopritore il premio Nobel della Fisica nel 2007.

I materiali superconduttori sono un altro importante esempio di come proprietà speciali della materia possano influenzare le applicazioni tecnologiche. Circuiti fatti con materiali superconduttori sono ora impiegati quando è necessario far circolare correnti molto elevate senza dissipare potenza.

Interessanti caratteristiche della materia sono a volte determinate dalle proprietà degli strati atomici più superficiali. Questo succede nei semiconduttori tecnologici, nei sensori di gas, nei catalizzatori.

Per "osservare" la materia fino alla scala atomica, e poterla quindi manipolare, si usano molteplici metodi: le superfici possono essere indagate utilizzando allora fasci di elettroni: quando questi hanno energia opportuna "vedono" solo il primo strato di atomi di un materiale o poco più. Altre tecniche sono basate invece sull'uso di fasci di fotoni, che a seconda della loro energia possono penetrare a profondità diverse nella materia.

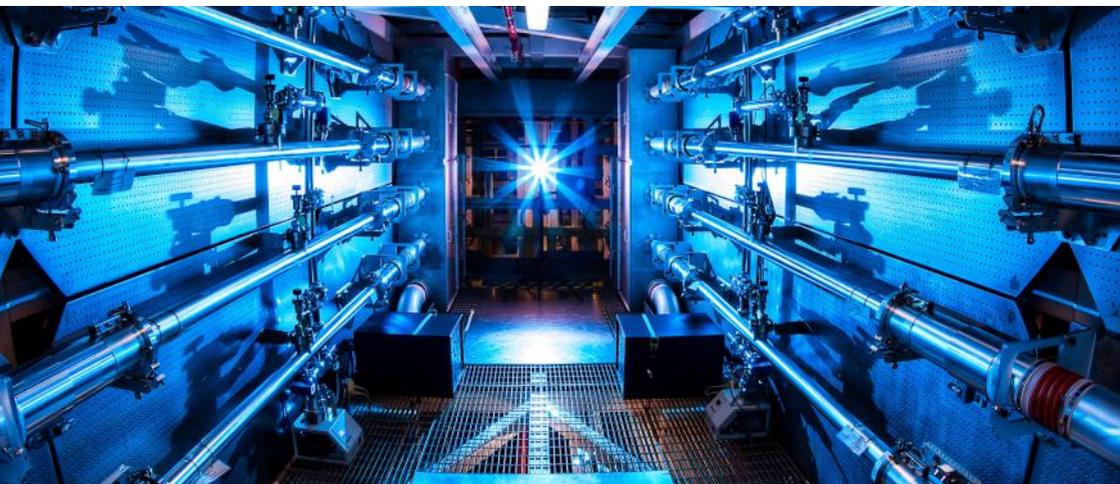
Il campo delle tecnologie fisiche e delle tecnologie ottiche sono quindi chiaramente fortemente legati.

Strettamente connesse sono inoltre – come si desume da quanto scritto fin qui – le attività di ricerca e indagine della materia e dei fenomeni ottici e quelle di sviluppo di metodi e strumenti nuovi per fare indagini sempre più sofisticate e precise.

Gli argomenti e gli esempi citati sono oggetto di ricerca anche presso i nostri laboratori al Dipartimento di Fisica del Politecnico.

Molti altri problemi e applicazioni del presente e del futuro – alcuni dei quali illustrati nelle prossime pagine – saranno alla portata degli sforzi di innovazione che i nostri futuri ingegneri fisici vorranno portare avanti ■

LA FOTONICA E LA RICERCA



A partire dall'invenzione del laser la fotonica ha compiuto progressi sorprendenti. Le sue applicazioni si estendono ormai in svariati settori tecnologici e della ricerca di base, con notevoli ricadute nella vita di tutti i giorni. La ricerca avanzata in fotonica, ancora in piena fase di sviluppo, abbraccia ormai una tale vastità di tematiche da rendere difficile una sintesi completa.

Nel settore dell'energia, laser di elevatissima potenza sono attualmente utilizzati per rendere possibile la fusione nucleare a confinamento inerziale, con la promessa di fornire una fonte illimitata di energia pulita. I laser impiegati possono generare all'interno di una miscela di deuterio e trizio temperature superiori a 100 milioni di kelvin, con pressioni 100 miliardi di volte superiori alla pressione atmosferica. La fotonica è ormai alla base dei moderni sistemi di trasmissione dati su fibra ottica. Notevoli progressi sono stati compiuti negli ultimi anni nel campo dell'ottica quantistica, con possibili sorprendenti sviluppi nell'ambito del quantum computing e della crittografia quantistica. Nel campo

della biomedicina, tecniche innovative di microscopia ottica consentono l'imaging non invasivo di cellule e tessuti, fornendo informazioni sui meccanismi molecolari alla base dei processi biologici e consentendo la diagnosi di patologie.

I laser trovano numerose applicazioni terapeutiche come bisturi ultraprecisi in svariati campi, dall'odontoiatria all'oftalmologia.

I laser consentono la generazione di impulsi di luce di durata estremamente breve, nel dominio temporale dei femtosecondi (1 femtosecondo = 10^{-15} secondi). La disponibilità di impulsi di breve durata ha prodotto una rivoluzione nello studio dei fenomeni ultraveloci, consentendo di seguire su scale di tempi ancora inesplorate gli eventi primari in fisica, chimica e biologia e di comprendere le proprietà di materiali innovativi. Le frontiere di questo campo sono la generazione di impulsi nella regione spettrale dell'ultravioletto estremo (XUV) con durate di poche decine di attosecondi (1 attosecondo = 10^{-18} secondi) e l'accelerazione di particelle mediante campi elettrici elevati ■

LA SCIENZA DEI FENOMENI ULTRAVELOCI

Un settore di particolare importanza nell'ambito della ricerca fotonica è costituito dalla scienza dei fenomeni ultrarapidi.

A partire dalla prima dimostrazione di impulsi laser con durate nella regione temporale dei femtosecondi, sono stati compiuti progressi enormi sia nelle tecniche di generazione, sia nel loro utilizzo. Numerosi processi primari in natura avvengono su scale di tempi estremamente rapide. Tecniche di spettroscopia vengono impiegate per studiarne la dinamica utilizzando la luce laser come una cinepresa che, mediante flash luminosi di durata infinitesima, congela le varie fasi del processo e consente di osservarle in tempo reale, in analogia all'utilizzo di una moviola. Esempi notevoli sono il processo della visione, i meccanismi della fotosintesi, numerose reazioni foto-chimiche e i processi fisici alla base del funzionamento di semiconduttori, di superconduttori e di materiali nanostrutturati. Impulsi ultrabrevi trovano anche numerose applicazioni pratiche, nella lavorazione di materiali, grazie alla loro estrema precisione e nella micro-chirurgia, soprattutto in campo oftalmologico.

Nell'ultimo decennio si è poi assistito ad un ulteriore notevole progresso nel settore della scienza ultraveloce, con la generazione ed applicazione di impulsi

con durate dell'ordine di poche decine di attosecondi ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$). E' questa la scala temporale naturale della dinamica degli elettroni in atomi, molecole e nanostrutture. Numerosi fenomeni fisici, chimici e biologici sono influenzati in modo determinante dal moto degli elettroni su scale temporali

In pochi femtosecondi, avviene la reazione chimica primaria alla base della visione.

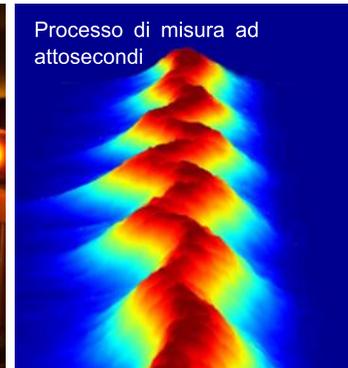


inferiori al femtosecondo. I meccanismi alla base della trasmissione dei segnali biologici in complesse strutture organiche o alla base dei processi che portano al danneggiamento del DNA, si basano su eventi ad attosecondi. La possibilità di osservare e, soprattutto, di controllare tali dinamiche elettroniche costituisce una frontiera di cruciale importanza nel campo della fotonica ultraveloce ■

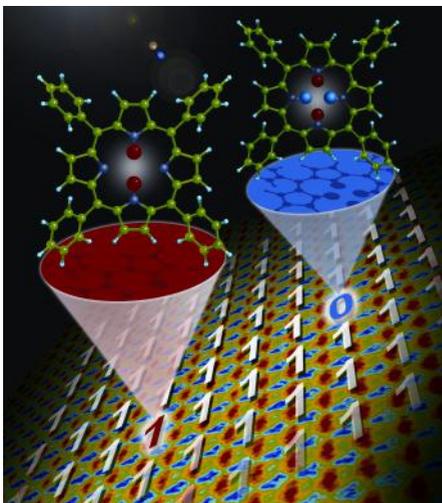
Sorgente laser per la generazione di impulsi da pochi femtosecondi



Processo di misura ad attosecondi



LA FISICA DELLE SUPERFICI - NANOSTRUTTURE



Un esempio delle attività di ricerca avanzata nel campo delle tecnologie fisiche è lo studio dei sistemi su scala nanometrica (il nanometro è una lunghezza pari ad un milionesimo di millimetro) ovvero su scala confrontabile con la distanza tra due atomi nella materia.

Le nanotecnologie hanno come scopo quello di studiare e controllare la materia su questa scala, dove avvengono i fenomeni fisici fondamentali per determinare tutte le proprietà (ottiche, elettroniche, meccaniche, magnetiche, ecc.) dei materiali. In questo contesto assume particolare importanza la capacità di realizzare e manipolare oggetti "a bassa dimensionalità", ovvero di dimensioni nanometriche.

Questi possono infatti essere caratterizzati da proprietà molto diverse da quelle osservate nei medesimi materiali in forma macroscopica.

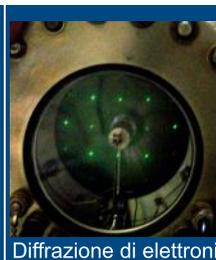
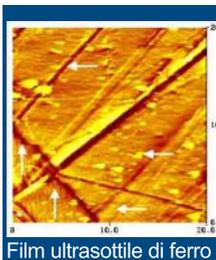
Uno degli obiettivi prioritari è quello di riuscire a miniaturizzare un dispositivo evidenziandone nuove funzionalità associabili alla sua ridotta dimensione.

Per esempio, le superfici dei solidi presentano molto spesso proprietà assai diverse da quelle esistenti all'interno del

volume. Utilizzando fasci di elettroni è possibile studiare proprio gli strati più superficiali della materia.

Accrescendo la complessità del sistema, si possono realizzare film dello spessore di pochi strati atomici.

Il film rappresenta un sistema artificiale che interagendo con il substrato che lo sostiene, acquista proprietà uniche non riscontrabili in nessun sistema esistente in natura. Queste proprietà possono essere ingegnerizzate grazie alla opportuna scelta dei materiali che costituiscono film e substrato e dello spessore stesso del film.



È inoltre possibile realizzare vere e proprie nanostrutture limitate anche in direzione laterale, sfruttando due strategie: la prima consiste nell'utilizzare tecniche nanolitografiche, in uso anche nell'industria dei semiconduttori e disponibili presso il Dipartimento di Fisica; l'altra sfrutta la capacità intrinseca della materia, in condizioni controllate, di auto-organizzarsi formando strutture complesse ■



LA FOTONICA E IL MONDO DELL'ICT



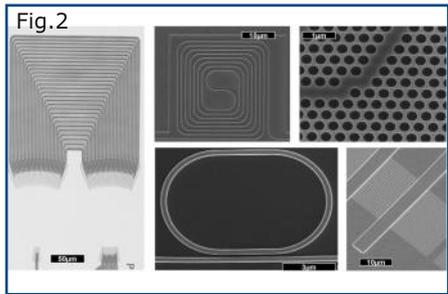
Le enormi potenzialità della fotonica nel campo della scienza e tecnologia dell'informazione e delle comunicazioni (ICT, Information and Communication Technology) derivano da un insieme di caratteristiche peculiari che rendono questa tecnologia in grado di rispondere con successo alle richieste sempre crescenti della nostra società. Tra le più importanti, vi sono la elevatissima capacità trasmissiva delle sorgenti laser (fino a centinaia di gigabit al secondo), le larghissime bande disponibili nei materiali utilizzati per la trasmissione della luce (decine di terahertz, $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$), la capacità di controllo e manipolazione dei singoli fotoni (tecnologia che è alla base della crittografia e dei computer quantistici), le ridottissime dimensioni a cui è possibile focalizzare un fascio laser (nei lettori di dischi ottici pari a circa un micrometro), le elevatissime intensità ottenibili nel fuoco di una lente (proprietà usata, ad esempio, nelle

stampanti laser e nelle memorie ottiche).

E' possibile individuare cinque settori principali in cui l'ottica attualmente ricopre un ruolo fondamentale. La trasmissione dell'informazione su fibra ottica per lunghissime distanze, sotto gli oceani e attraverso i continenti, rappresenta oggi la tecnologia più affermata e decisamente vantaggiosa, in termini di costi e prestazioni, rispetto a quelle basate su cavi coassiali o trasmissioni satellitari. Nel campo della registrazione dell'informazione, le memorie ottiche, oggi rappresentate soprattutto dai CD (Compact Disk) e dai DVD (Digital Versatile Disk), rappresentano una tecnologia in rapidissima crescita che si è dapprima affiancata e tende ora a soppiantare quella magnetica convenzionale. Un terzo settore è quello della visualizzazione dell'informazione su display, in cui l'ottica rappresenta l'intrinseco e insostituibile legame tra



l'occhio umano e l'elettronica di una televisione o di un computer. Il quarto settore, di enorme importanza industriale, è costituito dalla stampa dell'informazione, e include stampanti, scanner, e fotocopiatrici. Il quinto settore, infine, riguarda la lettura dell'informazione come si realizza ad esempio con i lettori di CD o DVD o con i diffusissimi lettori di codici a barre.



Nelle moderne reti di telecomunicazione la fotonica gioca sempre più un ruolo fondamentale. Le reti di trasporto a lunga distanza, sia di tipo sottomarino che terrestre, sono state tra i primi sistemi di comunicazione a sfruttare pienamente le tecnologie ottiche. I più recenti progressi in questo campo, tra i quali l'invenzione dell'amplificatore ottico, le trasmissioni a moltiplicazione di lunghezza d'onda, ed i circuiti fotonici integrati sulla piattaforma del silicio (silicon photonics), hanno reso oggi possibili capacità trasmissive di decine di terabit/s (1 Tb/s corrisponde a 20 milioni di canali telefonici vocali), inimmaginabili fino a pochissimi anni addietro, e stanno aprendo la via alla realizzazione di sistemi di trasmissione dati estremamente sicuri mediante crittografia quantistica e allo sviluppo dei computer del futuro basati sulla computazione quantistica ■

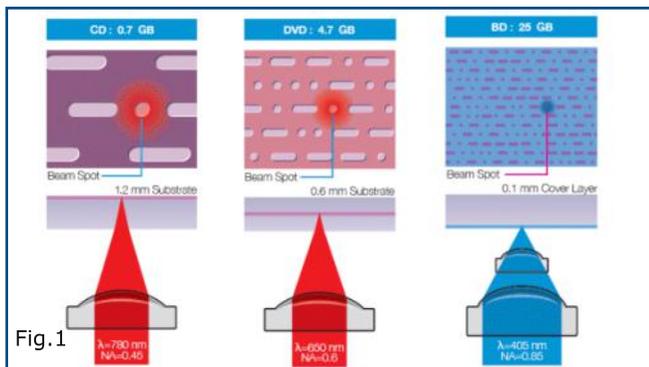
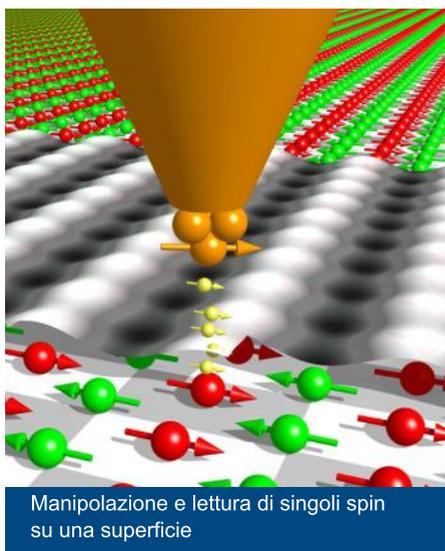


Fig.1 - Evoluzione della densità dell'informazione registrata sulla superficie del disco

Fig.2 - Dispositivi fotonici integrati realizzati su silicio per sistemi di trasmissione ad elevatissima capacità

OLTRE L'HARD DISK: NANOMAGNETISMO E SPINTRONICA

Nonostante l'avvento dei dischi a stato solido, gli hard disks magnetici costituiscono ancora la memoria non volatile più diffusa. In essi la testina di lettura è costituita da dispositivo spintronico a magnetoresistenza gigante (GMR), il quale è valso il Nobel ad A. Fert e P. Grunberg nel 2007. Il nuovo traguardo è raggiungere, entro il 2020, una capacità di 20 TB usando nuovi materiali e nuove configurazioni



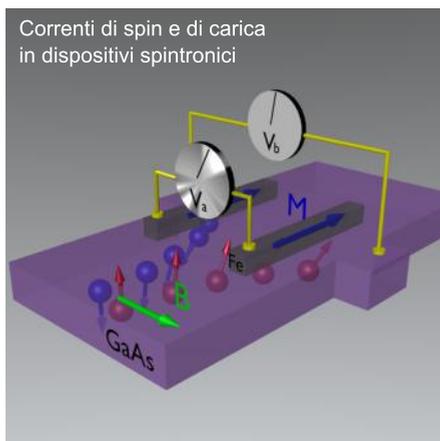
Manipolazione e lettura di singoli spin su una superficie

geometriche, alla micro e nano-scala. Il futuro è "nano", anche nel magnetismo. Per aumentare la densità di immagazzinamento bisogna sfruttare meglio lo spazio, come nel "racetrack memory" proposto da IBM. Il disco è ricoperto da piste magnetiche a forma di U, di dimensioni nanometriche, nelle quali vengono scritte e fatte scorrere delle pareti di dominio magnetiche (bit), fino a portarle in contatto con un sensore magnetoresistivo che ne effettua la lettura. E spingendosi al di sotto del "nano", la frontiera ultima delle memorie è la manipolazione e scrittura

dell'informazione in isole di pochi atomi su una superficie, dove ciò che conta è la disposizione dei singoli spin elettronici.

Proprio l'uso dello spin degli elettroni, in aggiunta alla loro carica, è l'idea alla base della spintronica. Nata nel 1988 con la scoperta della GMR, essa rappresenta una strada promettente per superare i limiti dell'elettronica convenzionale. C'è molto fermento attorno allo sviluppo di dispositivi nei quali si sfruttano correnti di spin, oltre che correnti di carica, come pure l'interazione fra il momento angolare dei fotoni e lo spin degli elettroni. Parimenti si stanno concentrando molti sforzi nello studio di nuovi dispositivi, detti "memristori", la cui resistenza varia progressivamente a seguito della sollecitazione con impulsi elettrici, in modo analogo a quanto avviene nei neuroni. Tali dispositivi stanno alla base di nuove e più efficienti architetture neuromorfiche dei calcolatori.

In tutti questi campi i ricercatori del Dipartimento di Fisica del Politecnico conducono attività di ricerca di punta, in forte connessione con i migliori centri di ricerca internazionali ■



Correnti di spin e di carica in dispositivi spintronici

I SEMICONDUTTORI DALLA MICROELETTRONICA ALLA PRODUZIONE DI ENERGIA

Negli ultimi 10 anni è aumentato in maniera notevolissima il numero di dispositivi elettronici presenti nella vita quotidiana: basti pensare ai telefoni cellulari o ai personal computer, diventati ormai oggetti di uso comune. I dispositivi elettronici attuali sono nati dall'utilizzo di materiali semiconduttori. I moderni circuiti integrati, realizzati con materiali quali il silicio e l'arseniuro di gallio, contengono l'equivalente di decine di milioni di transistor. Una così elevata concentrazione è stata resa possibile dalla capacità di trattare la superficie dei semiconduttori con tecnologie che permettono di "disegnare" microcircuiti con altissima precisione: la tecnologia planare permette di costruire su una singola fetta di silicio (wafer) componenti attivi (transistor) e passivi (resistenze e condensatori). Su uno stesso chip può

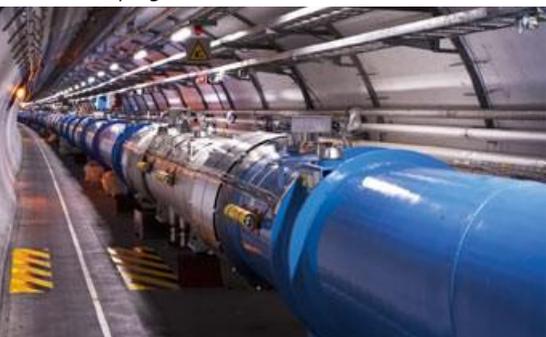
quindi essere costruito un circuito completo. La dimensione tipica di un componente è di circa 0.2 micron.

La figura in alto mostra un wafer di silicio del diametro di 8 pollici sul quale sono stati ricavati circuiti integrati con una densità superiore al milione per mm^2 . Tra i dispositivi che vengono realizzati sfruttando le proprietà fisiche dei semiconduttori sono da annoverare le celle solari, costituite da giunzioni fotovoltaiche: quando la giunzione fotovoltaica viene illuminata si ha passaggio di corrente attraverso il conduttore elettrico che collega i capi della giunzione. In questo modo la radiazione solare può essere convertita in energia elettrica. La foto mostra la centrale elettrica dell'ENEL a Serre (Salerno) in grado di fornire una potenza di 3 MW, in cui l'energia viene prodotta dai pannelli solari ■



I MATERIALI SUPERCONDUTTORI: TRA TECNOLOGIA E RICERCA

Alcuni metalli a temperature bassissime divengono superconduttori: la resistenza elettrica si annulla totalmente e la corrente elettrica può scorrere senza nessuna perdita di energia. Inoltre i superconduttori respingono in modo completo i campi magnetici comportandosi a loro volta come magneti molto speciali. La scoperta della superconduttività risale al 1911, ma solo 45 anni dopo ne è stata data una spiegazione teorica.



Da più di un secolo la superconduttività alimenta enormi speranze tecnologiche ed è fertile terreno per scoperte sorprendenti e sfide concettuali di prim'ordine. Infatti, sin dall'inizio la prospettiva di trasportare energia elettrica senza sprechi dovuti alla resistenza è apparsa come molto attraente. Purtroppo molto a lungo ci si è dovuti scontrare con il fatto che i cosiddetti superconduttori "tradizionali" assumono questa straordinaria proprietà a temperature così basse da essere impraticabili su larga scala: 1 K per l'alluminio e lo zinco, 4 K per il mercurio, 7 K per il piombo, 10 K per la lega niobio-titanio usata per gli elettromagneti dell'acceleratore di particelle LHC al CERN (zero kelvin corrisponde a circa -273°C). Temperature così basse richiedono l'utilizzo di elio liquido, molto costoso e difficile da gestire. Così i superconduttori hanno trovato applicazione tecnologica solo in casi molto speciali, come gli acceleratori di particelle e gli

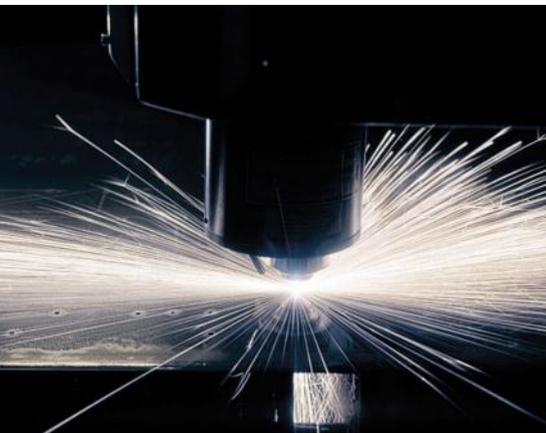
elettromagneti di alcune apparecchiature per la risonanza magnetica per immagini per la diagnostica medica per immagini.

Nel 1987 una nuova scoperta ha ridestato l'interesse sulla superconduttività. E' stata trovata una famiglia di materiali che diventano superconduttori fino a 120 K. Sono noti come superconduttori "ad alta temperatura critica". Alcuni di essi sono quindi superconduttori anche alla temperatura dell'azoto liquido (77 K), molto più comune e meno costoso dell'elio liquido. I nuovi superconduttori sono interessanti non solo per le alte temperature d'impiego, ma anche per ragioni scientifiche: a tutt'oggi non esiste una teoria che spieghi la superconduttività ad alta temperatura poiché quella valida per i materiali tradizionali non è adeguata. E' quindi in corso una duplice sfida: costruire cavi superconduttori adatti a impieghi su larga scala e comprendere le ragioni profonde per cui questi materiali sono superconduttori, nella speranza di poter poi progettare nuovi superconduttori, capaci di funzionare a temperature ancora meno basse ■



LA FOTONICA NELL'INDUSTRIA MANIFATTURIERA

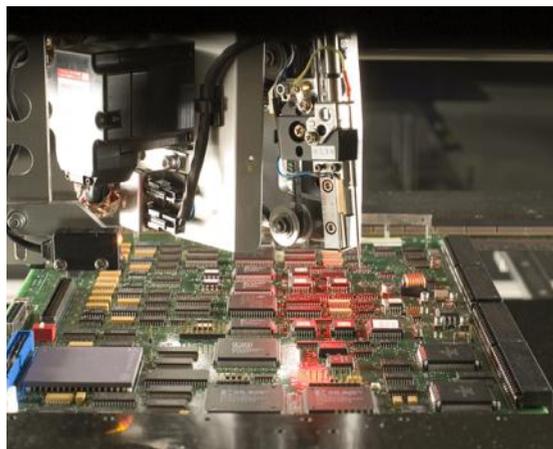
Lottica e la fotonica hanno rivoluzionato l'industria manifatturiera migliorando sia la produzione che la qualità dei manufatti. In questo ambito, le tecnologie fotoniche possono essere raggruppate in due categorie:



1: Tecnologie utili per produrre un manufatto. In questo caso la luce, molto spesso di tipo coerente (prodotta da una sorgente laser), interagisce direttamente col prodotto finito o intermedio per cambiarne le sue proprietà fisiche. Un primo esempio importante riguarda la fotolitografia mediante laser ultravioletti (laser ad eccimeri con lunghezza d'onda di 248 nm e, più recentemente, di 193 nm) per la realizzazione dei circuiti integrati. In questo caso, la tendenza della tecnologia è quella di usare luce con lunghezza d'onda sempre più corta fino al così detto ultravioletto estremo (10 nm) in modo da realizzare dispositivi di dimensioni sempre più piccole ($<0.25 \mu\text{m}$). Un secondo esempio è rappresentato dall'uso di laser di potenza per il taglio, saldatura e trattamento termico di componenti meccanici utilizzati in svariati settori ed, in particolare, in quello automobilistico e della meccanica di precisione.

Il taglio e la saldatura della scocca delle automobili e il trattamento termico delle valvole del motore sono due esempi a riguardo.

2: Tecnologie utili per controllare un manufatto. In questo caso la luce, a volte di tipo incoerente, generata da un comune sistema di illuminazione o da un LED (Light Emitting Diode), può essere usata per ottenere informazioni sul processo manifatturiero, come avviene in campo chimico con l'uso di sensori ottici per il controllo in linea del processo, o per ispezionare un prodotto finito, come ad esempio avviene nel campo della microelettronica. Un vantaggio importante delle tecnologie ottiche è costituito dalla possibilità di misura in tempo reale sì da poter controllare direttamente il sistema di lavorazione. Le tecnologie ottiche permettono infatti misure molto rapide, senza contatto con la parte da misurare e quindi in maniera non distruttiva. Inoltre, le tecnologie ottiche consentono la misura simultanea di una varietà di parametri, quali composizione chimica, stato elettronico, stress meccanico, temperatura, dimensioni, difetti etc ■



LA MICROSCOPIA ELETTRONICA

Il microscopio a scansione elettronica permette di osservare la topografia della superficie di un solido. Il principio di funzionamento è illustrato nella figura qui a lato: un fascio di elettroni, generato da un filamento, viene accelerato da una differenza di potenziale compresa solitamente tra 1 e 50 kV e viene convogliato verso il campione da un campo magnetico.

Il fascio di elettroni viene deflesso da elettromagneti a bobina ("scanning coils"), in modo da percorrere ciclicamente la superficie in esame, provocando l'emissione di elettroni. Questa corrente di elettroni viene utilizzata per modulare l'intensità di un tubo a raggi catodici in cui il movimento del pennello di elettroni che illumina lo schermo è sincronizzato con il movimento del fascio di elettroni sul campione.

Poiché l'intensità della corrente emessa dipende dall'inclinazione della superficie del campione, l'immagine sullo schermo è l'immagine in tre dimensioni del campione. Le immagini fornite dal microscopio a scansione elettronica sono di enorme utilità nella scienza dei materiali e in biologia, in quanto consentono di 'vedere' oggetti della dimensioni di pochi micrometri (10^{-6} m) distinguendo particolari anche 100 volte

più piccoli. Si può utilizzare questa tecnica di microscopia per ottenere le immagini di strutture esistenti in natura, come un minuscolo grano di polline.

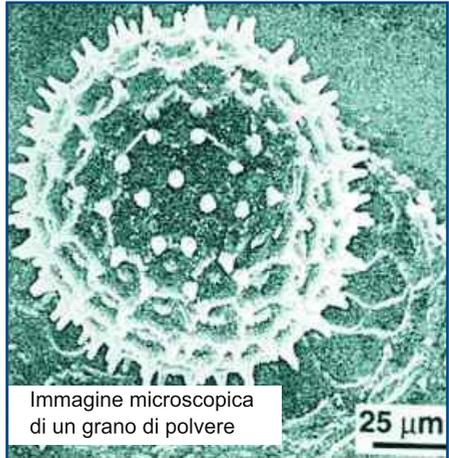
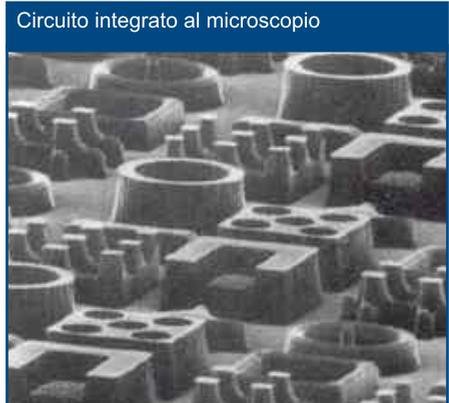
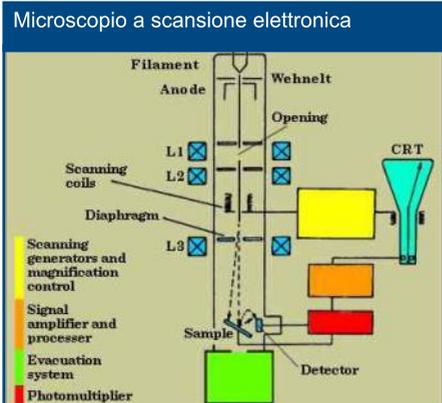


Immagine microscopica di un grano di polvere

25 μ m

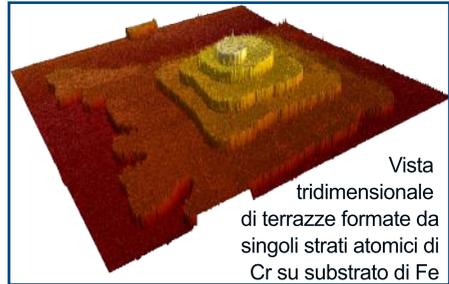
Oppure si può ottenere l'immagine di un circuito completo, fatto di milioni di elementi a semiconduttore costruiti su una fetta di silicio (wafer) in cui ogni componente ha una dimensione di pochi decimi di micron. Ciò consente di verificare la struttura dei circuiti costruiti nell'industria microelettronica e che sono alla base del funzionamento dei moderni dispositivi ■



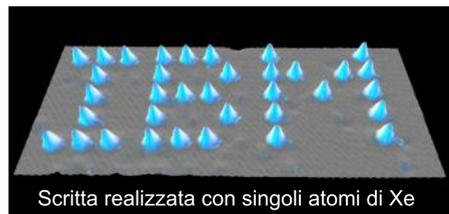
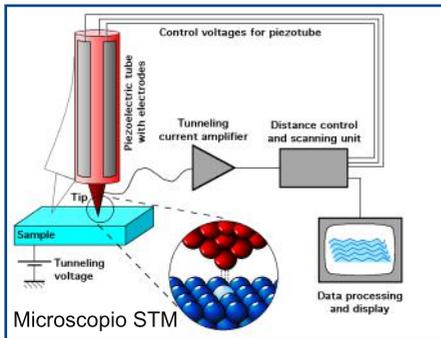
LA MICROSCOPIA SU SCALA ATOMICA

Il microscopio a scansione a effetto tunnel (scanning tunneling microscope, STM) ha permesso per la prima volta di guardare la superficie di un materiale con la risoluzione del singolo atomo. Esso è stato sviluppato nei primi anni '80 del secolo scorso ed è valso ai suoi inventori, G. Binnig e H. Rohrer dell'IBM di Zurigo, il Premio Nobel per la Fisica nel 1986.

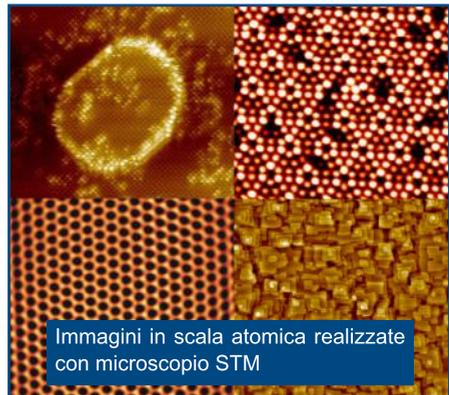
Attualmente l'STM è uno degli strumenti più utilizzati negli studi delle proprietà fondamentali delle nanostrutture (cioè strutture di dimensione dell'ordine del nanometro - pari a un milionesimo di metro - contententi pochissimi atomi) di materiali conduttori, semiconduttori (anche organici) e, in particolari casi, anche isolanti e nello sviluppo delle nanotecnologie.



Non solo in questo modo si può determinare una mappa della superficie analizzata, ad esempio determinandone l'omogeneità, la presenza di gradini, la disposizione di eventuali atomi depositati sulla superficie. Si può infatti anche utilizzare il microscopio per "manipolare" gli atomi, cioè per spostare singoli atomi e depositarli a proprio piacimento su una superficie regolare: di seguito viene mostrata la celebre scritta IBM fatta con atomi di xeno su una superficie di nichel ■



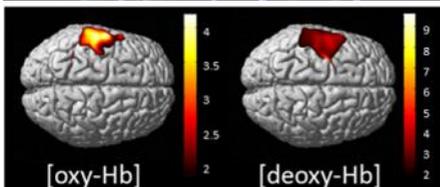
La figura ne illustra il principio di funzionamento: una sottilissima punta di materiale metallico viene fatta muovere lungo la superficie da alcuni attuatori piezoelettrici, capaci di una precisione dell'ordine del decimo di nanometro. La punta viene mantenuta ad una distanza inferiore a circa 1 nanometro dalla superficie. Una differenza di potenziale applicata alla punta provoca, per effetto tunnel quantistico, il passaggio di corrente, la cui intensità dipende dalla distanza tra la punta e il campione, e dalla natura degli atomi del campione.



LA FOTONICA NELLA BIOMEDICINA

La fotonica ha modificato la pratica della medicina offrendo nuove metodiche, spesso uniche, in molti settori quali ad esempio la chirurgia, l'oncologia, la diagnostica clinica non-invasiva. Anche la ricerca di base in biologia ha beneficiato di sviluppi tecnologici della fotonica quali il sequenziamento genico, le nuove micro e nanoscopie, l'optogenetica. Oltre all'uso di una particolare e sofisticata tecnica fotonica, la risposta biologica è il parametro critico in questo settore.

Pertanto una stretta cooperazione tra



Imaging ottico non-invasivo dell'attività funzionale del cervello

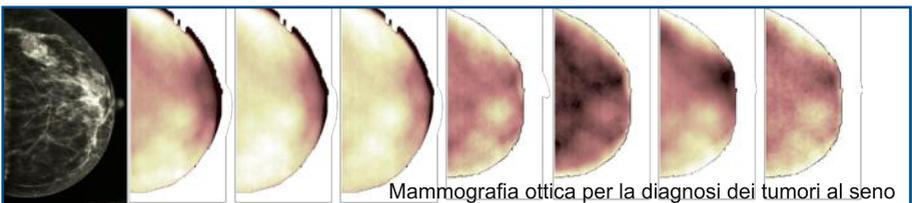
fisici ingegneri e medici, unita ad una conoscenza approfondita dei meccanismi di interazione tra radiazione e materia biologica, sono indispensabili per il

raggiungimento di un risultato positivo. Questo settore continua ad essere in grande espansione e citiamo brevemente alcuni esempi applicativi.

I laser e l'ottica hanno reso possibile il trattamento chirurgico di molte patologie in endoscopia, quali ad esempio la rimozione di polipi o di piccoli tumori benigni o maligni nelle cavità del corpo umano, oppure per la distruzione di calcoli alla cistifellea con interventi in laparoscopia. Molte malattie dell'occhio possono essere curate in modo non invasivo quali la correzione di difetti visivi con la chirurgia fotorifrattiva. Farmaci fotosensibilizzanti vengono utilizzati per la terapia dei tumori. Tali farmaci si localizzano nelle regioni patologiche e, quando attivati dalla luce, diventano citotossici e inducono la necrosi tumorale.

In ambito diagnostico l'emissione di fluorescenza di componenti sia endogeni che esogeni consente la localizzazione di aree tumorali non individuabili con una indagine visiva o la demarcazione dei bordi del tessuto tumorale in aree critiche come quelle del cervello. Su alcuni organi quali la mammella è in corso di sviluppo la tomografia ottica che potrà fornire informazioni diagnostiche complementari o alternative a quelle della radiografia X.

Un altro settore riguarda l'imaging funzionale del cervello, che consente, in maniera assolutamente non invasiva, di monitorare l'attività cerebrale in condizioni fisiologiche e patologiche ■



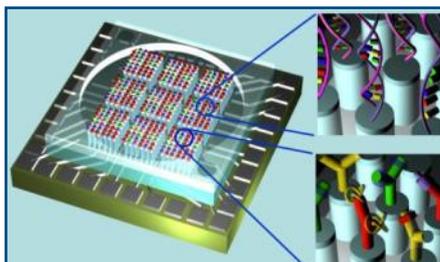
Mammografia ottica per la diagnosi dei tumori al seno

NANOBIOTECNOLOGIE E NANOMEDICINA

Una molecola di DNA di 25 basi raggomitolata su se stessa ha una forma sferica con un raggio di qualche nanometro ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), mentre le dimensioni di una cellula di lievito sono dell'ordine di 1000 nm. Queste sono le tipiche dimensioni dei componenti usati nei microchips, per cui le stesse nanotecnologie che permettono la realizzazione di un iPhone possono essere impiegate per costruire dei microchips o delle nanoparticelle utili in biologia e medicina (di qui il nome Nanomedicina).

Nei laboratori del Dipartimento di Fisica del Politecnico di Milano lavorano insieme ingegneri, fisici, chimici e biologi per studiare e produrre dispositivi micro e nanometrici destinati ad interagire con il mondo biologico. Un intero laboratorio di analisi mediche può essere integrato in un chip disponibile nello studio di un medico, ultrasensibile ma di basso costo, in modo da permettere uno screening efficiente della popolazione e la prevenzione di malattie come il cancro, in cui la diagnosi precoce è essenziale. Processi molecolari e cellulari possono essere efficacemente studiati mediante dispositivi nanometrici capaci di guidare o stimolare le interazioni biologiche. Medici e biologi hanno sempre più bisogno di nano-strumenti per studiare e manipolare in modo controllato e

quantitativo molecole, cellule ed altri sistemi biologici. Qui entrano in gioco gli ingegneri fisici, capaci di progettare e realizzare nano-oggetti e sistemi per guidare e rivelare la loro interazione con il mondo "bio". Nanoparticelle caricate con un farmaco specifico possono essere indirizzate all'interno del corpo umano in modo da colpire selettivamente cellule malate, ad esempio tumorali.

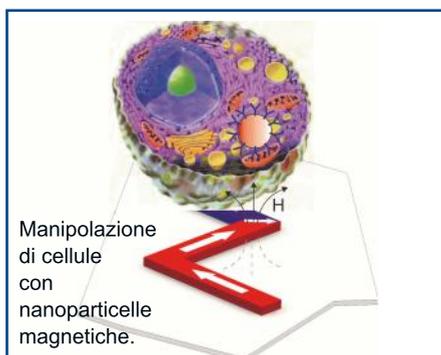


Microchip con matrice di sensori per la rivelazione di marcatori di una data patologia.

Questa è sicuramente la nuova frontiera per la medicina: non somministrare al paziente un farmaco che va ad agire praticamente su tutte le cellule (malate e non), ma guidare una particella, caricata con un farmaco specifico, rivestita di una molecola capace di riconoscere solo le cellule malate e dotata di un dispositivo di rilascio del farmaco che si attiva solo in contatto con una cellula malata. Il futuro della medicina e biologia è "nano" ■



Immagine pittorica di una particella che inietta un farmaco in un globulo rosso.



Manipolazione di cellule con nanoparticelle magnetiche.

LA FOTONICA PER I BENI CULTURALI

Nell'applicazione di tecniche diagnostiche per la conservazione del patrimonio storico-artistico è importante determinare la distribuzione spaziale dei diversi parametri di interesse. A questo scopo, il gruppo di ricerca attivo nella tutela dei beni culturali ha sviluppato diversi sistemi di imaging basati sull'impiego di radiazione ultravioletta, visibile e infrarossa.

La combinazione di dati può fornire a restauratori e a storici dell'arte importanti informazioni sia sullo stato di conservazione delle opere d'arte, che sulle tecniche usate dagli artisti.

Ad esempio, è stato sviluppato un sistema, detto di Fluorescence Lifetime Imaging, per acquisire mappe spaziali del tempo di decadimento (miliardesimi di secondo) della fluorescenza indotta da luce laser. Il sistema può essere impiegato in musei o in siti di interesse artistico e permette di discriminare

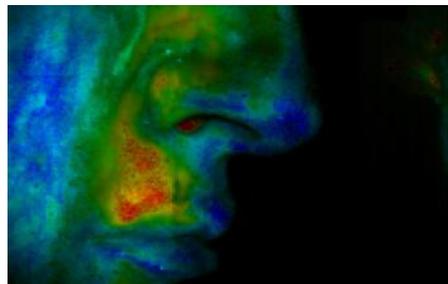
diversi materiali presenti su statue o quadri, sulla base del tempo di decadimento della fluorescenza.

Un secondo sistema, detto di Multispectral Imaging, permette di acquisire lo spettro della luce riflessa dal campione per tutti i punti di un'immagine. Mentre le normali fotografie registrano le sole componenti cromatiche rosse, verdi e blu (RGB) di una scena, i sistemi multispettrali acquisiscono decine, o in alcuni casi centinaia, di componenti spettrali nel visibile (400-690 nm) e, in alcuni casi, nel vicino infrarosso. Dalle immagini multispettrali si possono ricavare informazioni sui materiali che costituiscono il campione. Inoltre, nel caso di dipinti è possibile evidenziare aree che presentano caratteristiche cromatiche simili e che corrispondono all'uso dei medesimi pigmenti da parte dell'artista ■

Le immagini hanno permesso di identificare residui di cera, ossalato di calcio ed altre contaminazioni organiche



Mappa di fluorescenza FLIM del volto del David di Michelangelo





www.fisi.polimi.it
info-dfis@polimi.it