

# Luce dal silicio

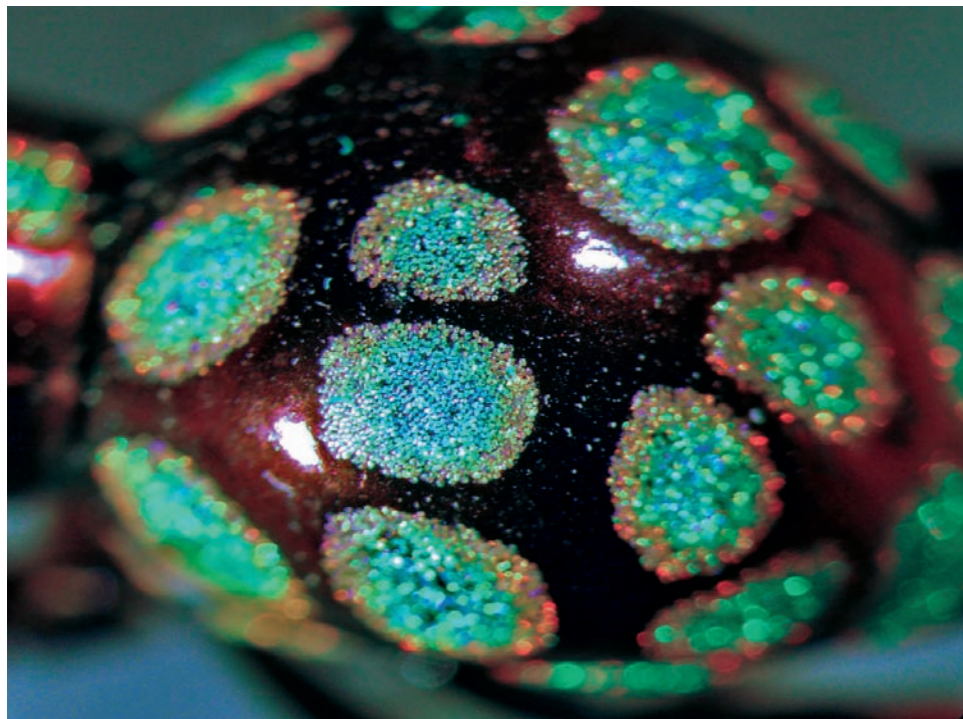
## Le frontiere della microelettronica

di Francesco Priolo



Il silicio è tra gli elementi più comuni sulla terra, lo troviamo abbondantemente nella sabbia, nei vetri e nelle rocce. Eppure, proprio il silicio, con una rivoluzione scientifica e tecnologica iniziata con la scoperta del *transistor bipolare* da parte di J. Bardeen, W. Brattain e W. Shockley (premi Nobel per la fisica nel 1956), ha profondamente modificato la nostra vita di tutti i giorni con l'avvento della microelettronica di massa e di tutti i prodotti di uso quotidiano a essa connessi, come la radio, i computer, i cellulari. Grazie al silicio e alle sue proprietà da *semiconduttore* la nostra è diventata una società dell'informazione. Ma la nostra è anche una società della comunicazione globale. Enormi flussi di informazione viaggiano su internet ogni giorno permettendoci di comunicare rapidamente a grande distanza. Tutto ciò è reso possibile grazie ai segnali di luce inviati nelle fibre ottiche che, scoperte da Charles Kuen Kao (premio Nobel per la fisica nel 2009),

a.  
Shockley, Bardeen e Brattain (da sinistra a destra), premi Nobel per la fisica nel 1956 per la scoperta del transistor bipolare.



b.  
La corazza di uno scarabeo, lo *Pachyrhynchus gemmatus*, vista al microscopio. Essa è formata da cristalli fotonici.

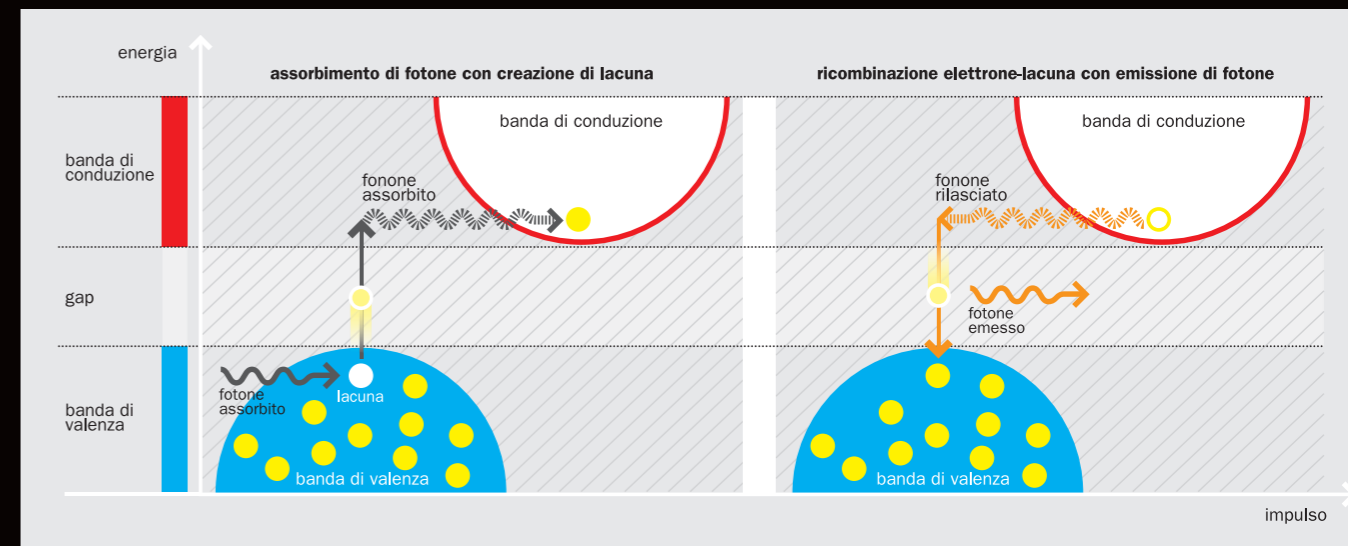
rappresentano delle vere e proprie autostrade per i fotoni, messaggeri dell'informazione da trasportare da una parte all'altra del globo. Ma che mondo sarebbe, se segnali elettronici e fotonici potessero essere integrati insieme in uno stesso oggetto, cioè se i miliardi di transistor presenti in un chip (un circuito elettrico integrato) potessero comunicare tra loro e con l'esterno non attraverso elettroni, ma attraverso fotoni? Questa nuova rivoluzione, in cui microelettronica e fotonica possono essere integrate insieme, è chiamata *microfotonica*. La microfotonica è il mondo dei circuiti fotonici integrati. Il mondo in cui si vuole integrare insieme sorgenti di luce, laser e led, amplificatori ottici, guide d'onda, modulatori ottici, rivelatori, il tutto su scala micrometrica e con tecnologie compatibili con la matura e consolidata tecnologia dei circuiti elettronici, per ottenere, ad esempio, *computer ottici* più veloci dei computer elettronici odierni. Si tratta di una grande sfida scientifica, perché il silicio, materiale principe in

elettronica, purtroppo è inadatto a emettere fotoni (vd. approfondimento). La comunità scientifica internazionale è recentemente impegnata nello studio di metodologie in grado di rendere il silicio un efficiente emettitore di fotoni. Grazie allo sviluppo delle nanotecnologie si è aperta la strada verso scenari assolutamente inaspettati. È possibile infatti costruire artificialmente dei *quantum dots* di silicio, cioè aggregati di forma sferica di dimensione nanometrica, o *quantum wires* di silicio, cioè *fili* di conduzione *quantici*, con lunghezza di svariati micron, ma diametro di pochi nanometri. Si tratta di strutture zero- o unidimensionali, cosiddette *nanostrutture*, in cui gli elettroni del semiconduttore sono confinati secondo le regole della meccanica quantistica all'interno di una buca di potenziale. Per il principio di indeterminazione di Heisenberg, questo confinamento quantico produce un'indeterminazione nell'impulso. Si apre così la possibilità di

ottenere una ricombinazione radiativa dell'elettrone-lacuna (vd. approfondimento), cioè un'emissione di luce da questi minuscoli componenti di silicio. Oltre a ottenere una efficiente emissione di fotoni, in questi sistemi l'energia dei fotoni emessi può essere modificata a piacimento semplicemente riducendo (o ingrandendo) le dimensioni fisiche delle rispettive nanostrutture. Molto è stato fatto, molto è ancora da fare. Un laser al silicio eccitato elettricamente (cioè attraverso un passaggio di corrente) e funzionante a temperatura ambiente non è però ancora stato realizzato. La ricerca di frontiera verso questi obiettivi consiste nell'accoppiamento tra nanostrutture di silicio attive otticamente (come i *quantum dots* e i *quantum wires*) e le cosiddette *nanocavità fotoniche* realizzate attraverso altre nanostrutture chiamate *cristalli fotonici*. I cristalli fotonici sono l'equivalente "fotonico" dei semiconduttori. In natura si trovano già: ad esempio, le ali di alcune farfalle o la corazza di alcuni scarabei (vd. fig. b)

## Le proprietà ottiche del silicio

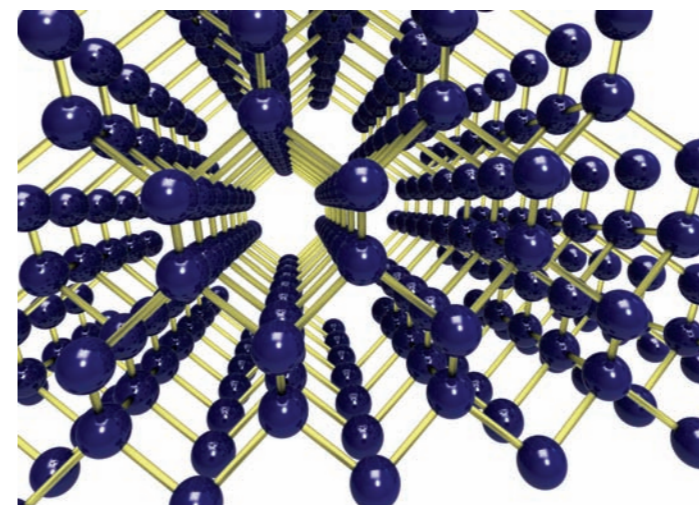
1.  
Visualizzazione della transizione di un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione (assorbimento di fotoni) e di ricombinazione elettrone-lacuna con emissione di fotoni.



Secondo la meccanica quantistica in un atomo gli elettroni occupano dei livelli energetici discreti (*quantizzati*). Nel silicio (vd. fig. c), come in tutti i solidi, la presenza di molti atomi fa sì che tali livelli energetici quantizzati siano molto vicini tra loro: l'insieme di questi livelli prende il nome di *banda di energia*. Tra bande di energia differenti spesso sono presenti delle regioni che sono energeticamente proibite per gli elettroni: queste regioni prendono il nome di *gap*. In un semiconduttore in generale, e quindi anche nel silicio, l'ultima banda di energia completamente piena allo zero assoluto prende il nome di *banda di valenza* e la prima banda di energia vuota allo zero assoluto si chiama *banda di conduzione*. In condizioni diverse dallo zero assoluto alcuni elettroni possono passare dalla banda di

valenza alla banda di conduzione: il posto lasciato vuoto in banda di valenza prende il nome di *lacuna*. In un semiconduttore la corrente elettrica è portata dagli elettroni in banda di conduzione e dalle lacune in banda di valenza. Nel caso del silicio, la sua struttura a bande di energia è detta a *gap indiretta*, perché i suoi elettroni in banda di conduzione e le sue lacune in banda di valenza hanno un impulso differente. Quando un elettrone in banda di conduzione "torna" in un posto vuoto in banda di valenza (una lacuna) si parla di *ricombinazione elettrone-lacuna*. Nel processo di ricombinazione elettrone-lacuna deve essere conservata sia l'energia che l'impulso. I fotoni sono particelle di grande energia, ma piccolo impulso. Pertanto, un fotone con energia pari a quella della ricombinazione elettrone-

lacuna non ha sufficiente impulso per rispettarne la conservazione. Il fotone, quindi, non può essere emesso dal silicio, a meno che una terza particella (il *fonone*, cioè il quanto delle vibrazioni reticolari) non sia anch'esso emesso (o assorbito) per conservare l'impulso (vd. fig. 1). Dato che i processi di ricombinazione che coinvolgono più particelle (sia fotoni che fononi) sono poco probabili, l'emissione di fotoni dal silicio è un processo altamente inefficiente. In una ricombinazione elettrone-lacuna l'elettrone perde energia. Se questa energia è ceduta a un fotone (e quindi genera un segnale di luce) si parla di *ricombinazione radiativa*. Tra gli obiettivi della microfotonica vi è quello di ottenere una efficiente ricombinazione radiativa dal silicio.



c.  
Struttura del silicio.

devono la loro colorazione non ai comuni pigmenti, ma al fatto di essere costituiti da cristalli fotonici naturali. Sono "cristalli", perché formati da una struttura *periodica*, che si ripete, e sono "fotonici", perché agiscono sui fotoni. Così come il potenziale elettrico periodico presente nei cristalli atomici agisce sugli elettroni generando le bande di energia (come quelle presenti nel silicio), una struttura in cui viene modulato artificialmente l'*indice di rifrazione* (la grandezza che indica quanto un mezzo modifica la velocità della luce che lo attraversa) agirà sui fotoni, creando delle vere e proprie bande energetiche fotoniche con delle *gap*, cioè delle

regioni di energia (e quindi di frequenza) proibite. I fotoni con una frequenza all'interno della gap non si potranno propagare nel cristallo fotonico e verranno pertanto totalmente riflessi, determinando così la percezione del colore dell'oggetto.

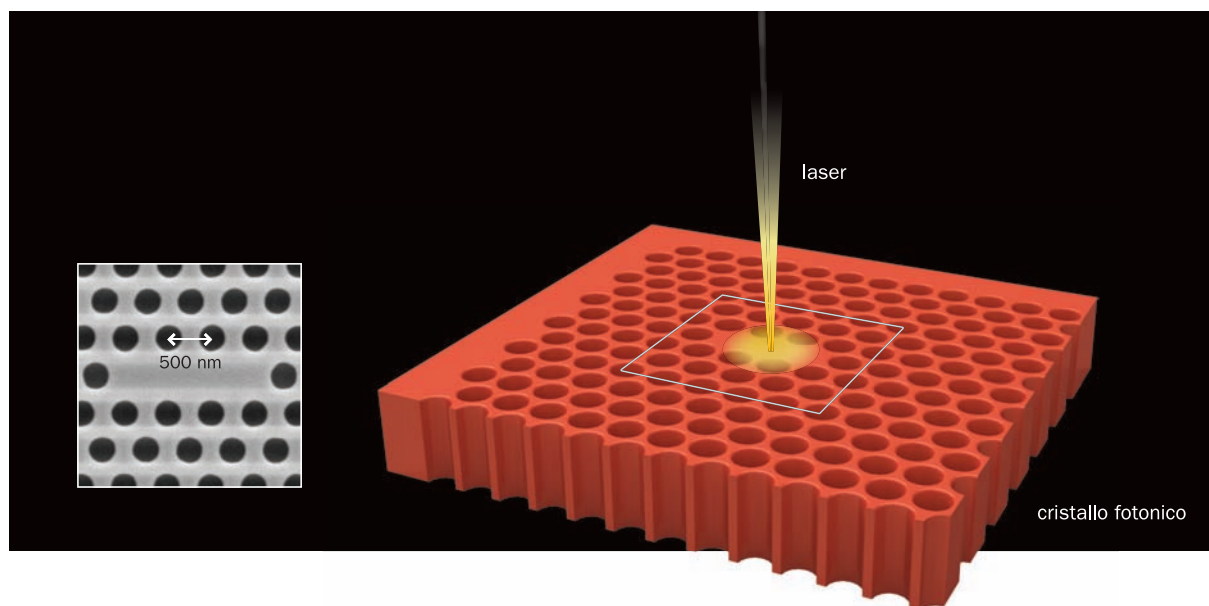
I cristalli fotonici artificiali sono nati a partire dai lavori pionieristici di E. Yablonovitch e J. Joannopoulos negli anni '90 e si sono sviluppati grazie alla capacità di controllare la materia attraverso le nanotecnologie.

Un semplice esempio di cristallo fotonico bidimensionale è rappresentato da un'alternanza di fori nanometrici, disposti in forma regolare su una sottile lamina di un materiale semiconduttore (come per esempio il silicio). All'interno del foro

l'indice di rifrazione relativo del mezzo è pari a uno (quello dell'aria), mentre nel resto della lamina è quello del materiale. Si ha così una modulazione periodica dell'indice di rifrazione che agisce sulle energie permesse ai fotoni. Se ora realizziamo artificialmente un "difetto" nanometrico all'interno della struttura periodica (in fig. d l'assenza di tre fori), cioè una regione in cui la periodicità è interrotta, in questa regione (e solo in questa regione) i fotoni di frequenza "proibita" potranno esistere, ma resteranno lì confinati non potendosi propagare nelle regioni limitrofe. Questo "difetto" rappresenta una nanocavità fotonica. L'inserimento di un materiale attivo otticamente (che quindi emette fotoni) dentro la nanocavità produrrà il

confinamento dei fotoni emessi ed eventualmente, in alcuni casi, un'azione simile a quella di un laser. Ci troviamo di fronte a un *nanolaser* (vd. fig. d).

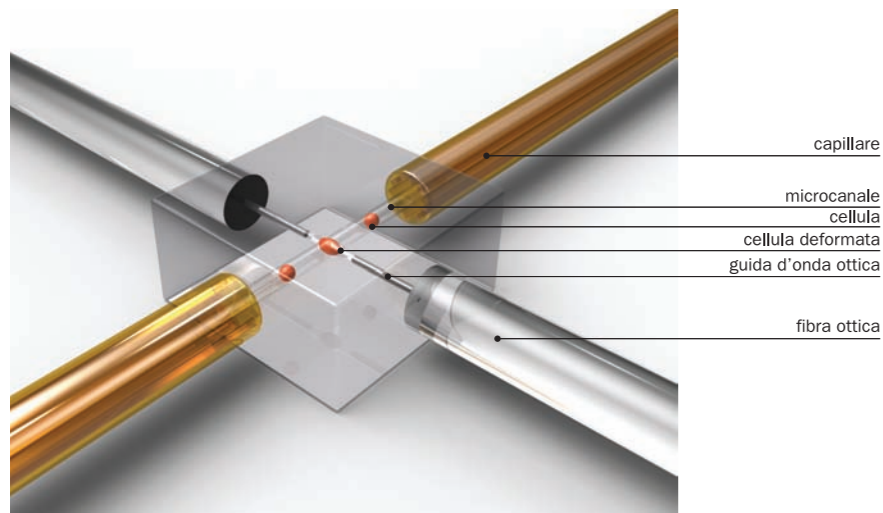
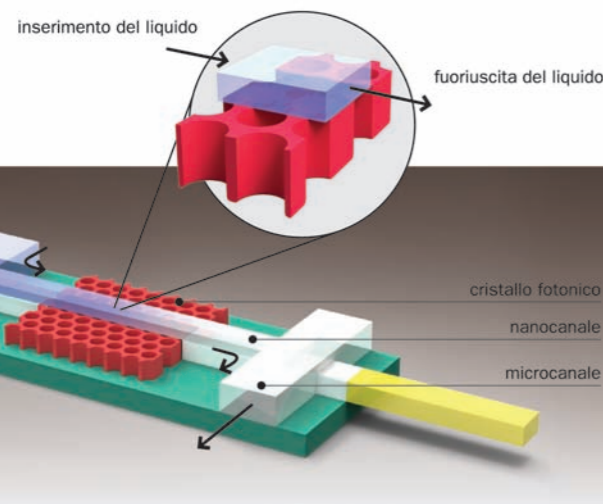
I nanolaser al silicio non sono stati ancora realizzati, ma la ricerca punta oggi a progettare e realizzare nanocavità fotoniche sempre migliori e ad accoppiarle opportunamente a sistemi otticamente attivi in grado di produrre guadagno ottico. Ci auguriamo che gli sforzi della comunità scientifica internazionale possano in un prossimo futuro portare alla realizzazione di un nanolaser al silicio a pompaggio elettrico, producendo così una rivoluzione scientifico-tecnologica con implicazioni enormi e ancora non del tutto immaginabili.



d. Visualizzazione schematica di un nanolaser a cristallo fotonico. Nell'immagine a sinistra è ben visibile la nanocavità fotonica (l'assenza di tre fori).

#### Biografia

**Francesco Priolo** è professore di Fisica della Materia presso l'Università di Catania. Attualmente è presidente della European Materials Research Society (Strasburgo).



**b.** La nanofluidica può essere utilizzata per "riconfigurare" circuiti a cristallo fotonico (cioè per modificarne le caratteristiche di propagazione della luce in termini di range di lunghezze d'onda proibite). Nella figura è mostrata l'architettura di un dispositivo che integra nanofotonica in silicio e nano- e microfluidica. Il liquido inserito nel nanocanale altera il salto d'indice fra "pieni" e "vuoti" all'interno del cristallo fotonico, modificandone le proprietà.

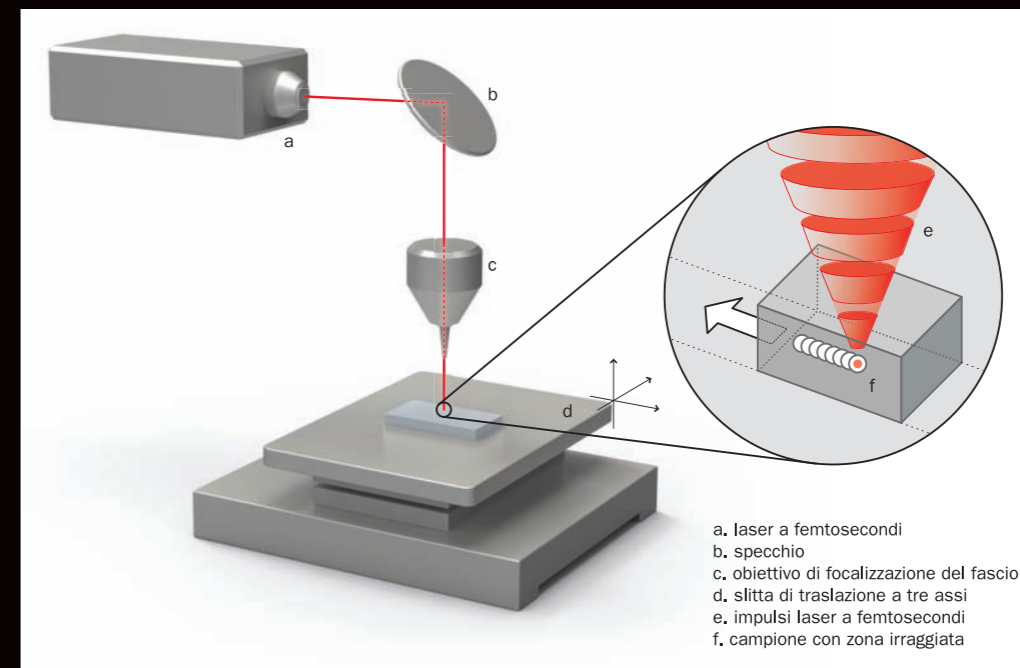
**c.** Schema di uno *stretcher ottico* (un dispositivo che deforma) per singole cellule. La sospensione contenente le cellule viene fatta fluire, mediante un gradiente di pressione, nel microcanale connesso a due capillari. La trappola ottica e la deformazione (*stretching*) vengono realizzati mediante i fasci "contropropaganti", in uscita dalle due guide d'onda, a loro volta accoppiate a due fibre ottiche.

consentono misure interferometriche su campioni contenuti in microcanali. In particolare, i *lab-on-a-chip* stanno assumendo un'importanza sempre crescente. Nascono come strutture microfluidiche per consentire l'analisi biochimica di piccole quantità di campioni fluidi, tipicamente di interesse biomedico (elettroforesi di sieroproteine, analisi del Dna). In generale, questo tipo di misure sono di tipo ottico (fluorescenza, assorbimento). Tradizionalmente, senza l'utilizzo dei *lab-on-a-chip*, queste misure vengono effettuate utilizzando un microscopio per illuminare il campione e raccogliere il segnale di misura, vanificando così la miniaturizzazione del

contenitore del campione, ottenuta grazie alla microfluidica. L'integrazione di guide d'onda ottiche accoppiate con dei microcanali, come nei *lab-on-a-chip*, costituisce un significativo progresso in termini di compattezza, miniaturizzazione, riduzione dei costi, ma anche di facilità d'uso, in quanto elimina ogni problema di allineamento in fase di misura. L'accoppiamento di guide d'onda ottiche e microcanali in un singolo chip consente inoltre la realizzazione di dispositivi più sofisticati di semplici piattaforme di misura. È infatti possibile, come schematizzato in fig. c, realizzare dispositivi optofluidici integrati per l'intrappolamento e la deformazione di

single cellule. La valutazione della risposta cellulare all'applicazione di forze ottiche intense consente di studiare eventuali alterazioni della deformabilità del cosiddetto *citoscheletro*, che sono state riportate in molte patologie e possono quindi essere utilizzate come marcatori dello stato della cellula. Due guide d'onda affiancate una all'altra intersecano un microcanale nel quale vengono fatte fluire le cellule disperse nel liquido di trasporto; la radiazione uscente dalle due guide d'onda crea, nella regione in cui si sovrappongono i due fasci "contropropaganti", una sorta di *pinza ottica* in grado di intrappolare le cellule. Aumentando la potenza

## Costruzioni micro-optofluidiche



1. Schema di un apparato di fabbricazione di dispositivi micro-optofluidici mediante laser a femtosecondi. L'apparato viene posto su un banco ottico delle dimensioni di un normale tavolo.

La realizzazione dei dispositivi "micro-optofluidici" in generale presenta alcuni aspetti critici. Da un lato l'integrazione di guide d'onda ottiche in piattaforme microfluidiche realizzate mediante tecniche litografiche tradizionali richiede una tecnica di fabbricazione delle guide stesse che ne consenta la realizzazione diretta alla stessa profondità del microcanale, senza indurre danni nel chip; dall'altro, nel caso di applicazioni più complesse, si rende necessaria la realizzazione di microcanali e guide d'onda in configurazione tridimensionale. Proprio l'aspetto tridimensionale rende complesso l'uso di tecniche tradizionali quali quelle litografiche che, essendo intrinsecamente planari, cioè con

lavorazioni sulla superficie del campione, richiedono una fabbricazione multi-strato se si vuole ottenere strutture tridimensionali. Una tecnica di fabbricazione che si è rivelata ottimale per queste applicazioni è la scrittura diretta mediante impulsi laser a femtosecondi. Come illustrato in fig. 1, il fascio laser viene focalizzato all'interno del substrato in cui si intende fabbricare il dispositivo. Il substrato stesso viene poi traslato mediante posizionatori meccanici (chiamate *slitte*) di alta precisione nelle tre dimensioni spaziali, in modo tale che il fascio laser "scriva" la traccia della guida d'onda o del canale che si intende fabbricare. A seconda dei parametri del

laser, e in particolare dell'intensità del fascio, nel substrato viene prodotta un'alterazione che può andare dalla semplice modificazione dell'indice di rifrazione (con conseguente realizzazione di una guida d'onda ottica) alla creazione di nanofratture; in quest'ultimo caso, facendo seguire all'irraggiamento un trattamento chimico per immersione del campione in un opportuno bagno acido (*etching*), si ha una rimozione selettiva di materiale nella zona irraggiata con conseguente realizzazione del microcanale. È quindi possibile utilizzare un laser a femtosecondi come una "penna" per scrivere direttamente entrambi i componenti base dei dispositivi micro-optofluidici.

accoppiata nelle due guide è possibile sottoporre la cellula intrappolata a uno stress meccanico, analizzandone quindi l'elasticità, un parametro di significativo interesse per verificare un eventuale stato patologico o di sofferenza della cellula stessa. Le applicazioni descritte sono solo alcuni esempi e non esauriscono certo le potenzialità dell'optofluidica. Infatti, mediante l'utilizzazione di soluzioni di materiali polimerici dotati di funzionalità ottiche all'interno di circuiti microfluidici, opportunamente progettati e integrati con guide d'onda ottiche, si può ipotizzare la realizzazione di dispositivi ottici attivi, quali per esempio sorgenti laser o amplificatori.

### Biografia

**Roberta Ramponi** è professore di Fisica Sperimentale presso il Politecnico di Milano. Svolge attività di ricerca nei settori dell'ottica integrata e dei dispositivi fotonici e optofluidici per applicazioni alle telecomunicazioni e alla sensoristica biomedica e ambientale.

### Link sul web

- [http://www.fisi.polimi.it/ricerca/strutture\\_di\\_ricerca/attivita/49546](http://www.fisi.polimi.it/ricerca/strutture_di_ricerca/attivita/49546)
- <http://www.mae.cornell.edu/erickson/research.html> - Optofluidic
- <http://photon.soe.ucsc.edu/iof.htm>
- <http://photon.soe.ucsc.edu/nanopores.htm>
- <http://www.biophot.caltech.edu/optofluidics/optofluidics/index.html>