

MINISTERO  
DELL'ISTRUZIONE  
DELL'UNIVERSITÀ  
E DELLA RICERCA



## Programmi di ricerca cofinanziati - Modello D Rendiconto del programma di ricerca - ANNO 2002 prot. 2002021127

<b>1. Area Scientifico Disciplinare principale</b>	02: Scienze fisiche
<b>2. Coordinatore Scientifico del programma di ricerca</b>	ANDREANI Lucio
<b>- Università</b>	Università degli Studi di PAVIA
<b>- Facoltà</b>	Facoltà di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI
<b>- Dipartimento/Istituto</b>	Dip. FISICA
<b>3. Titolo del programma di ricerca</b>	Cristalli fotonici a base di Silicio: tecnologia, proprietà ottiche e teoria
<b>4. Settore principale del Programma di Ricerca:</b>	FIS/03
<b>5. Costo originale del Programma:</b>	710.000 €
<b>6. Quota Cofinanziamento MIUR:</b>	390.000 €
<b>7. Quota Cofinanziamento Ateneo:</b>	168.300 €
<b>8. Finanziamento totale:</b>	558.300 €
<b>9. Durata:</b>	24 mesi

### 10. Obiettivo della ricerca eseguita

(dalla progetto originale, in fase di ripartizione/rimodulazione)

Il presente progetto riguarda la fabbricazione, gli studi ottici e la teoria di cristalli fotonici di varie dimensionalità a base di silicio. Il progetto si propone di sviluppare le tecnologie di fabbricazione di cristalli fotonici e della loro infiltrazione con mezzi attivi; di effettuare uno studio dettagliato delle proprietà ottiche e, per i sistemi attivi, dell'interazione radiazione-materia; di sviluppare la teoria delle bande fotoniche e della risposta ottica per i cristalli fotonici allo studio.

---

Combinando tecniche di deposizione, litografia (elettronica, a raggi X e di nanoimprint), attacco chimico umido e a secco, crescita per sedimentazione e infiltrazione verranno prodotti i seguenti tipi di cristalli fotonici con gap nel vicino infrarosso o nel visibile:

(i) sistemi bidimensionali: silicio macroporoso, film a base di silicio amorfo (a-Si:H) e nitrato di silicio amorfo (a-Si(1-x)Nx:H) con elevata intensità di fotoluminescenza;

(ii) sistemi bidimensionali in guida d'onda verticale: strutture SOI-Silicio su Isolante (a-Si:H su SiO<sub>2</sub>);

(iii) sistemi tridimensionali: silicio macroporoso con modulazione verticale del diametro dei pori, multistrati periodici (a-Si:H/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>:H) scavati con reticoli di fori, opali e opali inversi (Si e TiO<sub>2</sub>), Yablonovite e Yablonovite inversa.

In tutti i tipi di strutture ottenute per litografia saranno definiti difetti lineari (guide d'onda a canale e con curve) e puntuali (cavità fotoniche), anche al fine di realizzare dimostratori per dispositivi.

Le strutture saranno inoltre infiltrate con Erblio, coloranti, cristalli liquidi e quantum dots colloidal per ottenere mezzi attivi con frequenza di emissione attorno al gap fotonico. Al fine di avere mezzi attivi in posizioni controllate si svilupperanno tecniche di infiltrazione locale.

---

Gli studi ottici consisteranno principalmente in:

\* caratterizzazione della risposta ottica e della posizione del gap mediante riflettanza e trasmittanza;

\* misura della dispersione delle bande fotoniche mediante riflettanza ad angolo variabile dalla superficie del campione e tramite interferometria di Mach-Zehnder sensibile alla fase;

\* misura della trasmissione in guide d'onda a canale e microcavità con tecniche di accoppiamento in guida e con microscopia ottica a campo prossimo;

\* studi degli effetti del disordine tramite spettroscopia risolta in tempo e retrodiffusione coerente;

\* misure delle modifiche dell'emissione spontanea per cristalli fotonici infiltrati con mezzi attivi.

---

La teoria dei cristalli fotonici e delle loro proprietà ottiche avrà i seguenti sviluppi:

- calcolo delle bande fotoniche e delle densità degli stati in sistemi 2D, 2D in guida d'onda e 3D; calcolo delle perdite per diffrazione nei sistemi 2D in guida d'onda;
- calcolo degli spettri di riflessione e trasmissione, nonché della diffrazione, per cristalli fotonici finiti e semi-infiniti;
- simulazione della propagazione di un'onda elettromagnetica in cristalli fotonici e in guide d'onda a canale, anche con effetti di disordine, e studio della propagazione risolta in tempo di pacchetti d'onda;
- calcolo della modifica dell'emissione spontanea per un emettitore posto in cristalli fotonici periodici di varie dimensionalità e in cavità fotoniche;
- modellizzazione di microscopia ottica in campo prossimo.

## 11. Descrizione della Ricerca eseguita e dei risultati ottenuti

Le ricerche svolte nel corso del progetto hanno riguardato le tre attività previste, ossia preparazione di cristalli fotonici, misura delle proprietà ottiche e studio teorico, a cui hanno contribuito tutte le unità partecipanti. Su alcuni dei materiali e dei fenomeni allo studio sono stati ottenuti risultati di rilievo, anche grazie alla sinergia fra i vari gruppi, permettendo di posizionarsi sullo stato dell'arte internazionale con vari contributi innovativi e di individuare le direzioni di ricerca più promettenti per la continuazione delle attività. Nel seguito, al fine di evidenziare le collaborazioni che si sono stabilite, la descrizione sarà suddivisa come segue:

- 1) Cristalli fotonici di silicio poroso (1D e 2D)
- 2) Cristalli fotonici in guida d'onda planare (Silicio su Isolante e Nitruro di Silicio)
- 3) Cristalli fotonici tridimensionali (opali, Yablonovite, riflettori patternati)
- 4) Sviluppo di strumentazione e di tecniche sperimentali
- 5) Sviluppo di metodi teorici

Per maggiori dettagli e per le pubblicazioni si rimanda ai modelli C delle unità partecipanti: PV, FI, TN, TO+TS

### 1) CRISTALLI FOTONICI DI SILICIO POROSO

#### 1a) Sistemi monodimensionali

Sono state prodotte strutture fotoniche monodimensionali di silicio poroso, utilizzando la tecnica di etching elettrochimico con modulazione della corrente (TN). Poiché la profondità di etching dipende dal tempo di attacco mentre la porosità (e quindi l'indice di rifrazione) dipende dall'intensità della corrente, è possibile produrre strutture 1D anche di centinaia di strati con profilo predeterminato dell'indice di rifrazione. Con questa tecnica sono stati cresciuti: i) superreticoli di Fibonacci dove si è evidenziata la localizzazione di modi fotonici e la riduzione della velocità di gruppo mediante spettroscopia risolta in tempo; ii) strutture dielettriche disordinate con localizzazione della luce e stati di necklace; iii) riflettori di Bragg e microcavità accoppiate con gradiente controllato di cammino ottico. In particolare, nelle microcavità accoppiate sono state effettuate misure interferometriche che hanno permesso di determinare la dispersione della fase e della velocità di gruppo, con effetti di rallentamento della luce e di velocità superluminali nel gap (PV). Inoltre per mezzo di spettroscopia risolta in tempo sono state evidenziate per la prima volta le oscillazioni di Bloch dei fotoni (fenomeno analogo alle oscillazioni di Bloch degli elettroni in campo elettrico), dovute all'effetto combinato dell'accoppiamento fra i modi di cavità e del gradiente di periodo che simula l'effetto di campo esterno (FI).

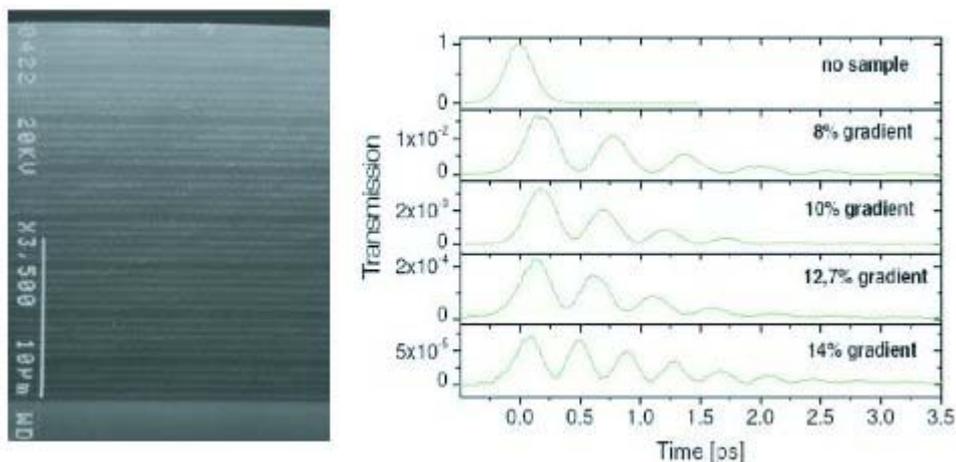


Fig. 1: Immagine SEM di un campione di microcavità accoppiate di Silicio poroso e risposta temporale per diversi valori del gradiente di lunghezza, che mostra le oscillazioni Bloch dei fotoni. Phys. Rev. Lett. 91, 263901 (2003): collaborazione TN+FI

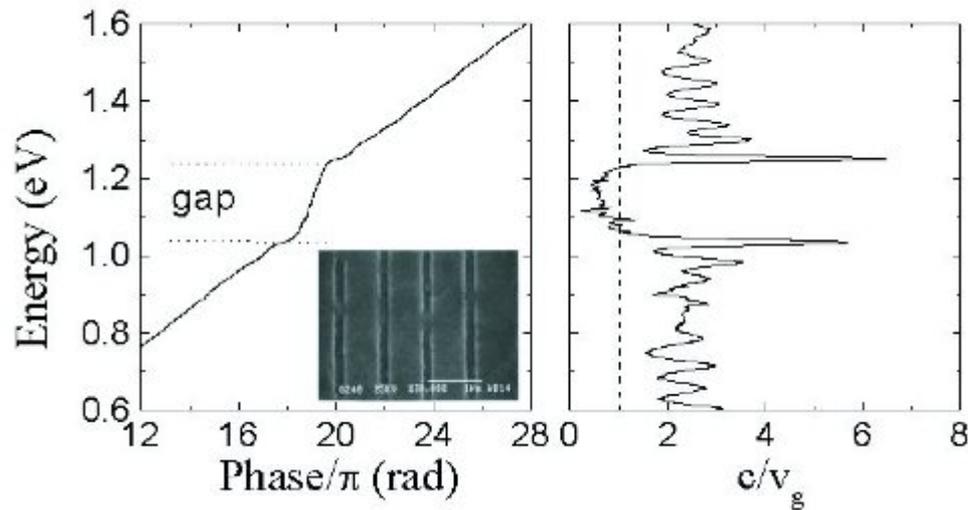


Fig. 2: Sfasamento e velocità di gruppo in un multistrato con 6 periodi. Phys. Rev. B 69, 115107 (2004): collaborazione TN+PV

#### 1b) Sistemi bidimensionali

Sono stati studiati vari processi tecnologici al fine di ottenere cristalli fotonici bidimensionali di Silicio macroporoso, ossia reticoli ordinati con profondità dei pori di diverse decine di micron ottenuti mediante litografia elettronica, trasferimento nel Silicio per formare gli etch pits e successivo attacco elettrochimico. Sono state prodotte maschere prima in ossido di silicio (TO) e poi in nitruro di silicio (TN), con trasferimento del pattern sul silicio mediante attacco in TMAH (TN). La realizzazione si è rivelata particolarmente complessa per strutture con periodicità sub-micrometrica e gap fotonico attorno a 1.55 micron, in particolare per quanto riguarda la formazione degli etch pits con la risoluzione desiderata. Verso la fine del progetto sono stati ottenuti i primi campioni (non ottimizzati) di cristallo fotonico (TN).

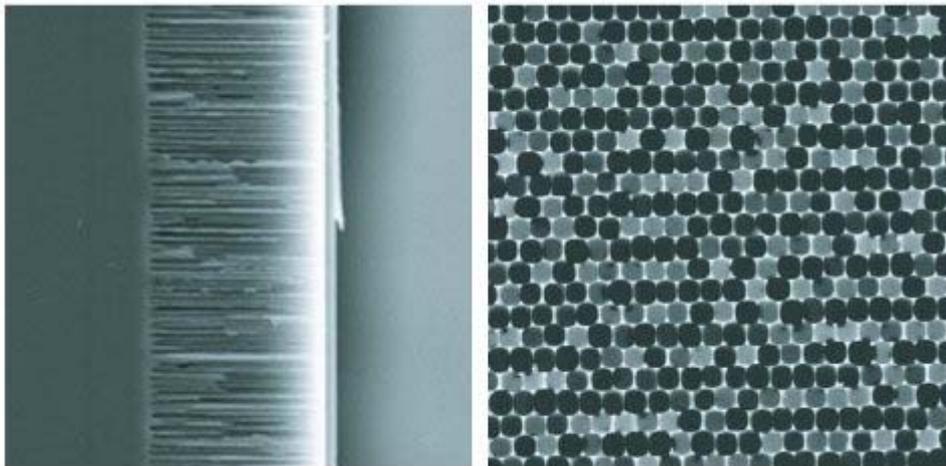


Fig. 3: Vista in sezione e in pianta di un campione di Silicio macroporoso.

A partire da campioni già disponibili con periodicità superiore al micron sono state ottenute strutture free-standing (TN), ovvero pori passanti, che sono state infiltrate localmente su file di pori con coloranti laser (FI). Le prime misure di emissione di luce sono molto promettenti al fine di ottenere effetti di guadagno ottico da difetti controllati (FI). Inoltre sono stati sviluppati processi dedicati per l'impregnazione di silicio poroso con coloranti organici della classe delle porfirine, per la tecnica di produzione di silicio nanocristallino in ossido di silicio via sol-gel, e per l'introduzione di sali di Erblio (emettitore a 1.55 micron) nella fase di sintesi (TN).

## 2) CRISTALLI FOTONICI IN GUIDA D'ONDA PLANARE

### 2a) Silicio su Isolante (SOI)

Sono state realizzate guide d'onda planari di SOI mediante deposizione PECVD di SiO<sub>2</sub>/a-Si:H (TO). Sono state prodotte guide d'onda fotoniche di SOI sia sulle guide PECVD, sia su wafer commerciali mediante tecniche di litografia elettronica e reactive-ion etching oppure litografia di nanoimprint (TO, PV in collaborazione con LPN-Marcoussis). Sono stati realizzati vari tipi di reticoli fotonici con periodicità sub-micrometrica e gap attorno a 1.55 micron: 1D e microcavità, 2D periodici, 2D con guide d'onda lineari. Su questi sistemi sono state misurate le bande fotoniche in guida d'onda mediante riflettanza ad angolo variabile dalla superficie del campione (PV): sono stati misurati sia i modi nella regione radiativa, sia i modi guidati sotto alla linea di luce mediante riflettanza totale attenuata (ATR) facendo uso di un prisma. Il risultato più interessante di questa ricerca, che è fortemente

innovativa a livello internazionale, riguarda la determinazione della dispersione dei modi di difetto lineare in guide W1 (una linea di fori mancanti nella direzione Gamma-K del reticolo triangolare) in tutta la zona Brillouin e per entrambe le polarizzazioni della luce (PV). Le tecniche di fabbricazione e di misura si sono rivelate molto promettenti, il vantaggio delle guide d'onda fotoniche di SOI sta nella disponibilità di tecnologie di processing ben stabilite e nella necessità di etchare solo un sottile strato di Silicio (tipicamente 200-300 nm) grazie all'alto contrasto di indice di rifrazione con il cladding di ossido.

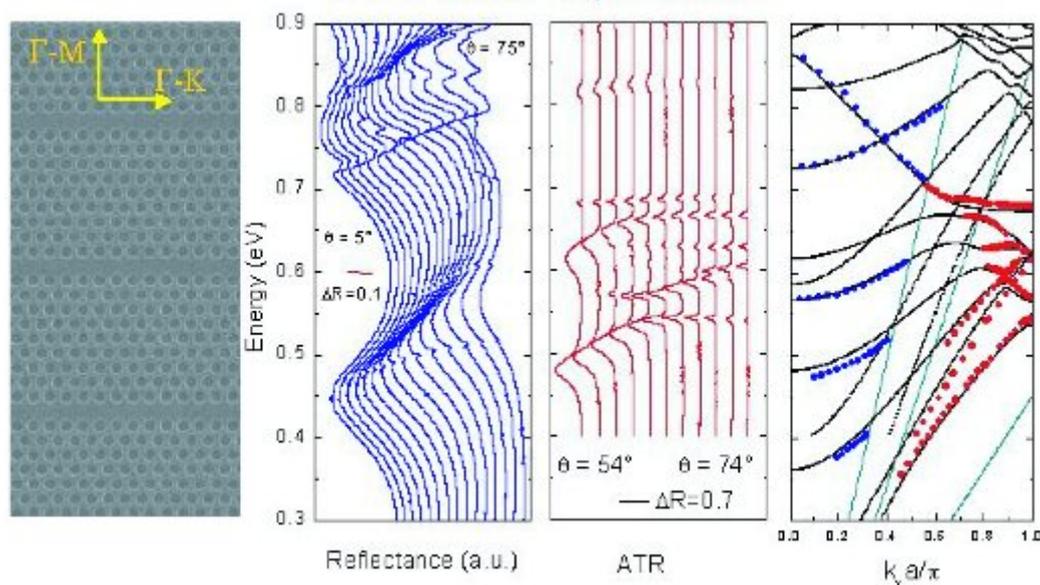


Fig. 4: Immagine SEM di una guida d'onda fotonica di SOI con difetti W1, misure di riflettanza e ATR nella direzione Gamma-K e dispersione dei modi fotonici. Phys. Rev. B 70, 081307R (2004)

Sono state realizzate anche guide a ridge con patterning fotonico e sono state effettuate misure di trasmissione preliminari che hanno evidenziato la presenza di un gap fotonico nel vicino infrarosso, nelle direzioni Gamma-M e Gamma-K del reticolo triangolare (PV). Su campioni provenienti da collaborazioni estere (Univ. Delaware) sono state effettuate misure di trasmissione da modi di difetto lineare nella regione spettrale 1.5-1.6 micron (TN). In seguito verranno effettuate misure precise di perdite di propagazione nei sistemi realizzati.

Sono state effettuate con successo misure di ottica nonlineare, consistenti nella generazione di terza armonica dalla superficie delle guide d'onda fotoniche di SOI (PV). Sono stati trovati segnali intensi sia con pompa a 800 nm che nella regione 1.4-1.6 micron. Sono stati evidenziati dei notevoli effetti di risonanza (aumento della terza armonica generata dell'ordine di  $10^3$ ) quando il fascio di pompa è accordato in frequenza e vettore d'onda parallelo con un modo fotonico della guida patternata.

## 2b) Nitruro di Silicio

Sono state prodotte guide d'onda planari di Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> (TN) con geometria a rib (buried channel) e in queste guide sono stati realizzati cristalli fotonici con scrittura diretta mediante il sistema Focused Ion Beam (TS). Sulla base del design teorico (PV) sono stati prodotti reticoli 1D, 1D con cavità e 2D con reticolo triangolare. Su questi sistemi sono state effettuate misure di trasmissione in guida d'onda mediante laser tunabile nella regione 1.5-1.6 micron (TN) e utilizzando spettroscopia in luce bianca (PV). Sulle guide a rib non patternate le misure hanno permesso di distinguere i meccanismi di perdite a bassa frequenza dovute a scattering nel substrato, da quelle ad alta frequenza dovute a scattering di Rayleigh dalla superficie. Sulle guide patternate con reticoli 1D, le misure hanno evidenziato la presenza dei modi di cavità in accordo con il design.

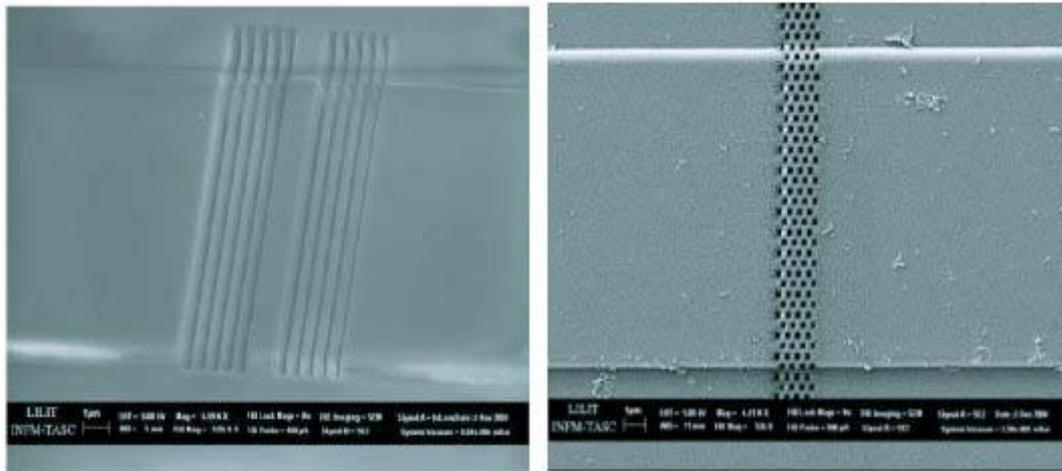


Fig. 5: Immagine SEM di guide d'onda fotoniche di Nitruro di Silicio con pattern 1D (microcavità) e 2D. Collaborazione TN+TS+PV

### 3) CRISTALLI FOTONICI TRIDIMENSIONALI

#### 3a) Opali e opali inversi

Sono stati realizzati opali diretti a base di nanosfere di polistirene (acquistate) e a base di nanosfere di Silice (sintetizzate in laboratorio), mediante tecnica di dip-coating ossia evaporazione di soluzione colloidale contenente le nanosfere (TO). Per mezzo di microscopia elettronica (SEM) e a forza atomica (AFM) è stata verificata la formazione di una struttura fcc. E' stata effettuata la caratterizzazione ottica degli opali mediante misure di riflettanza ad incidenza normale (TO) e ad angolo variabile (PV), che hanno evidenziato la presenza di un gap fotonico nella direzione Gamma-L con forte dispersione in funzione dell'angolo di incidenza. Sono stati inoltre osservate strutture spettrali ad alto angolo, identificate come effetti di diffrazione da famiglie di piani cristallografici non paralleli alla superficie (111) (PV). Sono stati realizzati opali luminescenti mediante adsorbimento di cluster di Carbonio e le misure di luminescenza hanno evidenziato una inibizione parziale dell'emissione nella direzione [111] in cui si forma il gap fotonico (TO). Gli opali diretti sono stati realizzati anche su substrato conduttivo trasparente (TO) e sono stati infiltrati con cristalli liquidi (FI), allineati poi mediante campo elettrico. A seguito del processo di crescita, i campioni possiedono una lieve anisotropia nella direzione perpendicolare alla [111], che favorisce l'allineamento del cristallo liquido e che produce un grande effetto di tuning delle bande fotoniche in campo elettrico (FI). Queste misure sono molto promettenti e costituiscono una novità assoluta a livello internazionale.

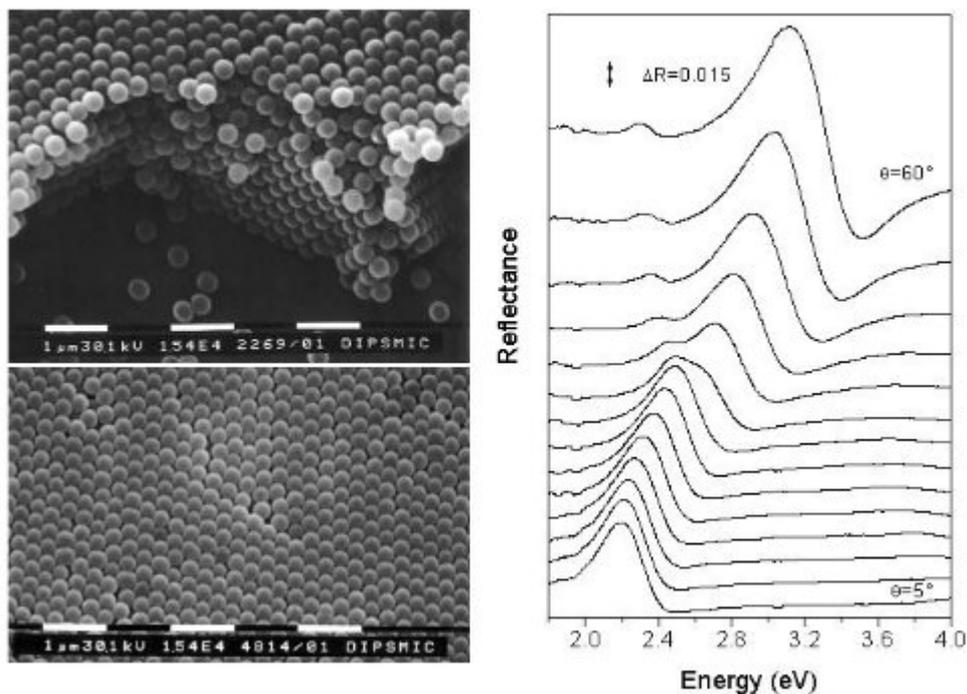


Fig. 6: Immagini SEM di opali diretti di polistirene e di silice, misure di riflettanza ad angolo variabile su opale di silice. Collaborazione TO+PV

Per quanto riguarda gli opali inversi, sono state realizzate matrici di Ossido di Titanio e di Silicio (TO). Gli opali inversi di Silicio sono stati prodotti con un processo che comprende calcinazione della matrice di Silice, infiltrazione con silicio amorfo nel reattore CVD, rimozione del coating di Silicio via plasma-RIE e rimozione del templato di Silice via etching umido in HF. I campioni sono stati caratterizzati mediante riflettanza normale e ad angolo variabile nelle diverse fasi del processo: prima e dopo la calcinazione, dopo l'infiltrazione di Silicio, dopo la rimozione del templato. Le misure di riflettanza ad angolo variabile sugli opali infiltrati con Silicio hanno mostrato la formazione di una gap nella direzione [111] privo di dispersione angolare, strutture spettrali associate ad effetti di diffrazione, e la presenza di una banda di alta riflettività che si può considerare come il precursore del gap fotonico completo nella struttura ad opale inverso (PV).

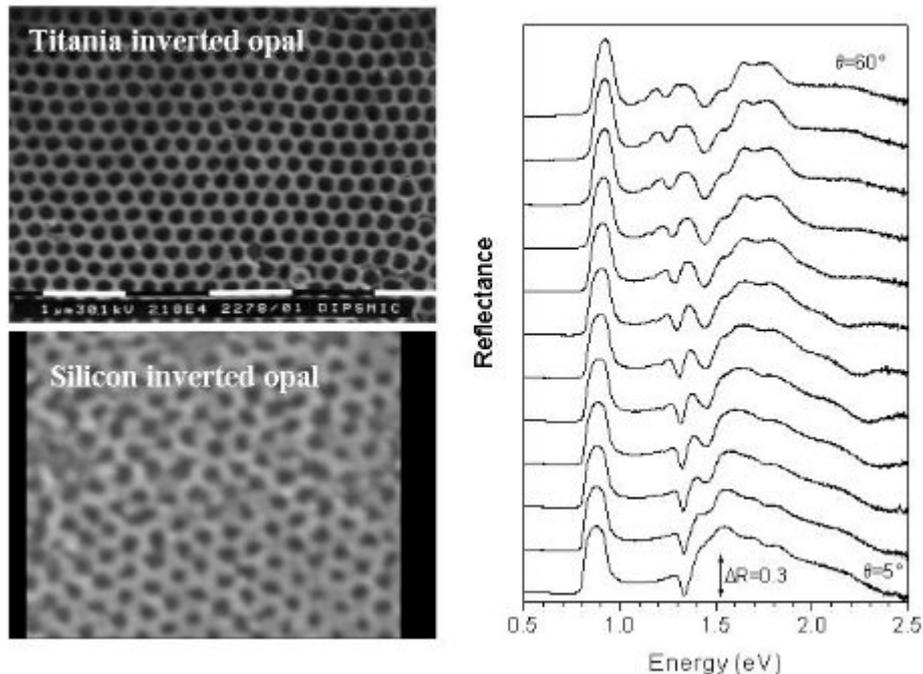


Fig. 7: Immagini SEM di opali inversi di titania e di silicio, misure di riflettanza ad angolo variabile su opale infiltrato con silicio. Collaborazione TO+PV

### 3b) Yablonovite e Yablonovite inversa

Sono state prodotte cristalli fotonici con struttura delle Yablonovite su matrice polimerica (PMMA), mediante litografia a raggi X con luce di sincrotrone (TS). La caratterizzazione ottica con misure di riflettanza ha confermato la formazione di un cristallo fotonico con un gap nella direzione normale alla superficie (111) (PV). Sono stati ottenuti cristalli fotonici metallici con struttura della Yablonovite mediante infiltrazione di Nickel per via elettrolitica e successiva rimozione del polimero (TS). Le misure ottiche di riflettanza ad angolo variabile hanno mostrato la presenza di strutture spettrali associate sia a bande fotoniche, sia a plasmoni di superficie del reticolo metallico (PV).

E' stato sviluppata una tecnica per la introduzione di difetti lineari in strutture a Yablonovite (TS). La tecnica, che è oggetto di brevetto, consiste nella realizzazione del difetto lineare a livello della matrice polimerica mediante introduzione di un polimero diverso dal PMMA: il difetto lineare viene mantenuto nei passaggi successivi di processo.

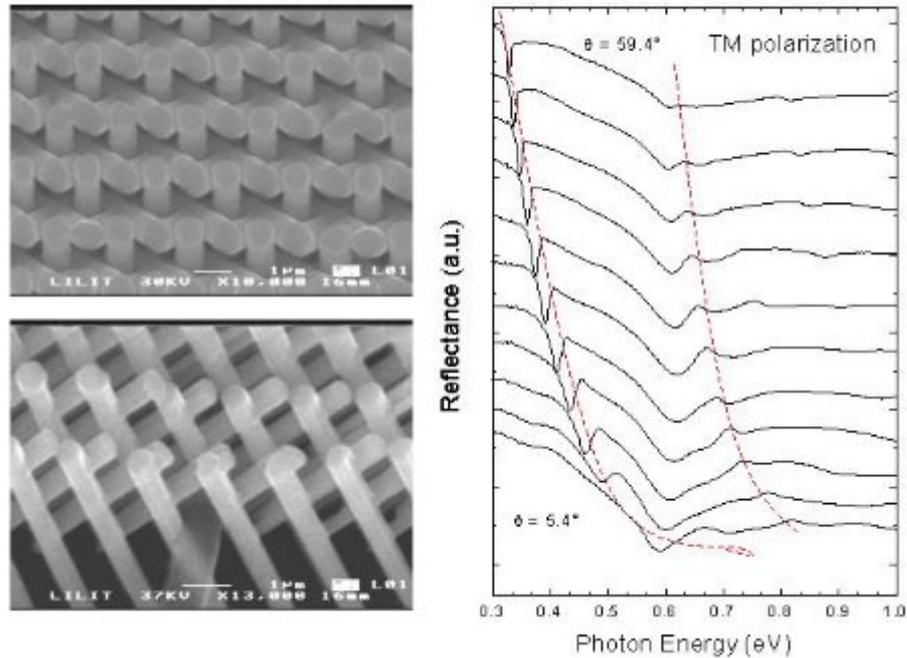


Fig. 8: Immagini SEM di Yablonovite di Nickel, Yablonovite con difetto lineare, misure di riflettanza ad angolo variabile. Microel. Eng. 67-68, 479 (2003). Collaborazione TS+PV

Allo scopo di realizzare strutture di Yablonovite a base di Silicio, sono stati effettuati tentativi di infiltrazione dei templati metallici mediante CVD termica (TO). Tuttavia i risultati del processo di infiltrazione hanno evidenziato la crescita di nano-wires di Silicio (amorfo e cristallino), a causa dell'azione catalitica del metallo sul gas precursore di silano. Si ritiene quindi che la realizzazione della Yablonovite in materiali ad alto indice richieda lo sviluppo di metodologie differenti. Sono attualmente allo studio le seguenti alternative: (i) infiltrazione della matrice metallica con SiO<sub>2</sub> via sol-gel, rimozione del metallo e successiva infiltrazione del Silicio con CVD termica; (ii) infiltrazione della matrice metallica con semiconduttori II-VI ad alto indice di rifrazione; (iii) etching diretto in profondità del Silicio mediante focused-ion beam.

### 3c) Riflettori patternati

Sono stati prodotti riflettori di Bragg Si/SiO<sub>2</sub> mediante crescita PECVD (TS), con struttura non- $\lambda/4$  secondo il design teorico (PV) in modo da avere una frazione elevata di Silicio. Sono state effettuate misure di riflettanza (PV) che hanno confermato la buona qualità dei campioni e la presenza delle stop band previste dal design. Sono stati realizzati patterning con reticoli di fori mediante litografia elettronica seguita da RIE (TS). La profondità di etching raggiunta è dell'ordine di 1 micron, ossia circa due periodi del riflettore di Bragg. Questo processo è limitato dalla fuoriuscita dai fori dei gas di reazione. Per ottenere profondità superiori, e quindi realizzare il cristallo fotonico 3D con sovrapposizione dei gap nel piano e verticale previsti dal design, si prevede di utilizzare in seguito l'etching diretto con focused-ion beam.

## 4) SVILUPPO DI STRUMENTAZIONE E DI TECNICHE SPERIMENTALI

Sono stati messi a punto i processi di crescita PECVD (TO,TS) di litografia a fascio elettronico (TO, TN, TS) e di etching mediante focused-ion beam (TS).

E' stato acquisito e messo a punto un sistema di crescita low-pressure CVD, utilizzato per l'infiltrazione di Silicio in opali e in Yablonovite (TO).

E' stato installato il sistema per la litografia di nanoimprint (PV). Sono stati sviluppati processi di Hot Embossing e di Soft UV nanoimprint e sono stati prodotti vari campioni di guide d'onda fotoniche di SOI con queste tecniche.

Sono stati messi a punto due apparati per la misura della trasmissione nel piano delle guide d'onda fotoniche. Il sistema sviluppato presso l'unità di TN utilizza come sorgente un laser tunabile fra 1.5 e 1.6 micron e si basa sulla tecnica di accoppiamento per butt-coupling, con sistemi di nano-posizionamento a controllo piezo, fibre ottiche tapered e varie camere IR per l'osservazione della luce trasmessa nel piano e/o scatterata dalla superficie. Invece il sistema sviluppato presso l'unità di PV utilizza una sorgente di luce bianca con rivelazione mediante spettrometro a trasformata di Fourier e realizza l'accoppiamento nel piano mediante obiettivi di microscopio e nano-posizionamento manuale. I due apparati sono quindi complementari.

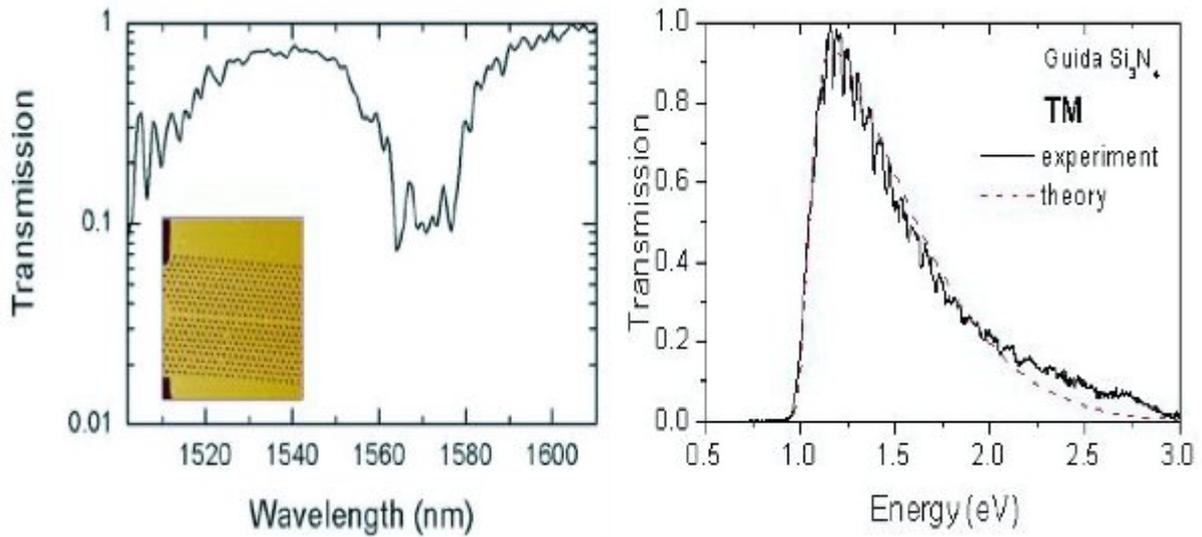


Fig. 9: Trasmissione da guida d'onda fotonica di SOI con difetto lineare, con l'apparato di Trento; trasmissione da guida d'onda di nitruro di silicio, con l'apparato di Pavia.

E' stato realizzato un sistema per l'infiltrazione locale di cristalli fotonici mediante un micro-dispenser con risoluzione micrometrica (FI). Con questa tecnica possono essere infiltrati localmente coloranti laser, cristalli liquidi e/o quantum dots colloidal e possono essere realizzati difetti controllati come guide d'onda lineari e nano-cavità. Sono state effettuate con successo infiltrazioni di coloranti laser su campioni free-standing di Silicio macroporoso ed è stata misurata la luminescenza dei campioni infiltrati.

E' stata installata una chemical facility per la sintesi di quantum dots colloidal (FI).

Sono stati realizzati sistemi per la retrodiffusione coerente, la spettroscopia risolta in tempo e l'estensione nell'infrarosso della spettroscopia in campo prossimo (FI). Con queste tecniche sono stati studiati vari campioni di Silicio micro- e macroporoso e di opali.

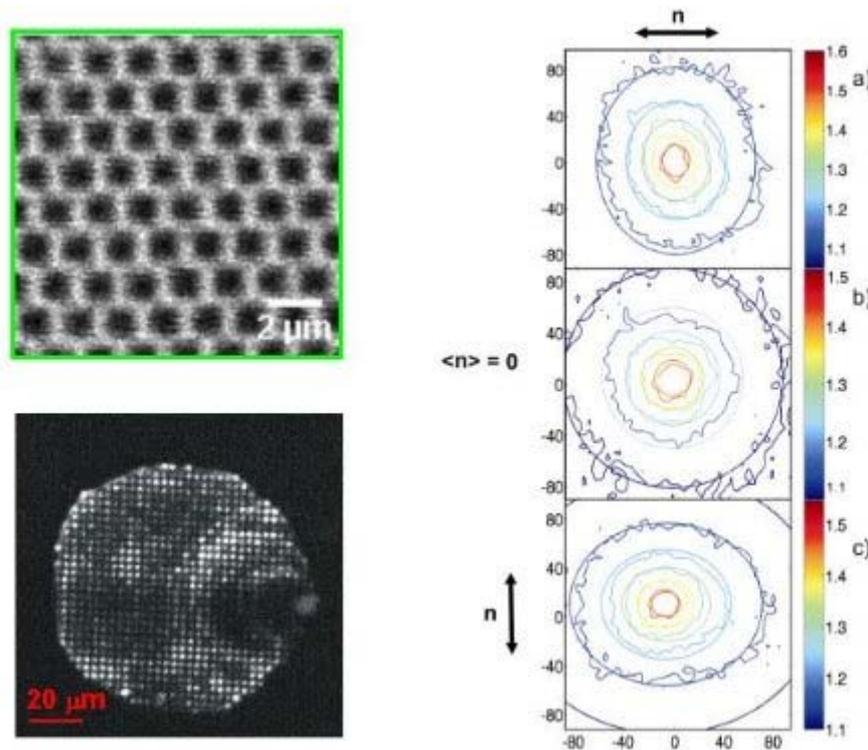


Fig. 10: Immagini SNOM di un campione di silicio macroporoso, immagine confocale di un campione infiltrato con dye, retrodiffusione coerente anisotropa da cristalli liquidi in fase nematica. Phys. Rev. Lett. 92, 033903 (2004)

E' stata perfezionata la tecnica di interferometria di Mach-Zehnder in luce bianca su piccole aree (PV). Con questa tecnica sono state effettuate misure su multistrati Si/SiO<sub>2</sub>, multistrati a-Si/SiN:H e su microcavità accoppiate di Silicio poroso: sono stati evidenziati effetti di rallentamento della luce al band edge e velocità superluminali all'interno del gap fotonico.

E' stato esteso il sistema di misura di riflettanza ad angolo variabile dalla superficie dei cristalli fotonici, utilizzando un prisma per la misura della riflettanza totale attenuata o ATR (PV). Come prisma viene usata una semisfera di ZnSe la cui distanza dal campione è controllata da tre posizionatori piezoelettrici. Con questa tecnica possono essere misurati i modi sotto alla linea di luce nelle guide d'onda fotoniche e i modi di superficie dei cristalli fotonici 3D. Le prime misure sono state effettuate su guide d'onda fotoniche di SOI nelle quali hanno permesso di determinare la dispersione dei modi di difetto lineare.

##### 5) SVILUPPO DI METODI TEORICI

a) E' proseguito lo sviluppo di un metodo originale, chiamato Guided-Mode Expansion (GME), per il calcolo della dispersione dei modi fotonici e delle perdite radiative nelle guide d'onda fotoniche (PV). Il metodo consiste nello sviluppo del campo magnetico su una base mista che consiste di onde piane nel piano 2D e di modi guidati di una guida d'onda effettiva nella direzione verticale. Le perdite per diffrazione si ottengono mediante la regola d'oro di Fermi nella formulazione elettromagnetica. Questo metodo è stato applicato al calcolo delle mappe dei gap e delle perdite radiative di vari sistemi fotonici: reticoli periodici e cavità 1D in membrane di Silicio e guide d'onda di SOI, reticoli periodici 2D e con difetti lineari, guide d'onda fotoniche SiN/SiO<sub>2</sub>. Fra i risultati più significativi vi sono il calcolo delle perdite dei modi associati a difetti lineari, principalmente guide d'onda di tipo W1 nel reticolo triangolare, e il calcolo dei fattori Q in nano-cavità. I risultati hanno costituito la base per il design dei campioni realizzati nel corso del progetto e per l'interpretazione delle misure di riflettanza e ATR effettuate a PV.

È stato sviluppato un modello per trattare le perdite radiative dei modi guidati sotto alla linea di luce, dovute al disordine di fabbricazione delle strutture (PV). Il modello consiste nell'assumere una variazione casuale del raggio dei buchi, descritta da una distribuzione Gaussiana, e nel trattare la modifica del tensore dielettrico in teoria delle perturbazioni. Il modello è stato applicato ai modi di difetto lineare di tipo W1 nel reticolo triangolare ed dà risultati in ottimo accordo con le perdite misurate su membrane di Silicio e guide di SOI da vari gruppi. Inoltre permette di ottimizzare il design delle strutture per diminuire le perdite estrinseche dei modi guidati: si è mostrato in particolare che le perdite si riducono di più di un ordine di grandezza usando guide di tipo W1.5 su membrana di Silicio, con larghezza di canale aumentata. In queste strutture, le perdite in presenza di rugosità sulla scala di 5 nm raggiungono valori dell'ordine di 2 dB/cm.

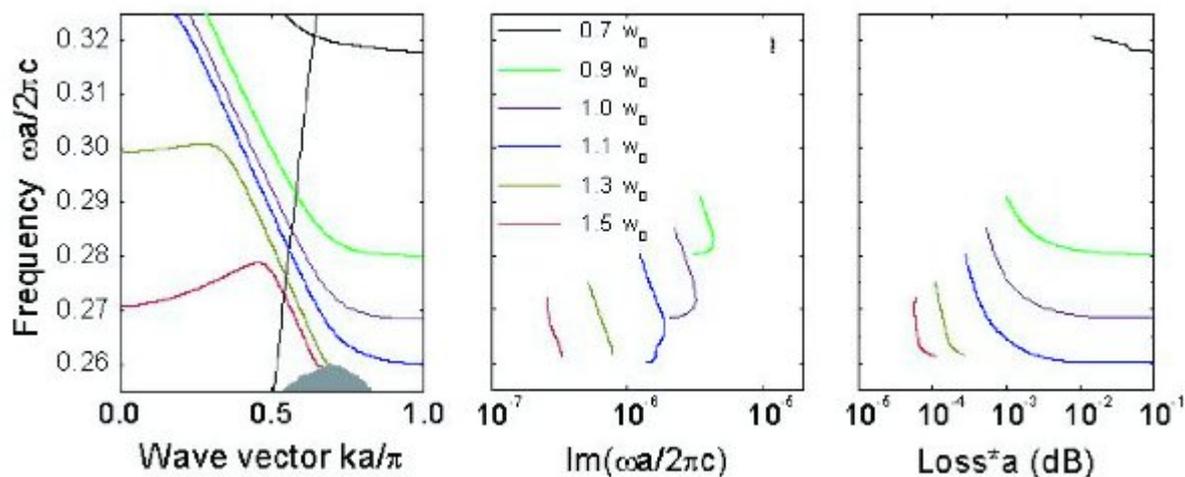


Fig. 11: Perdite radiative sotto alla linea di luce in funzione della larghezza di canale. Photon. Nanostr. 2, 103 (2004)

b) Sono stati adattati i metodi basati sullo sviluppo in onde piane, per calcolare le bande fotoniche di sistemi 3D quali opali e Yablonovite. In particolare sono state calcolate mappe dei gap dettagliate per la Yablonovite diretta e inversi per diversi valori della costante dielettrica e sono stati effettuati calcoli preliminari dei modi di difetto lineare nella Yablonovite. I risultati indicano che il band gap completo della struttura della Yablonovite sussiste in un ampio range di costanti dielettriche (giustificando quindi, per il futuro, l'utilizzo di materiali alternativi al Silicio per l'infiltrazione dei template metallici) e supporta modi localizzati su difetti lineari lungo i canali di tipo  $[1,1,0]$  o  $[1,-1,0]$ .

c) E' proseguito lo sviluppo del metodo di matrice di scattering per calcolare la riflettanza a vari angoli di incidenza (PV). Il metodo è stato esteso anche al calcolo della riflettanza totale attenuata prendendo il fascio incidente in un materiale con l'indice di rifrazione del prisma. I risultati hanno costituito la base per l'interpretazione degli esperimenti di riflettanza e ATR su guide d'onda fotoniche. Inoltre il metodo della matrice di scattering è stato esteso al calcolo della riflettanza ad angolo variabile da opali, nell'approssimazione in cui le sfere della struttura fcc vengono suddivise in cilindri orientati lungo la direzione  $[111]$ . Le dimensioni dei cilindri sono state ottimizzate per rappresentare al meglio le bande fotoniche del cristallo. Con questo approccio sono stati interpretati gli spettri di riflettanza su opali diretti e infiltrati.

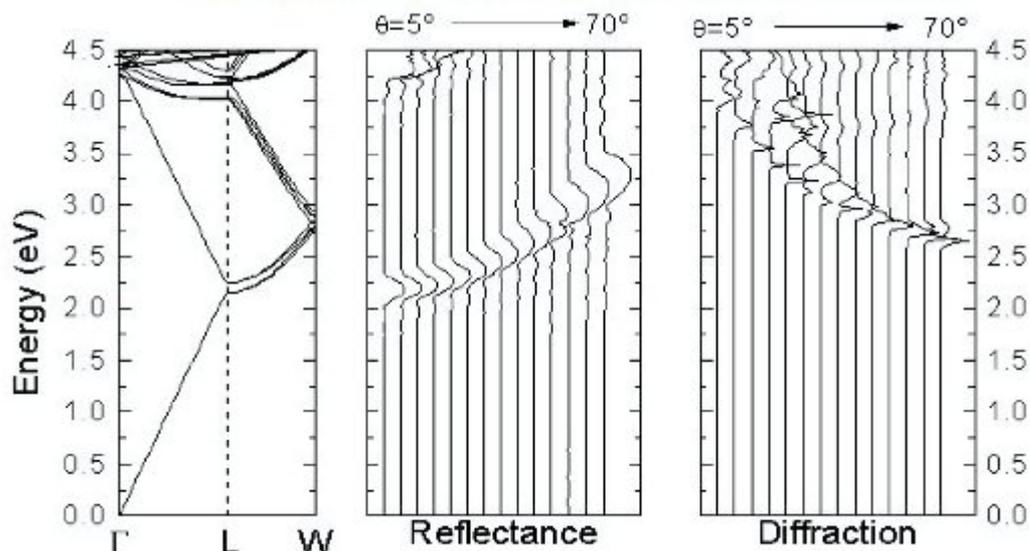


Fig. 12: Bande fotoniche, spettri di riflettività e diffrazione in opali.

d) È stata data una formulazione quanto-meccanica dell'interazione radiazione-materia in cristalli fotonici, basata sulla seconda quantizzazione del campo elettromagnetico in presenza di una funzione dielettrica variabile nello spazio (PV). È stata formulata la teoria dei polaritoni eccitonici in guide d'onda fotoniche, ossia i modi misti risultanti dall'interazione fra un eccitone e un modo fotonico guidato o quasi-guidato. La formulazione quantistica dell'interazione radiazione-materia sarà applicata in seguito alla teoria dell'emissione spontanea.

e) Sono stati effettuati calcoli di propagazione di un impulso elettromagnetici in cristalli fotonici 2D massivi e con guide d'onda a canale, mediante il metodo finite-difference time-domain (FDTD) (PV,TN). Inoltre sono state ottimizzate le strutture di cavità 1D in guide d'onda di Nitruro di Silicio utilizzando il principio del tapering (TN).

f) È stata data una formulazione della teoria della risposta ottica in near field, in grado di studiare la luce emessa da strutture micro- e nanometriche di forma e composizione arbitraria (TO). Questo metodo completamente 3D consente di derivare la distribuzione del campo elettromagnetico in prossimità di strutture dielettriche emettitrici, e di studiare come tale campo sia modificato da elementi scatteratori. Questo studio permette di legare le immagini in campo prossimo con gli spettri di fluorescenza.

## 12. Problemi riscontrati nel corso della ricerca

Il problema principale è consistito nel ritardo della preparazione del Silicio macroporoso. Ciò è stato dovuto principalmente ai requisiti di risoluzione per ottenere un gap a lunghezza d'onda di 1.55 micron: per questo motivo non è stato possibile utilizzare la tecnica già esistente che si basava su maschere di ossido di silicio e formazione degli etch pits mediante attacco in KOH, e si è dovuto invece sviluppare nuovi processi tecnologici basati su maschere di nitruro di silicio e attacco chimico in TMAH. È stato necessario testare un gran numero di campioni provenienti prima da TO e PV-LPN, poi dal nuovo sistema di litografia installato a TN. Solo verso la fine del progetto è stata risolta la difficoltà legata alla formazione degli etch pits e si sono potuti effettuare i primi attacchi elettrochimici su reticoli ordinati. È anche un motivo di questo ritardo che parte dell'enfasi del progetto si è spostata sui sistemi 1D di silicio poroso e sulle guide d'onda fotoniche di SOI e di Nitruro di Silicio.

Il processo di formazione della Yablonovite ha incontrato il problema della formazione dei nano-wires di Silicio al momento dell'infiltrazione mediante CVD termica dei templati metallici. Sono stati effettuati molti tentativi ma si è concluso che l'attività catalitica del metallo che conduce alla formazione dei nano-wires non può essere evitata. Pertanto (oltre alla studio della Yablonovite metallica, che è interessante di per sé) per il futuro saranno studiati i processi alternativi di cui al punto 3b).

Non è risultato facilmente realizzabile l'obiettivo di ottenere cristalli fotonici 3D mediante etching profondo di multistrati. Con gli apparati di reactive-ion etching disponibili presso le unità partecipanti non è stato possibile realizzare etching con profondità superiori a un micron. Questo "bottleneck" tecnologico potrebbe essere superato solo utilizzando un apparato di deep-RIE, ossia con alta densità di plasma (attualmente non disponibile in nessuna sede universitaria italiana). Per quanto riguarda le guide d'onda fotoniche di nitruro di silicio su ridge, il problema è stato risolto mediante l'uso della scrittura diretta con focused-ion beam che su aree piccole si è rivelata molto efficace. Per le guide d'onda fotoniche di SOI è stata inoltre molto utile la collaborazione stabilita con il laboratorio LPN-CNRS di Marcoussis (Francia).

Nell'evidenziare i problemi emersi nel corso della ricerca, occorre ricordare che il progetto prevedeva lo sviluppo di un gran numero di tecnologie di fabbricazione e di tipologie di cristalli fotonici, anche al fine di individuare i sistemi più facilmente realizzabili e le linee di ricerca più promettenti. Riteniamo anche utile sottolineare che i risultati molto positivi ottenuti su vari tipi di sistemi (silicio poroso 1D, guide d'onda fotoniche di SOI e nitruro di silicio, opali e opali inversi, infiltrazione) sono in linea con le tendenze della ricerca a livello internazionale sui cristalli fotonici.

**13. Elenco unità di ricerca che hanno partecipato al programma di ricerca**

n°	Università	Facoltà	Responsabile	Quota Ateneo	Cofinanziamento assegnato	Finanziamento totale	Pagato	Residuo da saldare (già fatturato)	Impegnato	Spese globali sostenute
1.	Università degli Studi di PAVIA	Facoltà di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	<a href="#">ANDREANI Lucio</a>	43.100	98.900	142.000	142.000	0	0	142.000
2.	Università degli Studi di FIRENZE	Facoltà di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	<a href="#">COLOCCI Marcello</a>	42.400	98.900	141.300	141.300	0	0	141.300
3.	Università degli Studi di TRENTO	Facoltà di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	<a href="#">PAVESI Lorenzo</a>	31.000	71.400	102.400	102.433	0	0	102.400
4.	Politecnico di TORINO	Facoltà di INGEGNERIA III (Ingegneria dell'Informazione)	<a href="#">PIRRI Candido</a>	51.800	120.800	172.600	172.600	0	0	172.600
<b>TOTALE</b>				<b>168.300</b>	<b>390.000</b>	<b>558.300</b>	<b>558.333</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>558.300</b>

**14. Risorse umane complessivamente ed effettivamente impegnate**

	(mesi uomo)		
	I anno	II anno	TOTALE
<b>da personale universitario</b>	45	41	86
<b>altro personale</b>	147	109	256
<b>personale a contratto</b>	52	56	108

**15. Modalità di svolgimento (dati complessivi)**

	(numero)
<b>partecipazioni a convegni:</b>	
<b>in Italia</b>	20
<b>all'estero</b>	44
<b>articoli pertinenti pubblicati:</b>	
<b>su riviste italiane con referee</b>	0
<b>su riviste straniere con referee</b>	42
<b>su altre riviste italiane</b>	0
<b>su altre riviste straniere</b>	0
<b>comunicazioni a convegni/congressi internazionali</b>	41
<b>comunicazioni a convegni/congressi nazionali</b>	19
<b>rapporti interni</b>	10
<b>brevetti depositati</b>	1

**16. Tabella delle spese sostenute**

n°	Responsabile (Cognome e nome)	Università	Materiale inventariabile	Grandi Attrezzature	Materiale di consumo	Spese per calcolo ed elaborazione dati	personale a contratto	Servizi esterni	Missioni
1.	ANDREANI Lucio	Università degli Studi di PAVIA	59.370	0	23.784	1.019	33.204	4.506	7.000

2.	COLOCCI Marcello	Università degli Studi di FIRENZE	52.455	0	44.880	0	28.222	0	7.8
3.	PAVESI Lorenzo	Università degli Studi di TRENTO	53.225	0	15.372	0	25.823	0	3.9
4.	PIRRI Candido	Politecnico di TORINO	42.498	0	92.105	0	28.100	0	6.3
<b>TOTALE</b>			<b>207.548</b>	<b>0</b>	<b>176.141</b>	<b>1.019</b>	<b>115.349</b>	<b>4.506</b>	<b>25.1</b>

(per la copia da depositare presso l'Ateneo e per l'assenso alla diffusione via Internet delle informazioni riguardanti i programmi finanziati legge del 31.12.96 n° 675 sulla "Tutela dei dati personali")

Data 24/01/2005 17:33

Firma .....