

MINISTERO DELL'ISTRUZIONE DELL'UNIVERSITÀ E DELLA RICERCA

RELAZIONE ANNUALE

COORDINATORE

Anno 2002 - prot. 2002021127

1. Dati riassuntivi del progetto

Coordinatore	ANDREANI Lucio	
Università	Universita' degli Studi di PAVIA	
Titolo del Programma	Cristalli fotonici a base di Silicio: tecnologia, proprietà ottiche e teoria	
Costo originale del Progetto		710.000 €
Quota Cofinanziamento MIUR		390.000 €
Quota Cofinanziamento ATENEO		168.300 €
Totale finanziamento		558.300 €
Fondi complessivi utilizzati nel primo anno		305.638 €

2. 1. Obiettivo della Ricerca

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 nitruro 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 SiO₂);

(iii) sistemi tridimensionali: silicio macroporoso con modulazione verticale del diametro dei pori, multistrati periodici (a-Si:H/a-Si₃N₄:H) scavati con reticoli di fori, opali e opali inversi (Si e TiO₂), 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.

3. 2.1 Risultati (i risultati di maggior rilievo conseguiti nel corso dell'attività di ricerca)

I risultati principali di fabbricazione e di misure ottiche ottenuti nel corso del primo anno del progetto vengono riferiti ai vari tipi di cristalli fotonici:

- (1) sistemi bidimensionali
- (2) sistemi bidimensionali in guida d'onda planare
- (3) sistemi tridimensionali: opali
- (4) sistemi tridimensionali: Yablonovite
- (5) sistemi tridimensionali: multistrati patternati

Verranno inoltre illustrati i risultati relativi a:

- (6) strumentazione sviluppata
- (7) teoria

Per maggiori dettagli, pubblicazioni, ecc si fa riferimento ai modelli B delle singole unità.

- (1) Sistemi bidimensionali: silicio macroporoso, films a base di a-Si:H e a-Si(1-x)Nx:H

Sono stati messi a punto i processi di litografia a fascio elettronico per la realizzazione maschere in PMMA con reticoli 2D, per il successivo trasferimento del pattern sui substrati (TO). Sono stati studiati i processi di attacco chimico via plasma con gas a base di fluorine per i film di a-Si:H (TO).

Sono state realizzate maschere in ossido e sono stati messi a punto i protocolli per il trasferimento dei campioni da TO a TN, per la realizzazione degli etch pits e del silicio macroporoso. Il design per le strutture con gap nell'IR è stato effettuato a PV. Sono stati prodotti substrati con etch pits e sono state effettuate prove di attacco elettrochimico, che tuttavia devono ancora essere perfezionate. Nell'immediato futuro, oltre alla produzione di nuove maschere con litografia elettronica, le strutture verranno replicate mediante litografia di nano-imprint al fine di avere un numero di campioni che permetta l'ottimizzazione del processo di etching elettronico e quindi la produzione del silicio macroporoso con gap nell'IR.

Alcuni campioni già disponibili di silicio macroporoso (TN) sono stati infiltrati localmente con coloranti laser (FI). E' proseguita l'attività di impregnazione di ioni Er in cristalli fotonici di silicio.

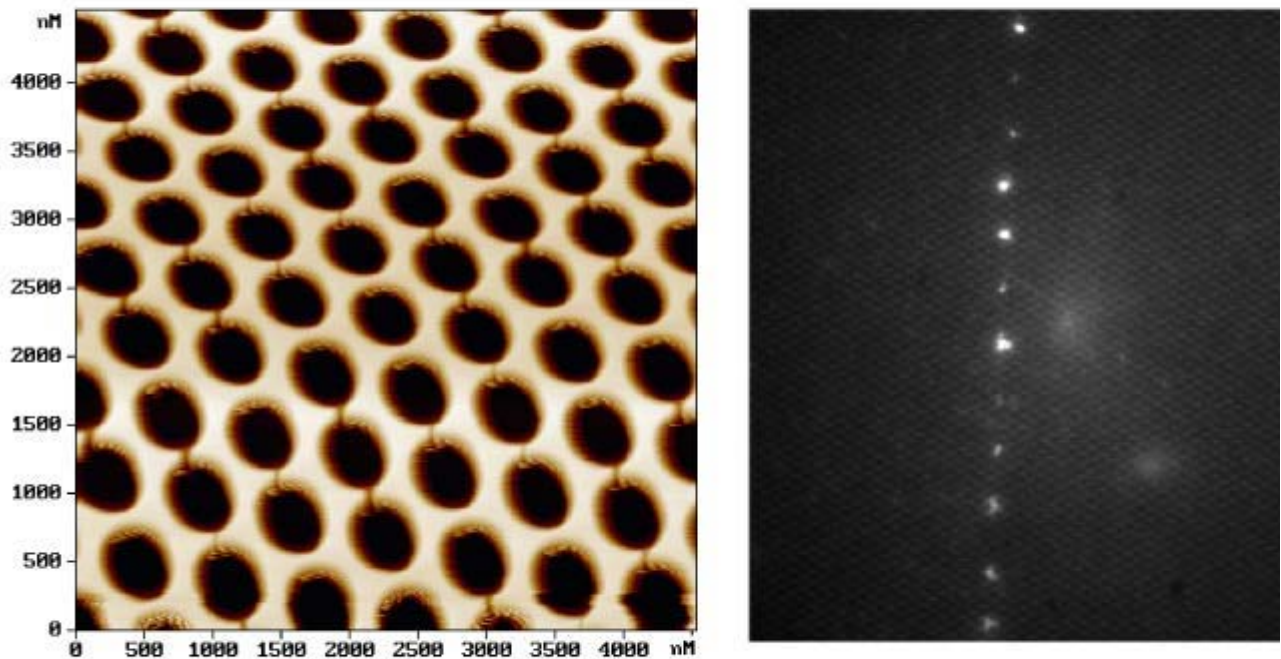


Figura 1: definizione degli etch pits per il silicio macroporoso e luminescenza di campioni infiltrati localmente con dye lungo una fila di fori.

(2) Sistemi bidimensionali in guida d'onda planare: strutture Si/SiO₂ (SOI) e Si₃N₄/SiO₂.

Sono state prodotte guide d'onda di SiO₂/a-Si:H mediante deposizione PECVD su substrati di silicio (TO). Sono stati ottimizzati i processi per la formazione dei patterns. Sono state realizzate guide d'onda fotoniche di SOI con reticoli 1D e 2D, anche contenenti difetti lineari e puntuali, mediante litografia elettronica e reactivation etching (TO,PV). Su questi sistemi sono state effettuate misure di riflettanza ad angolo variabile che hanno fornito la dispersione delle bande fotoniche e le energie dei modi di difetto (PV). Queste misure sono state confrontate con l'analisi teorica: calcolo della dispersione dei modi guidati e quasi-guidati, delle larghezze radiative dovute alla diffrazione, e della riflettanza. Sono state inoltre effettuate misure di trasmissione nel piano della guida d'onda su strutture SOI che hanno evidenziato la propagazione della luce in difetti lineari (TN). Sono state effettuate con successo misure di generazione di terza armonica da guide d'onda di SOI, che hanno evidenziato forti effetti di risonanza quando il fascio di pompa ha la stessa energia e lo stesso vettore d'onda nel piano di un modo fotonico (PV).

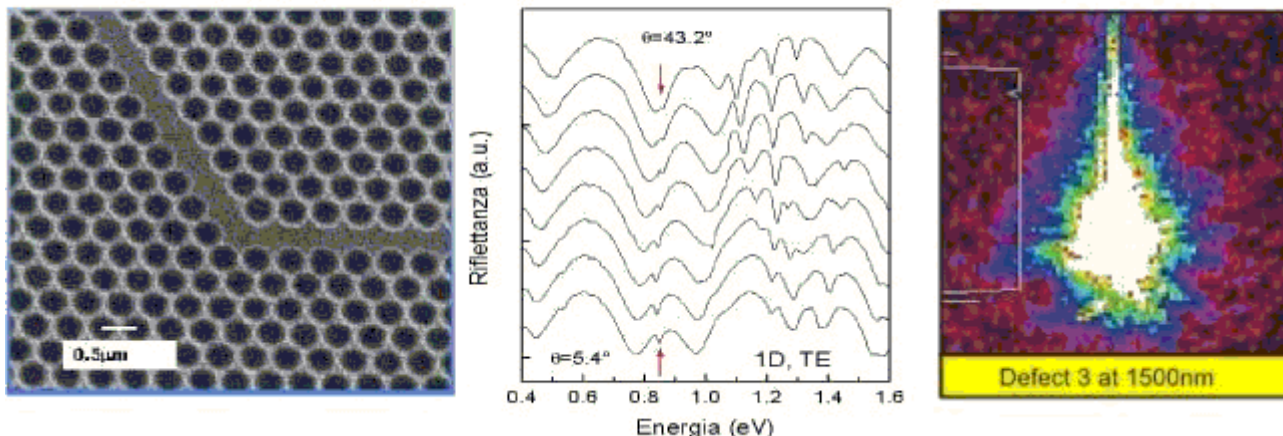


Figura 2: Immagine SEM di un canale con curva a 120 gradi in SOI, riflettanza ad angolo variabile di struttura 1D con microcavità (l'energia dei modi di difetto è indicata da frecce) e luce trasmessa dal piano della guida d'onda con difetto lineare

Sono state prodotte guide d'onda di Si₃N₄ (TO, TN) e sono iniziati i test per la realizzazione di reticoli 1D e 2D nelle guide con il nuovo sistema Focused Ion Beam (FIB) installato a TS-TASC. Il design è stato fatto per ottenere gap attorno a λ=1.5 micron oppure 800 nm (PV). Il sistema FIB ha il vantaggio di compiere in una sola fase di processo sia litografia che etching, ed è molto promettente per la realizzazione di strutture fotoniche su ridge per la trasmissione in guida.

(3) Sistemi tridimensionali: opali

Sono stati sintetizzati mediante dip-coating in soluzione colloidale opali diretti a base di nanosfere di polistirene (acquistate) e di Silice (sintetizzate) (TO). Gli opali hanno struttura fcc e spessori fino a 20 micron. Alcuni campioni sono stati misurati otticamente mediante riflettanza ad angolo variabile (PV) e retrodiffusione coerente (FI).

Alcuni opali sono stati sintetizzati su substrato conduttivo trasparente (Indium Tin Oxide, ITO) per consentire l'infiltrazione di cristalli liquidi e la successiva misura delle proprietà ottiche. Le prove di infiltrazione hanno evidenziato in molti casi la fragilità delle strutture auto-assemblate e la necessità di processi di sinterizzazione.

Sono stati ottenuti i primi opali inversi infiltrando gli opali diretti di polistirene con Titania e rimuovendo le sfere per calcinazione.

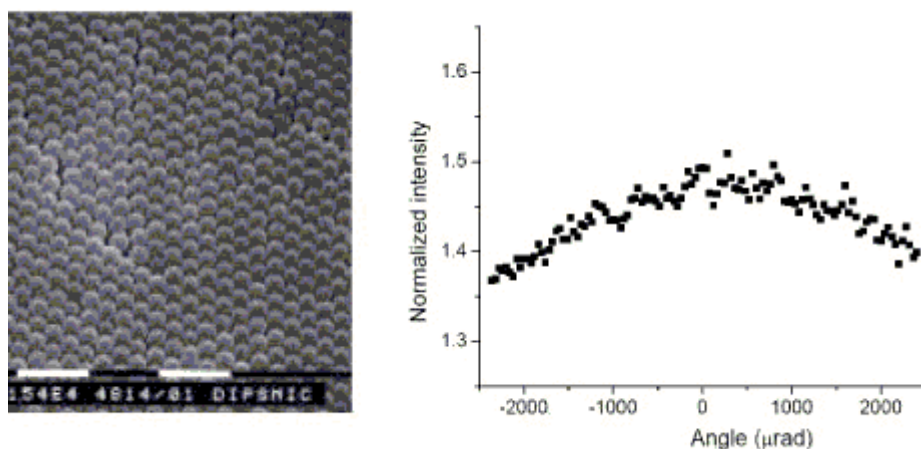


Figura 3: immagine SEM di opale a base di Silice e risultati di coherent backscattering (il picco di backscattering è arrotondato a causa dello spessore finito del campione)

(4) Sistemi tridimensionali: Yablonovite

Sono state realizzate strutture 3D con la geometria della Yablonovite (3 set di fori circolari inclinati di 35 gradi rispetto alla superficie e ruotati di 120 gradi uno rispetto all'altro) mediante litografia a raggi X (TASC-TS). Le strutture sono state realizzate inizialmente in PMMA, ottenendo la Yablonovite diretta. I campioni, di spessore dell'ordine di 10 micron, sono stati misurati mediante riflettanza ad angolo variabile (PV) che ha evidenziato la presenza di un gap fotonico nella regione dell'IR nella direzione di propagazione della luce. Il gap si sposta verso le alte energie all'aumentare dell'angolo di incidenza.

E' stata poi realizzata la Yablonovite inversa di Nickel, mediante infiltrazione del metallo per via elettrolitica e rimozione del PMMA. I campioni sono stati misurati con riflettanza ad angolo variabile che ha mostrato la presenza di diverse strutture spettrali associate alle bande fotoniche e/o ai plasmoni di superficie.

Sono state effettuate prove di infiltrazione di Si per CVD termico nei templati di Nickel, al fine di produrre la Yablonovite diretta di silicio. L'ottimizzazione del processo è tuttora in corso.

E' stato messo a punto un processo per la realizzazione di difetti lineari nella Yablonovite, anche con connessioni in 3D e con completo controllo della geometria.

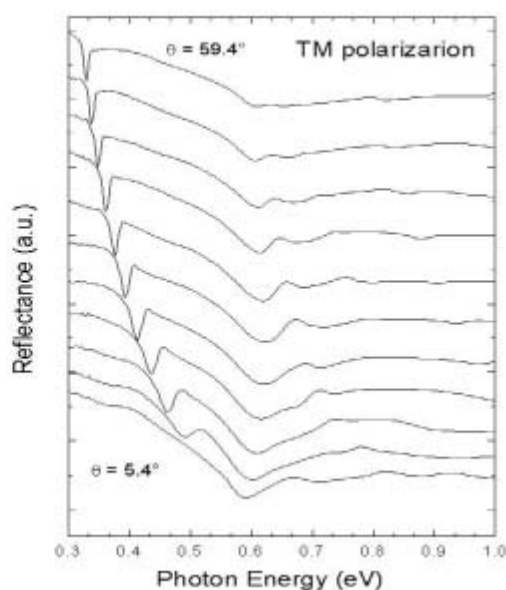
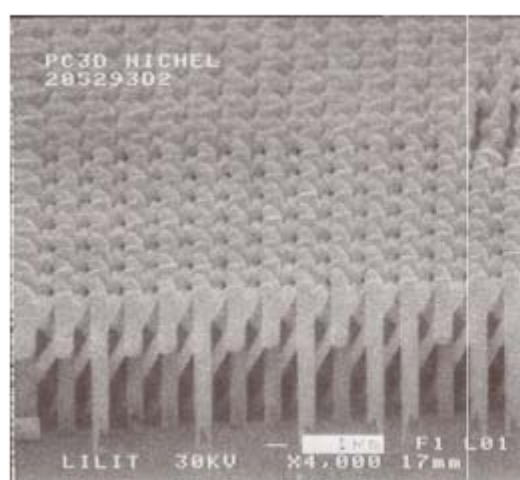


Figura 4: immagine SEM di Yablonovite inversa di Nickel e riflettanza ad angolo variabile sul campione, che mostra le strutture spettrali associate ai modi fotonici

(5) Sistemi 3D: multistrati patternati

Sono stati realizzati riflettori di Bragg con strati di a-Si/SiO₂ e di a-Si/Si₃N₄ mediante deposizione PECVD (TO,TS). Gli spessori degli strati differiscono dalla condizione usuale $\lambda/4$, al fine di ottenere un alto indice di rifrazione medio per il successivo gap 2D. I campioni sono stati misurati in riflettanza e trasmittanza, che ha mostrato la presenza di gap nella direzione di crescita, nonché in interferometria (PV). Sono stati realizzati pattern 2D con reticoli di fori triangolari e periodo sub-micrometrico, sulla base di un design che realizza la sovrapposizione dei gap 1D nella direzione di crescita e 2D nel piano. Sono state effettuate prove di etching su campioni con 4.5 periodi (il periodo è di 420 nm) e la profondità raggiunta è dell'ordine di 1 micron, quindi circa la metà di quella richiesta per avere fori passanti lungo tutto il multistrato. I risultati sono molto promettenti in vista della realizzazione di strutture 3D con gap lungo tre direzioni perpendicolari e controllo parziale della densità degli stati fotonici e dell'emissione.

(6) Strumentazione sviluppata

Sono stati messi a punto i processi di litografia a fascio elettronico (TO) e di etching con 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 messo a punto un apparato di misura della trasmissione nel piano di guide d'onda fotoniche (TN).

E' stato installato il sistema per la litografia di nanoimprint (PV).

E' stato realizzato un sistema per infiltrazione controllata di cristalli fotonici 2D, che permette di infiltrare localmente i singoli fori (FI). Il sistema è accoppiato ad un microscopio confocale e ad uno NSOM.

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

(7) Teoria

E' stata completata l'elaborazione di una teoria delle guide d'onda fotoniche con il metodo dello sviluppo nella base dei modi guidati di una guida d'onda efficace. In particolare sono state calcolate le perdite radiative intrinseche per i modi sopra la linea di luce, dovuti a diffrazione fuori del piano di propagazione. Fra le varie applicazioni vi sono lo studio delle mappe dei gap e delle perdite radiative in reticoli periodici e in guide d'onda lineari, il design delle varie strutture per le altre unità, e la formulazione della teoria dei polaritoni (modi misti eccitone-luce) per le guide d'onda fotoniche (PV).

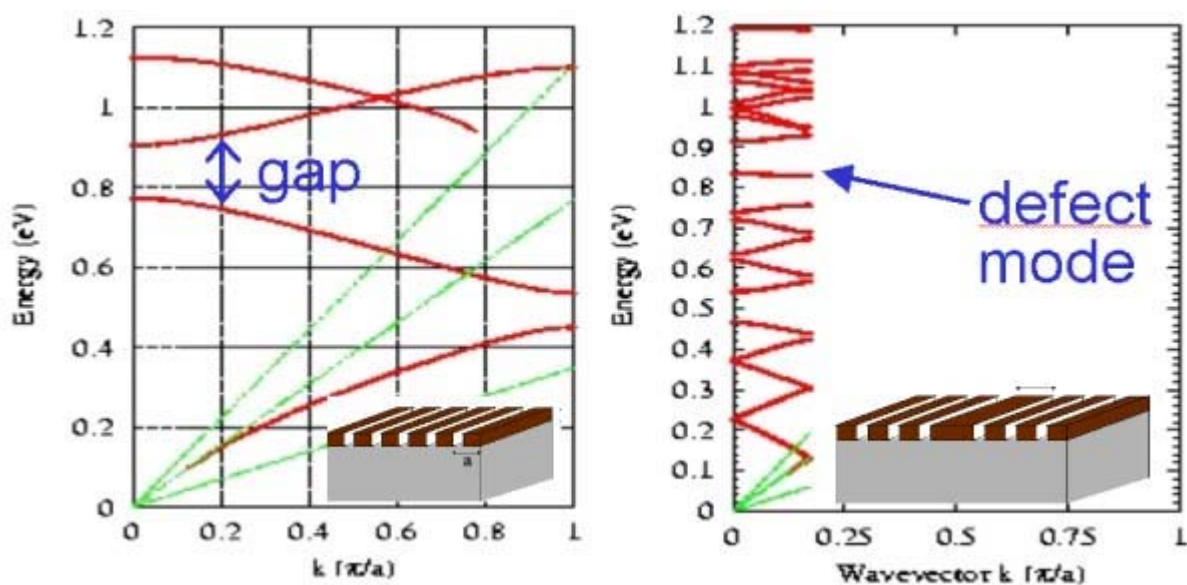


Figura 5: Dispersione dei modi fotonici in guida d'onda fotonica con reticolo 1D periodico e con microcavità. Questo design è stato utilizzato per per guide d'onda Si/SiO₂ e Si₃N₄/SiO₂

Sono state calcolate le bande fotoniche e le densità degli stati in reticoli 3D complessi quali la Yablonovite. Per questa struttura sono state determinate le mappe dei gap per diversi valori della costante dielettrica, per la Yablonovite "diretta" (cilindri di aria in dielettrico) e "inversa" (cilindri di dielettrico in aria). Sono state determinate quantitativamente le condizioni per ottenere gap completo (PV).

Sono state analizzate le proprietà ottiche di opali costituiti da sfere di polistirene con struttura fcc e direzione di crescita [111], sulla base di calcoli di bande fotoniche e densità degli stati in corrispondenza di un angolo di incidenza fissato. Questo approccio ha il vantaggio di poter distinguere gli effetti dovuti al gap fotonico da quelli dovuti alle bande fotoniche: il gap corrisponde a una diminuzione della DOS, mentre le bande fotoniche danno un aumento. In effetti, si trova che la prima struttura spettrale a incidenza normale corrisponde al ben noto gap dell'opale nella direzione [111], mentre a energia più elevata vi sono strutture spettrali (analoghe alle singolarità di Van Hove) che corrispondono ai modi fotonici, ossia a diffrazione in una direzione diversa da quella di incidenza (PV).

E' stata calcolata la riflettanza di guide d'onda fotoniche con il metodo della matrice di scattering, in particolare sono stati interpretati gli esperimenti condotti a Pavia su guide d'onda di SOI. E' stata elaborata una estensione del metodo (per il momento solo su reticoli 1D) al fine di calcolare la generazione di armoniche in riflessione e in diffrazione su reticoli fotonici (PV).

E' proseguita l'attività di simulazione della propagazione di onde elettromagnetiche in cristalli fotonici 2D e 3D con il metodo finite-difference time domain (FDTD) e con altri metodi agli elementi finiti (PV, TN).

E' stato sviluppato uno schema di calcolo generale delle proprietà ottiche, che combina il metodo delle onde piane e quello degli stati di scattering. Tale approccio consente di trattare strutture finite ma molto spesse, per le quali si possono trascurare gli effetti di bordo. Il metodo è stato applicato in un primo momento ai sistemi 1D (doppie cavità accoppiate), con l'idea di estenderlo ai cristalli fotonici 2D e 3D (TO).

E' stato effettuato uno studio della risposta ottica locale (near-field), mediante un approccio teorico che determina la luce emessa da strutture nanometrica di forma e composizione arbitraria. Questo metodo consente di derivare la distribuzione spaziale del campo elettromagnetico in prossimità di strutture emettitrici, e di comprendere la complessa relazione esistente fra immagini di campo prossimo e spettri di luminescenza (TO). Il passo successivo sarà l'applicazione di questa teoria alle misure che vengono effettuate con NSOM.

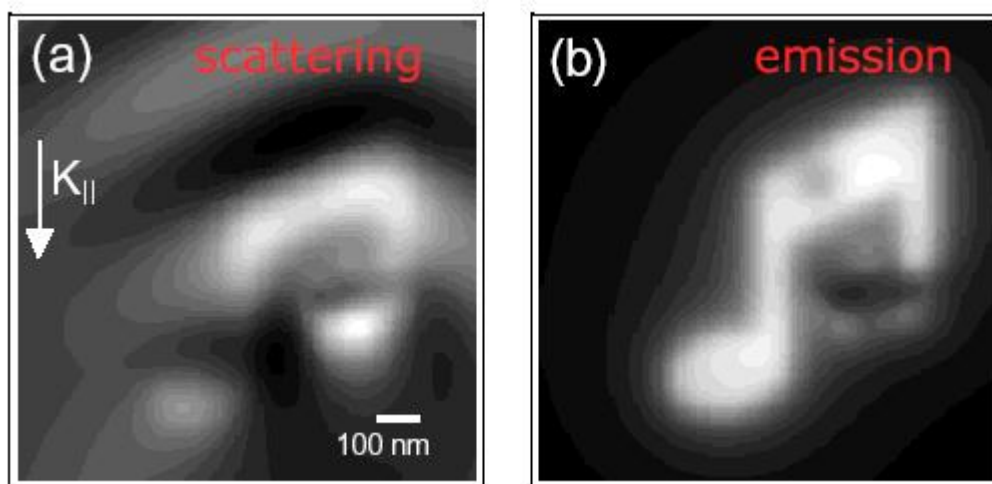


Figura 6: Spettri di emissione in near-field calcolati

Nel complesso, tutte le attività del progetto hanno un buon grado di avanzamento (con l'unica eccezione del silicio macroporoso, vedi punto successivo) e su alcune linee sono stati raggiunti obiettivi più avanzati di quelli previsti per il primo anno.

4. 2.2 Problemi

Si è verificato un ritardo nella produzione del silicio macroporoso, dovuto a problemi tecnici con la litografia a fascio elettronico e con l'etching elettrochimico. Tuttavia i protocolli di processo e il trasferimento di campioni sono ben stabiliti, la strumentazione ora è funzionante, quindi pensiamo di recuperare il ritardo nel corso del secondo anno.

5. 3. Rendiconto delle attività presso le sedi partecipanti

n°	Responsabile	Università	Materiale inventariabile	Grandi Attrezzature	Materiale di consumo	Spese per calcolo ed elaborazione dati	personale a contratto	Servizi esterni	Missioni	Pubblicazioni	Partec Organ cor
1.	ANDREANI Lucio	Università degli Studi di PAVIA	37.900	0	14.500	0	21.200	1.500	4.200	2.100	
2.	COLOCCI Marcello	Università degli Studi di FIRENZE	22.853	0	18.047	0	11.911	0	6.543	2.851	
3.	PAVESI Lorenzo	Università degli Studi di TRENTO	53.225	0	9.128	0	25.823	0	4.099	0	

4.	PIRRI Candido	Politecnico di TORINO	42.498	0	0	0	14.036	0	2.053	0
TOTALE		156.476	0	41.675	0	72.970	1.500	16.895	4.951	11.171

6. 4.Obiettivi per il secondo anno del programma

FABBRICAZIONE E TECNOLOGIA, INFILTRAZIONE

* Realizzazione di cristalli fotonici 2D (silicio macroporoso) e 2D in guida d'onda (SOI e Si₃N₄/SiO₂), anche con difetti puntuali e filtri a trasmissione selettiva. Realizzazione di un dimostratore di guida d'onda lineare (TO, TN).

* Realizzazione di guide d'onda verticali e di cristalli fotonici 3D di silicio macroporoso mediante modulazione del diametro dei pori (TN).

* Produzione di etch pits per silicio macroporoso mediante litografia di nanoimprint (TO, PV).

* Realizzazione di cristalli fotonici 3D e microcavità utilizzando riflettori di Bragg a multistrati Si/SiO₂ e a-Si:H/a-Si₃N₄, patternate con reticoli di fori passanti su tutta la struttura (TO, TS).

* Realizzazione di opali inversi a base Si e TiO₂ mediante infiltrazione degli opali diretti sintetizzati nella prima fase. Le strutture dovranno presentare una elevata riduzione della densità degli stati fotonici nel range del vicino infrarosso (TO).

* Realizzazione di Yablonovite a base Si, con elevata riduzione della densità degli stati nel vicino infrarosso, tramite infiltrazione dei template metallici realizzati nella prima fase (TO, TS).

* Impregnazione dell'Er in cristalli fotonici 3D di silicio macroporoso e in guide d'onda/microrisuonatori, studio delle caratteristiche di emissione dell'Er (TN).

* Infiltrazione di emettitori in cristalli fotonici 2D e 3D con band gap. Si seguiranno due vie: quantum dots colloidali e gocce di colorante (FI).

* Infiltrazione locale controllata di cristalli liquidi, dyes, quantum dots in cristalli fotonici 2D (FI).

PROPRIETA' OTTICHE

* Misura delle energie associate a modi di difetto lineare e puntuale ripetuti con supercella in sistemi 2D e 2D in guida d'onda planare mediante riflettanza ad angolo variabile (PV).

* Caratterizzazione dei modi di propagazione e delle perdite in guide d'onda/microrisuonatori a cristalli fotonici mediante butt-coupling (TN).

* Misure di riflettanza e di trasmittanza e di bande di energia mediante riflettanza ad angolo variabile in sistemi 3D: opali inversi, Yablonovite diretta, riflettori di Bragg patternati (PV).

* Misure di bande fotoniche mediante interferometria di Mach-Zehnder su sistemi 3D (PV).

* Misure risolte in tempo e di retrodiffusione coerente nel vicino infrarosso su cristalli fotonici 2D di silicio macroporoso e su strutture 3D (Yablonovite e opali) (FI).

* Studio dell'emissione di sorgenti interne in cristalli fotonici di varie dimensionalità con controllo della densità degli stati fotonici (FI).

* Studi di microscopia ottica a campo prossimo di cristalli fotonici 2D con alto grado di confinamento ottico, anche in strutture in guida d'onda, e con sorgenti locali (FI).

* Misure di generazione di armoniche su cristalli fotonici di Si macroporoso e SOI (PV).

TEORIA

* Calcoli delle energie dei modi associati a difetti lineari e puntuali in cristalli fotonici (PV).

* Estensione dei calcoli di riflettanza ad angolo variabile ai sistemi 2D con difetti lineari e puntuali (ripetuti con supercella) e ai sistemi 3D (PV).

* Calcoli della modifica di emissione spontanea in cristalli fotonici di varie dimensionalità (PV).

* Estensione dell'analisi con funzioni di Green delle proprietà ottiche alle strutture 2D e/o 3D finite (TO).

* Simulazioni di fenomeni di propagazione ultraveloce in cristalli fotonici e in guide d'onda lineari (TO, PV, TN).

* Calcolo dei processi nonlineari in cristalli fotonici 2D (PV).

* Modellizzazioni di spettroscopia ottica in campo prossimo (TO).

7.

Data 30/01/2004 12:07