

MINISTERO
DELL'ISTRUZIONE
DELL'UNIVERSITÀ
E DELLA RICERCA



Programmi di ricerca cofinanziati - Modello C
Rendiconto di unita' di ricerca - ANNO 2002
prot. 2002021127_001

1. Area Scientifico Disciplinare principale	02: Scienze fisiche
2. Coordinatore Scientifico del programma di ricerca	ANDREANI Lucio
- Università	Università degli Studi di PAVIA
- Facoltà	Facoltà' di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI
- Dipartimento/Istituto	Dip. FISICA
3. Titolo del programma di ricerca	Cristalli fotonici a base di Silicio: tecnologia, proprietà ottiche e teoria

4. Responsabile Scientifico dell'Unità di Ricerca	ANDREANI Lucio
- Università	Università degli Studi di PAVIA
- Facoltà	Facoltà' di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI
- Dipartimento/Istituto	Dip. FISICA
5. TITOLO del programma dell'unità di ricerca	Proprietà ottiche e teoria di cristalli fotonici
6. SETTORE principale dell'unità di ricerca:	FIS/03
7. Finanziamenti assegnati all'unità di ricerca:	
- Quota Ateneo	43.100 €
- Quota MIUR	98.900 €
- Finanziamento totale	142.000 €

8. Descrizione della Ricerca eseguita e dei risultati ottenuti

L'attività dell'unità di Pavia si è sviluppata lungo le linee previste dal progetto, ossia:

- 1) misura delle proprietà ottiche dei cristalli fotonici prodotti dai partner;
- 2) studio teorico delle bande fotoniche e delle proprietà ottiche;
- 3) sviluppo della litografia di nano-imprint.

1) MISURA DELLE PROPRIETÀ OTTICHE DEI CRISTALLI FOTONICI

1a) Sono stati caratterizzati i multistrati e le guide d'onda di Si/SiO₂, Si₃N₄/SiO₂ e a-SiN:H mediante riflettanza, trasmittanza e ellissometria spettroscopica. Per i vari campioni sono stati misurati gli spessori degli strati e gli indici di rifrazione. In particolare,

per i multistrati periodici di Si/SiO₂ cresciuti a Trieste mediante PECVD è stata verificata la presenza di un gap fotonico nel vicino infrarosso, la buona omogeneità del campione e la corrispondenza fra i parametri di crescita e quelli nominali, studiati al fine di ottenere una sovrapposizione fra i gap 1D e 2D dopo patterning verticale.

1b) Sono state effettuate misure di riflettanza ad angolo variabile dalla superficie di vari tipi di cristalli fotonici: guide d'onda Si/SiO₂, Yablonovite, opali. La tecnica consiste nel determinare la frequenza delle strutture spettrali associate all'eccitazione di modi fotonici: grazie alla conservazione del vettore d'onda parallelo alla superficie (modulo un vettore del reticolo reciproco), viene determinata la dispersione delle bande fotoniche nella zona di Brillouin bidimensionale. Gli esperimenti sono stati effettuati mediante un micro-riflettometro che permette di misurare piccole aree (diametro dell'ordine di 100 micron) in un ampio range spettrale (4-0.2 micron).

Le guide d'onda di Silicio su Isolante (SOI) consistono di un core di Si (260 nm), un cladding inferiore di SiO₂ (1000 nm) e un substrato di Silicio: i reticoli fotonici sono definiti nel core di Silicio e sono reticoli 1D (riflettore di Bragg in guida e microcavità) e 2D (reticolo triangolare di buchi, anche con difetti lineari). Per questi reticoli sono state misurate le bande fotoniche sia dei sistemi periodici, sia delle strutture con difetti [3,9,16]. I risultati sono in ottimo accordo con la teoria delle bande fotoniche in guida d'onda (v. parte teorica).

I cristalli fotonici con struttura della Yablonovite, prodotti a Trieste-TASC, sono stati realizzati sia in matrice polimerica (PMMA) che metallica (Nickel). Sui campioni di PMMA le misure hanno evidenziato la presenza di un gap fotonico nella direzione perpendicolare alla superficie, corrispondente alla direzione [111] del reticolo fcc. Sui campioni metallici, le misure danno evidenza di strutture spettrali con una ben definita dispersione angolare, associabili sia a bande fotoniche che a modi plasmonici di superficie del Nickel [4].

I cristalli fotonici con struttura ad opale sono stati realizzati a Torino e consistono di opali diretti (sfere di silice o di polistirene), opali infiltrati con Silicio, e opali inversi in cui è stato rimosso il template di silice. Le misure di riflettanza hanno dato evidenza della presenza del gap fotonico fondamentale nella direzione [111]. Negli opali diretti il gap si sposta verso le alte frequenze al crescere dell'angolo di incidenza; invece negli opali infiltrati e inversi il gap non ha dispersione angolare, in accordo con la teoria e a causa dell'alto contrasto dell'indice di rifrazione fra i materiali costituenti la struttura [19]. Inoltre le misure hanno evidenziato effetti di diffrazione da modi fotonici.

1c) La riflettanza ad angolo variabile è stata estesa alla misura dei modi sotto alla linea di luce per mezzo di un prisma: si tratta quindi di riflettività totale attenuata (ATR). Il fascio incidente sullo ZnSe diventa un'onda evanescente nello strato di aria fra lo ZnSe ed il campione, permettendo quindi di eccitare i modi guidati della guida d'onda fotonica di SOI. Per mezzo di questa tecnica è stato possibile misurare il gap fotonico del primo ordine di reticoli 1D, che non era accessibile a misure precedenti nella regione radiativa. Inoltre la tecnica è stata applicata a guide d'onda contenenti difetti lineari di tipo W1 (una linea di fori mancanti nella direzione Gamma-K del reticolo triangolare), ripetuti con periodicità nella direzione Gamma-M. Le misure nella direzione della supercella permettono di distinguere i modi di difetto (localizzati e quindi privi di dispersione) da quelli ripiegati del reticolo periodico (che sono invece dispersivi). Le misure nella direzione del difetto lineare forniscono la dispersione dei modi di difetto e anche la velocità di gruppo [9].

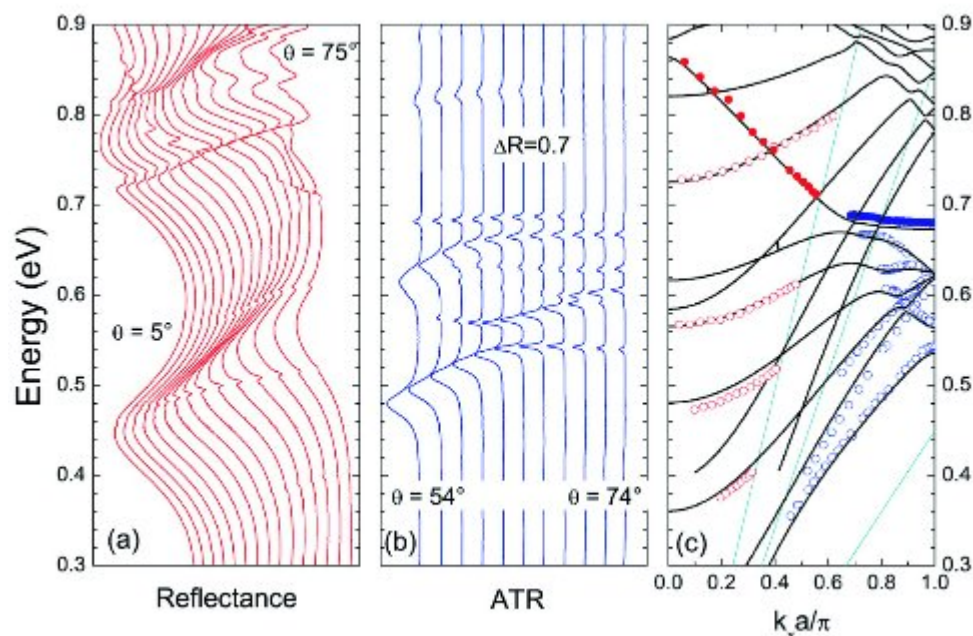


Fig. 1 – (a) Riflettanza e (b) ATR su una guida d'onda fotonica di SOI con difetto lineare W1, nella direzione Gamma-K e per polarizzazione TE. (c) Dispersione dei modi fotonici: teoria (linee continue) e esperimento (punti). I modi di difetto sono indicati da punti pieni.

1d) Sono state completate le misure interferometriche e la relativa analisi di dispersione delle bande fotoniche e della velocità di gruppo in riflettori di Bragg Si/SiO₂ (ossia cristalli fotonici 1D) prodotti a Trento [8]. La misura utilizza un interferometro di Mach-Zehnder in luce bianca (range spettrale da 5 a 0.3 micron) che permette di determinare lo sfasamento dell'onda e.m. attraverso il

campione. I risultati mostrano che la dispersione delle bande fotoniche nella direzione del multistrato tende a quella del sistema periodico all'aumentare del numero di periodi. Inoltre la velocità di gruppo mostra un forte rallentamento in corrispondenza delle risonanze di band-edge e diventa superluminale all'interno del gap fotonico. I risultati sono in accordo completo con la teoria elettromagnetica. Misure analoghe sono state effettuate su riflettori di Bragg di a-Si(1-x)N(x):H prodotti a Torino e su multistrati e microcavità di silicio poroso prodotti a Trento. La tecnica interferometrica è stata applicata alla misura assoluta dell'indice di rifrazione di materiali trasparenti [1] ed è oggetto di brevetto.

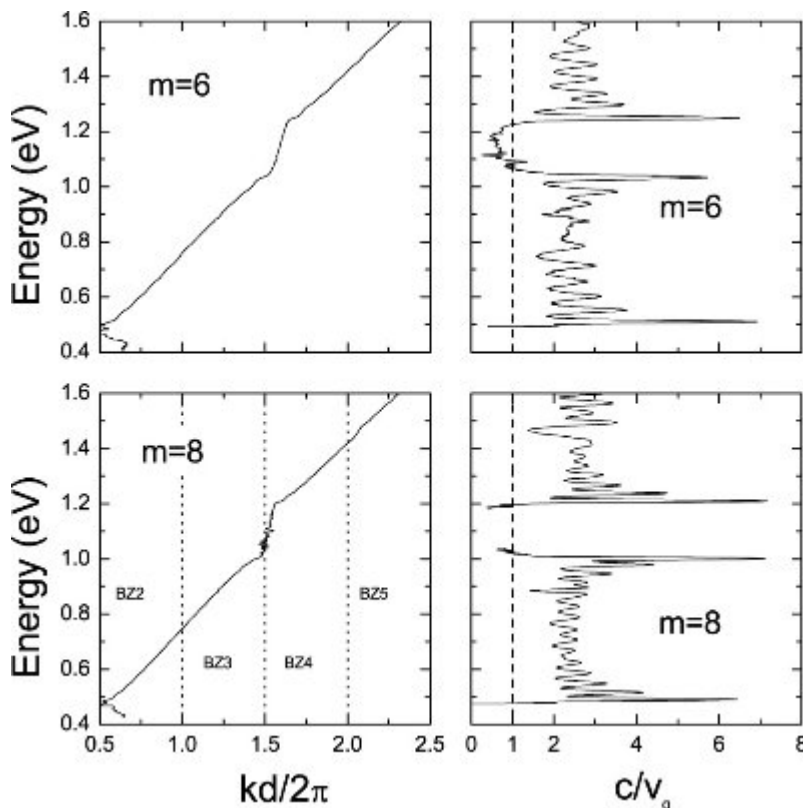


Fig. 2 – Dispersione delle bande fotoniche e reciproco della velocità di gruppo misurate in multistrati SiSiO₂ con m=6 e 8 periodi.

È stata perfezionata una seconda versione dell'interferometro di Mach-Zehnder, che opera su piccole aree (100 micron di diametro). Questo nuovo strumento è estremamente utile sia per ridurre gli effetti di inhomogeneità, sia per misurare la dispersione delle bande fotoniche nel piano del silicio macroporoso. Utilizzando il micro-Mach Zehnder sono state effettuate misure di dispersione della fase e della velocità di gruppo su film di opali diretti. Le misure hanno mostrato effetti di rallentamento della luce in prossimità del band edge, velocità superluminali all'interno del gap, e fenomeni sorprendenti legati alla diffrazione per frequenze più alte. L'analisi è tuttora in corso.

1e) È stato sviluppato un set-up in luce bianca per la misura della trasmissione in guida d'onda, consistente in una lampada alogena come sorgente, obiettivi di microscopio per la focalizzazione sul lato della guida e la raccolta del segnale trasmesso, nano-posizionatori manuali, e analisi mediante uno spettrometro a trasformata di Fourier. Sono state effettuate misure su guide d'onda a rib di Si₃N₄/SiO₂ prodotte a Trento: i risultati hanno evidenziato la presenza di perdite radiative nel substrato di Silicio alle basse frequenze e perdite dovute a scattering di tipo Rayleigh da rugosità di superficie alle alte frequenze [17]. Inoltre sono state effettuate misure preliminari nel piano delle guide d'onda di SOI, che hanno dato evidenza dei gap fotonici nelle direzioni Gamma-K e Gamma-M.

1f) Nell'ambito degli studi ottici nonlineari su cristalli fotonici a base di Silicio, si è constatato che la tecnica di più facile applicazione consiste nella misura della generazione di terza armonica (THG). Mentre la generazione di seconda armonica (SHG) è proibita nel silicio bulk in approssimazione di dipolo e può verificarsi solo alla superficie del materiale dando origine ad effetti molto piccoli, la THG è permessa e facilmente osservabile. A tale scopo si è utilizzata la sorgente laser Ti:zaffiro a 800 nm, con oscillatore parametrico accordabile nel range 1.4-1.6 micron, disponibile presso l'unità INFM di Pavia al Dipartimento di Elettronica.

Sono state effettuate misure su guide d'onda di SOI con reticolo fotonico 1D. Gli esperimenti a 800 nm hanno permesso di misurare i fasci di terza armonica generati in diffrazione nelle direzioni permesse dalla condizione cinematica $k(3\omega) = 3k(\omega) + G$, dove G è un vettore del reticolo reciproco. Le misure in riflessione nel vicino infrarosso con l'oscillatore parametrico hanno mostrato effetti di risonanza quando la frequenza ed il vettore d'onda parallelo del fascio incidente si accordano su quelli di un modo fotonico della guida patternata. L'aumento della terza armonica generata raggiunge fattori dell'ordine di 10^3 rispetto ai valori della guida non patternata [20]. I fattori di aumento sono confrontabili o migliori di quelli ottenuti su guide d'onda fotoniche di semiconduttori III-V.

2) STUDIO TEORICO DELLE BANDE FOTONICHE E DELLE PROPRIETÀ OTTICHE

2a) Sono state calcolate le bande fotoniche di sistemi 2D, 2D in guida d'onda e 3D mediante sviluppo in onde piane e su base finita. Per i sistemi 3D quali riflettori di Bragg patternati, Yablonovite, opali diretti e inversi, i risultati hanno contribuito all'interpretazione degli esperimenti ottici effettuati a Pavia e hanno costituito una guida per il design di ulteriori campioni. Per la struttura della Yablonovite, sono state calcolate le mappe dei gap della Yablonovite diretta e inversa per diversi valori della costante dielettrica e sono stati calcolati i modi di difetto lineare associati a canali mancanti (pieni) lungo le 6 direzioni [110]. Per quanto riguarda gli opali, è stata calcolata la densità degli stati corrispondente a un valore assegnato dell'angolo di incidenza rispetto alla normale [111] alla superficie. Questa densità degli stati "ridotta" evidenzia la regione di frequenza del gap fondamentale e mostra delle strutture spettrali in corrispondenza all'eccitazione di modi fotonici ad alta frequenza, ossia ad effetti di diffrazione in direzioni diverse da quella di riflessione speculare [18].

Per le guide d'onda fotoniche si è utilizzato un metodo originale, chiamato "Guided Mode Expansion" (GME), che consiste nel sviluppare il 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. Il metodo, che permette di determinare sia i modi fotonici veramente guidati che quelli radiativi sopra alla linea di luce, è stato esteso al calcolo delle perdite dei modi radiativi utilizzando la teoria delle perturbazioni: i modi che cadono sopra alla linea di luce del materiale di cladding sono accoppiati ai modi "leaky" della guida d'onda efficace dalle componenti fuori diagonale del tensore dielettrico, ed hanno quindi una larghezza radiativa che si ottiene mediante la regola d'oro di Fermi nella formulazione elettromagnetica [2,3]. È stato effettuato uno studio dettagliato delle mappe dei gap e delle perdite radiative per reticoli 1D in membrane di Silicio e guide d'onda di SOI [11] e dei modi di cavità 1D [14]. Il metodo GME è stato utilizzato per calcolare le bande fotoniche e le larghezze di riga per le guide d'onda fotoniche misurate a Pavia, con risultati in ottimo accordo per tutti i sistemi studiati.

2b) Sono stati calcolati i modi associati a difetti lineare, principalmente guide d'onda di tipo W1 nel reticolo triangolare, ripetuti con la periodicità di una supercella. I calcoli sono in ottimo accordo con le misure di riflettanza e ATR [9]. Sono state calcolate le perdite di propagazione dei modi di difetto al di sopra della linea di luce, che sono dell'ordine di 10-100 dB/mm per guide fotoniche in membrane di Silicio [2], in accordo con esperimenti effettuati al Caltech e da altri gruppi. Le perdite di propagazione esse aumentano con la frazione d'aria nel reticolo triangolare e diminuiscono all'aumentare dello spessore del core oppure della larghezza di canale.

Sono stati calcolati i modi fotonici in nano-cavità puntuali costituite da uno o più fori mancanti nel reticolo triangolare, anche con spostamento oppure con riduzione del raggio dei buchi adiacenti alla regione di cavità [7]. È stato determinato il fattore Q dei modi di cavità. I risultati per cavità di tipo L3 (tre fori mancanti nella direzione Gamma-K) sono in buon accordo con recenti esperimenti condotti all'università di Kyoto, e mostrano che il fattore Q ha un massimo dell'ordine di 150'000 in funzione dello spostamento o del restringimento dei buchi adiacenti.

2c) 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. Il modello consiste nell'assumere una variazione casuale del raggio dei buchi, descritta da una distribuzione Gaussiana. La modifica del tensore dielettrico rispetto ai valori in assenza di disordine viene trattata in teoria delle perturbazioni e permette di ottenere la larghezza estrinseca e le perdite di propagazione. 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 dai gruppi IBM-Yorktown e NTT-Tokyo [12]. Per una parametro di disordine (deviazione standard del raggio) di 5 nm, le perdite sotto alla linea di luce per guide W1 in membrane di Silicio sono dell'ordine di 3 dB/mm, dipendono poco dalla frazione d'aria e diminuiscono all'aumentare dello spessore del core. Si è mostrato inoltre che le perdite possono ridursi a valori dell'ordine di 0.2 dB/mm usando guide con larghezza di canale aumentata [7] questi valori sono comparabili a quelli ottenuti in guide d'onda convenzionali ("Silicon wires") di Si/SiO₂.

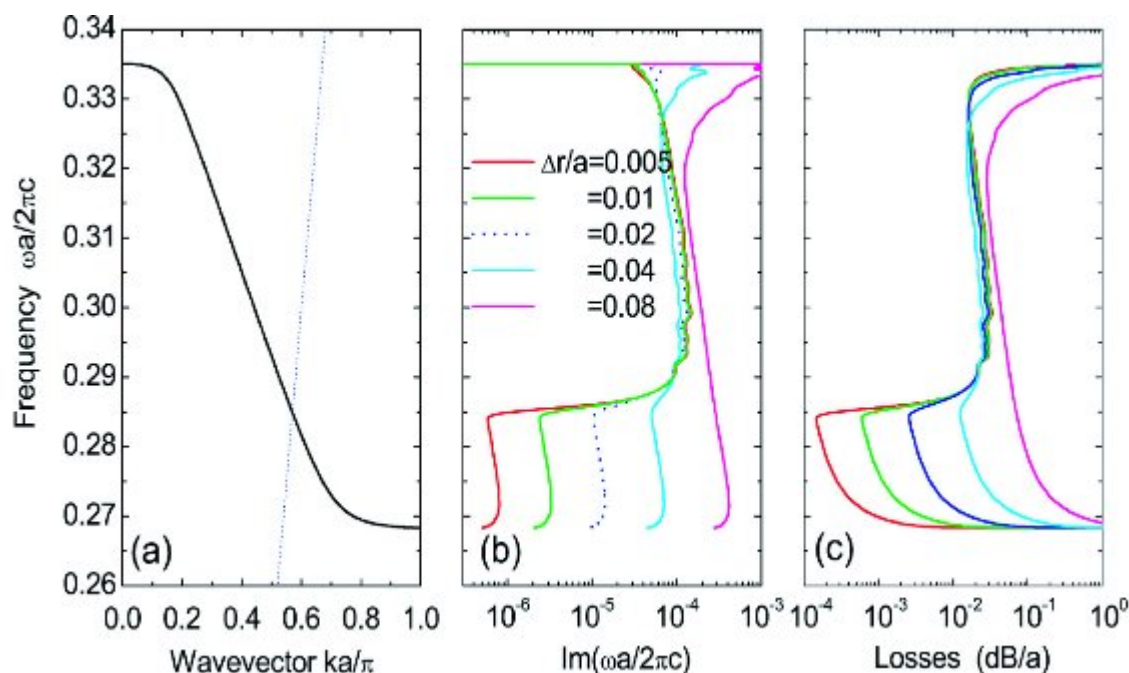


Fig. 3 – (a) Dispersion del modo di difetto, (b) parte immaginaria della frequenza e (c) perdite di propagazione calcolate per una guida W1 in membrana di Silicio, per diversi valori del parametro di disordine.

2d) È stata calcolata la riflettanza a vari angoli di incidenza per le guide d'onda fotoniche con il metodo della matrice di scattering. 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, separato dal campione da uno strato di aria di spessore assegnato. I risultati hanno costituito la base per l'interpretazione degli esperimenti di riflettanza ad angolo variabile (normale e attenuata) [9].

Il metodo della matrice di scattering è stato esteso al calcolo della riflettanza ad angolo variabile da opali. Poiché il metodo può essere applicato a strutture patternate costituite da strati omogenei nella direzione verticale (z), nel caso degli opali si è fatta l'approssimazione di rappresentare le sfere della struttura fcc con cilindri orientati lungo la direzione [111]. Le dimensioni dei cilindri sono state ottimizzate per rappresentare al meglio le bande fotoniche del cristallo. Per gli opali diretti, grazie al basso contrasto dielettrico fra silice ed aria, l'approssimazione è ottima e permette di calcolare gli spettri di riflettanza a vari angoli di incidenza con grande accuratezza e tempi di calcolo minimi. Per gli opali infiltrati e inversi, si ottengono risultati qualitativamente corretti ma migliorabili dal punto di vista quantitativo. Si è mostrato in particolare che la riflettanza mostra strutture spettrali in corrispondenza a effetti di diffrazione, ossia all'eccitazione di modi fotonici ad alta frequenza [19].

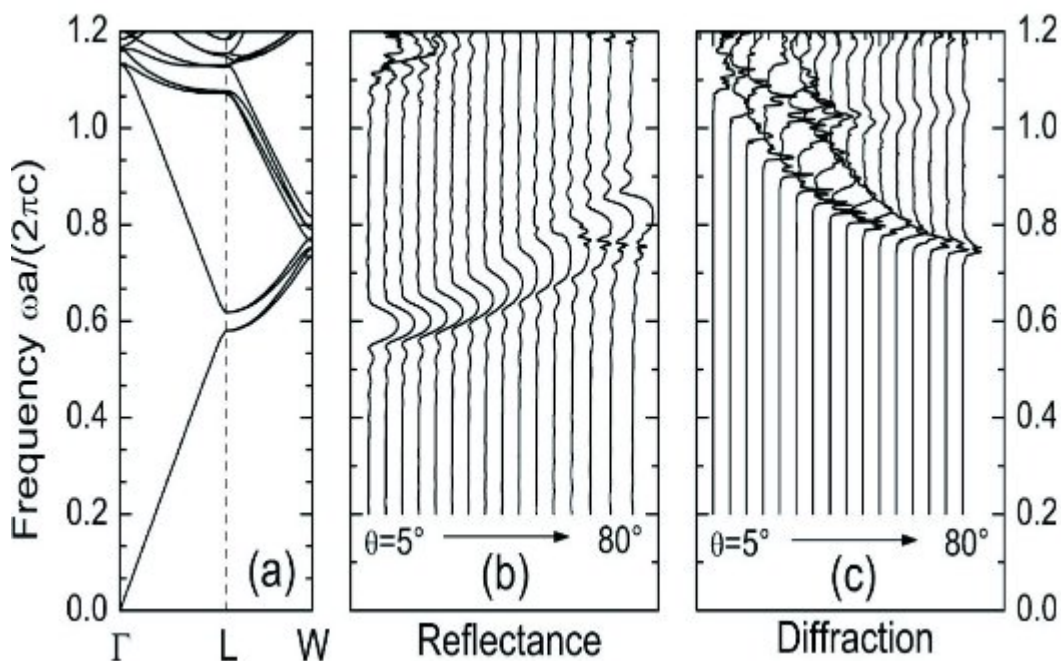


Fig. 4 – (a) Bande fotoniche, (b) spettri di riflettanza e (c) spettri di diffrazione a vari angoli di incidenza di un opale diretto di polistirene.

2e) 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. Sono stati studiati i 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 [10]. I risultati della teoria quantistica sono in ottimo accordo con quelli ottenuti da calcoli di riflettività con il metodo semi-classico della matrice di scattering. La formulazione quantistica dell'interazione radiazione-materia sarà applicata in seguito alla teoria dell'emissione spontanea.

2f) 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). I risultati hanno permesso di interpretare esperimenti su Silicio macroporoso, nei quali sono stati osservati effetti di emissione fortemente direzionale di fasci uscenti da guide d'onda lineari [13].

3) SVILUPPO DELLA LITOGRAFIA DI NANOIMPRINT

La litografia a nanoimprint è una tecnica basata non sull'utilizzo di resist sensibili a radiazione, ma sulla modificazione meccanica del resist mediante la compressione con uno stampo. In questo modo la risoluzione litografica non è limitata da scattering o da diffrazione, ma soltanto dallo stampo che si utilizza. La tecnica consiste nello sfruttare le proprietà termoplastiche e/o di fotosensibilità di alcuni layer plastici per ottenere una replica del pattern mediante pressione dello stampo sui polimeri stessi.

Partendo da questi presupposti sono state sviluppate due diverse tecniche: L'hot embossing che sfrutta le proprietà termoplastiche di alcuni polimeri come il PMMA e il TOPAS e il Soft UV imprint che invece è basato su polimeri plastici e fotosensibili. Nel caso dell'hot embossing si modifica un resist termoplastico premendo lo stampo sul resist con il sistema al di sopra della temperatura di transizione vetrosa. La replica del pattern diventa permanente riportando il sistema al di sotto della temperatura critica [5]. A questo scopo è stata acquisita una pressa con controllo digitale della temperatura e della pressione. Nel caso del Soft UV nanoimprint invece si utilizza la radiazione UV per rendere permanenti, mediante reticolazione, le deformazioni introdotte da uno stampo trasparente non rigido su un resist poco viscoso. In questo modo è stato possibile realizzare trasferimenti litografici su ampie superfici, fino a tre pollici di diametro [15].

Sono state realizzate sia maschere per la formazione degli etch pits per il Silicio macroporoso, sia cristalli fotonici mono e bidimensionali in guide d'onda di SOI, con e senza difetti lineari. Inoltre sono stati preparati cristalli fotonici 2D in guide d'onda di

SOI usando tecniche convenzionali di litografia elettronica e reactive-ion etching.

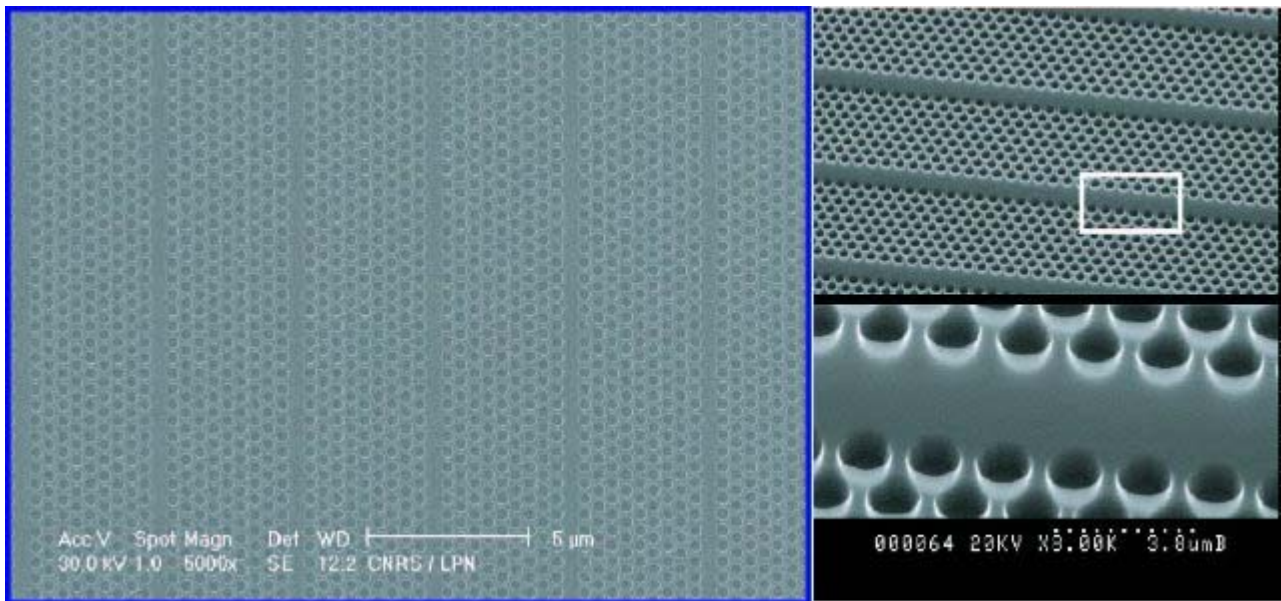


Fig. 5 – Guide d'onda di SOI con difetto lineare W1 preparate con litografia elettronica + RIE (sinistra) e con litografia di nanoimprint (destra).

Formazione di giovani ricercatori, collaborazioni internazionali

Diversi giovani ricercatori (dottorandi e post-doc) sono stati inseriti e hanno lavorato attivamente sulle tematiche del progetto. Tutti i giovani ricercatori hanno partecipato a scuole internazionali e hanno presentato i risultati del lavoro a congressi nazionali e internazionali.

La tesi di dottorato del dott. Michele Belotti si svolge in regime di co-tutela con il prof. Yong Chen del laboratorio LPN-CNRS di Marcoussis, Francia. Nell'ambito di questa collaborazione sono state prodotte le guide d'onda di SOI e sono stati ottenuti i risultati riguardanti la litografia di nano-imprint.

A partire dal 2004, il gruppo di Pavia partecipa al Network of Excellence "PHOREMOST" del VI Programma Quadro dell'UE ed inoltre alla rete di collaborazione Europea "COST P11".

PUBBLICAZIONI LEGATE AL PROGETTO

- [1] M. Galli, F. Marabelli, G. Guizzetti: Direct measurement of refractive index dispersion of transparent media by white-light interferometry, *Appl. Optics* 42, 3910 (2003).
- [2] L.C. Andreani and M. Agio: Intrinsic diffraction losses in photonic crystal waveguides with line defects, *Appl. Phys. Lett.* 82, 2011 (2003).
- [3] L.C. Andreani, M. Agio, D. Bajoni, M. Belotti, M. Galli, G. Guizzetti, A.M. Malvezzi, F. Marabelli, M. Patrini, G. Vecchi: Optical properties and mode dispersion in two-dimensional and waveguide-embedded photonic crystals, *Synthetic Metals* 139, 695 (2003).
- [4] F. Romanato, L. Businaro, L. Vaccari, S. Cabrini, P. Candeloro, M. De Vittorio, A. Passaseo, M.T. Todaro, R. Cingolani, E. Cattaruzza, M. Galli, C. Andreani, E. Di Fabrizio: Fabrication of 3D metallic photonic crystals by X-ray lithography, *Microelectron. Eng.* 67-68, 479 (2003).
- [5] M. Belotti, M. Galli, D. Bajoni, L.C. Andreani, G. Guizzetti, D. Decanini, Y. Chen, "Comparison of SOI photonic crystals fabricated by both electron-beam lithography and nanoimprint lithography", *Microelectron. Eng.* 73-74C, 405 (2003).
- [6] C. Jamois, R.B. Wehrspohn, L.C. Andreani, C. Hermann, O. Hess, U. Gösele: Silicon-based two-dimensional photonic crystal waveguides, *Photon. Nanostr.* 1, 1 (2003).
- [7] L.C. Andreani, D. Gerace, M. Agio: Gap maps, diffraction losses and exciton-polaritons in photonic crystal slabs, *Photon. Nanostr.* 2, 103 (2004)
- [8] M. Galli, D. Bajoni, F. Marabelli, L.C. Andreani, L. Pavesi, G. Pucker: Photonic bands and group-velocity dispersion in Si/SiO₂ photonic crystals from white-light Interferometry, *Phys. Rev. B* 69, 115107 (2004).
- [9] M. Galli, M. Belotti, D. Bajoni, M. Patrini, G. Guizzetti, D. Gerace, M. Agio, L.C. Andreani, Y. Chen: Excitation of radiative and evanescent defect modes in linear photonic crystal waveguides, *Phys. Rev. B* 70, 081307(R) (2004)
- [10] D. Gerace, M. Agio and L.C. Andreani: Quantum theory of photonic crystal polaritons, *Phys. Stat. Solidi (c)* 1, 446 (2004).
- [11] D. Gerace, L.C. Andreani: Gap maps and intrinsic diffraction losses in one-dimensional photonic crystal slabs, *Phys. Rev. E* 69, 056603 (2004)
- [12] D. Gerace, L.C. Andreani: Disorder-induced losses in photonic crystal waveguides with line defects, *Opt. Lett.* 29, 1897 (2004)
- [13] P. Kramper, M. Agio, C.M. Soukoulis, A. Birner, F. Mueller, R. Wehrspohn, U. Goesele, and V. Sandoghdar, Highly directional emission from photonic crystal waveguides of subwavelength width, *Phys. Rev. Lett.* 92, 113903 (2004).

PUBBLICAZIONI IN STAMPA O IN PREPARAZIONE

- [14] D. Gerace, M. Agio, L.C. Andreani, Ph. Lalanne: "Cavity modes in one-dimensional photonic crystal slabs", *Opt. Quantum Electron.*, in press.
- [15] E. Roy, Y. Kanamori, M. Belotti, Y. Chen, "Soft UV nanoimprint lithography for large area pattern replication", *Microelectron. Eng.*, in press
- [16] M. Galli, D. Bajoni, M. Belotti, F. Paleari, M. Patrini, G. Guizzetti, D. Gerace, M. Agio, L.C. Andreani, D. Peyrade and Y.Chen: Measurement of photonic mode dispersion and linewidths in Silicon-On-Insulator photonic crystal slabs, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, in press.
- [17] D. Bajoni, M. Galli, L.C. Andreani, N. Daldosso, L. Pavesi, G. Pucker, A. Lui: Wide-band transmission spectroscopy of Silicon Nitride waveguides, submitted to *Electron. Lett.*
- [18] E. Pavarini, L.C. Andreani, C. Soci, M. Galli, F. Marabelli, D. Comoretto: Band structure and optical properties of opal photonic crystals, *Phys. Rev. B*, submitted.
- [19] M. Galli, D. Bajoni, A. Balestreri, L.C. Andreani, L. Pallavidino, F. Giorgis, C. Ricciardi, F. Geobaldo: Gap formation and diffraction phenomena in optical spectra of direct and infiltrated opals, in preparation
- [20] G. Vecchi, C. Comaschi, M. Patrini, A.M. Malvezzi, G. Guizzetti, M. Liscidini, L.C. Andreani, D. Peyrade, Y. Chen: "Third-harmonic generation study of Silicon-on-Insulator photonic crystal slabs", in preparation

Per aggiornamenti sulle pubblicazioni, vedi il sito web <http://fisicavolta.unipv.it/Cofin2004/fotonici.htm>

9. Pubblicazioni del responsabile

n°	Pubblicazione
1.	D. GERACE; ANDREANI L.C. (2004). Disorder-induced losses in photonic crystal waveguides with line defects <i>OPTICS LETTERS</i> vol. 29 pp. 1897-1899 ISSN: 0146-9592
2.	ANDREANI L.C.; M. AGIO (2003). Intrinsic diffraction losses in photonic crystal waveguides with line defects <i>APPLIED PHYSICS LETTERS</i> vol. 82 pp. 2011-2013 ISSN: 0003-6951

dei partecipanti

- M. Galli, D. Bajoni, F. Marabelli, L.C. Andreani, L. Pavesi, G. Pucker; 2004; Photonic bands and group-velocity dispersion in Si/SiO₂ photonic crystals from white-light Interferometry; Rivista: *Physical Review B*; Volume: 69; pp.: 115107(7)
- M. Galli, M. Belotti, D. Bajoni, M. Patrini, G. Guizzetti, D. Gerace, M. Agio, L.C. Andreani, Y. Chen; 2004; Excitation of radiative and evanescent defect modes in linear photonic crystal waveguides; Rivista: *Physical Review B*; Volume: 70; pp.: 081307(4) (R)

10. Prodotti della Ricerca eseguita

1) Sviluppo o estensione di strumentazione:

1a) Interferometro di Mach-Zehnder in luce bianca nel range 0.3-5 micron per misure di fase. Lo strumento utilizza una sorgente di luce bianca che viene divisa da un beam-splitter in un fascio di riferimento e uno di prova che attraversa il campione. I due fasci vengono ricombinati attraverso un secondo beam-splitter ed inviati allo spettrometro. Nel corso di questo progetto è stata perfezionata in particolare la versione dell'interferometro che opera su piccole aree (diametro spot 100 micron).

1b) Micro-riflettometro per riflettanza ad angolo variabile nel range spettrale 0.2-4 micron su aree di 100 micron x 100 micron, con estensione per riflettanza totale attenuata. Si tratta di un riflettometro θ - 2θ . Lo strumento utilizza ottiche con specchi parabolici in modo coprire un range spettrale ampio evitando effetti di aberrazione cromatica. L'estensione per ATR fa uso di una semisfera di materiale dielettrico ad alto indice di rifrazione (attualmente ZnSe), tenuto ad una distanza controllata rispetto al campione per mezzo di tre posizionatori piezo-elettrici.

1c) Sistema per la misura della trasmissione nel piano delle guide d'onda fotoniche nel range spettrale 1.7-0.4 micron, consistente di una sorgente di luce bianca, obiettivi di microscopio per la focalizzazione della luce sul lato del campione e la raccolta della luce trasmessa, nano-posizionatori manuali per la movimentazione del campione e degli obiettivi, camera vidicon nell'infrarosso per la visualizzazione del campione e della luce trasmessa.

Tutti questi strumenti vanno accoppiati allo spettrometro Bruker a trasformata di Fourier.

2) Brevetti:

È stato depositato il brevetto italiano dal titolo "Metodo per la determinazione dell'indice di rifrazione mediante interferometria a luce bianca", autori M. Galli e F. Marabelli. Numero brevetto: MI2003A000763 dell'11/04/2004, di proprietà dell'Università degli Studi di Pavia.

Il metodo di misura si basa sull'utilizzo dell'interferometro di Mach-Zehnder accoppiato allo spettrometro a trasformata di Fourier, che determina la fase attraverso il campione e quindi il vettore d'onda ad ogni frequenza. Per determinare la fase assoluta, si ruota il campione rispetto alla direzione del fascio luminoso di prova e si effettuano misure diverse ad angoli noti: questo determina una variazione nel cammino ottico di prova e quindi nello sfasamento relativo al fascio di riferimento. La differenza di fase, che è facilmente misurabile, fornisce una accurata ed univoca determinazione sia dell'indice di rifrazione che dello spessore del

campione.

3) Pubblicazioni: sulle tematiche del progetto, 13 lavori pubblicati su riviste internazionali con referee nel biennio 2003-2004 e altre 7 in corso di pubblicazione o di preparazione

4) Presentazioni a congressi: circa 33 presentazioni a congressi, di cui 4 invited talks. Menzioniamo i congressi principali: CLEO (Munich), LEOS (Vancouver), PECS (Kyoto), SPIE Photonics (Strasbourg e Beijing), MRS (San Francisco), ICTON-ESPC (Varsavia), Electrochemical Society Meeting (Honolulu), NOEKS (Karlsruhe), Optical Probes (Venezia), OECS (Lecce), LPHYS (Trieste).

Inoltre vi sono state varie partecipazioni a scuole internazionali, fra cui quelle di nanofotonica tenute a Les Houches e a Cargèse.

11. Componenti dell'Unità di ricerca che hanno effettivamente partecipato alla ricerca

Personale docente

n°	Cognome	Nome	Qualifica	Facoltà	Dipartimento/Istituto Università	mesi uomo dal modello		mesi uomo effettiv. impegnati		Nota
						I anno	II anno	I anno	II anno	
1.	ANDREANI	Lucio	Prof. Associato	Facoltà di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	Dip. FISICA Univ. PAVIA	8	6	8	6	
2.	GUIZZETTI	Giorgio	Prof. Ordinario	Facoltà di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	Dip. FISICA Univ. PAVIA	4	4	4	4	
3.	PATRINI	Maddalena	Ricercatore	Facoltà di FARMACIA	Dip. FISICA Univ. PAVIA	4	4	4	4	

altro personale

n°	Cognome	Nome	Qualifica	Facoltà	Dipartimento/Istituto Università/Ente	mesi uomo effettiv. impegnati		Nota
						I anno	II anno	
1.	Galli	Matteo	ricercatore		INFN - Istituto Nazionale per la Fisica della Materia	9	9	
2.	Pavarini	Eva	ricercatrice		INFN - Istituto Nazionale per la Fisica della Materia	3	3	
3.	Bajoni	Daniele	dottorando		dip. FISICA	4		
4.	Gerace	Dario	dottorando		dip. FISICA	6	4	
5.	Vecchi	Gabriele	dottorando		dip. FISICA	4	4	
6.	Belotti	Michele	dottorando		dip. FISICA	6	6	

personale a contratto

n°	Cognome	Nome	Qualifica	Tipologia di contratto	Inizio del contratto	Durata del contratto in mesi	Costo in Euro	mesi uomo		Nota
								I anno	II anno	
1.	Agio	Mario	dottore di ricerca	assegno di ricerca + prestazione occasionale	01/07/2003	18	10.493	8	10	assegno cofinanziato
2.	Bajoni	Daniele	dottore di ricerca	prestazione occasionale + borsa di studio	01/11/2003	14	16.460	2	12	
3.	Gerace	Dario	dottore di ricerca	prestazione occasionale	01/11/2004	2	2.430		2	
4.	Saggiani	Anna	laureanda	prestazione occasionale	01/06/2003	6	2.880	6		tesi di laurea a TASC-Trieste
5.	Lalanne	Philippe	ospite	prestazione occasionale	16/01/2003	1	285	1		seminario
6.	Torres	Jeremi	ospite	prestazione occasionale	09/06/2003	1	656	1		seminario
TOTALE							33.204			

12. Note relative ai componenti (punto 11)

Il dott. Matteo Galli ha usufruito prima di un assegno di ricerca universitario, poi di un posto di ricercatore INFM a tempo determinato cofinanziati su altri progetti. Si è occupato di tutti gli esperimenti di ottica lineare e dello sviluppo della relativa strumentazione: interferometria, micro-riflettanza ad angolo variabile, trasmissione in guida d'onda.

La dott.ssa Eva Pavarini ha usufruito di un posto di ricercatore INFM a tempo determinato cofinanziato su altri progetti. Si è occupata del calcolo delle bande fotoniche, delle densità degli stati e dei modi di difetto nei cristalli fotonici tridimensionali, ossia opali e Yablonovite.

Il dott. Mario Agio ha usufruito prima di una borsa di studio INFM, poi di un assegno di ricerca universitario e di un contratto di 6 mesi, cofinanziati sui fondi del progetto. Si è occupato della teoria dei cristalli fotonici bidimensionali e in guida d'onda con i metodi della matrice di scattering e del finite-difference time-domain.

Il dott. Daniele Bajoni ha terminato il triennio di dottorato di ricerca il 31/10/2003. Successivamente gli sono stati assegnati prima un contratto di due mesi, poi una borsa di studio di 12 mesi sui fondi del progetto. Si è occupato degli esperimenti di ottica lineare: riflettanza ad angolo variabile e trasmissione in guida d'onda, con sviluppo della relativa strumentazione.

Il dott. Dario Gerace ha terminato il triennio di dottorato di ricerca il 31/10/2004. Successivamente gli è stato assegnato un contratto di due mesi sui fondi del progetto. Si è occupato della teoria dei cristalli fotonici in guida d'onda: bande fotoniche, modi di difetto e perdite di propagazione.

La studentessa Anna Saggiani ha usufruito di un incarico di sei mesi dal 1/11/2003, allo scopo di svolgere la tesi di laurea presso il laboratorio TASC-Elettra di Trieste (partner del progetto associato all'unità di Torino). L'argomento della tesi di laurea è stata la fabbricazione di templati polimerici e metallici di Yablonovite mediante litografia X profonda e infiltrazione elettrolitica.

Ai dott. Philippe Lalanne e Jeremi Torres, ospiti nell'ambito di visite brevi su tematiche del progetto, è stato assegnato un incarico di prestazione professionale per seminario tenuto al Dipartimento di Fisica "A. Volta".

13. Risorse umane complessivamente ed effettivamente impegnate

	(mesi uomo)		
	I anno	II anno	TOTALE
da personale universitario	16	14	30
altro personale	32	26	58
personale a contratto	18	24	42

14. Dati complessivi relativi al programma

	(numero)
partecipazioni a convegni:	
in Italia	12
all'estero	21
articoli pertinenti pubblicati:	
su riviste italiane con referee	
su riviste straniere con referee	13
su altre riviste italiane	
su altre riviste straniere	
comunicazioni a convegni/congressi internazionali	21
comunicazioni a convegni/congressi nazionali	12
rapporti interni	
brevetti depositati	1

Tabella riassuntiva sulla ripartizione delle spese

Voce di spesa	Spese indicate nella rideterminazione di base	Spese rimodulate
Materiale inventariabile	62.000	59.532
Grandi Attrezzature	0	0
Materiale di consumo	20.000	23.624

Spese per calcolo ed elaborazione dati	1.000	1.019
personale a contratto	32.000	33.163
Servizi esterni	5.000	4.545
Missioni	7.000	7.007
Pubblicazioni	3.000	1.804
Partecipazione / Organizzazione convegni	12.000	11.306
Altro	0	0
TOTALE	142.000	142.000

15. Tabella delle spese sostenute

Voce di spesa	Spese rimodulate	Pagato		Residuo da saldare (già fatturato)	Impegnato * limitatamente a Pubblicazioni, Convegni e Congressi per presentazione dei risultati finali della ricerca	Totale spese sostenute	Descrizione (elementi contabili a giustificazione) (max 2000 Car. per ogni voce)
		I anno	II anno				
Materiale inventariabile	59.532	37.900	21.470			59.370	Wiley rivista, 64985 del 20/01/03, €257.76 IBM Italia PC portatile, S01088 del 30/4/03, €1'581.05 Micro Controle traslatore, 92801 del 23/4/03, €769.20 Sigma monitor, 807 del 28/04/03, €396.00 Hellma Italia coppia piatti riscaldanti, 416 del 28/05/03, €3'240.00 Servo tecnica motori stepper, 1883 del 09/05/03, €624.00 Al Ticino poltroncine, 152 del 24/04/03, €720.00 Micro Controle traslatore, 92902 del 30/06/03, €914.40 Micro Controle banco ottico, 92996 del 25/09/03, €9'655.32 Rapitron telecamera, 286 del 10/07/03, €858.02 Thorlabs traslatore, 450173 del 17/07/03, €638.56 Thorlabs adattatori, 451237 del 04/09/03, €244.48 Edmund telecamere 4032554 del 25/08/03, €3469.75 Sigma PC 1366 del 30/07/03, € 1181.28 Amazon libro, 634 del 27/10/03, €174.35 Creative Software, 764 del 03/12/03, €1'878.00 Hamamatsu Photonics videocamera, 77 del 31/01/03, €12'048.38 Rapitron telecamera, 55 del 05/02/03, €769.2 Micro Controle breadbord, 921701 del

							<p>12/02/03, €1603.2 Amazon libri, 734 del 01/12/03, €359.52 Wiley rivista, 1840159 del 04/11/03, €271.00 Laserpoint tubi laser, 296 del 26/11/03, €1'140.00 Elma EMC PC, 20 del 18/02/04, €1074.86 Essedi PC, 462 del 27/02/04, €1079.28 Electro Optics semisphere, 50345 del 24/02/04, €537.32 Assitec mater. inform., 381 del 16/04/04, €127.50 Assitec scanner, 341 del 31/03/04, €112.5 Teoresi monitor, 366/S del 31/05/04, €577.2 Piezomechanic amplificatore, 35 del 17/05/04, €2'169 Open Systems stampante laser, 369 del 12/10/04, €2'019.60 Hamamatsu amplificatori, 516-NC15 del 30/09/02, €489.79 IBM PC portatile, S00427 del 12/02/03, €1'477.43 Essedi monitor, 1378 del 01/08/03, €420.00 Microcontrol laser, 45/04 del 02/12/04, €3'225.26 Wiley libro, mandato 844 del 25/11/04, €132.13 Thorlabs traslatori, 2039652 del 29/11/04, €3'134.4</p> <p>Gli acquisti superiori a €5'000 sono stati: Camera vidicon Hamamatsu nell'infrarosso (€ 12'048); banco ottico stabilizzato Micro Control per apparato interferometria e riflettanza (€ 9'655).</p>
Grandi Attrezzature	0					0	
Materiale di consumo	23.624	14.500	9.284			23.784	<p>Assitec lucidi e CD, 101- 159 del 6-21/2/03, €264.38 DCS toner, 50 del 18/02/03, €420.00 Multitecnic mat. cons., 21 del 27/01/03, €367.13 Università contributio spese manut. dip., 235 del 13/05/03, €213.19 Open Systems waste toner box, 130 del 08/04/03, €256.80 DB Electronics ottiche, 703 del 29/04/03, €423.60 UPS spese doganali Janos, 66746 del 22/05/03, €298.42 Thorlabs componenti ottici, 427420 del 24/04/03, €2067.34 Janos Technology</p>

						<p>specchi, 38675 del 21/05/03, €1168.00 Lambda Research lenti, 876898 del 12/06/03, €204.11 Hamamatsu fotodiodi, 1003 del 19/12/03, €588.54 Thorlabs mater. ottico, 439415 del 06/06/03, €813.08 Ealing fenditura, 2015336 del 27/06/03, €335.88 Edmund Scientific fibre ottiche, 4032014 del 11/07/03, €223.86 Thorlabs lenti, 450173 del 17/07/03, €464.39 Epson cartucce+riparazione, 630 del 03/09/03, €311.28 Thorlabs montaggi per ottica, 451209-345-237 del 04/09/03, €1342.87 Hamamatsu InGaAs photodiode, 280 del 31/03/03, €173.24 Micro Controlo motaggi per ottica, 927225 del 26/02/03, €504.00 RS Components mater. elettrico, 91720 del 15/10/03, €266.50 Intern. Scient. Products mater. laboratorio, 49725 del 14/11/03, €278.54 Assitec cartucce e lucidi, 977 del 05/12/03, €227.56 Essedi mater. informatico, 1608,2172 del 03/12/03, €282.60 RS Components mater. elettrico, 963 del 09/01/04, €156.24 Barze mater. ferramenta, 14 del 31/01/04, €239.89 RS Components mater. elettrico, 12872 del 12/02/04, €223.07 Thorlabs mater. ottico, 2032987 del 04/03/04, €1'060.62 Open Systems kit colori per stampante, 369 del 12/10/04, €480.00 Laser Optronics silicon window, 1416 del 10/12/03, €666.57 DB tube, 564 del 04/03/03, €725.90 Thorlabs mater. ottico, 2039652 del 29/11/04, €2'526.30 Thorlabs mater. ottico, 2034806 del 19/05/04, €3'121.87 Distrelec Italia mater. elettrico, 1537948 del 27/04/04, €190.86</p> <p>Piccole spese inferiori a €150 (cancelleria, telefoni, ferramenta ecc) non sono elencate per brevità.</p>
--	--	--	--	--	--	--

Spese per calcolo ed elaborazione dati	1.019	0	1.019		1.019	Media Direct licenze McAfee, 10426 del 16/03/04, €178.60 The Mathworks software, 624 del 16/07/04, €840
personale a contratto	33.163	21.200	12.004		33.204	Mario Agio prestazione occasionale + IRAP e INPS, mandati 888-889-890-891-892 del 03/12/04, €7'242.54 Mario Agio cofinanziamento assegno di ricerca, mandato 212 del 15/04/03, €3'250.00 Daniele Bajoni borsa di studio spettroscopia cristalli fotonici, mandato 40 del 30/01/04, €14'105.00 Daniele Bajoni contratto + IRAP, mandati 233 e 234 del 06/05/04, €2'354.45 Dario Gerace prestazione professionale + IRAP + bollo, mandati 882-883-845 del 02/12/2004 e 25/11/2004, 2'429.88 Anna Saggiani collaborazione occasionale, mandato 159 del 09/05/03 e fattura del 06/10/03, €2'880.00 Hotel Rosengarden ospitalità prof. Lalanne, 23 del 16/01/03, €68.00 Philippe Lalanne seminario + IRAP, 175 e 176 del 04/04/03, 217.00 Jeremi Torres seminario + IRAP, 324 del 09/06/03, €271.25 Residenza Golgi I ospitalità prof. Torres, 237 del 16/06/03, €210.00 Residenze Golgi II ospitalità Torres, 21 del 15/01/04, €175.00
Servizi esterni	4.545	1.500	3.006		4.506	Bar Campus- coffee break per meeting Cofin, 10 del 19/02/03, €128.00 ISU pasti per meeting Cofin, 16 del 24/02/03, €218.40 DCS contratto assistenza a workstations, 45 del 13/02/03, €1'200.00 Majocchi trattamenti vuoto alluminatura substrati, 82 del 24/09/03, €300.00 Biblioteca Fisica fotocopie, 724 del 28/11/03, €200.00 Hotel Rosengarten ospitalità prof. Houdré, 108 del 19/02/03, €136.00 DCS contratto assistenza a workstation, 47 del 02/02/04, €576.00 Trabella biglietti da visita, 72 del 03/03/04, €127.20 Copyworld poster, 55 del 05/03/04, €154.40

							Copyworld poster, 100 del 16/04/04, €75.12 Open Systems garanzia stampante, 369 del 12/10/04, €876.00 CopyWorld poster, 36 del 09/06/04, €30.40 Spese telefoniche III-IV bimestre, 327 del 28/10/02, €449.77 Centro Copie poster, 14 del 28/06/03, €35.00
Missioni	7.007	4.200	2.807			7.007	Andreani missione Venezia, 76 del 07/03/03, €243.47 Galli missione Monaco, 510 del 08/09/03, €1'264.44 Gerace missione Lecce, 572 del 07/10/03, €464.03 Andreani missione Acireale, 574 del 07/10/03, €914.84 Andreani missione Bruxelles, 757 del 02/12/03, €402.32 Andreani missione Trieste, 121 del 08/03/04, €185.69 Gerace missione Trieste, 122 del 08/03/04, €156.19 Patrini missione Trieste, 123 del 08/03/04, €158.59 Patrini missione Bruxelles, 173 del 07/04/04, €278.92 Gerace missione Bruxelles, 174 del 07/04/04, €580.57 Andreani missione Cargèse (Corsica), 240 del 06/05/04, €296.56 Gerace missione Cargèse (Corsica), 384 del 02/07/04, €231.84 Andreani missione Trieste, 514 del 02/08/04, €540.62 Gerace missione St. Petersburg, 515 del 02/08/04, €1'288.83
Pubblicazioni	1.804	1.804	0			1.804	SIF reprints Scuola Varenna, 241 del 19/06/03, €666.12 AIP reprints, 102877 del 07/04/03, €400.84 Elsevier pubblicazioni, 3692856 del 11/11/03, €267.00 AIP reprints Galli Bajoni, 116035 del 14/05/04, €166.10 AIP reprint Vecchi, 114323 del 19/03/04, €348.48
Partecipazione / Organizzazione convegni	11.306	7.600	3.706			11.306	Andreani congresso NOEKS a Karlsruhe, 59-60-61 del 07/03/03, €1'145.10 Andreani congresso NoE a Firenze, 307 del 04/06/03, €367.16 Andreani congresso

							ICTON-ESPC, 374 del 09/07/03, €659.99 Patrini congresso CLEO Monaco, 500 del 08/09/03, €1'634.99 Andreani congresso PECS Kyoto, 177 del 07/04/04, €2'167.83 Patrini congresso EMRS Strasburgo, 239 del 06/05/04, €1'181.01 Andreani congresso SIF Brescia, 641 del 07/10/04, €109.46 Gerace congresso SIF Brescia, 660 del 07/10/04, €67.42 Guizzetti congresso Chem. Res. Soc. Honolulu, 746-747-748 del 04/11/04, €3'872.57 Guizzetti congresso Modena, 516 del 24/10/02, €100.75
Altro	0					0	
Impegnato * limitatamente a Pubblicazioni, Convegni e Congressi per presentazione dei risultati finali della ricerca							
TOTALE	142.000	88.704	53.296	0	0	142.000	

Descrizione dettagliata della cifra impegnata.

Voce di spesa	Impegnato	Estremi dell'impegno		Descrizione
		Data	Protocollo	
Pubblicazione dei risultati finali della ricerca				
Convegni e congressi per la presentazione dei risultati finali della ricerca				
TOTALE	0			

Per ogni cifra impegnata ci deve essere una descrizione di almeno 100 caratteri

Si ricorda che le cifre impegnate dovranno essere spese e rendicontate entro SETTEMBRE 2005

Totale spese sostenute

	(in Euro)
Totale finanziamento assegnato	142.000
Pagato	142.000
Residuo da saldare	0
Impegnato	0
Totale spese sostenute	142.000
Residuo	0

(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 17/01/2005 13:21

Firma

MINISTERO
DELL'ISTRUZIONE
DELL'UNIVERSITÀ
E DELLA RICERCA



Programmi di ricerca cofinanziati - Modello C
Rendiconto di unita' di ricerca - ANNO 2002
prot. 2002021127_004

1. Area Scientifico Disciplinare principale	02: Scienze fisiche
2. Coordinatore Scientifico del programma di ricerca	ANDREANI Lucio
- Università	Università degli Studi di PAVIA
- Facoltà	Facoltà' di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI
- Dipartimento/Istituto	Dip. FISICA
3. Titolo del programma di ricerca	Cristalli fotonici a base di Silicio: tecnologia, proprietà ottiche e teoria
<hr/>	
4. Responsabile Scientifico dell'Unità di Ricerca	COLOCCI Marcello
- Università	Università degli Studi di FIRENZE
- Facoltà	Facoltà' di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI
- Dipartimento/Istituto	Dip. FISICA
5. TITOLO del programma dell'unità di ricerca	Propagazione di onde di luce in strutture a cristalli fotonici
6. SETTORE principale dell'unità di ricerca:	FIS/03
7. Finanziamenti assegnati all'unità di ricerca:	
- Quota Ateneo	42.400 €
- Quota MIUR	98.900 €
- Finanziamento totale	141.300 €

8. Descrizione della Ricerca eseguita e dei risultati ottenuti

Scientific activity

The main tasks of the Florence team in this project were:

A. aspects of the sample preparation: sample infiltration with controllable liquids (switching of the photonic crystal) and local sources,

B sample characterization via coherent backscattering,

C study of the emission from internal sources and light transport (time-resolved transmission, Near-field optical microscopy, fluorescence spectroscopy).

A.

The Florence group has realized infiltration techniques to infiltration of both 2D and 3D photonic crystals with liquids and in particular liquid crystals. Infiltration was performed on 3D photonic crystal samples synthesized by the Torino group (opals) and 2D photonic crystals made by the Trento group (porous Silicon 2D photonic crystal slabs).

Excellent results have been obtained in both cases that lead to the discovery of new switching effects in 3D photonic crystals and to the development of a local infiltration technique in 2D photonic crystals that enables one to write photonic structures directly into a periodic array of holes.

The 3D photonic crystals of the Torino team are grown by an evaporation technique that introduces a tiny anisotropy in the sample structure. We managed to infiltrate these samples with liquid crystals (5CB, 7CB, E7) and found that this tiny anisotropy can be exploited to obtain a huge switching effect with an external electric field. Such strong switching of photonic crystals has not been reported in literature so far and is very promising for application as optical switches. This result will be published in the coming months in a joint publication with the Torino team (submission to Phys. Rev. Lett.).

In addition to the 3D global infiltration technique, an apparatus was designed and realized to perform local infiltration in 2D photonic crystals. The 2D Silicon samples of the Trento team were successfully infiltrated with this technique and a demonstration was given of how local waveguide structures can be written this way. This technique is expected to have a huge impact in the field of 2D photonic crystals since it allows to write, and if needed erase, any desired structure in a very simple way and extremely low cost. Local sources were successfully infiltrated. To that end laser dyes were compared to colloidal quantum dots as local sources. The synthesis of InAs nanocrystals was setup using the dehalosilylation reaction of InCl_3 and $\text{As}[\text{Si}(\text{CH}_3)_3]_3$ at temperatures ranging from 240 to 265 °C with TOP serving as capping agent.

It was found that commercially available laser dye was an efficient source and very promising for obtaining optical gain inside 2D photonic crystals after local infiltration. This opens up the road towards local resonators and laser action from defect modes in 2D photonic crystals. This result will be published in a joint publication with the Trento team in the coming months (submission to Nature).

B.

The Florence group has set up a system to perform coherent backscattering experiments with extremely high accuracy. This setup was designed, realized, and tested, with excellent results. An angular resolution of less than 20 micro radians was obtained. This setup was used to characterize the samples of the Torino and Trento groups and was used as feedback in the sample growing process. Coherent backscattering measurements on 2D samples were attempted but the available lateral sample size was too small to utilize the high angular resolution of the setup, so that no coherent backscattering in 2D could be detected. (The illuminated spot size limits the angular resolution via diffraction.)

Coherent backscattering measurements were performed on the liquid crystals used in the infiltration under point A. It was found that the coherent backscattering cone from the liquid crystal in the nematic phase was anisotropic which constitutes the first observation of anisotropic weak localization of light (Published PRL).

C.

A system to perform time-resolved measurements was designed and realized, using a Ti:Sapphire pumped parametric oscillator as laser source and an optical gating technique to perform the time-resolved measurements. A time-resolution of 200 femtoseconds was obtained. Time resolved measurements were also performed with an existing streak-camera setup. The results were used by the Torino team as feedback regarding the amount of disorder that is introduced in the sample growing process. Multiple scattering in direct and inverse opals was clearly observed and a small diffusion constant was measured.

The 2D photonic crystals of the Trento team were characterized by near-field scanning optical microscopy that was extended into the near-infrared range. In addition to what was foreseen in the project, also a confocal microscope was built that was combined with the near-field microscope. This way both optical techniques were available. Images were taken of the 2D photonic crystals using both techniques at the same time and on the same point on the sample surface.

Initial studies of the fluorescence of laser dyes were performed using the locally infiltrated samples of the Trento team as indicated under point A.

9. Pubblicazioni

del responsabile

n°	Pubblicazione
1.	EMILIANI V.; INTONTI F.; CAZAYOUS M.; COLOCCI M.; WIERSMA D.; ALIEV F.; LAGENDIJK A. (2003). Near-field short range correlation in optical waves transmitted through random media <i>PHYSICAL REVIEW LETTERS</i> vol. 90 pp. 250801 ISSN: 0031-9007
2.	DAL NEGRO L.; OTON C. J.; GABURRO Z.; PAVESI L.; JOHNSON P.; LAGENDIJK A.; RIGHINI R.; COLOCCI M.; WIERSMA D. S. (2003). Light transport through the band edge states of Fibonacci quasi crystals <i>PHYSICAL REVIEW LETTERS</i> vol. 90 pp. 055501 ISSN: 0031-9007

dei partecipanti

- R. Sapienza, P. Costantino, D.S. Wiersma, M. Ghulinyan, C. Oton, L. Pavesi; 2003; The Optical Analogue of Electronic Bloch Oscillations; Rivista: Physical Review Letters; Volume: 91; pp.: 263902
- R. Sapienza, S. Mujumdar, C. Cheung, A.G. Yodh, and D.S. Wiersma; 2004; Anisotropic Weak Localization of Light; Rivista: Physical Review Letters; Volume: 92; pp.: 033903

10. Prodotti della Ricerca eseguita

Deliverables:

- Realization of infiltration techniques for infiltrating 3D structures by global infiltration with liquid crystal (Florence, Torino, Pavia).
- Realization of local infiltration techniques that allows to infiltrated 2D photonic crystals and write photonic circuits (Florence, Trento, Trieste).
- Observation of fluorescence from locally infiltrated sources in 2D photonic crystal (Florence, Trento).
- Realization of setup to perform ultra-fast transport measurements on photonic crystals; feedback on sample preparation (Florence, Torino, Trento, Trieste).
- Realization of setup to perform coherent backscattering on photonic crystals and coherent backscattering measurements on opals (Florence, Torino).
- Integration of confocal microscope in NSOM system and combined imaging of 2D photonic crystals and fluoresce (Florence, Trento).

11. Componenti dell'Unità di ricerca che hanno effettivamente partecipato alla ricerca

Personale docente

n°	Cognome	Nome	Qualifica	Facoltà	Dipartimento/Istituto Università	mesi uomo dal modello		mesi uomo effettiv. impegnati		Nota
						I anno	II anno	I anno	II anno	
1.	COLOCCI	Marcello	Prof. Ordinario	Facoltà di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	Dip. FISICA Univ. FIRENZE	6	6	6	6	

altro personale

n°	Cognome	Nome	Qualifica	Facoltà	Dipartimento/Istituto Università/Ente	mesi uomo effettiv. impegnati		Nota
						I anno	II anno	
1.	GOTTARDO	Stefano	dottorando	SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	dip. FISICA	6	3	
2.	INTONTI	Francesca	post doc	SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	dip. FISICA	1	6	
3.	SAPIENZA	Riccardo	dottorando	SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	dip. FISICA	6	6	
4.	TURCK	Volker	post doc europeo		dip. FISICA	6		
5.	WIERSMA	Diederik	RICERCATORE		INFM	5	5	
6.	lauria	gianfranco	tecnico	SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	univ. di Firenze	6	6	
7.	neri	marco	tecnico	SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	univ. di Firenze	6	6	

personale a contratto

n°	Cognome	Nome	Qualifica	Tipologia di contratto	Inizio del contratto	Durata del contratto in mesi	Costo in Euro	mesi uomo		Nota
								I anno	II anno	
1.	Intonti	Francesca	postdoc	temporaneo	16/12/2002	7	4.052	7		
2.	Turck	Volker	postdoc	temporaneo	24/07/2003	5	11.180	5		

3.	Bertolotti	Jacopo	borsa	temporaneo	01/07/2004	6	8.468		6		
4.	Gottardo	Stefano	postdoc	temporaneo	01/04/2004	3	4.522		3		
TOTALE								28.222			

12. Note relative ai componenti (punto 11)

13. Risorse umane complessivamente ed effettivamente impegnate

	(mesi uomo)		
	I anno	II anno	TOTALE
da personale universitario	6	6	12
altro personale	36	32	68
personale a contratto	12	9	21

14. Dati complessivi relativi al programma

	(numero)
partecipazioni a convegni:	
in Italia	3
all'estero	6
articoli pertinenti pubblicati:	
su riviste italiane con referee	0
su riviste straniere con referee	12
su altre riviste italiane	0
su altre riviste straniere	0
comunicazioni a convegni/congressi internazionali	6
comunicazioni a convegni/congressi nazionali	3
rapporti interni	3
brevetti depositati	0

Tabella riassuntiva sulla ripartizione delle spese

Voce di spesa	Spese indicate nella rideterminazione di base	Spese rimodulate
Materiale inventariabile	50.000	52.455
Grandi Attrezzature	0	0
Materiale di consumo	42.000	44.880
Spese per calcolo ed elaborazione dati	0	0
personale a contratto	32.000	28.222
Servizi esterni	0	0
Missioni	10.000	7.879
Pubblicazioni	5.000	5.017
Partecipazione / Organizzazione convegni	2.300	2.847
Altro	0	0
TOTALE	141.300	141.300

15. Tabella delle spese sostenute

Voce di spesa	Spese rimodulate	Pagato	Residuo da saldare	Impegnato * limitatamente a Pubblicazioni,	Totale spese sostenute	Descrizione (elementi contabili a giustificazione)

		I anno	II anno	(già fatturato)	Convegni e Congressi per presentazione dei risultati finali della ricerca		(max 2000 Car. per ogni voce)
Materiale inventariabile	52.455	22.853	29.602			52.455	*Euro 15065.38 - Telecamera IR INDIGO- EQUIPMENT FOR TECHNOLOGY - N° 9950 del 29/10/04 *Euro 12054.38 - Elettronica di controllo per sopraddetta telecamera - Fatt. N° 344 del 31/07/03 *Euro 1767.00 - Sdoganamento per sopraddetta - N° 10515 del 11/11/04 *Euro 4529.51 - Integrazione imp. Telecamera IR - N° 10117 del 04/11/04 *Euro 1906.80 - PC HP EVO D530 CMT - MIPS INFORMATICA spa - N° 832 del 23/02/04 *Euro 1814.40 - PC HP EVO D530 CMT - MIPS INFORMATICA spa - N° 2679 del 02/04/04 *Euro 462.00 - CELLA di Teflon - MAGINI STEFANO S.N.C. N° 4182 del 13/05/04 *Euro 3437.13 - DIGITAL SOURCE METER Keithley 2410 - AVALON EQUIPMENT CORPORATION - N° 5580 del 22/06/04 *Euro 828.88 - Sdoganamento per sopraddetto - N° 5582 del 22/06/04 *Euro 273.22 - Sdoganamento FEDEX- DEL MAR VENTURES - N° 8216 del 17/09/04 *Euro 1071.80 - VISORE ABRIS - DEL MAR VENTURES - N° 8218 del 17/09/04 *Euro 1730.40 - PC HP EVO D530 -MIPS INFORMATICA spa - Fatt. 1477/F del 29/10/04 *Euro 1043.79 - ESSEDI BRAIN TECHNOLOGY - N° OA04001530 del 16/03/04 *Euro 2274.00 - PERSONAL COMPUTER COMPLETO N° 001- 00001 del 13/05/04 *Euro 1885.82 - ACAL ITALIA SRL - N° 001- 00001 del 18/12/03 La documentazione contabile e' depositata presso la segreteria amministrativa del dipartimento.

Grandi Attrezzature	0				0	
Materiale di consumo	44.880	18.047	26.833		44.880	*Euro 1488.00 - LAMPADE PER POMPAGGIO OTTICO NYAG - FACTUM ITALIA SRL - N°590 del 18/02/04 *Euro 1931.76 - FIBRE OTTICHE PER SNOM - THORLABS GMBH - N° 7224 del 03/08/04 *Euro 386.35 - IVA per sopraddette - N° 7225 del 03/08/04 *Euro 294.84 - Sostenze chimiche - SIGMA ALDRICH SRL - N° 10078 del 03/11/04 *Euro 1600.00 - Riparazione CCD- ANDOR TECHNOLOGY - N° 7314 del 04/09/03 *Euro 578.95 - CELLE QUARZO _ HELLMMA ITALIA SRL - N° 2723 del 05/04/04 *Euro 517.50 - Posizionatori di precisione - DB ELECTRONIC INSTRUMENTS - N° 4186 del 13/05/04 *Euro 188.16 - Prodotti chimici - SIGMA ALDRICH SRL - N° 4525 del 24/05/04 *Euro 235.00 - SPECCHI - CVI TECHNICAL OPTICS - N° 4565 del 25/05/04 *Euro 788.49 - CRISTALLI SEMICONDUTTORE _ UNIVERSITY WAFER - N° 4568 del 25/05/04 *Euro 800.00 - WAFERS - N° 4569 del 25/05/04 *Euro 582.20 - PLATINUM WIRE - ALFA AESAR - N° 4571 del 25/05/04 *Euro 116.44 - IVA per sopraddetto - N° 4572 del 25/05/05 *Euro 243.60 - SCHEDE COMPUTER - MIPS INFORMATICA SPA - N° 4994 del 08/06/04 *Euro 475.96 - LASER DIODE - ROITHNER LASERTECHNIK - N° 5089 del 10/06/04 *Euro 281.59 - GIRMET - N° 5679 del 29/06/04 *Euro 4782.80 - ROTATION STAGE - OWIS GmbH - N° 9237 del 12/10/04 *Euro 2884.09 - LENTI - THORLABS GMBH - N° 9426 del 20/10/04 *Euro 576.81 - IVA su sopraddetto - N° 9427 del 20/10/04 *Euro 3646.39 - LENTI E SPECCHI - THORLABS

							GMBH - N° 9430 del 20/10/04 *Euro 729.28 - IVA su sopraddetto - N° 9431 del 20/10/04 *Euro 194,28 - CCD Camera - RITAR SPA - N° 9435 del 20/10/04 *Euro 295.32 - Prodotti chimici - SIGMA ALDRICH SRL - N° 9442 del 20/10/04 *Euro 822.00 - MONTAGGI OTTICI - MAGINI STEFANO SNC - N° 9446 del 20/10/04 *Euro 201.31 - Femtotips sterili - EPPENDORF SRL - Fatt. 3934 del 18/10/04 *Euro 1092.00 - 466 PHOTORECEIVER - BFI OPTILAS SRL - N° 9449 del 20/10/04 Il dettaglio e' stato troncato dal conteggio dei caratteri permessi.
Spese per calcolo ed elaborazione dati	0					0	
personale a contratto	28.222	11.911	16.311			28.222	*Euro 4051.74 - Contratto di collab. F. INTONTI 16/12/02-15/07/03 *Euro 7860.24 - Contratto di collab. V. TUERCK 01/09/03-31/12/03 *Euro 3627.75 - Contratto di collab I. BERTELOTTI 01/07/04-30/09/04 *Euro 4522.00 - Contratto di collab. S. GOTTARDO 01/04/04-30/06/04 *Euro 4840.00 - Contratto di collab. I. BERTELOTTI 01/10/04-31/12/04 *Euro 3320.00 Contratto di collab. V. TUERCK 24/07/03-28/08/03
Servizi esterni	0					0	
Missioni	7.879	6.543	1.336			7.879	Principali missioni rimborsate: *Euro 1242.34 - Diederik Wiersma a SYBOLT *Euro 1072.13 - Riccardo sapienza a SAN SEBASTIAN *Euro 1037.57 - Francesca Intonti a SAN SEBASTIAN *Euro 494.50 - Sapienza Riccardo a PISA *Euro 1207.00 - Ramon Schifano a Lione
Pubblicazioni	5.017	2.851	2.166			5.017	Il dettaglio e' depositato presso la segreteria amministrativa.
Partecipazione / Organizzazione convegni	2.847	364	2.483			2.847	Il dettaglio e' depositato presso la segreteria amministrativa.
Altro	0					0	
Impegnato *						0	0

limitatamente a Pubblicazioni, Convegni e Congressi per presentazione dei risultati finali della ricerca							
TOTALE	141.300	62.569	78.731	0	0	141.300	

Descrizione dettagliata della cifra impegnata.

Voce di spesa	Impegnato	Estremi dell'impegno		Descrizione
		Data	Protocollo	
Pubblicazione dei risultati finali della ricerca				
Convegni e congressi per la presentazione dei risultati finali della ricerca				
TOTALE	0			

Per ogni cifra impegnata ci deve essere una descrizione di almeno 100 caratteri

Si ricorda che le cifre impegnate dovranno essere spese e rendicontate entro SETTEMBRE 2005

Totale spese sostenute

	(in Euro)
Totale finanziamento assegnato	141.300
Pagato	141.300
Residuo da saldare	0
Impegnato	0
Totale spese sostenute	141.300
Residuo	0

(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 17/01/2005 17:25

Firma

MINISTERO
DELL'ISTRUZIONE
DELL'UNIVERSITÀ
E DELLA RICERCA



Programmi di ricerca cofinanziati - Modello C
Rendiconto di unita' di ricerca - ANNO 2002
prot. 2002021127_002

1. Area Scientifico Disciplinare principale	02: Scienze fisiche
2. Coordinatore Scientifico del programma di ricerca	ANDREANI Lucio
- Università	Università degli Studi di PAVIA
- Facoltà	Facolta' di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI
- Dipartimento/Istituto	Dip. FISICA
3. Titolo del programma di ricerca	Cristalli fotonici a base di Silicio: tecnologia, proprietà ottiche e teoria
<hr/>	
4. Responsabile Scientifico dell'Unità di Ricerca	PAVESI Lorenzo
- Università	Università degli Studi di TRENTO
- Facoltà	Facolta' di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI
- Dipartimento/Istituto	Dip. FISICA
5. TITOLO del programma dell'unità di ricerca	Cristalli fotonici a base di silicio macroporoso: fabbricazione e caratterizzazione
6. SETTORE principale dell'unità di ricerca:	FIS/01
7. Finanziamenti assegnati all'unità di ricerca:	
- Quota Ateneo	31.000 €
- Quota MIUR	71.400 €
- Finanziamento totale	102.400 €

8. Descrizione della Ricerca eseguita e dei risultati ottenuti

L'attività dell'unità di Trento in questi due anni di progetto ha riguardato la fabbricazione di strutture fotoniche innovative, la misure delle loro caratteristiche e la simulazione. La maggior parte degli studi si è svolta in collaborazione con le unità di Torino per la litografia elettronica di silicio, di Firenze per la misura risolta in tempo della propagazione di fotoni e per gli studi di impregnazione di cristalli fotonici bidimensionali, di Pavia per il design e l'interpretazione di misure ottiche di strutture fotoniche e di Trieste per il processing mediante FIB di guide d'onda in nitruro. Questi studi hanno prodotto una serie di pubblicazioni e di comunicazioni a congresso riportate in appendice. Nel seguito dettagliamo i vari studi condotti secondo la divisione di attività del progetto originario, i riferimenti bibliografici sono relativi alla lista di pubblicazioni riportata alla fine di questo rapporto.

Obiettivo 1: Sviluppare le tecnologie di produzione di cristalli fotonici

1.1 Sistemi unidimensionali in guida d'onda

Abbiamo svolto studi sia su strutture fotoniche monodimensionali in silicio poroso [18] (figura 1), che su strutture fotoniche monodimensionali prodotte in guide d'onda (figura 2).

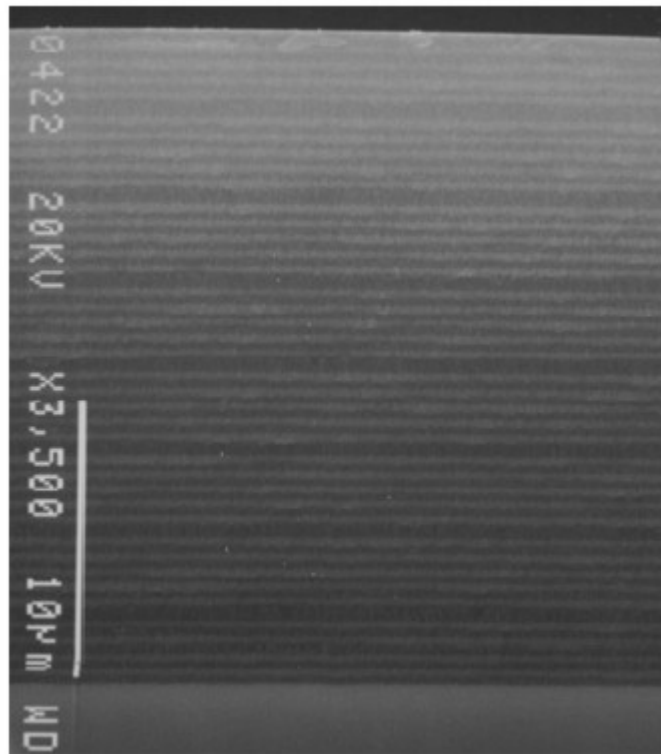


Figura 1. Immagine al microscopio elettronico a scansione di una sezione di un film dielettrico di silicio poroso contenente dieci microcavità accoppiate. Ref. [3,4]

La disponibilità di queste strutture fotoniche ci ha permesso di effettuare esperimenti di propagazione di fotoni in strutture dielettriche complesse come [15]: 1) superreticoli di Fibonacci dove si è evidenziata la presenza di modi fotonici con una localizzazione quasi-critica e la riduzione della velocità di gruppo dei fotoni [1,9,10]; 2) cavità accoppiate con gradienti controllati di cammino ottico per l'osservazione delle oscillazioni di Bloch dei fotoni [7,13] e il tunneling Zener risonante di onde di luce [11,14]; 3) strutture dielettriche disordinate dove si sono osservati effetti di localizzazione della luce e di accoppiamento risonante di modi fotonici localizzati (stati di necklace) [12]. Questi studi sono stati complementati da uno studio interferometrico delle bande fotoniche in strutture unidimensionali di Si/SiO₂ prodotto per deposizione LPCVD [8]. La comprensione della struttura a bande sia da un punto di vista teorico che sperimentale ha permesso di ottenere accordi quantitativi tra i risultati sperimentali e computazionali.

L'ottimizzazione del procedimento di produzione di guide d'onda in nitruro con fattori di perdita molto bassi (N. Daldosso, M. Melchiorri, F. Riboli, M. Girardini, G. Pucker, M. Crivellari, P. Bellutti, A. Lui, L. Pavesi, "Design, Fabrication, Structural and Optical Characterization of Thin Si₃N₄ Waveguides", IEEE Journal of Lightwave Technology 22, 1734 (7 July 2004)) ci ha permesso di svolgere un'attività di produzione di cristalli fotonici unidimensionali in guida d'onda in stretta collaborazione con Pavia per il design e Trieste per il processo di produzione. La struttura si basa su scavi localizzati con pareti nette di linee d'aria, ovvero gli strati sono composti da nitruro di silicio e da aria per ottenere un salto d'indice massimo. La figura 2 mostra un esempio di un difetto in un cristallo fotonico unidimensionale (altrimenti detto cavità) prodotto per litografia ed etching con fascio ionico focalizzato (FIB) su guide di nitruro a canale.

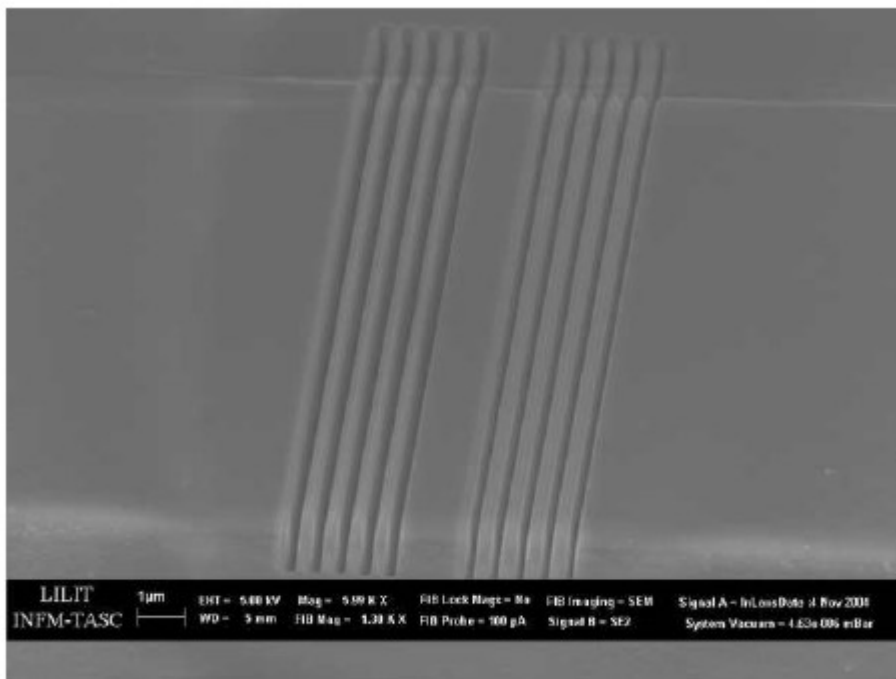


Figura 2. Cavità ottica unidimensionale prodotta in guide d'onda di nitruro. Si notino i profondi tagli che caratterizzano la struttura periodica unidimensionale aria-nitruro. Questa struttura è una cavità di nitruro circondata da due riflettori di Bragg composti da 4.5 periodi e centrata a 1.55 µm. Le guide di nitruro sono state prodotte a Trento presso l'IRST e il patterning con FIB è stato effettuato al laboratorio TASC di Trieste.

Altre strutture sono state disegnate con l'obiettivo di realizzare un tapering del modo fotonico per ottimizzare l'accoppiamento tra la cavità e la guida d'onda. Lo schema della struttura è mostrato in figura 3 mentre a figura 4 mostra lo spettro di trasmissione del modo TE fondamentale e del secondo modo TE. L'accordo tra la misura e la simulazione della struttura completa è molto soddisfacente.

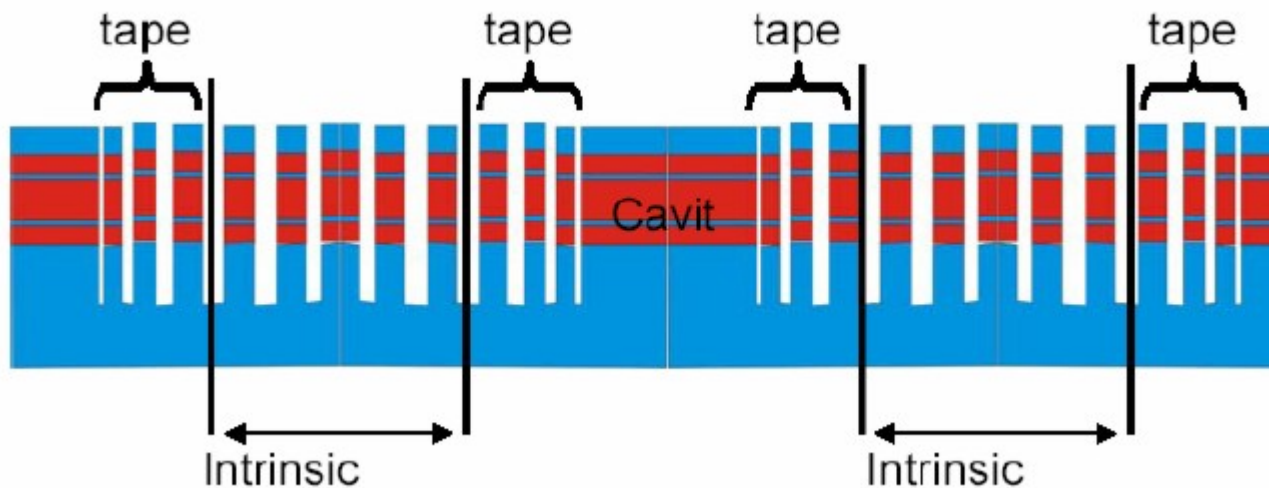


Figura 3. Struttura del cristallo monodimensionale scavato in una guida d'onda in nitruro. La lunghezza della cavità è di 270 nm.

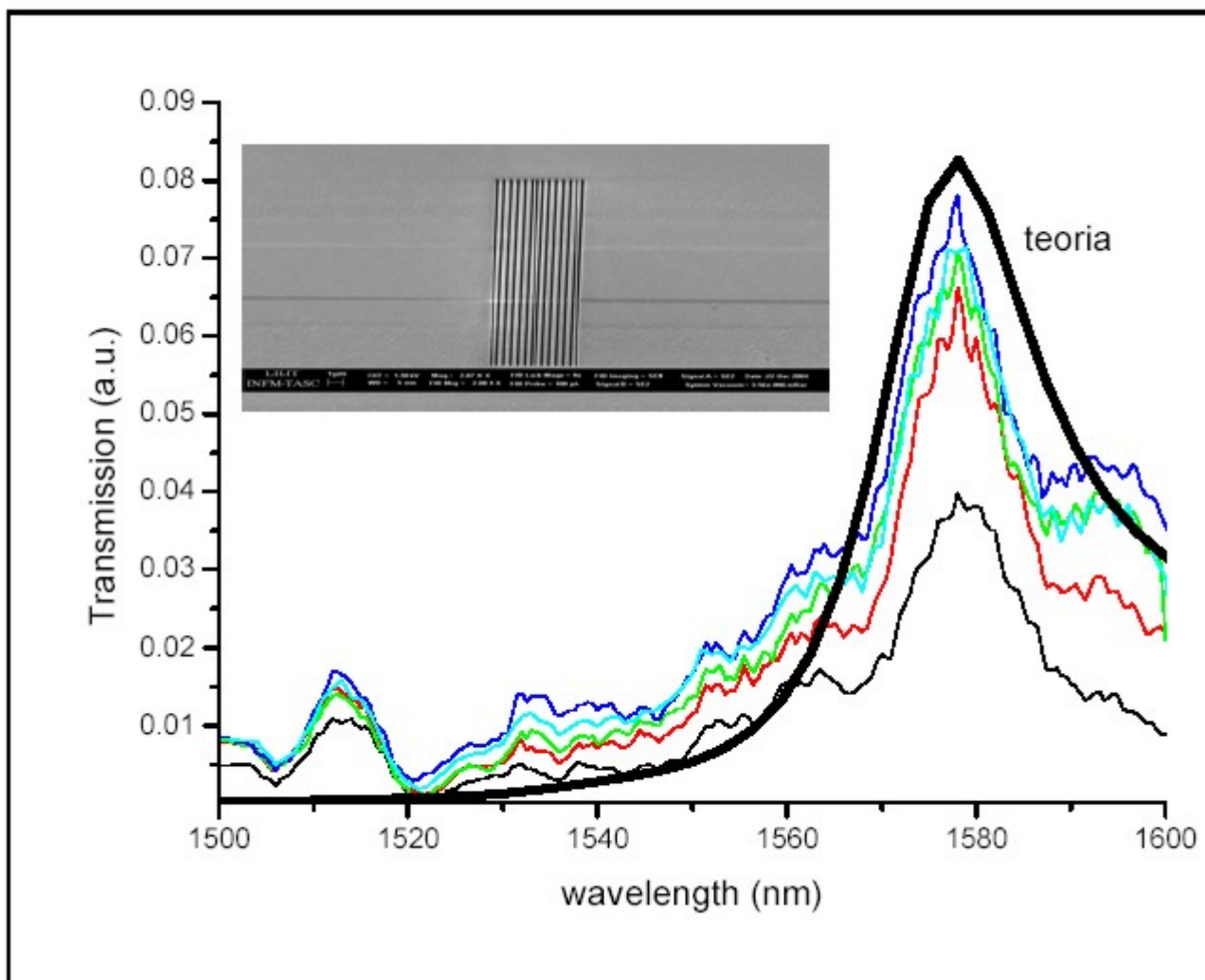


Figura 4. Spettro di trasmissione di una struttura fotonica in cavità del modo TE fondamentale della guida d'onda in nitruro. La curva spessa è il dato teorico, mentre le altre curve sono dati sperimentali per varie condizioni di accoppiamento. L'inset riporta una foto al microscopio elettronico a scansione della struttura.

1.2 Sistemi bidimensionali di silicio macroporoso

Mediante un processo composta da una fase di scrittura per litografia della struttura fotonici bidimensionale in silicio, trasferimento della struttura nel silicio per la formazione degli etch-pits e formazione di pori profondi con attacco elettrochimico, è possibile ottenere cristalli fotonici bidimensionali. La fase di produzione è particolarmente complessa quando si cerca di realizzare strutture fotoniche con gap fotonici a 1.55 μm . Infatti occorre disporre di una litografia capace di risoluzione sub-micrometrica. In una prima fase del progetto la collaborazione con l'unità di Torino ci ha permesso di scrivere strutture con la giusta risoluzione in ossido di silicio. Il processo di trasferimento nel silicio per formare di etch-pits è stato possibile mediante attacchi in KOH. Purtroppo però la maschera in ossido non resiste abbastanza a lungo all'HF impedendo di scrivere in profondità la struttura fotonica. A cause delle difficoltà derivanti dal trasferimento di campioni da Torino a Trento, e dalla necessità di testare i processi tecnologici su un gran numero di campioni, abbiamo pensato di comprare a Trento un sistema di litografia a fascio elettronico (su altri fondi). Abbiamo quindi proceduto alla scelta del sistema (sistema ElphyQuantum della Raith) e alla sua installazione (febbraio 2004). Quindi abbiamo messo a punto il processo di scrittura mediante strutture test su film di PMMA spinnato su fette di silicio e trasferite le stesse mediante attacco in TMAH in silicio. Infine abbiamo provato varie maschere resistenti all'HF. Alla fine il processo su cui ci siamo concentrati consiste nei seguenti passi: 1. deposizione per LPCVD di un film di nitruro di silicio su fetta di silicio drogata p come maschera resistente all'HF, 2. deposizione per spin di film di PMMA, 3. scrittura delle strutture fotoniche con litografia per fascio elettronico, 4. sviluppo PMMA, 5. trasferimento delle strutture nel nitruro mediante attacco in plasma, 6. trasferimento delle strutture in silicio per formare gli etch pits con attacco umido in TMAH, 7. formazione dei cristalli fotonici bidimensionali mediante la formazione di silicio macroporoso. La messa a punto ed ottimizzazione di tutti i vari passi di processo ha richiesto molto tempo, e alla fine del progetto in corso siamo riusciti ad ottenere le prime strutture non ottimizzate di cristalli fotonici con gap fotonico previsto nella regione spettrale desiderata. In Figura 5 e 6 sono mostrate queste strutture. Si noti la profondità dell'attacco (più di dieci micron) che permette di ottenere dei fattori di merito molto elevati. Figura 6 mostra ancora i limiti del nostro processo e la necessità di una sua messa a punto in quanto alcuni pori non si sono sviluppati a partire dagli etch pits.

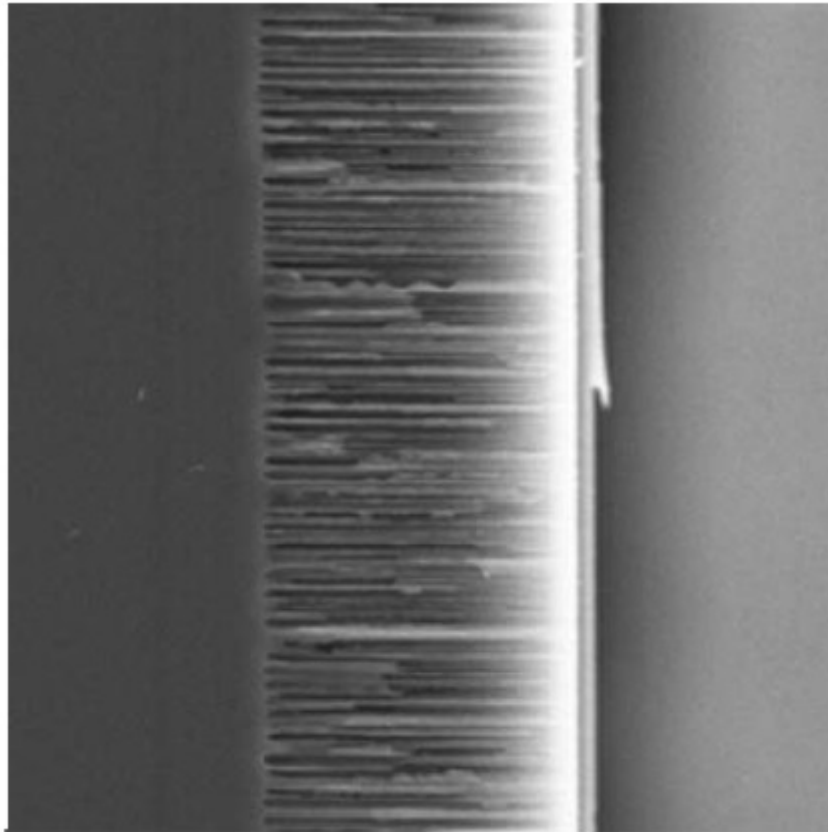


Figura 5. Vista in sezione di un cristallo fotonico, la profondità di attacco è di 10m micron.

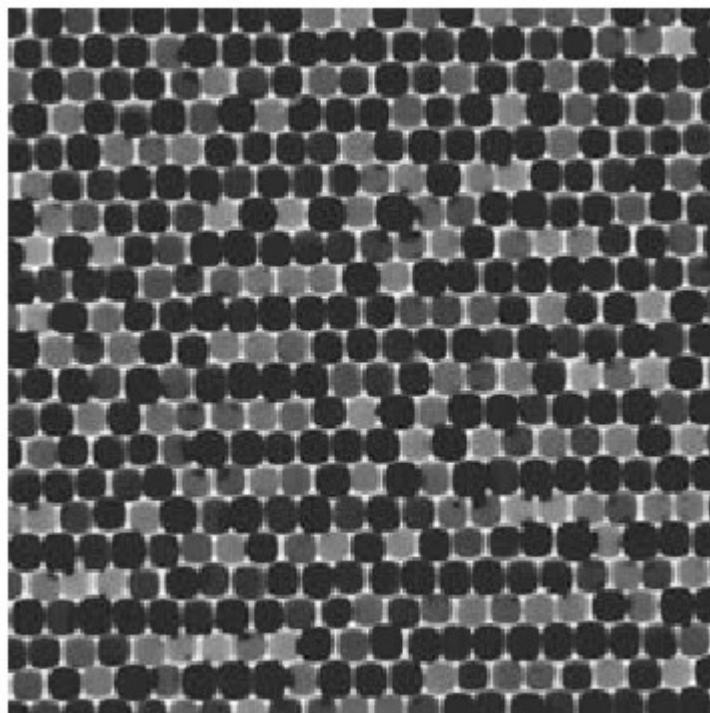


Figura 6. Vista in pianta di un cristallo fotonico. I diversi pori hanno un diametro di 200 nm. Il diverso colore dei vari pori dipende dalla loro profondità con il nero che indica la maggior profondità.

Abbiamo messo a punto anche una tecnica di lappatura controllata per poter ottenere cristalli fotonici free-standing, ovvero pori passanti. Un esempio del risultato è mostrata in figura 7 dove come cristallo fotonico si è utilizzato un cristallo fotonico con gap di 3 micron.

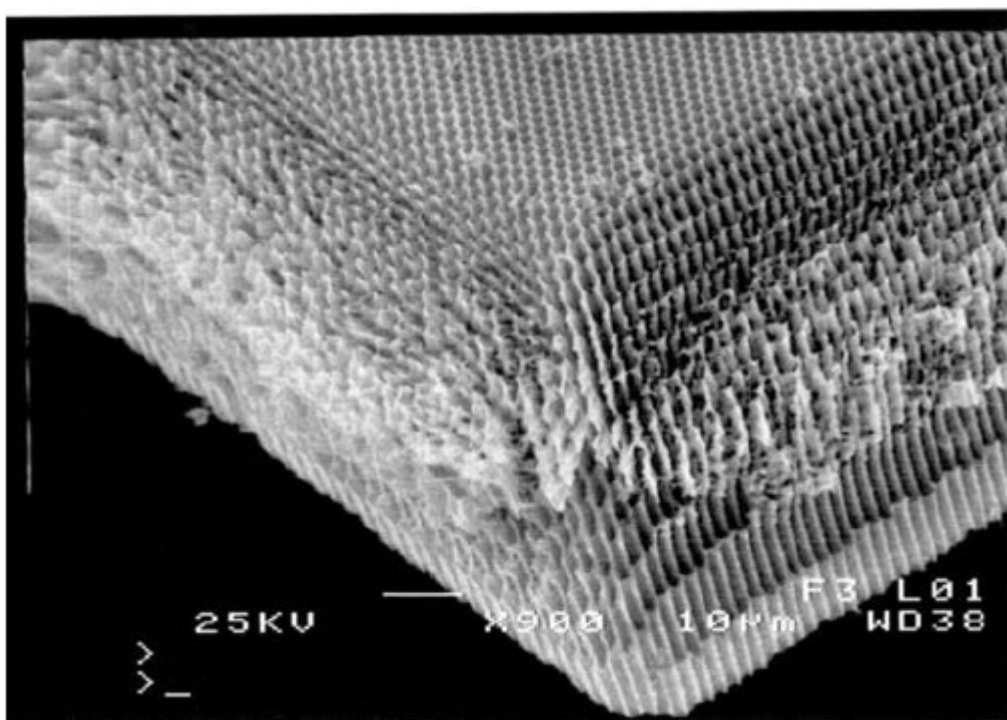


Figura 7. Immagine di un cristallo fotonici free-standing, ovvero con fori passanti.

1.4 Sistemi tridimensionali

Visto il ritardo nella produzione di cristalli fotonici bidimensionali non sono stati effettuati studi dettagliati. Alcuni tentativi hanno mostrato la possibilità di ottimizzare il processo di attacco elettrochimico in modo tale di consumare completamente le pareti di pori adiacenti e quindi produrre strutture fotoniche tridimensionali. Un esempio del risultato di questo processo è mostrato in figura 8.

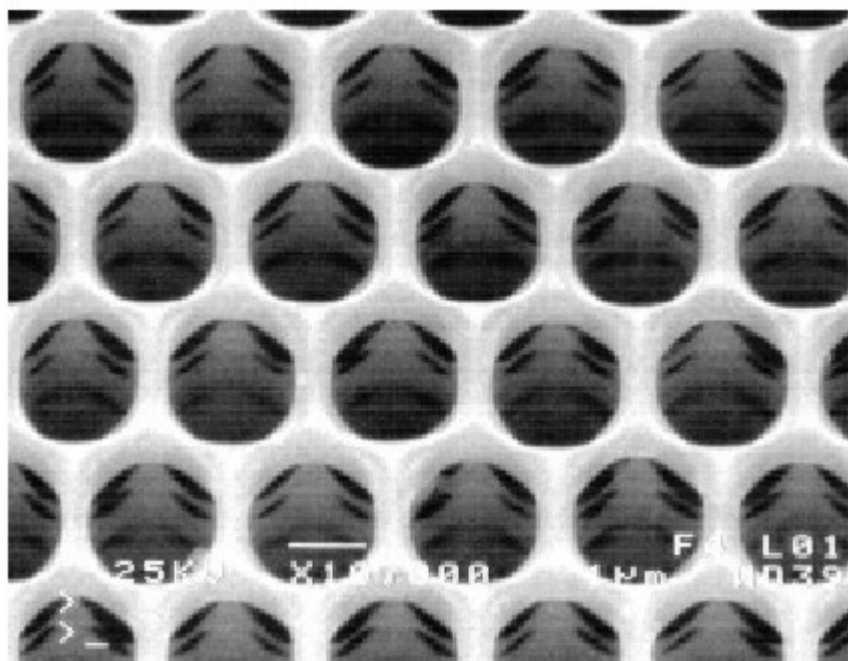


Figura 8. Immagine al microscopio a scansione elettronica di un cristallo fotonici tridimensionale ottenuto dal coalescere laterale di pori verticali in silicio macroporoso.

Obiettivo 2. Sviluppare le tecnologie delle loro infiltrazione con mezzi otticamente attivi

Oltre alla messa a disposizione di template in cui realizzare le infiltrazione presso l'unità di Firenze i cui risultati sono descritti nella loro relazione, abbiamo svolto tentativi presso l'unità di Trento in modo particolare su strutture unidimensionali in silicio poroso.

2.1 Infiltrazione chimica con Er

Il processo di infiltrazione con Er si basa su di un drive/in elettrochimico con sali di cloruro di Er e successivo trattamento di ossidazione termico per l'attivazione ottica dell'Er. I primi test hanno dimostrato l'introduzione di Er in strutture fotoniche monodimensionali di silicio poroso e la sua attivazione. Viste le difficoltà incontrate nella produzione di cristalli fotonici bidimensionali a base di silicio macroporoso, non abbiamo effettuato test di impregnazione di Er in queste strutture.

2.2 Coloranti

Abbiamo sviluppato processi dedicati per l'impregnazione di strutture fotoniche unidimensionali di silicio poroso con coloranti organici della classe delle porfirine. Esempio del processo e dei risultati sono mostrati nelle figure 9 e 10.

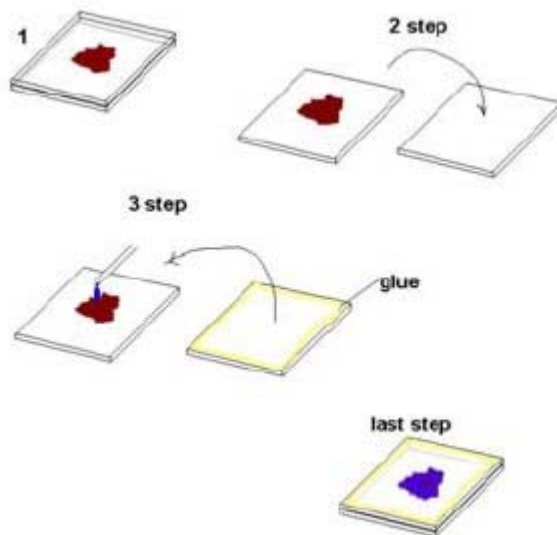


Figura 9 Passi principali per la realizzazione di strutture unidimensionali in silicio poroso infiltrate con porfirine. Un film di poroso viene ossidato e quindi impregnato con una soluzione di porfirina disciolto in acqua. Quindi un vetrino viene incollato sulla struttura in modo da evitare la perdita di colorante.

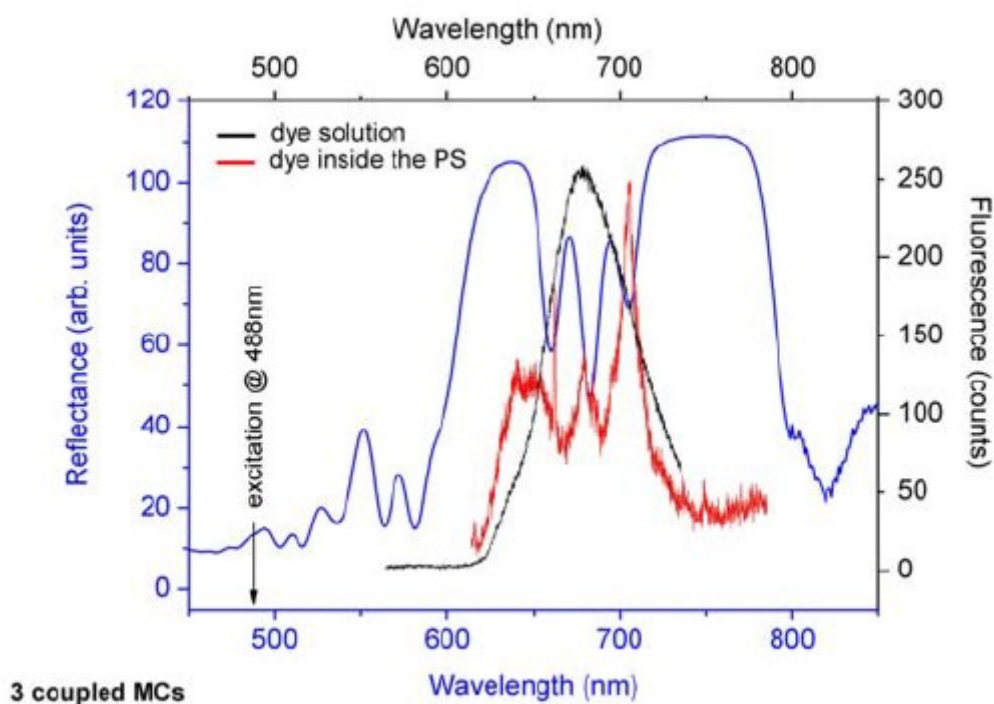


Figura 10. Caratteristica ottica del film impregnato di poroso. Si tratta di 3 microcavità accoppiate infiltrate di porfirina. La curva blu è lo spettro di riflettanza del film ossidato. La curva in nero è lo spettro di emissione della porfirina in acqua. Lo spettro in rosso è lo spettro del film impregnato con la porfirina. Si noti che la struttura ottica della riflettanza si riscontra nello spettro di emissione della porfirina modificata.

2.3 Quantum dots colloidali

Abbiamo sviluppato in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria dei materiali di Trento una tecnica di produzione di silicio nanocristallino in ossido di silicio che si basa sulla sintesi via sol-gel [6]. Il problema principale incontrato in questa fase è stata la riduzione dell'incorporazione di gruppi CH o CO che nel processo di pirolisi necessario per sintetizzare i nanocristalli di silicio avrebbero prodotto un vetro opaco o assorbente all'emissione dei nanocristalli di silicio stesso. Mediante un processo di sintesi dedicato siamo riusciti a produrre vetri massivi con ottime proprietà di emissione. Inoltre introducendo Sali di Er nella fase di sintesi abbiamo ottenuto vetri di ossido con nanocristalli di silicio ed ioni Er otticamente attivi. In questo modo siamo capaci di sfruttare il trasferimento di energia tra i nanocristalli e l'Er per ottenere alte efficienze di emissione dall'Er. Questo materiale si presta idealmente per realizzare esperimenti di impregnazione di cristalli fotonici. Esempio dei vetri prima del processo di pirolisi è mostrato in figura 11.

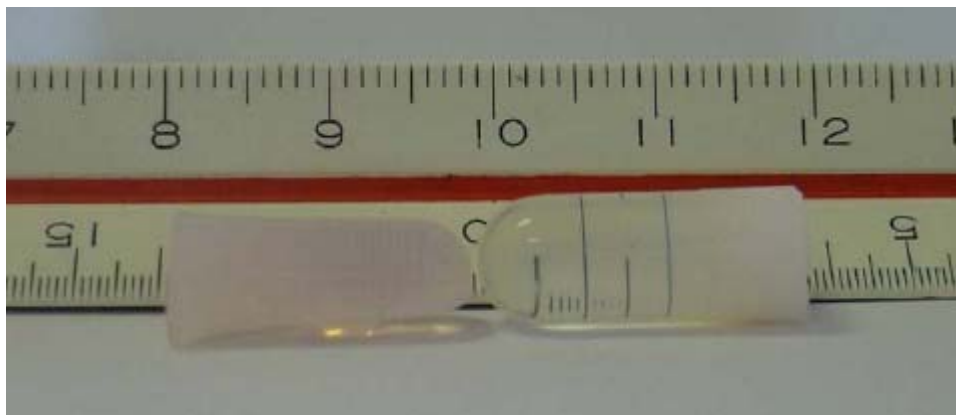


Figura 11 esempio di due vetri con nanocristalli di silicio (a destra) e nanocristalli di silicio accoppiati ad Er (sinistra). Dopo il processo di pirolisi a 1100°C si ha forte emissione dai nanocristalli di silicio e dagli ioni di Er.

Obiettivo 3. Effettuare uno studio dettagliato delle loro proprietà ottiche

Abbiamo comprato ed installato un sistema di microscopia a nanosonda (AFM e SNOM) per permettere la caratterizzazione delle strutture fotoniche.

3.1 Misura della trasmissione in guide d'onda fotoniche



Figura 12 Apparato di misura per guide d'onda fotoniche.

Abbiamo installato un sistema di misura di guide d'onda fotoniche mediante la tecnica dell'end-fire coupling che si basa su di un laser tunabile tra 1.5 e 1.6 micron, sistema di nanoposizionamento, fibre ottiche tapered o obiettivi di microscopio per l'accoppiamento e varie camere per l'osservazione dei profili di modo. Un esempio delle misure di trasmissione su guide d'onda di cristalli fotonici prodotti presso l'università del Delaware è mostrato nella figura 13.

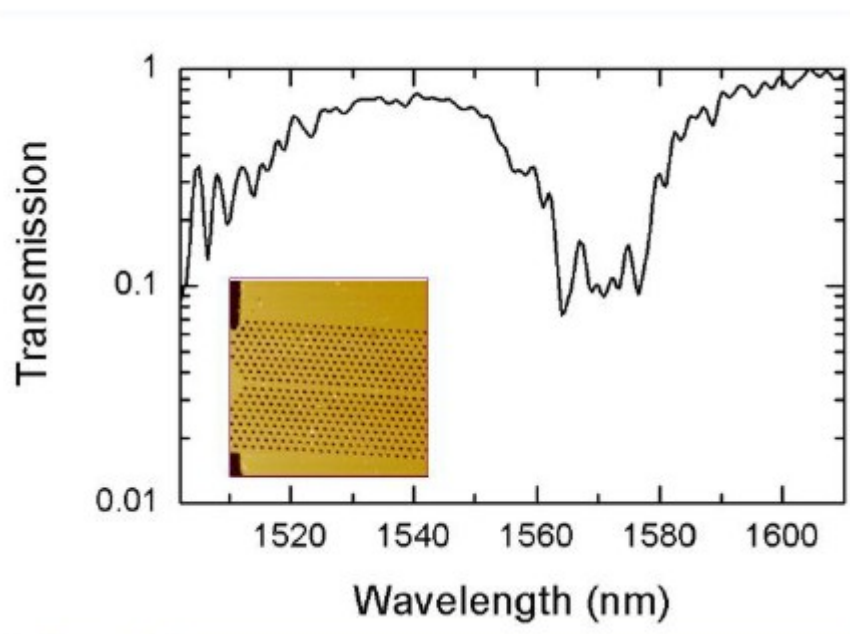


Figura 13 Spettro di trasmissione di guide d'onda fotoniche in silicon on insulator (misura AFM della struttura nell'inset).

3.2 Misura delle modifiche dell'emissione spontanea per cristalli fotonici infiltrati con mezzi attivi

Un esempio dei risultati è riportato in figura 10.

FORMAZIONE

Nel corso di questo progetto l'unità di Trento ha dedicato una borsa di studio post-doc volta all'implementazione di un laboratorio di microscopia a sonda locale e una borsa di dottorato (pagata su altri fondi e con fine Febbraio 2005) con l'obiettivo di sviluppare cristalli fotonici bidimensionali.

PUBBLICAZIONI

Comunicazioni a congressi in Italia

Mher Ghulinyan, C. J. Oton, Z. Gaburro, P. Bettotti, L. Dal Negro, L. Pavesi, R. Sapienza, D. S. Wiersma "Light Transport Through Porous Silicon Coupled Microcavities" Si Workshop 2003 (12-14 Feb Genova) [oral contribution]

M. Ghulinyan, C. J. Oton, Z. Gaburro, P. Bettotti, and L. Pavesi, R. Sapienza, S. Gottardo, P. Costantino, Jacopo Bertolotti, D. S. Wiersma "Light propagation in one dimensional complex multilayer systems" Si Workshop 2004 (11-13 Feb Genova) [oral contribution]

Comunicazioni a congressi internazionali

M. Ghulinyan, C.J. Oton, Z. Gaburro, P. Bettotti, N. Daldosso, L. Dal Negro and L. Pavesi, R. Sapienza and D.S. Wiersma "Light transport through porous silicon coupled microcavities", Microphotonics, MRS Spring meeting (San Francisco April 2003) [poster presentation]

M. Ghulinyan, C. J. Oton, Z. Gaburro, P. Bettotti, L. Dal Negro and L. Pavesi, "Light transport through porous silicon coupled microcavities", Micro-Optics and Photonics nanostructures, CLEO/Europe-EQEC Conference (Munich 23-27 June 2003) [oral contribution]

M. Galli, M. Belotti, M. Patrini, F. Marabelli, M. Agio, L. C. Andreani, G. Guazzetti, P. Bettotti, L. Pavesi, A. Lui G. Pucker, "Optical properties and photonic bands of Si-based photonic crystals", Micro-Optics and Photonics nanostructures, CLEO/Europe-EQEC Conference (Munich 23-27 June 2003) [oral contribution]

N. Daldosso and L. Pavesi, "Silicon Photonics" Nato ARW:Frontiers in molecular scale science and technology of nanocarbon, nanosilicon and biopolymer integrated nanosystems (Ilmenau, Germany 12-16 July 2003) [invited contribution]

M. Ghulinyan, C.J. Oton, Z. Gaburro, L. Pavesi, and V.M. Aroutiounian "Free standing porous silicon single and multiple optical cavities", 4th National Conference on Semiconductor Microelectronics in Armenia, (29-31 May 2003, Tsakhkadzor, Armenia).

R. Sapienza, P. Costantino, D. S. Wiersma, M. Ghulinyan, C. Oton, L. Pavesi, "Time-resolved photonic Bloch oscillations" 'Optical Properties of Complex Materials over Different Length Scales' July 7-11 San Sebastian Spain [Poster contribution]

M. Ghulinyan, C.J. Oton, Z. Gaburro, L. Pavesi, R. Sapienza, P. Costantino, and D. Wiersma, "Time resolved photonic Bloch oscillations in porous silicon superlattice structures", Porous Semiconductor Science and Technology PSST2004 (LaCullera, Valencia 14-19 March 2004) [Oral contribution] best talk of the day award

Z. Gaburro and L. Pavesi "Silicon Photonics Research In Trento: An Integrated Approach", 8th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2004) Orlando, USA, July 18-21, 2004 (oral contribution)

M. Ghulinyan, L. Pavesi, C. J. Oton, C. Toninelli, D. S. Wiersma "Zener tunneling of light in an optical superlattices" MRS Fall meeting: Symposium B: Progress in semiconductor materials IV (Boston 29 november 3 december 2004) [oral contribution]

Invited talk del responsabile di progetto L. Pavesi

"Silicon microphotonics", Invited talk at Recent trends in nonlinear optics and ultra-short pulse generation (15-16 June 2003, Pavia, Italy)

"Silicon photonics" Invited two hours talk at the X international Summer school "Nicolas Cabrera" on New trends in Ion beam physics and applications (Miraflores de la Sierra, Madrid Spain 15-19 September 2003).

Silicon Photonics (3 hours long pre conference tutorial) (9 gennaio 2004 Jadavpur University of Kolkhata and BE college of Sciences)

On the route towards a silicon monolithic photonic Invited talk at the International Conference on Communication, Device and Intelligent System (CODIS 2004, Kalkhota India 9-11 gennaio 2004)

Articoli

[1] L. Dal Negro, C. J. Oton, Z. Gaburro, L. Pavesi, P. Johnson, A. Lagendijk, R. Righini, M. Colocci, D. S. Wiersma, "Light transport through the bandedge states of Fibonacci quasicrystals", *Physical Review Letter* 90, 055501-1/4 (7 feb 2003).

[2] L. Pavesi, Z. Gaburro, L. Dal Negro, P. Bettotti, G. Vijaya Prakash, M. Cazzanelli, C. Oton, "Nanostructured silicon as a photonic material", *Optics and Laser in Engineering* 39(3), 345-368 (March, 2003). [invited paper in special issue Optics in Italy]

[3] M. Ghulinyan, C. J. Oton, Z. Gaburro, P. Bettotti, and L. Pavesi "Porous silicon free-standing coupled microcavities" *Applied Physics Letters* 82, 1550-1552 (10 march 2003).

[4] L. Pavesi "Will Silicon be the photonics material of the third millennium" *Topical Review Journal of Physics Condensed Matter* 15 (17 April 2003) R1169-1196.

[5] M. Ghulinyan, C. J. Oton, G. Bonetti, Z. Gaburro, L. Pavesi "Free standing porous silicon single and multiple optical cavities", *Journal of Applied Physics* 93, 9724-9729 (15 june 2003).

[6] Gian Domenico Soraru, Stefano Modena, Paolo Bettotti, Gonbind Das, Gino Mariotto and Lorenzo Pavesi, "Si nanocrystals obtained through polymer pyrolysis" *Applied Physics Letters* 83, 749-751 (28 july 2003)

[7] Riccardo Sapienza, Paola Costantino, Diederik Wiersma, Mher Ghulinyan, Claudio J. Oton and Lorenzo Pavesi "Optical Analog of Electronic Bloch Oscillations", *Physical Review Letters* 91, 263902-1 (31 December 2003, cover story).

[8] M. Galli, D. Bajoni, F. Marabelli, L. C. Andreani, L. Pavesi, G. Pucker, "Photonic bands and group velocity dispersion in Si/SiO₂ photonic crystals from white-light interferometry", *Physical Review B* 69, 115107-1/7 (15 march 2004).

Articoli in stampa

[9] D. S. Wiersma, R. Sapienza, S. Mujumdar, M. Ghulinyan, L. Pavesi "Optics of nanostructured dielectrics: from random lasers to quasi-crystals", *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* special issue on Nanostructured Optical Meta-materials (February 2005).

[10] Mher Ghulinyan, Claudio J. Oton, Luca Dal Negro, Lorenzo Pavesi, Riccardo Sapienza, Marcello Colocci, and Diederik Wiersma "Light pulse propagation in Fibonacci quasicrystals", *Physical Review B* (23 February 2005).

Articoli sottomessi

[11] M. Ghulinyan, C. J. Oton, Z. Gaburro, L. Pavesi, C. Toninelli and Diederik Wiersma "Zener tunneling of light waves", submitted to *Physical Review Letters* (31 July 2004).

[12] Jacopo Bertolotti, Stefano Gottardo, Diederik S. Wiersma, Mher Ghulinyan and Lorenzo Pavesi "Optical necklace states in Anderson localized 1D systems", submitted to *Physical Review Letters* (10 November 2004)

[13] M. Ghulinyan, C.J. Oton, Z. Gaburro, L. Pavesi, R. Sapienza, P. Costantino, and D. Wiersma, "Time resolved photonic Bloch oscillations in porous silicon superlattice structures", submitted in *Physica Status Solidi* (15 march 2004).

[14] M. Ghulinyan, Z. Gaburro, L. Pavesi, C. J. Oton, C. Toninelli and D. Wiersma, "Zener Tunneling of light in an optical superlattice", MRS proceedings Fall meeting 2004

Capitoli di libri

[15] D.S. Wiersma, S. Gottardo, R. Sapienza, S. Mujumdar, S. Cavalieri, M. Colocci, R. Righini, L. Dal Negro, C. Oton, M. Ghulinyan, Z. Gaburro, L. Pavesi, F. Aliev, P. Johnson, A. Lagendijk, W. Vos, "Light Transport In Complex Photonic Systems: From Random Lasers To Photonic Crystals" in *Wave Scattering in Complex Media: from Theory to Applications*, edited by Bart A. van Tiggelen and Sergey E. Skipetrov, Nato Advanced Study Institute series vol. (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2003) pag. 3-20.

[16] N. Daldosso and L. Pavesi, "On the route towards a monolithically integrated silicon photonics", in *Frontiers of multifunctional integrated nanosystems* eds. E. Buzaneva and P. Scharff (Kluwer Academic Publisher, Dordrecht 2004) pag. 287-298

[17] D. Lockwood and L. Pavesi "Silicon Fundamentals for Photonics Applications" in *Silicon Photonics*, edited by Lorenzo Pavesi and David Lockwood, *Topics in Applied Physics* vol. 94 (Springer-Verlag, Berlin 2004) pag. 1-50.

[18] Z. Gaburro, N. Daldosso, L. Pavesi, article "Porous Silicon" in *Encyclopedia of Condensed Matter Physics* edited by Franco Bassani, Jerry Liedl and Peter Wyder (Elsevier Ltd).

Libri

[19] *Silicon Photonics*, edited by Lorenzo Pavesi and David Lockwood, *Topics in Applied Physics* vol. 94 (Springer-Verlag, Berlin 2004) ISBN 3-540-21022-9.

9. Pubblicazioni

del responsabile

n°	Pubblicazione
1.	PAVESI L.; LOCKWOOD D.J. (2004). Silicon photonics vol. 94 pp. 1-397 ISBN: 3-540-21022-9
2.	RICCARDO SAPIENZA; PAOLA COSTANTINO; DIEDERIK WIERSMA; MHER GHULINYAN; OTON CLAUDIO J; PAVESI L. (2003). Optical Analog of Electronic Bloch Oscillations <i>PHYSICAL REVIEW LETTERS</i> vol. 91 pp. 263902-1-263902-4 ISSN: 0031-9007 cover story of the issue

dei partecipanti

- L. Dal Negro, C. J. Oton, Z. Gaburro, L. Pavesi, P. Johnson, A. Lagendijk, R. Righini, M. Colocci, D. S. Wiersma; 2003; Light transport through the bandedge states of Fibonacci quasicrystals; Rivista: *Physical Review Letters*; Volume: 90; pp.: 055501
- M. Galli, D. Bajoni, F. Marabelli, L. C. Andreani, L. Pavesi, G. Pucker,; 2004; Photonic bands and group velocity dispersion in

Si/SiO₂ photonic crystals from white-light interferometry; Rivista: Physical Review B; Volume: 69; pp.: 115107

10. Prodotti della Ricerca eseguita

Durante questo progetto di ricerca sono stati prodotti:

- cristalli fotonici unidimensionali basati su silicio nanoporoso
- cristalli fotonici unidimensionali aria-semiconduttore in guida d'onda basati su guide d'onda in nitruro
- cristalli fotonici bidimensionali basati su silicio macroporoso
- nanocristalli di silicio in matrici vetrose mediante processi sol-gel
- processi tecnologici per produrre i materiali summenzionati
- processi tecnologici per infiltrazione di speci otticamente attive in cristalli fotonici come salidi Erbium o porfirine
- apparati di misure di guide d'onda fotoniche
- apparati di misura in sonda locale
- pubblicazioni
- tesi di dottorato
- training di giovani ricercatori

11. Componenti dell'Unità di ricerca che hanno effettivamente partecipato alla ricerca

Personale docente

n°	Cognome	Nome	Qualifica	Facoltà	Dipartimento/Istituto Università	mesi uomo dal modello		mesi uomo effettiv. impegnati		Nota
						I anno	II anno	I anno	II anno	
1.	PAVESI	Lorenzo	Prof. Ordinario	Facoltà di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	Dip. FISICA Univ. TRENTO	4	4	4	4	

altro personale

n°	Cognome	Nome	Qualifica	Facoltà	Dipartimento/Istituto Università/Ente	mesi uomo effettiv. impegnati		Nota
						I anno	II anno	
1.	GABURRO	Zeno	RICERCATORE		INFM	1	1	
2.	BETTOTTI	Paolo	dottorando	SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	dip. FISICA	11	11	
3.	DALDOSSO	Nicola	collaboratore	SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	Università di Trento	1	1	

personale a contratto

n°	Cognome	Nome	Qualifica	Tipologia di contratto	Inizio del contratto	Durata del contratto in mesi	Costo in Euro	mesi uomo		Nota
								I anno	II anno	
1.	Sbrana	Francesca	dottorato	borsa post-doc	06/04/2003	20	25.823	9	11	termine contratto il 6/12/2004
TOTALE							25.823			

12. Note relative ai componenti (punto 11)

13. Risorse umane complessivamente ed effettivamente impegnate

	(mesi uomo)		TOTALE
	I anno	II anno	
da personale universitario	4	4	8
altro personale	13	13	26
personale a contratto	9	11	20

14. Dati complessivi relativi al programma

	(numero)
partecipazioni a convegni:	
in Italia	3
all'estero	12
articoli pertinenti pubblicati:	
su riviste italiane con referee	
su riviste straniere con referee	10
su altre riviste italiane	
su altre riviste straniere	
comunicazioni a convegni/congressi internazionali	12
comunicazioni a convegni/congressi nazionali	3
rapporti interni	7
brevetti depositati	

Tabella riassuntiva sulla ripartizione delle spese

Voce di spesa	Spese indicate nella rideterminazione di base	Spese rimodulate
Materiale inventariabile	50.000	53.225
Grandi Attrezzature	0	0
Materiale di consumo	18.577	15.352
Spese per calcolo ed elaborazione dati	0	0
personale a contratto	25.823	25.823
Servizi esterni	0	0
Missioni	4.000	4.000
Pubblicazioni	0	0
Partecipazione / Organizzazione convegni	4.000	4.000
Altro	0	0
TOTALE	102.400	102.400

15. Tabella delle spese sostenute

Voce di spesa	Spese rimodulate	Pagato		Residuo da saldare (già fatturato)	Impegnato * limitatamente a Pubblicazioni, Convegni e Congressi per presentazione dei risultati finali della ricerca	Totale spese sostenute	Descrizione (elementi contabili a giustificazione) (max 2000 Car. per ogni voce)
		I anno	II anno				
Materiale inventariabile	53.225	10.011	43.214			53.225	14-13/1/04 Crisel Instrument SPETTROGRAFO €41,260.80 04-13/1/04 Waldner ARMADIO PER ACIDI

							€1,851.36 3030750-17/10/3 Bfi Optilas Testo di lettura €102.02 472-11/4/03e525-29/4 Laser Optronic Pitch- yaw/optical rail €1,022.40 63-2/4/03 Physik Instrumente sistema XYZ €4,800.00 3030758-17/10/03 BFI Optilas testa di lettura €1,769.98 1285-6/11/03 Laser Optronic depolarizer dpl 10 €2,419.42
Grandi Attrezzature	0	0				0	
Materiale di consumo	15.352	9.899	5.473			15.372	47609-5/6/3 The Electrochemical €224.57 15030-13/11/3 Carlo erba reagenti €9.36 271-25/5/2003 2M strumenti SRL elementi riscaldanti forno €862.00 1004-15/3/04 DSE Italia € 897.60 300195-1/4/04 Princetel €549.42 190475021 sigma Aldrich €595.02 185-3/5/04 Telefo €84.00 OSPITE utilizzo foreteria Supriya €1,031.54 137-10/8/04 Sistemi informativi €306.52 1217-14/5/04 D. Pisetta di macro €129.77 31-15/6/04 Cambo controller € 1,644.96 Trasferimenti Federal Express €113.05 acquisto disco per PC piccole spese €84.00 81252-6/5/03 MKS intrument confezione 4 rotoli €76.80 719-20/6/03 4WD informatica Usb Pen drive e mouse €297.00 70912-15/3/03 elettrocasa cordless €118.80 190395453-30/5/03 Sigma Aldrich materiale vario €655.68 788-30/6/03 Laser Optronic microskopie obiective €564.67 421625-30/7/3 CHL memorie €346.18 289-30/6/03 Reco ricarica cartucce €121.80 19041350-82271085 Sigma Aldrich materiale vario €499.20 443-23/10/03 Worldstat group general purpuse- handling €229.20 3033048-29/903 Edmund Industrie micron

							ingaas €281.52 500430-19/11/03 Coherent europe intervento tecnico €1,182.00 15030488-628- Carlo erba reagenti reagenti €2,417.96 312421-8/12/03 Allresist gmbh ar600-70 4*2 €2,049.60
Spese per calcolo ed elaborazione dati	0	0				0	
personale a contratto	25.823	11.620	14.203			25.823	15000331 Sbrana 06/04/03-06/01/04 1-2-3 rata 15000331 Sbrana
Servizi esterni	0	0				0	
Missioni	4.000	1.030	2.940			3.970	MISSIONI MANDATI N. AG.SOLE NEVE INDIA PAVESI 1001922-3/2/04 € 2,231.99 AG.SOLE NEVE VIAGGIO INDIA PAVESI 1001923-3/2/04 €152.00 Pavesi India 06- 12/01/04 1003119- 3/2/04 € 555.42 agenzia viaggi Bolgia 1012972-27/5/03 €263.29 agenzia Sole e neve viaggi 1019949-5/8/03 €161.29 Pavesi Pavia 15- 16/06/03 1015291- 24/6/03 €74.57 Pavesi Monaco 24- 27/06/03 1021207- 26/8/03 €344.66 Pavesi Chiavasso 1027357-28/10/03 €186.09
Pubblicazioni	0	0				0	
Partecipazione / Organizzazione convegni	4.000	4.043				4.043	2008814-31/03/03 3543,00 euro pagamento servizi per Winter School on Photonics tenutasi dal 23 al 28 febbraio 2003 500 euro iscrizione Pavesi convegno CLEO/EQEC 23-27/6/03 MANDATO 1010811 30/11/2003
Altro	0	0				0	
Impegnato * limitatamente a Pubblicazioni, Convegni e Congressi per presentazione dei risultati finali della ricerca							
TOTALE	102.400	36.603	65.830	0	0	102.433	

Descrizione dettagliata della cifra impegnata.

Voce di spesa	Impegnato	Estremi dell'impegno		Descrizione
		Data	Protocollo	
Pubblicazione dei risultati finali della ricerca				
Convegni e congressi per la presentazione dei risultati finali della ricerca				
TOTALE	0			

Per ogni cifra impegnata ci deve essere una descrizione di almeno 100 caratteri

Si ricorda che le cifre impegnate dovranno essere spese e rendicontate entro SETTEMBRE 2005

Totale spese sostenute

	(in Euro)
Totale finanziamento assegnato	102.400
Pagato	102.433
Residuo da saldare	0
Impegnato	0
Totale spese sostenute	102.433
Residuo	-33

(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 17/01/2005 22:38

Firma

MINISTERO
DELL'ISTRUZIONE
DELL'UNIVERSITÀ
E DELLA RICERCA



Programmi di ricerca cofinanziati - Modello C
Rendiconto di unità di ricerca - ANNO 2002
prot. 2002021127_003

1. Area Scientifico Disciplinare principale	02: Scienze fisiche
2. Coordinatore Scientifico del programma di ricerca	ANDREANI Lucio
- Università	Università degli Studi di PAVIA
- Facoltà	Facoltà di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI
- Dipartimento/Istituto	Dip. FISICA
3. Titolo del programma di ricerca	Cristalli fotonici a base di Silicio: tecnologia, proprietà ottiche e teoria

4. Responsabile Scientifico dell'Unità di Ricerca	PIRRI Candido
- Università	Politecnico di TORINO
- Facoltà	Facoltà di INGEGNERIA III (Ingegneria dell'Informazione)
- Dipartimento/Istituto	Dip. FISICA
5. TITOLO del programma dell'unità di ricerca	Realizzazione, caratterizzazione e modellizzazione di Cristalli Fotonici bi e tri-dimensionali a base di Silicio
6. SETTORE principale dell'unità di ricerca:	FIS/03
7. Finanziamenti assegnati all'unità di ricerca:	
- Quota Ateneo	51.800 €
- Quota MIUR	120.800 €
- Finanziamento totale	172.600 €

8. Descrizione della Ricerca eseguita e dei risultati ottenuti

L'Unità di Torino, accorpa gruppi di Ricerca del Politecnico di Torino (Dip. di Fisica e Dip. Scienze dei Materiali), del Laboratorio TASC-INFM di Trieste (gruppo LILIT) e dell'Università di Messina (Dip. Fisica). L'attività di ricerca, sviluppata nei due anni, può essere sintetizzata nei seguenti punti:

a) Processi per la realizzazione di cristalli fotonici 2D in matrici a base Silicio

- b) Processi per la realizzazione di guide d'onda planari a cristallo fotonico 2D e difetti in guide d'onda a ridge in Nitruro di Silicio
- c) Realizzazione e caratterizzazione di cristalli fotonici 3D con strutture ad opale diretto e inverso e Yablonovite
- d) Analisi teorica e modellizzazione di varie eterostrutture dielettriche: calcoli a bande e modellizzazione di microscopia a campo prossimo in sistemi fotonici complessi.

a) Sono stati messi a punto i processi di litografia a fascio elettronico (sistema RAITH-Elphy Quantum implementato su sistema SEM JEOL 6400) per la realizzazione di matrici di fori (a simmetria triangolare) di diametro e passo sub-micrometrico su film di polimetilmetacrilato (pmma) che agisce da maschera per il trasferimento del pattern su substrato sottostante.

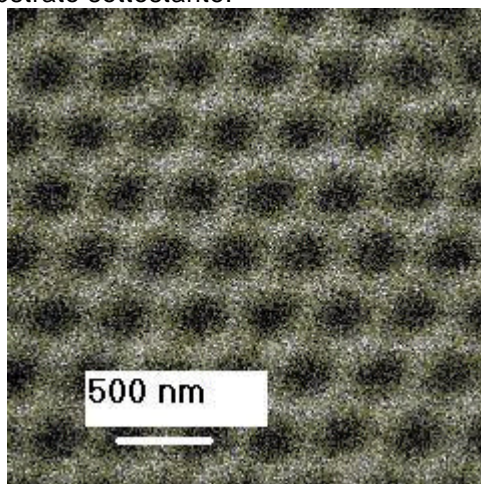


Fig.1 – Esempio di test pattern eseguito su pmma e trasferito su SiO₂ successivamente etchato in HF.

Sono inoltre stati studiati processi di asportazione selettiva via plasma (con sistemi di Reactive Ion Etching ad accoppiamento capacitivo ed induttivo [ICP -RIE]) di film di Silicio amorfo idrogenato (a-Si:H, depositato via Plasma Enhanced-CVD), utilizzando strati di pmma patternato con litografia a fascio elettronico. L'omogeneità dei film di a-Si:H è stata ottimizzata variando i parametri di deposizione del sistema PE-CVD (pressione gas, potenza radio frequenza, distanza di elettrodo). La migliore selettività di asportazione a-Si/pmma (94:1) si è raggiunta utilizzando SF₆ come gas reattivo in un sistema ICP nell'ambito di una collaborazione con l'azienda Olivetti i-jet S.p.A. di Arnad (Aosta). Nell'ultimo semestre di attività si sono ottimizzati i processi per l'asportazione di film di a-Si e di Nitruro di Silicio amorfo idrogenato (a-SiN:H) con un nuovo sistema RIE ad accoppiamento capacitivo installato presso il Laboratorio Materiali e Microsistemi dell'Unità di Torino.

b) Sulla base dell'esperienza compiuta nell'attività sopra dettagliata, sono stati ottimizzati i processi per la realizzazione di guide d'onda planari a cristallo fotonico realizzate su strutture SOI (Silicon on Insulator). Le strutture SOI consistono nel nostro caso in bi-strati di SiO₂/a-Si:H depositati via PE-CVD su wafer di Si cristallino. Le condizioni di deposizione dei film di SiO₂ sono state ottimizzate (pressioni parziali dei gas di miscela SiH₄+CO₂+H₂) per minimizzare gli stress all'interfaccia e per raggiungere la stechiometria propria dell'ossido di Silicio termico. Sono stati quindi realizzati dei pattern in cui nella matrice di fori si inseriscono dei difetti lineari. Tali difetti a singola linea (assenza di fori) creano una banda fotonica localizzata, mentre i bassi indici di rifrazione degli strati superiori ed inferiori al core in a-Si (rispettivamente biossido di silicio e aria) permettono un confinamento verticale della luce, consentendo una propagazione guidata a basse perdite.

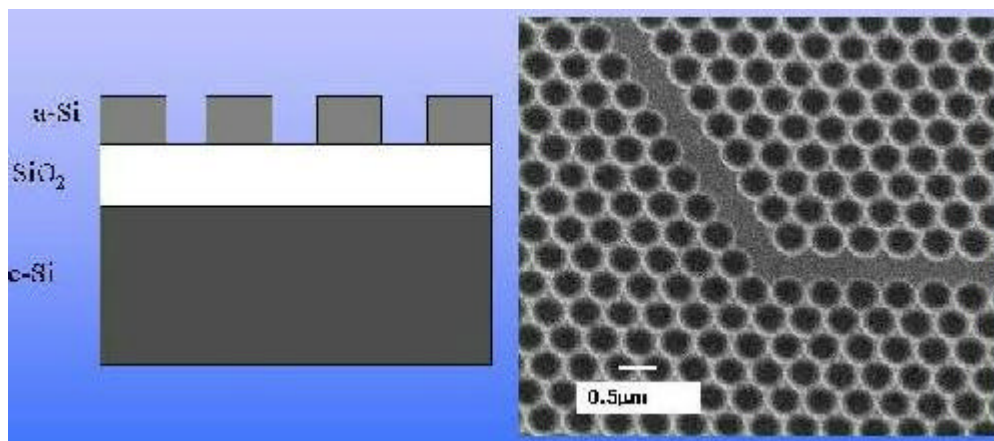


Fig.2 – Guida d'onda planare a cristallo fotonico realizzata su struttura SOI (a-Si/SiO₂/c-Si) in cui si evidenzia un canale con curvatura brusca a 60 gradi

Sempre nell'ambito dei processi sviluppati su guida d'onda, sono state realizzate delle microcavità e pattern a cristallo fotonico 2D su guida planare di nitruro di silicio realizzate dall'Unità di Trento. Le guide sono state realizzate utilizzando le tecniche di CVD e litografia ottica, mentre le strutture mostrate in fig. 3 sono state realizzate con il nuovo sistema Focused Ion Beam (FIB) installato presso il laboratorio INFN-TASC, gruppo LILIT, di Trieste. L'utilizzo del sistema FIB combina in una sola fase di processo sia la litografia diretta che l'etching del materiale, con conseguente riduzione dei tempi fabbricativi.

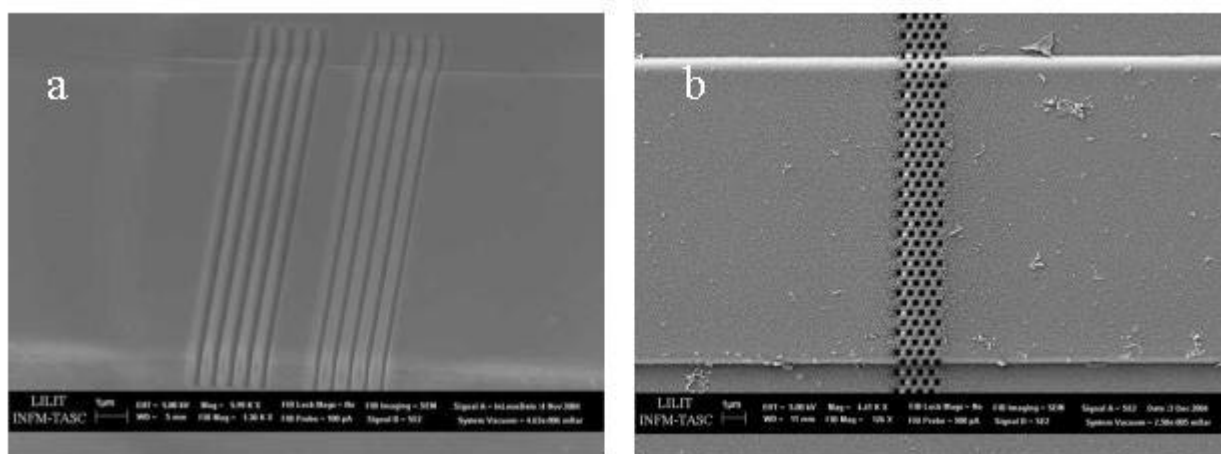


Fig. 3 – pattern realizzati via FIB su guide d'onda planari in Nitruro di Silicio: (a) microcavità 1D Fabry-Perot, (b) filtro a cristallo fotonico 2D

c) Sono stati sintetizzati opali diretti a base di nanosfere di polistirene (acquistate in soluzione colloidale con diametro di 330 nm) e a base di nanosfere di Silice (sintetizzate in laboratorio con processo di idrolisi di tetra-etil-orto-silicato con diametri controllabili da 150 a 700 nm). Gli opali diretti, con struttura fcc (verificata con misure di microscopia elettronica e a forza atomica) e spessori variabili in un range di 5-20 micron, sono stati sintetizzati con la tecnica di dip-coating, consistente nella deposizione dell'opale durante l'evaporazione della soluzione colloidale contenente le nanosfere, a temperatura controllata.

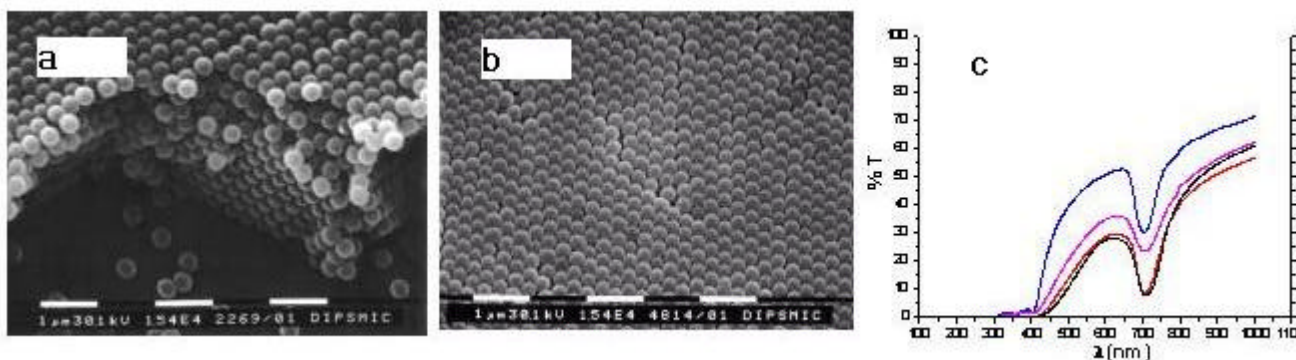


Fig 4 Immagini SEM di (a) opale a base di polistirene; (b) opale a base di Silice; (c) esempi di spettri di trasmittanza a incidenza normale ottenuti su opali a base polistirene (diametro sfere di 330 nm), che dimostrano l'apertura del gap a circa 700 nm in direzione (111).

Gli opali diretti sintetizzati sono stati caratterizzati dall'Unità di Torino (con misure di trasmittanza ad angolo di incidenza normale alla struttura), dall'Unità di Pavia (con misure di riflettanza ad angolo variabile) e dall'Unità di Firenze (con misure di back-scattering coerente).

Su alcuni opali diretti in Silice è stato indotto l'adsorbimento di cluster di Carbonio con processi termici in atmosfera controllata; ciò ha reso le matrici fortemente luminescenti a temperatura ambiente. Misure di fotoluminescenza stazionaria hanno dimostrato l'influenza della struttura fotonica sull'emissione spontanea, tradotta nell'inibizione nell'emissione in direzione 111 (perpendicolare alla superficie dell'opale) per energie prossime al gap parziale (vedi confronto spettro di luminescenza-riflettanza spettrale di fig. 5)

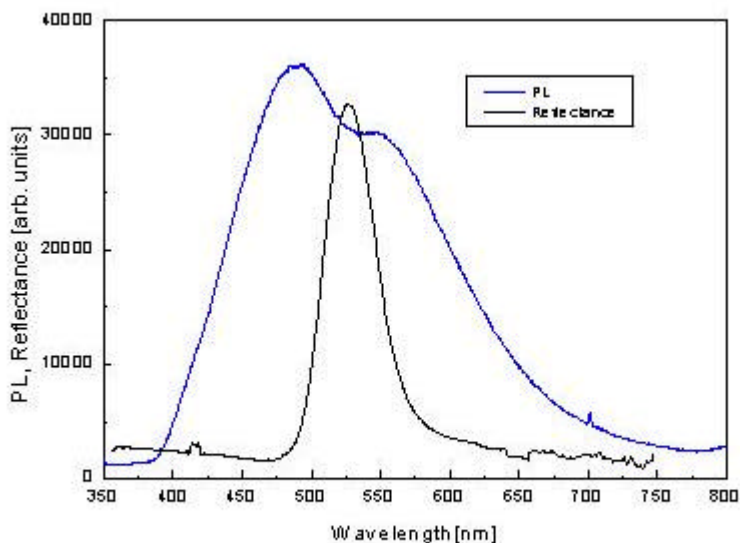


Fig. 5 Confronto spettri di riflettanza spettrale ad angolo di incidenza normale e di fotoluminescenza per un opale diretto a base di Silice (diametro sfere 275 nm) con intenzionale adsorbimento di Carbonio; si evidenzia l'inibizione dell'emissione all'energia del picco di Bragg a 530 nm.

Alcuni opali sono stati sintetizzati su substrato conduttivo trasparente (Ossido di Indio Stagno, ITO depositato su substrati di vetro) con sottile film buffer di SiO₂, per consentire all'Unità di Firenze l'infiltrazione di cristalli liquidi e l'analisi dell'influenza del bias elettrico e della temperatura sulle proprietà ottiche delle strutture ottenute dopo l'infiltrazione. Misure di riflessione ad angolo e polarizzazioni variabili hanno dimostrato un marcato effetto di switching del picco di Bragg a bassa energia (banda fotonica in direzione 111 nella struttura fcc infiltrata con cristallo liquido E7) indotto dal campo elettrico, imputabile al carattere birifrangente della struttura.

Per quanto riguarda la realizzazione di opali inversi, sono stati realizzate matrici di Ossido di titanio e di Silicio utilizzando differenti tecniche. Nel primo caso opali diretti a base polistirene sono stati infiltrati a temperatura ambiente con Etossido di Titanio diluito in Etanolo, il template polimerico è stato successivamente rimosso per calcinazione (cottura a 570 °C), ottenendo la struttura inversa in Titania. Gli opali inversi di Silicio sono stati realizzati calcinando (a temperatura di 850 °C) le strutture dirette in Silice per irrobustire la matrice, infiltrando successivamente gli opali con Silicio amorfo utilizzando un reattore di crescita CVD (Silano come gas precursore, temperatura di processo 500 °C). La presenza della matrice in a-Si è stata verificata con spettroscopia Raman. La rimozione del template è stata effettuata con un primo etching via plasma (RIE, per consentire l'asportazione del coating di Silicio che ricopre tutta la struttura) e un seguente etching umido in HF (per la rimozione delle nanosfere di Silice). L'ottimizzazione di questa serie di processi ha prodotto opali inversi a diverse frazioni di Silicio, che sono stati misurati attraverso spettroscopia di riflettanza ad angolo fisso e variabile (eseguite dall'Unità di Torino e dall' Unità di Pavia).

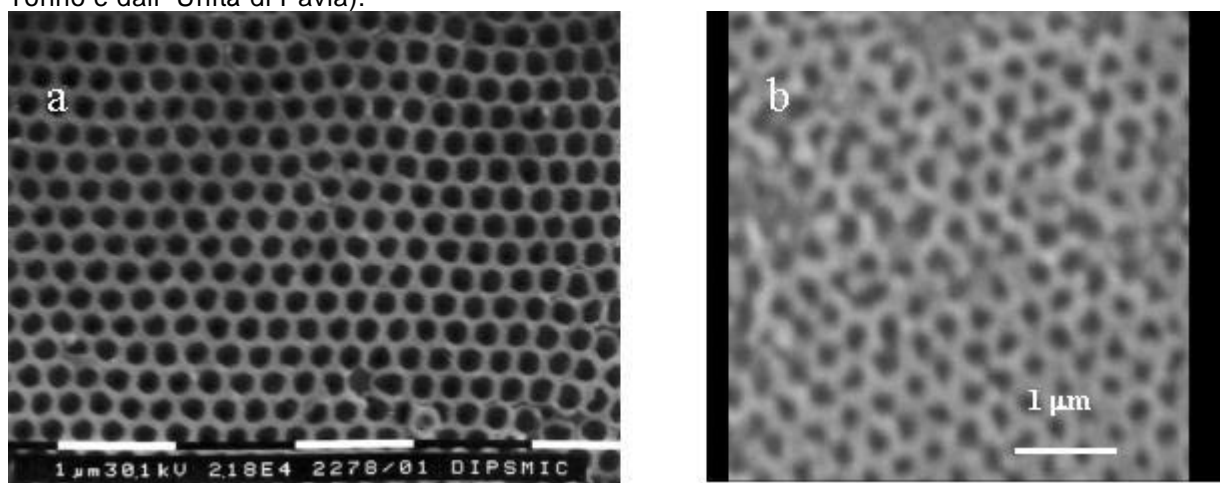


Fig. 6 Immagini SEM di (a) opale inverso a base di Titania; (b) opale inverso a base di Silicio

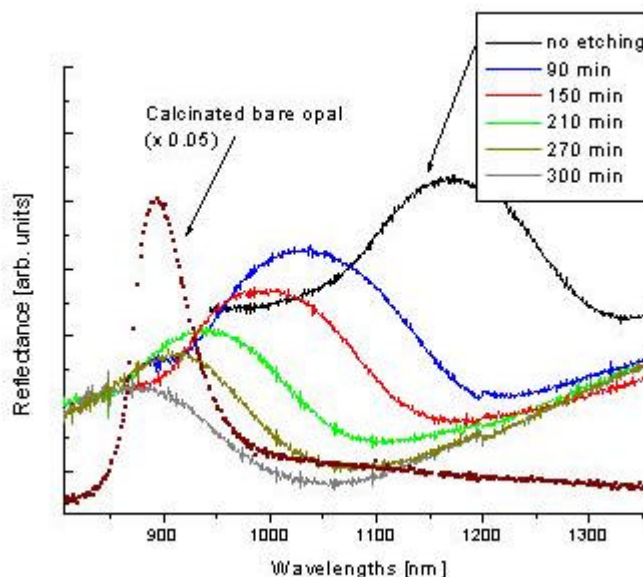


Fig. 7 spettri di riflettanza spettrale ad angolo di incidenza normale di un'opale diretto a base di Silice infiltrato con Silicio via CVD; sono confrontati gli spettri della struttura non infiltrata (opale diretto) e di strutture infiltrate con Si in cui in tempi successivi è stato gradualmente rimosso il template in Silice (i tempi indicati sono relativi al processo di etching in HF)

Utilizzando le facilities del gruppo LILIT del laboratorio INFM-TASC sono state sintetizzate strutture di Yablonovite a base di Nickel. Nel dettaglio sono stati realizzati pattern tri-dimensionali su film spessi di

pmma con litografia a raggi X (sorgente luce di sincrotrone); una successiva infiltrazione metallica elettrochimica ha consentito di ottenere la struttura inversa al template infine rimosso. Sono stati in alcuni casi introdotti dei difetti ad hoc (es. canali lineari) con estremo controllo della loro geometria

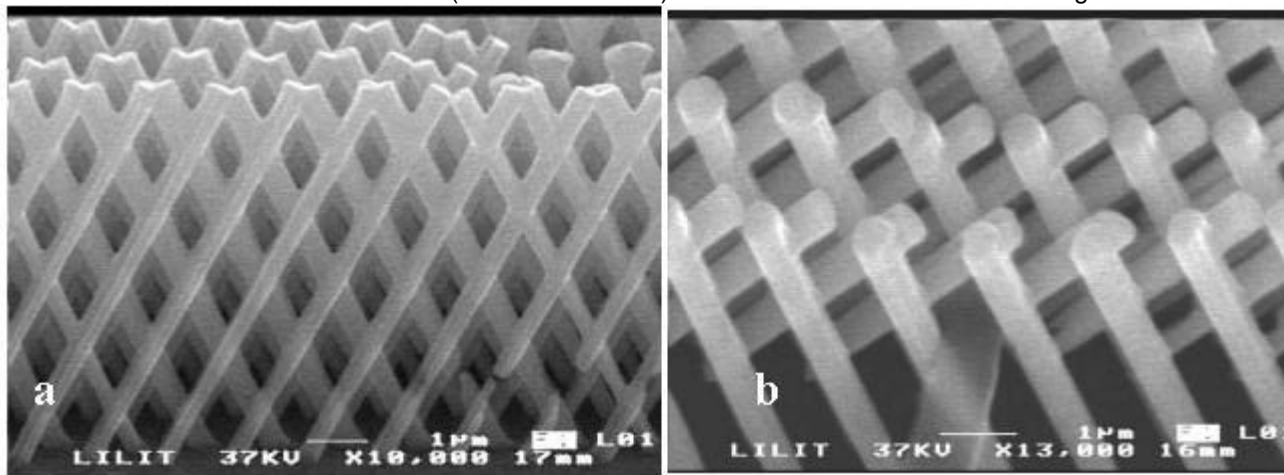


Fig. 8 Immagini SEM di (a) Yablonoite inversa a base Nickel; (b) struttura con difetto lineare

Allo scopo di realizzare strutture di Yablonoite a base di Silicio, sono stati effettuati tentativi di infiltrazione dei template metallici con la tecnica di CVD termica. Tuttavia i risultati del processo di infiltrazione hanno mostrato il problema della crescita di nanowires di Silicio (in fase amorfa e cristallina) a causa dell'azione catalitica della matrice metallica nei confronti del gas precursore (Silano), processo che inibisce l'infiltrazione omogenea che è stata raggiunta con gli opali in Silice.

d) L'attività di carattere teorico/simulativo dell'Unità di Torino può essere suddivisa in due parti: lo sviluppo di metodi innovativi per il calcolo della struttura a bande e dello spettro di assorbimento/riflessione per strutture periodiche o parzialmente periodiche, e l'analisi della risposta ottica locale per materiali attivi e passivi.

Sul primo fronte si sono effettuati calcoli a bande per strutture mono e bidimensionali utilizzando l'approccio dello sviluppo in onde piane. E' stato quindi sviluppato uno schema di calcolo generale in grado di combinare i vantaggi dei due approcci comunemente utilizzati nel calcolo delle proprietà delle eterostrutture dielettriche, ovvero il metodo delle onde piane e quello degli stati di scattering. In particolare si suddivide lo spazio in tre regioni: due regioni a sinistra e a destra della struttura in esame, in cui il campo elettromagnetico è descritto in termini di stati di scattering entranti ed uscenti, ed una regione centrale in cui si effettua un calcolo del campo elettromagnetico utilizzando il metodo delle onde piane. Tale approccio consente di trattare strutture di notevoli dimensioni, per le quali gli effetti di bordo possono essere trascurati.

Per quanto riguarda l'analisi della risposta ottica locale, si è utilizzato un approccio teorico in grado di studiare la luce emessa da strutture micro- e nanometriche di forma e composizione arbitraria. Nello specifico, questo metodo completamente tridimensionale consente di derivare la distribuzione spaziale del campo elettromagnetico in prossimità di strutture dielettriche emittitrici, e di studiare come tale campo sia modificato da oggetti scatteranti posti nelle vicinanze (vedi Fig. 9). Tale studio ha consentito di meglio comprendere la relazione non banale fra immagini di campo prossimo e spettri di fluorescenza.

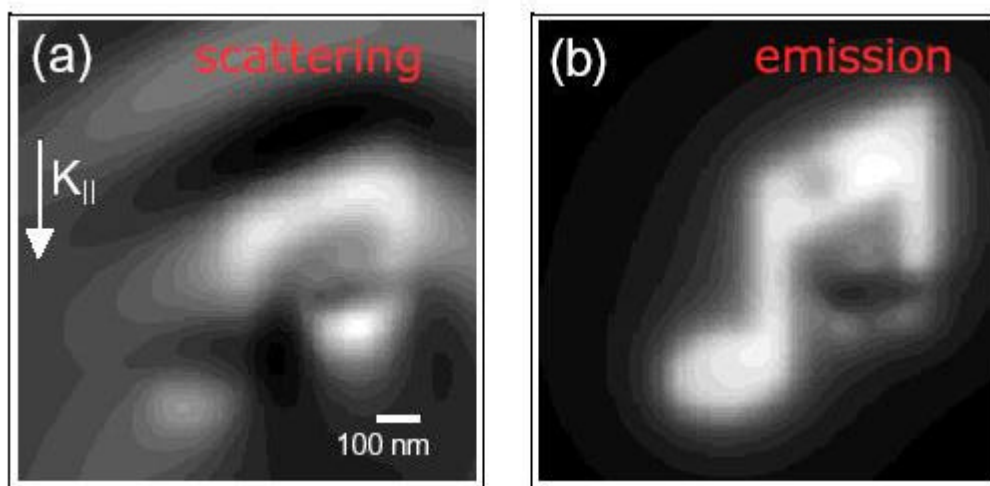


Fig.9 Pattern in campo prossimo della luce diffusa (a) ed emessa (b) da una struttura tridimensionale nanometrica [vedi Pieruccini et al. APL 83, 2480 (2003)].

STRUMENTAZIONE ACQUISITA O MESSA A PUNTO NELL'AMBITO DELLA TEMATICA DEL PROGETTO

- 1) Banco ottico di fotoluminescenza stazionaria con eccitazione UV-VIS a temperatura 4K-RT
- 2) Sistema di Reactive Ion Etching a 13.56 MHz con accoppiamento capacitivo
- 3) Sistema di deposizione Low Pressure Chemical Vapor Deposition

PARTECIPAZIONE A CONGRESSI INERENTI ALLA TEMATICA DEL PROGETTO

Silicon Workshop INFM (Genova (Italy) 2003)

International Conference on Nonequilibrium Carrier Dynamics in Semiconductors - HCIS 13 (Modena, 28 Luglio-1 Agosto 2003)

European-Material Research Society Conference in Strasbourg [France] (June 10-13, 2003)

March 2003 Meeting of the American Physical Society (Austin (USA), 3-7 Marzo 2003)

2nd European aSiNet Workshop on Thin Silicon in Lisbon [Portugal] (February 19-21, 2003)

First International Meeting on Applied Physics (APHYS-2003) Badajoz [Spain], (October 14-18, 2003)

3rd European aSiNet Workshop on Thin Silicon in Bratislava [Czech Republic] (February 25-27, 2004)

PUBBLICAZIONI 2003-2004 INERENTI ALLA TEMATICA

"a-Si:H Based two-dimensional photonic crystals", E.Bennici, M. Cocuzza, S. Ferrero, F.Giorgis, C.F.Pirri, R.Rizzoli, P.Schina, L.Businaro, E. Di Fabrizio, Physica E 16 (2003) 539

"New insights on amorphous silicon-nitride microcavities ", V. Ballarini, G. Barucca, E. Bennici, C.F. Pirri,

C. Ricciardi, E. Tresso, F. Giorgis, Physica E 16 (2003) 591

"Luminescence properties of amorphous Silicon-Nitride based optical microcavities", F. Giorgis, V. Ballarini, S. Ferrero, P. Mandracci, C. Ricciardi, C. F. Pirri, J. Non-Cryst. Solids 299-302 (2003) 653

"Fabrication of 3D metallic photonic crystals by X-ray lithography", F. Romanato, L. Businaro, L. Vaccari, S. Cabrini, P. Candeloro, M. De Vittorio, A. Passaseo, M.T. Todaro, R. Cingolani, E. Cattaruzza, G. Battaglin, M. Galli, M. Patrini, C. Andreani, E. Di Fabrizio, MICROELECTRONIC ENGINEERING, 67-8 (2003) 479

"Near-field light emission from nano- and micrometric complex structures", M. Pieruccini, S. Savasta, R. Girlanda, R. C. Iotti, F. Rossi, Appl. Phys. Lett. 83 (2003) 2480

"Linear and non linear optical properties of amorphous Silicon-nitride microcavities", V. Ballarini, F. Giorgis, C. Ricciardi, S. Di Finizio, S. Lettieri, P. Maddalena, M. Losurdo, G. Bruno, Proceed. of the 2nd aSiNet Workshop on Thin Silicon (Lisbon, Portugal, 2003)

"Silicon-based microcavities: theory and experiment", V. Ballarini, C. Ricciardi, F. Giorgis, R. C. Iotti, F. Rossi, Semicond. Sci. Technol. 19 (2004) S489

"Second Harmonic Generation in a-SiN:H thin films and planar microcavities", V. Ballarini, F. Giorgis, C. Ricciardi, L. C. Andreani, M. Liscidini, G. Bruno, M. Losurdo, S. Lettieri, P. Maddalena, Proceed. of the 3rd aSiNet Workshop on Thin Silicon (Bratislava, Czech Republic, 2004)

"Gap formation and diffraction phenomena in optical spectra of direct and infiltrated opals", M. Galli, D. Bajoni, A. Balestreri, L.C. Andreani, L. Pallavidino, F. Giorgis, C. Ricciardi, F. Geobaldo, to be submitted to Journal of Applied Physics

DETTAGLIO RENDICONTAZIONE SPESE DI CONSUMO

(Per tutti i mandati INFM si intende siano preceduti dalla sigla TP).

Poli service stampa n. 2 poster fatt. 470 del 17/10/2003 euro 92,40 mand pag. 944 del 01/02/04, Canavese Sviluppo SaS catering meetin partner Prin fatt. 48/03 del 23/10/2003 euro 1121,66 mand. Pag 2003/ 853 del 31/10/03, Gerra ferramenta fatt 1888 del 29/11/03 euro 123,47 mand pag. 2004/80 del 17/02/04 e fatt 2047 del 19/12/03 euro 176,74 mand pag. 2004/173 del 25/03/04, Rivoira fatt. 107377 del 31/12/036 bombole di azoto euro 180 mand pag. 2004/193 del 31/03/04, ASYSTEEL licen server fatt. n. 1658 del 26/02/04 euro 122,82 mand pag. 2004/324 del 18/05/04, Rivoira fatt.n. 2278 del 31/01/04 Argon e ossigeno euro 168,48 mand pag. 2004/235 16/04/04, Elettrovava riparazione n. 2 pompe turbo ETP fatt n. 400109 del 27/02/04 euro 2136 mand. Pagam. N. 2004/328, Caburn fatt. n. 40 del 03/02/04 tubi in ceramica, guarnizioni in rame, raccordo dritto euro 74,40 mand pag. 2004/322 del 18/05/04, Caburn Materiale vario spese di spedizione n. 40 del 03/02/04 euro 25,20 mand pag. 2004/323 del 18/05/04, Criofarma riparazione pompa rotativa Edwards 175 fatt. n. 123 del 22/07/04 euro 1680 mand pag. 2004/895 del 08/11/04, LINKAM accessori per cella ad alta temperatura fatt n. 010382 di 08/03/04 euro 236,60 mand pag. 2004/194-195 del 31/03/04, CANAVESANA fatt n. 540/03 del 30/09/03 euro 123,94 mand pag. 2004/81 del 17/02/04, Perkin Elmer manut spettrofot fatt. 3204200876 del 23/02/04 euro 856,80 mand. Pagam n. 2004/327 del 18/05/04, RS Components fatt n. 28/013757 del 16/02/04 Gepe filtri ferrite e cavo in rame euro 64,62 mand pag. 2004/326 del 18/05/04, UPS n. M0755152759 del 24/02/04 euro 242,64, piccole spese euro 100,41 mand pag. 2004/113 del 25/02/04, Rivoira bombole sped. Fatt. n. 107375 del 21/12/03 euro 20,09 mand. Pag. 2004/234 del 16/04/04, Gerra febbraio 2004 fatt. n. 351 del 29/02/04 euro 101,24 mand pag. 2004/329 del 18/05/04 e fatt. 165 del 31/01/04 euro 121,06 mand pag. 2004/233 del 16/04/04, RTAU fatt. n. 310 del 31/03/04 raccordi e tubi mand euro 399,56 pag. 2004/395 del 08/06/04, Perkin Elmer manut spettrof fatt n. 50128267 del 13/05/04 euro 379,20 mand pag. 2004/690 del 15/09/04, Rivoira fatt. n. 31666 del 30/04/04 Elio liquido euro 874,75 mand pag. 2004/585/586/587 del 28/07/04, Palmas Piero lav quarzo fatt. n. 954 del 14/04/04 euro

133,32 mand pag. 2004/486 del 16/07/04, Politeko toner e fuser oil n. 228 del 12/05/04 euro 416,40 mand pag. 2004/691 del 15/09/04, AM instruments n. 1113 del 20/05/04 indum da camera pulita euro 418,97 mand pag. 2004/689 del 15/09/04, Rivoira gas Azoto n. 31668 del 30/04/04 euro 150 mand pag. 2004/589 del 28/07/04, Piroso guanti laboratorio fatt n. 2415 del 07/06/04 euro 48 mand pag. 2004/539 del 22/07/04, picc spese Euro 42 mand pag. 2004/410 del 16/06/04 e euro 123,87 mand pag. 2004/411 del 16/06/04, SIEM Impianto elettrico Limadel fatt 146/04 del 14/07/04 euro 552 mand. pag 2004/776 del 07/10/04, Tinteggiatura Limadel n. 19 del 03/08/04 euro 540 mand pag. 2004/675 del 14/09/04, CSR smaltimen sost tossic fatt n 488 del 31/07/04 euro 327 mand pag. 2004/483 del 26/10/04, Elettrovava riscaldatore ad alta temperatura fatt n. 400629 del 15/11/04 euro 6000, Manut clean room lab microsostemi anno 2004 euro 28450,25 mand pag. 2004/569-70 del 28/07/04
ADAS fatt 675/j del 30/07/2004 antivegetativo euro 336 mand pag. 2004/906 del 08/11/04
Assing - parte manut camera pulita Chivasso 2° rata euro 188,08 fatt n 1421_03 del 11/12/03 mand pag 2004/592 del 28/07/04, Centro Estintori Monferrato - revisione semestr estint fatt n. 1291 del 15/07/04 euro 108 mand pag 2004/789 del 12/10/04, Rivoira elio liquido n. 41957 del 31/05/04 euro 123,95 mand. Pag n. 2004/684 del 15/09/04, COPISISTEM n 2 hard disk fatt n. 3389 del 23/09/04 euro 156 mand pagam n. 2004/894 del 08/11/04, Politec Torino (DISPEA) lavoraz portacamp doc n. 28/2004 del 12/08/04 euro 30 mand pag. 2004/910 del 08/11/04, Assing mat lab fatt n. RV080804 del 19/10/2004 euro 596,40 mand pag. 2004/1051 del 02/12/04, DME punte AFM fatt n. 902555 del 02/11/04 euro 1878 mand pag. 2004/944-945 del 12/11/04, EM System contr di assist fatt n. RVO80804 del 19/10/04 per JSM 5200 e JSM 6400 , Plastotecnica manut straord impianto di riciclo Chivasso euro 6000 fatt. 157/2004 del 3/12/2004 mand pag. 2004/1272 del 22/12/04, Giannone Gabriele impianto elettrico Chivasso fatt. n. 25 del 26/11/04 euro 3384, RS frese fatt. 28/098221 del 20/10/04 euro 190,73 mand pag. 2004/1050 del 02/12/04, Gerra fatt vs 1505 del 21/09/04 euro 153,77 mand pag. 2004/930 del 12/11/04e fatt 1802 del 31/10/04 euro 214 mand pag. 2004/931 del 12/11/04, Panalytical tubo a raggi X fatt n. 40000480 del 16/11/04 euro 2218,80 , Capra mat di sicurez fatt. n. 4573 del 13/12/04 euro 1605,16, Allresist - negative resist, developer, remover. Thinner fatt 412487 del 01/12/2004 euro 833,44, spese post mand pag 2004/830 del 25/10/04 euro 93,70, piccole spese mandato pag 2004/836 del 25/10/04 euro 250,32ed euro 48 mandato pag 2004/837 del 25/10/04, Politeko fatt. n. 479 del 02/12/04 toner euro 445,20 mand pag. 2004/1175 del 16/12/04, Varian fatt. n. 600108592 del 02/12/04 cold cathode gauge tube W/NW 25 KF, Copisistem fatt. n. 4393 del 02/12/04 n.2 alim computer euro 324 mand pag. 2004/1222 del 20/12/04, Ocè Italia SpA fotocopie fatt. n. 4018965 del 31/08/04 mand pag. 2004/959 del 15/11/04, Poliservice stampa n. 3 poster fatt 660 del 30/11/04 euro 75 mand pag. 2004/1246, Politeko canc euro 69,60 mand. pag 2004/1021 del 30/11/04Ocè Italia noleggio euro 936 fatt 3019843 del 31/08/03 mand pag 2003/850 del 29/10/2003, Mondoffice S.r.l cancell euro 378.41 fatt 54/123925 del 24/05/04 mand pag 2004/348 del 24/05/04, Allora art ferram euro 12396 fatt. 150 del 30/04/04 mand pag 2004/454 del 12/07/04, fatt 270 del 15/07/04 mand pag 2004/788 del 15/07/04, fatt 356 del 15/10/04 mand pag 2004/1043 del 02/12/04, Nuova Bertolino art sanit fatt 1010 del 30/07/04 mand pag 2004/941 del 12/11/03, euro 116.63 fatt 1359 mand pag 2004/1109 del 09/12/04, Siem imp elettr fatt 163/04 del 27/09/09 euro 272.40 mand pag 2004/942 del 27/09/04, Scuola Attiva cancell euro 546 fatt 3399 del 15/11/04 mand pag 2004/1042 del 02/12/04, Gianni S.pA manut criogen fatt 7979 del 25/10/04 mand pag 2004/1044 del 12/12/04, axel supporto euro 90 fatt V1207 del 29/10/04 mand pag 2004/1045 del 12/12/04.
INFM Phobos, ADVENT RESEARCH, rame x evaporazione euro 101 fatt 17043 del 20/02/03 mand pag 97 del 06/03/03, GPS, adesivo euro 173,74 fatt 204 del 28/02/03 mand pag 87 del 12/03/03, DHL 83524-DHL 83336 mand pag 250 del 03/07/03 -83675 euro 30,22mand pag 249 del 03/07/03- 7483 701 686 690 euro 46,98mand pag 354 del 08/09/03 -540 7483 712 euro 29,49 mand pag 378 del 01/10/03, PALMAS PIERO euro 163,20 fatt 64 del 18/11/03 mand pag 441 del 02/12/03, COPISISTEM S.A.S., riparazione Pentium III euro 192 fatt 4156 del 27/11/03 mand pag 482 del 16/12/03, MEMC, 1 wafer silicio fatt n. 31495 del 25/11/03 euro 3628,80 mand pag 487 del 16/12/03, MESSER, manutenzione decompressore euro 234 fatt 2043900642 del 14/12/04 euro 234mand pag 243, VITERIE TORINESI (viti,rondelle,dadi) fatt 1186 del 28/11/03 euro 40,56mand pag. 488 del 16/12/03, ALLRESIST - Reagenti fatt 13218d del 19/12/2003 euro 508,80 mand. Pag TP/507 del 05/12/03, RS Components spa componenti elettronici euro 859,45 fatt 27/104784 del 19/11/2003 mand pag 486 del 16/12/03, RS Components spa componenti elettronici euro 262,48 fatt. 27/104578 del 19/11/03 mand pag 486 del 16/12/03, DHL 5407483804-DHL 5407483992 euro 228,55 mand pag 445 del 01/12/03, DHL 5407483981-DHL 5407484003 euro 44,19 mand pag 445 del 01/12/03, SIEM, riparazione impianto elettrico euro 686,4 fatt 191/03 del 05/12/03 mand pag 485 del 16/12/03, DHL 5407483863 euro 16,80

mand pag 478 del 16/12/03, DHL 5407483970-DHL 5407483874 euro 47,52 mand pag 478 del 16/12/03 PANalytical - manutenz euro 1080 fatt 40000349 del 05/08/04 TPSEZEE03 (2003)
 MYCROM litografia euro 180 fatt 12 del 31/01/2003 mand pag 60 del 03/03/03, DHL 338336/DHL 5407483340/483760 euro 185,82mand pag 250 del 03/07/03, DHL 83196 - 303 - 292 30/6/03-7483200 euro 144,34 mand pag 295 del 24/07/03, dhl 5689361425 euro 30,30mand pag 303 del 24/07/03, dhl 756 266 233 euro 147,36 mand pag 354 del 08/09/04
 GPS fatt 795 del 31/07/03 euro 316,84 mand pag 341 del 05/09/03, CUEN, 3 copie libro Fumi euro 35,33 fatt 517 del 08/10/03 mand pag 460 del 03/12/03, dhl n. 5407483734-5407483270 euro 54,88 mand pag 425 del 20/10/03, DHL 5407483826-5407484040 - 5407483830...

9. Pubblicazioni

del responsabile

n°	Pubblicazione
1.	PIRRI C.; M. COCUZZA; S. FERRERO; F.GIORGIS; R.RIZZOLI; P.SCHINA; L.BUSINARO; E. DI FABRIZIO (2003). a-Si:H Based two-dimensional photonic crystals <i>PHYSICA E-LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS & NANOSTRUCTURES</i> vol. 16 pp. 539-542 ISSN: 1386-9477
2.	PIRRI C.; G. BARUCCA; E. BENNICI; C. RICCIARDI; E. TRESSO; F. GIORGIS (2003). New insights on amorphous silicon-nitride microcavities <i>PHYSICA E-LOW-DIMENSIONAL SYSTEMS & NANOSTRUCTURES</i> vol. 16 pp. 591-594 ISSN: 1386-9477

dei partecipanti

1. F.Romanato, L. Businaro, L. Vaccari, S. Cabrini, P. Candeloro, M. De Vittorio, A. Passaseo, M.T.Todaro, R. Cingolani, E. Cattaruzza, G. Battaglin, M. Galli, M. Patrini, C. Andreani, E. Di Fabrizio; 2003; Fabrication of 3D metallic photonic crystals by X-ray lithography; Rivista: MICROELECTRONIC ENGINEERING; Volume: 67-8; pp.: 479
2. V. Ballarini, C. Ricciardi, F. Giorgis, R. C. Lotti, F. Rossi; 2004; Silicon-based microcavities: theory and experiment; Rivista: Sem. Science & Techn.; Volume: 19; pp.: S489

10. Prodotti della Ricerca eseguita

I prodotti più significativi dell'attività sperimentale inerente alla tematica di questo progetto consistono in:

- Strutture 2D: prototipi di guide d'onda planari a cristallo fotonico 2D realizzati su strutture SOI (Silicio amorfo su SiO₂ depositato per PECVD); filtri Fabry-Perot e a cristallo fotonico 2D sono stati implementati su guide d'onda planari a ridge in Nitruro di Silicio sintetizzate dall'Unità di Trento
- Strutture 3D: opali diretti (struttura fcc) a base polistirene e silice con diametro controllato delle nanosfere depositati con tecnica di dip-coating. Le matrici in Silice infiltrati dal gruppo di Firenze con cristalli liquidi hanno mostrato peculiari carattere birfrangente e conseguente switching del gap fotonico indotto dal bias elettrico
- Strutture 3D: opali inversi a base di Ossido di Titanio e a base di Silicio con proprietà ottiche ben correlate con la modellizzazione eseguita dall'Unità di Pavia
- Strutture 3D: Yablonovite metallica ottenuta per litografia X ed infiltrazione elettrochimica

11. Componenti dell'Unità di ricerca che hanno effettivamente partecipato alla ricerca

Personale docente

n°	Cognome	Nome	Qualifica	Facoltà	Dipartimento/Istituto Università	mesi uomo dal modello		mesi uomo effettiv. impegnati		Nota
						I anno	II anno	I anno	II anno	
1.	GIORGIS	Fabrizio	Ricercatore	Facoltà di INGEGNERIA III (Ingegneria dell'Informazione)	Dip. FISICA Politecnico TORINO	3	3	3	3	
2.	ONIDA	Barbara	Ricercatore	Facoltà di INGEGNERIA	Dip. SCIENZA DEI MATERIALI E INGEGNERIA CHIMICA Politecnico TORINO	3	3	3	3	
3.	PIRRI	Candido	Prof. Associato	Facoltà di INGEGNERIA III (Ingegneria dell'Informazione)	Dip. FISICA Politecnico TORINO	5	5	5	5	
4.	ROSSI	Fausto	Prof. Associato	Facoltà di INGEGNERIA	Dip. FISICA Politecnico TORINO	4	3	4	3	
5.	SAVASTA	Salvatore	Ricercatore	Facoltà di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	Dip. FISICA DELLA MATERIA E TECNOL. FIS. AVANZ. Univ. MESSINA	4	3	4	3	

altro personale

n°	Cognome	Nome	Qualifica	Facoltà	Dipartimento/Istituto Università/Ente	mesi uomo effettiv. impegnati		Nota
						I anno	II anno	
1.	BENNICI	Erica	Dottorando di Ricerca		dip. FISICA	9		
2.	PALLAVIDINO	Luca	Dottorando di Ricerca		dip. SCIENZA DEI MATERIALI E INGEGNERIA CHIMICA	10	10	
3.	COJOC	Danut Adrian	Ricercatore		INFIM-TASC Trieste	6	6	
4.	IOTTI	Rita	Ricercatore		INFIM-UdR Torino Politecnico	7	7	
5.	ROMANATO	Filippo	Ricercatore		INFIM-TASC Trieste	6	6	
6.	COCUZZA	Matteo	Ricercatore		INFIM-UdR Torino Politecnico	3	4	
7.	MANDRACCI	Pietro	Assegnista di Ricerca		dip. FISICA	11	4	
8.	FERRERO	Sergio	Assegnista di Ricerca		dip. FISICA	4		
9.	RICCIARDI	Carlo	Dottorando di Ricerca		dip. FISICA	8		
10.	CICERO	Giancarlo	Assegnista di Ricerca		dip. FISICA	2	1	

personale a contratto

n°	Cognome	Nome	Qualifica	Tipologia di contratto	Inizio del	Durata del	Costo in	mesi uomo	Nota

					contratto	contratto in mesi	Euro	I anno	II anno	
1.	MANDRACCI	Pietro	Assegnista di Ricerca	Assegno di Ricerca	01/01/2003	11	11.298	11		Ricercatore Universitario dal 1/1/2004
2.	RICCIARDI	Carlo	Assegnista di Ricerca	Assegno di Ricerca	01/01/2004	2	2.265		2	Dottorando di Ricerca fino al 31/12/2003 a tuttoggi Borsista della fondazione CRT
3.	QUAGLIO	Marzia	Borsista post- laurea	Contratto di Ricerca	03/05/2004	3	3.292		3	
4.	PERRONE	Denis	Borsista post- laurea	Borsa di studio	22/05/2004	4	6.727		4	
5.	PERRONE	Denis	Borsista post- laurea	Contratto di Ricerca	26/11/2003	2	2.360	2		
6.	PERRONE	Denis	Borsista post- laurea	Contratto di Ricerca	01/03/2004	3	2.158		3	
TOTALE							28.100			

12. Note relative ai componenti (punto 11)

13. Risorse umane complessivamente ed effettivamente impegnate

	(mesi uomo)		
	I anno	II anno	TOTALE
da personale universitario	19	17	36
altro personale	66	38	104
personale a contratto	13	12	25

14. Dati complessivi relativi al programma

	(numero)
partecipazioni a convegni:	
in Italia	2
all'estero	5
articoli pertinenti pubblicati:	
su riviste italiane con referee	
su riviste straniere con referee	7
su altre riviste italiane	
su altre riviste straniere	
comunicazioni a convegni/congressi internazionali	2
comunicazioni a convegni/congressi nazionali	1
rapporti interni	
brevetti depositati	

Tabella riassuntiva sulla ripartizione delle spese

Voce di spesa	Spese indicate nella rideterminazione di base	Spese rimodulate
Materiale inventariabile	47.500	42.498
Grandi Attrezzature	0	0
Materiale di consumo	81.000	92.105
Spese per calcolo ed elaborazione dati	1.500	0
personale a contratto	28.100	28.100

Servizi esterni	0	0
Missioni	10.000	6.334
Pubblicazioni	1.000	0
Partecipazione / Organizzazione convegni	3.500	3.563
Altro	0	0
TOTALE	172.600	172.600

15. Tabella delle spese sostenute

Voce di spesa	Spese rimodulate	Pagato		Residuo da saldare (già fatturato)	Impegnato limitatamente a Pubblicazioni, Convegni e Congressi per presentazione dei risultati finali della ricerca *	Totale spese sostenute	Descrizione (elementi contabili a giustificazione) (max 2000 Car. per ogni voce)
		I anno	II anno				
Materiale inventariabile	42.498	42.498				42.498	Elettrorava - LPCVD euro 42.498 fatt. 233 del 16/12/02 mand pag. 2003/198
Grandi Attrezzature	0					0	
Materiale di consumo	92.105	3.759	88.346			92.105	Le spese di consumo hanno principalmente riguardato: materiali per il processo, deposizione e caratterizzazione [gas quali CF4, SF6, SiCl4, SiH4, NH3, CH4, C2H2, H2, Etossido di Ti, He liquido, resist per e-beam, reagenti per la pulizia dei substrati e lo sviluppo litografico, manutenzione camere pulite classe 100 e 1000 (contributo parziale), manutenzione sistemi di litografia elettronica, LPCVD e plasma-etching (RIE). N.B. Il dettaglio dei costi è elencato in una legenda a parte in coda alla relazione scientifica (punto 8) per mancanza di spazio

							tipografico.
Spese per calcolo ed elaborazione dati	0	0				0	
personale a contratto	28.100	14.036	14.064			28.100	<p>Assegno di Ricerca per dott. P. Mandracci (11 mesi dal 1/1/2003) 11298 Euro</p> <p>Assegno di Ricerca per Dott. C. Ricciardi (2 mesi dal 1/1/2004) 2265 Euro</p> <p>Contratto di Ricerca per Dott.ssa M. Quaglio (5 mesi dal 3/5/2004) 3292 Euro</p> <p>Contratto di Ricerca per Dott. D. Perrone (7 mesi) 4518 Euro</p> <p>Borsa di Studio per Dott. D. Perrone (4 mesi dal 22/5/2004) 6727 Euro</p>
Servizi esterni	0					0	
Missioni	6.334	2.053	4.281			6.334	<p>Giorgis Pavia 14/02/04 euro 84,64 mand pag. 2003/1037 del 09/12/03, Mandracci Congresso Film sottili a Badajoz euro 144,98 mand pag. 2003/1153 del 09/12/03, Pirri Leone euro 36,50 spese mand pag. 2004/246 del 26/04/04, Pirri e Cicero Parma , Mandracci Badajoz euro 395,78 mand pag. 2004/100 del 24/02/04, Pirri Trento euro 150 mand pag. 2003/1029 del 09/12/03, Pirri Brescia mand pag. 2004/253 del 26/04/04, Pirri Brescia dicembre 2003 euro 98,22 mand pag.2004/88</p>

						<p>del 18/02/04, Cicero Parma 09/12/03 euro 35,55 mand pag.2004/23 del 05/02/04, Cicero, Cocuzza, Pirri Brescia euro 159,13 mand pag.2004/231 del 16/04/04, Pirri Trento euro 68,91 mand pag. 2004/29 del 05/02/04, Pirri Brescia euro 25,40 mand pag. 2004/247 del 26/04/04, Giorgis-Pallavidino - Celasco-Pirri Trieste 29/02/04- Pirri Brescia 23/02 - Cicero Modena 23/02- Pirri Brescia 05/02 euro 904.42 mand pag.2004/357 del 24/05/04,e . 2004/240-241-48 del 26/04/04, Cicero Firenze - Brescia 26/27-02-04 euro 155,87 mand pag. 2004/252 del 26/04/04, , Pirri Parma 29/09/03 euro 22 mand pag. 2004/249 del 26/04/04, Celasco Cargese (Corsica) euro 74,39 mand pag. 2004/618 del 29/07/04, Pirri Piacenza 26/04/04 euro 48,10 mand pag. 2004/583 del 28/07/04,Savasta Torino euro 140.55 mand pag. 2004/337 del 19/05/04 e. 2004/321 del 14/05/04, Kaplan euro 434,08 mand pag. 2004/319 del 14/05/04, Giorgis + CelascoTrieste euro 238.04 mand pag. 2004/594 del 28/07/04 e 2004/443 del 27/05/04 e 2004/609 del 29/07/04, Celasco Dortmund euro 567,80 mand pag. 2004/461 del 13/07/04 2004/640</p>
--	--	--	--	--	--	--

							del 07/09/04 e 2004/886 del 05/11/04, Pirri Gorgis Milano 11/06/04 euro 156.62 mand pag. 2004/741 del 24/09/04 ed. 2004/600 del 29/07/04e 2004/599 del 29/07/04, Ricciardi Bologna dal 31/08/04 al 04/09/04 euro 321,27 mand pag. 2004/838 del 26/10/04, Congresso lotti R. in USA marzo 2003 euro 1223,47 mand pag. 2003/1027 del 09/12/03, INFM Phobos GIORGIS Bruxelles euro 961.79 mand pag 472 del 04/12/03 e 503 del 19/12/03
Pubblicazioni	0	0				0	
Partecipazione / Organizzazione convegni	3.563	2.708	855			3.563	iscrizione convegno di R. lotti in USA marzo 2003 euro 474,13 mand pag. 2003/1026 del 09/12/03, Mandracci Badajoz e Scaltrito iscriz Lione euro 820,78 mand pag. 2003/863 del 03/11/03, Iscr Ferrero e Pirri Congresso Lione euro 1413,00 mand pag. 2003/907 del 19/11/03, Iscriz congr di B. Onida euro 854,80 mand pag. 2004/666 del 13/09/04
Altro	0					0	
Impegnato * limitatamente a Pubblicazioni, Convegni e Congressi per presentazione dei risultati finali della ricerca							
TOTALE	172.600	65.054	107.546	0	0	172.600	

Descrizione dettagliata della cifra impegnata.

Voce di spesa	Impegnato	Estremi dell'impegno		Descrizione
		Data	Protocollo	
Pubblicazione dei risultati finali della ricerca				
Convegni e congressi per la presentazione dei risultati finali della ricerca				
TOTALE	0			

Per ogni cifra impegnata ci deve essere una descrizione di almeno 100 caratteri

Si ricorda che le cifre impegnate dovranno essere spese e rendicontate entro SETTEMBRE 2005

Totale spese sostenute

	(in Euro)
Totale finanziamento assegnato	172.600
Pagato	172.600
Residuo da saldare	0
Impegnato	0
Totale spese sostenute	172.600
Residuo	0

(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 17/01/2005 19:15

Firma