

MINISTERO DELL'ISTRUZIONE DELL'UNIVERSITÀ E DELLA RICERCA

RELAZIONE ANNUALE**COORDINATORE**

Anno 2004 - prot. 2004023725

Dati riassuntivi del progetto

Coordinatore	ANDREANI Lucio
Università	Università degli Studi di PAVIA
Titolo del Programma	Cristalli fotonici a base di Silicio per il controllo della propagazione e dell'emissione di luce
Costo originale del Progetto	590.000 €
Quota Cofinanziamento MIUR	250.000 €
Quota Cofinanziamento ATENEO	107.300 €
Totale finanziamento	357.300 €
Fondi complessivi utilizzati nel primo anno	151.853 €

1. Obiettivo della Ricerca

Questo progetto si propone di utilizzare cristalli fotonici di varie dimensionalità a base di Silicio, realizzati dai gruppi proponenti, per studiare vari effetti legati al controllo su scala sub-micrometrica della propagazione e della emissione di luce. Le tecnologie di fabbricazione disponibili combinano crescita per deposizione da fase vapore e per sedimentazione in soluzione colloidale, litografia elettronica e a raggi X, attacco chimico umido (elettrochimico) e a secco (via plasma e via fasci ionici). Queste tecniche permettono di produrre sistemi mono-dimensionali (Silicio microporoso), bi-dimensionali (Silicio macroporoso, guide d'onda planari) e tri-dimensionali (opali, Yablonovite). Inoltre i materiali saranno infiltrati globalmente e localmente con mezzi attivi. Saranno studiati in particolare i seguenti sistemi e fenomeni:

- 1) Cristalli fotonici 1D di Silicio poroso: multistrati e microcavità accoppiate.
 - Si determinerà la dispersione della fase e il rallentamento della velocità di gruppo in corrispondenza delle risonanze di band edge e, per le microcavità accoppiate, nella minibanda risultante dall'accoppiamento dei modi delle singole cavità.
 - Si effettueranno misure risolte in tempo della propagazione di impulsi in questi sistemi.
- 2) Cristalli fotonici 2D e in guida d'onda planare: Silicio macroporoso, Silicio su Isolante, Nitrato di Silicio.
 - Si determinerà la dispersione dei modi fotonici per mezzo di riflettanza di risolta in angolo e, per i modi guidati sotto alla linea di luce, per mezzo di riflettanza totale attenuata. Con la stessa tecnica saranno misurate le energie dei modi associati a difetti lineare (guide d'onda fotoniche) e puntuali (nano-cavità).
 - Si misurerà la trasmissione nel piano delle guide d'onda fotoniche contenenti difetti lineari e strutture più complesse.
 - Si studieranno in particolare gli effetti di tuning ottenuto mediante foto-eccitazione. Si misurerà inoltre la

generazione di terza armonica con effetti di risonanza sui modi fotonici.

- Si effettueranno misure di emissione da cristalli fotonici periodici e da nano-cavità fotoniche infiltrate con mezzi attivi quali ioni Erblio e coloranti laser.

3) Cristalli fotonici 3D: opali e opali inversi, Yablonovite.

- Sarà misurata la dispersione delle bande fotoniche nella direzione di propagazione della luce (mediante interferometria) e nel piano parallelo alla superficie del campione (per mezzo di riflettanza risolta in angolo).

- Saranno studiati i fenomeni legati al disordine mediante la propagazione e diffusione di luce risolte in tempo e tramite la retrodiffusione coerente.

- Saranno realizzati effetti di switching via campo magnetico di opali infiltrati con cristalli liquidi.

Queste attività sperimentali saranno affiancate da uno studio teorico delle bande fotoniche, della risposta ottica e dell'emissione spontanea nei cristalli fotonici allo studio. Verranno studiati in particolare i difetti lineari e le nano-cavità, calcolando le perdite di propagazione in presenza di disordine di fabbricazione.

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

1) Cristalli fotonici 1D di Silicio poroso: multistrati e microcavità accoppiate.

Sono state realizzate presso l'unità di Trento le strutture 1D, composte da multistrati di silicio poroso, in cui il reticolo dielettrico è ottenuto variando la porosità dei singoli strati e, di conseguenza, il loro indice di rifrazione. Le strutture fabbricate hanno una struttura estremamente complessa e si pongono come stato dell'arte per quanto riguarda la realizzazione di multistrati silicio poroso. Grazie alla accurata modellizzazione teorica delle strutture ed alla ottima qualità dei campioni prodotti, è stato possibile misurare molti effetti legati alla presenza del reticolo fotonico. In particolare:

1a) Sono state realizzate cavità ottiche accoppiate per lo studio del rallentamento della luce (slow wave). Le strutture con 5 cavità accoppiate sono state ottimizzate mediante una procedura di apodizzazione (consistente nel modificare lo spessore degli specchi di Bragg esterni) al fine di massimizzare la larghezza della mini-banda e di minimizzare la velocità di gruppo dell'impulso all'interno della mini-banda. I campioni, dopo una prima caratterizzazione della trasmissione a Trento, sono stati misurati a Pavia mediante interferometria in luce bianca e a Firenze mediante trasmissione risolta in tempo. Entrambe le misure hanno fornito evidenza di un rallentamento della luce di un fattore superiore a cinque, pressoché costante su una ampia banda spettrale e quindi senza distorsione dell'impulso.

1b) Sono stati realizzati sistemi intenzionalmente disordinati, al fine di dimostrare la presenza di "stati di necklace", ossia risonanze di trasmissione multiple in un sistema caratterizzato da localizzazione di Anderson. I campioni, dopo la prima caratterizzazione a Trento, sono stati misurati a Firenze per mezzo di trasmissione risolta in tempo ed è stata dimostrata la presenza di risonanze di trasmissione associate a stati di necklace. Inoltre è stata determinata la lunghezza di localizzazione attraverso la dipendenza della trasmissione dallo spessore. Successivamente i campioni sono stati misurati a Pavia per mezzo di interferometria in luce bianca ed è stato mostrato che ogni stato di necklace con molteplicità n produce un salto di fase di $n \cdot \pi$, con una forma di riga che corrisponde al prodotto di n lorentziane. Tutti questi risultati sono di assoluta novità rispetto allo stato dell'arte internazionale.

1c) In multistrati formati da 12 cavità accoppiate, è stato caratterizzato il tunnelling Zener fotonico, tramite misure di trasmissione effettuate a Trento e risolte in tempo svolte a Firenze. Inoltre sono state effettuate misure di tunnelling Zener dinamico, facendo fluire del gas all'interno dei cristalli fotonici, in questo modo la variazione di indice di rifrazione data dalla condensazione del gas nei nanopori, produce uno spostamento della posizione dei picchi di trasmissione. Queste strutture possono essere utilizzate come sensori. E' inoltre stato svolto un lavoro teorico teso a dimostrare la possibilità di utilizzare effetti

dinamici delle strutture fotoniche per variare in maniera controllata l'energia di un impulso elettromagnetico ("optical lifter").

2) Cristalli fotonici 2D e in guida d'onda planare: Silicio macroporoso, Silicio su Isolante, Nitruro di Silicio.

2a) Cristalli fotonici bidimensionali a base di silicio sono stati realizzati mediante litografia a fascio elettronico e attacco chimico a ioni reattivi a partire da wafer di Silicio su Isolante (SOI). Inoltre sono state realizzate membrane sospese di silicio mediante rimozione dello strato sottostante di ossido. Questi sistemi costituiscono guide d'onda fotoniche, nelle quali la luce è confinata verticalmente dalla riflessione totale all'interno della guida d'onda planare. Le misure più innovative sono state effettuate su guide d'onda lineari nel reticolo triangolare su membrana. Presso l'unità di Pavia sono state effettuate misure di riflettanza totale attenuata (ATR) mediante l'uso di un prisma di Silicio: il prisma si comporta come una lente, focalizzando il fascio e permettendo di misurare singoli difetti lineari su aree molto piccole. Sono state studiate guide d'onda lineari con larghezza di canale variabile, ossia guide di tipo W1.0, W1.2 e W1.5. Variando l'orientazione del campione rispetto al prisma è stato possibile misurare la dispersione dei modi di difetto lineare di parità opposta rispetto ad un piano verticale, e quindi di determinare la regione di propagazione guidata a singolo modo sotto alla linea di luce. Si è dimostrato che le guide W1.0 e W1.5 possiedono una regione a singolo modo, sotto alla linea di luce (quindi con perdite solo estrinseche dovute al disordine di fabbricazione) ed inoltre, nel caso della guida W1.5, con velocità di gruppo elevata: quindi la guida W1.5 risulta la più promettente per ottenere perdite di propagazione ridotte in membrane di Silicio. Questi risultati sono fortemente innovativi.

2b) Sono state prodotte presso l'unità di Trento guide d'onda di nitruro di silicio in ossido. Di queste guide sono state misurate le perdite di trasmissione con la tecnica di cut-back su campioni clivati di lunghezza variabile, sia a Trento (per determinate lunghezze d'onda) che a Pavia (su ampio spettro con luce bianca). In particolare si è mostrato che le perdite di propagazione sono molto basse in un ampio intervallo spettrale vicino alla soglia del visibile. Inoltre sono state realizzate presso il gruppo LILIT-TASC di Trieste (accorpato all'unità di Torino) delle strutture fotoniche monodimensionali, periodiche e contenenti cavità, utilizzando il nuovo sistema di focused-ion beam. Tali strutture sono state misurate mediante trasmissione in guida d'onda a Trento e a Pavia. Le misure hanno evidenziato la presenza di gap fotonici fino al quarto ordine in una ampia regione spettrale dal vicino infrarosso fino a tutto lo spettro visibile, e la presenza di modi di difetto all'interno dei gap. Le misure sono in ottimo accordo con i calcoli teorici di bande fotoniche in guida d'onda e con le simulazioni della trasmissione. Questi risultati indicano chiaramente l'interesse delle guide d'onda fotoniche di nitruro di silicio per la realizzazione di dispositivi fotonici nel vicino IR e nel visibile.

2c) Presso l'unità di Torino sono state realizzate guide d'onda planari in Nitruro di Silicio sottostechiometrico: $a\text{-Si}(1-x)\text{N}(x)\text{:H}$, $x=0.5$, avente elevata efficienza di luminescenza a temperatura ambiente per studi di propagazione guidata con sorgente di emissione intrinseca. I primi prototipi di guide a ridge sono stati realizzati depositando bi-strati $\text{SiO}_2/a\text{-SiN:H}$ con tecnica di Plasma Enhanced CVD e successivo ottenimento del canale guidante in $a\text{-SiN:H}$ utilizzando litografia ottica e Reactive Ion Etching (RIE). Misure di trasmissione preliminari sono state effettuate a Pavia. Partendo da bistrati $\text{SiO}_2/a\text{-SiN:H}$, utilizzando processi di litografia a fascio elettronico e RIE sono state realizzate strutture a cristallo fotonico 2D con guide d'onda a difetto lineare. L'intento per il secondo anno di attività è quello di integrare guide a ridge taperate all'ingresso e all'uscita delle guide fotoniche, oltre che realizzare filtri a nanocavità inserite nelle guide luminescenti utilizzando la tecnica di Focus Ion Beam (FIB) disponibile presso il gruppo LILIT.

2d) Infiltrazione di materiali attivi: presso l'unità di Firenze sono stati infiltrati localmente cristalli fotonici bidimensionali (prodotti a Trento) con cristalli liquidi e coloranti laser. E' stata realizzata una guida d'onda a S per mezzo di questa tecnica di infiltrazione locale controllata. Inoltre sono state infiltrate localmente cavità fotoniche (progettate a Pavia), consistenti di un foro grande in un cristallo fotonico 2D di fori più piccoli. Sono stati effettuati i primi esperimenti di emissione da coloranti laser infiltrati e il segnale di emissione è stato rilevato da un microscopio confocale e un sistema di near-field, operanti simultaneamente. La tecnica e i risultati sono fortemente innovativi a livello internazionale. Inoltre presso l'unità di Trento si è messo a punto il processo di formazione di matrice vetrosa

contenente ioni Erblio e si è dimostrato l'accoppiamento fra tali ioni e nanoparticelle di silicio presenti nel dielettrico. Sono stati infiltrati campioni a multistrato in silicio poroso, in configurazione di guida d'onda planare, con diversi coloranti organici (quali: Nile blu e R6G). Questi campioni sono stati ampiamente caratterizzati dal punto di vista delle loro proprietà ottiche, eseguendo misure di perdite di propagazione in guide, fotoluminescenza e misure di guadagno ottico. In particolare è stata caratterizzata la fotoluminescenza dei campioni impregnati con uno o più tipi di colorante, evidenziando in entrambi i casi, un comportamento più che lineare per quanto riguarda l'intensità del segnale di luminescenza al crescere della potenza di eccitazione (guadagno ottico, g). La verifica dell'esistenza di emissione stimolata è stata effettuata attraverso misure di spettroscopia VSL, in cui si è evidenziato un valore di g pari alle perdite di propagazione nelle guide planari.

3) Cristalli fotonici 3D: opali e opali inversi, Yablonovite.

3a) Nell'ambito della realizzazione di strutture 3D, presso l'unità di Torino sono stati ottimizzati i processi di sintesi di nanosferule di Silice mediante idrolisi di tetra-etil-orto-silicato (TEOS). L'attuale procedura consente di realizzare sfere con diametri controllabili da 170 a 600 nm e dispersione del diametro inferiore al 5%, nei casi ottimali attorno al 3%. Opali diretti a struttura fcc sono stati realizzati sia con tecnica di dip-coating (consistente nella deposizione dell'opale su substrato inserito inclinato nella soluzione colloidale contenente le nanosfere, a temperatura controllata, spessore ottenibile 1-20 micron) che con sedimentazione naturale (deposizione ottenuta sul fondo del baker contenente la soluzione colloidale, spessore ottenibile diverse centinaia di micron). La buona qualità delle strutture a simmetria fcc è stata evidenziata particolarmente per i campioni ottenuti da dip-coating che presentano poli-domini con omogenea orientazione preferenziale. Le caratteristiche morfologiche sono state sondate con microscopie SEM ed AFM. Su questi opali sono state effettuate a Pavia misure di riflettanza ad angolo variabile che hanno dimostrato la presenza del picco di Bragg, la sua dispersione in funzione dell'angolo di incidenza, e la presenza di strutture associate a fenomeni di diffrazione ad alti angoli. Inoltre sono state effettuate misure di fase su opali artificiali di polistirene. Per mezzo di una accurata analisi della dipendenza della fase dalla frequenza è stato possibile ottenere la fase assoluta, ossia una funzione continua della frequenza che si annulla a frequenza zero: partendo dalla fase assoluta si è poi ottenuto l'indice di rifrazione effettivo, senza bisogno di fare ipotesi di mezzo omogeneo. Dalla derivata della fase è stata ottenuta la velocità di gruppo, che ha mostrato effetti di rallentamento al band edge e velocità superluminali all'interno del gap fotonico. Sono stati infine realizzati opali inversi di Silicio infiltrando gli opali in Silice con Silicio amorfo utilizzando un reattore di crescita CVD, con rimozione del template in Silice ottenuta con etching umido in HF. Anche questi opali sono stati caratterizzati mediante SEM, AFM e riflettanza ad angolo variabile.

3b) Ai fini di analizzare l'influenza della struttura fotonica sull'emissione spontanea, presso l'unità di Torino diversi opali sono stati infiltrati con coloranti organici con emissione nel visibile-vicino IR (Cianine e Ossazine). Alternative strutture sono state realizzate con opali cresciuti su film sottili di a-SiN:H luminescente. L'inibizione dell'emissione dei coloranti e dei film di Nitrato di Silicio in direzione normale rispetto alla superficie (111) degli opali è stata verificata in corrispondenza degli pseudo-gap (punto critico L nella prima zona di Brillouin associata alla struttura fcc). Inoltre gli opali prodotti a Torino sono stati infiltrati presso l'unità di Firenze con il cristallo liquido E7 (Merck). Questo cristallo liquido è nematico nel range di temperature fra -10 e 60 gradi Celsius, e in questo regime è birifrangente con indice ordinario e straordinario rispettivamente di $n(o)=1.53$ e $n(e)=1.75$. I campioni sono stati misurati mediante spettroscopia di riflettanza ad angolo variabile. La presenza del cristallo liquido sposta la stop-band verso energie minori, come ci si aspetta. Inoltre nei campioni cresciuti per dip-coating si è trovata una differenza di 32 nm nei centri delle stop band per le due polarizzazioni, che indica un effetto di birifrangenza. Questo effetto è causato da un allineamento spontaneo del cristallo liquido nella direzione della crescita, che è parallela al vetrino e perpendicolare alla [111]. L'anisotropia, indotta dalla sintesi per dip-coating, produce un allineamento spontaneo del cristallo liquido e offre grandi vantaggi per lo switching del band gap fotonico. Si è mostrato che un campo elettrico applicato può modificare l'anisotropia allineando le molecole di cristallo liquido da parallele a perpendicolari rispetto al piano del campione. Ciò apre la possibilità di uno switching elettrico del gap fotonico. In vista del secondo anno del progetto, si è deciso di investigare a fondo questa possibilità per via dei suoi vantaggi rispetto allo switching con campo magnetico.

4) Attività teoriche

4a) Presso l'unità di Pavia sono stati effettuati calcoli di bande fotoniche in sistemi di varia dimensionalità, in particolare su guide d'onda fotoniche 1D e 2D, allo scopo sia di design che di interpretazione delle misure. Sono stati studiati sia i reticoli 1D e cavità in guide fotoniche di Nitruro di Silicio, sia le guide lineari W1.0-W1.5 in membrane di Silicio. I risultati sono in ottimo accordo con gli esperimenti. Inoltre sono stati effettuati design di guide lineari e nanocavità per la successiva realizzazione in Silicio su Isolante e in membrane di Silicio.

4bb) Riguardo alle proprietà ottiche, lo sviluppo più interessante ha riguardato l'applicazione del metodo della matrice di scattering agli opali. Poiché il metodo si applica a sistemi che si possono suddividere in strati omogenei lungo una direzione (z), nel caso degli opali le sfere sono state rappresentate con cilindri orientati lungo la direzione perpendicolare alla superficie, che è solitamente la [111]. Sono stati studiati modelli a uno, tre e cinque cilindri ed in tutti questi casi sono state trovate le condizioni ottimali perché la struttura fcc con cilindri riproduca le bande fotoniche dell'opale di sfere. Successivamente sono state calcolate le proprietà ottiche: riflessione, trasmissione, fase di trasmissione, diffrazione. Ne risulta un metodo vettoriale per il calcolo di tutte le proprietà ottiche degli opali nelle regioni di bassa e alta energia, che è superiore a tutti gli altri metodi attualmente disponibili. In particolare è stato possibile interpretare le misure di fase nella regione a bassa energia, effettuate a Pavia, e le misure di trasmissione ad alta energia effettuate da altri gruppi.

4c) Un'altra linea teorica innovativa riguarda le perdite di propagazione in difetti lineari e fattori Q in nano-cavità, anche con effetti di disordine dovuto a difetti di fabbricazione. E' stato effettuato uno studio sistematico degli effetti di disordine in guide lineari con larghezza di canale variabile, sia su SOI che su membrane di Silicio, mediante il metodo di espansione nella base dei modi guidati e trattando la modulazione dielettrica dovuta al disordine in teoria delle perturbazioni. E' stato mostrato che la guide di tipo W1.5 ha una banda con perdite di propagazione ridotte di quasi un ordine di grandezza rispetto alla guida W1.0: la banda di alta trasmissione ha una ampiezza confrontabile nei due tipi di guida. Inoltre sono state confrontate le perdite di propagazione dovute al disordine nelle guide d'onda fotoniche con quelle nelle guide d'onda convenzionali (Silicon wires) e sono stati trovati risultati confrontabili nei due casi. Un metodo simile è stato applicato anche allo studio degli effetti di disordine sui fattori Q di nanocavità di tipo L3 (tre fori mancanti nel reticolo triangolare) in funzione dello spostamento dei buchi adiacenti. E' stato mostrato che il disordine riduce notevolmente gli elevati fattori Q previsti dalla teoria per il sistema ideale.

Tutte queste attività teoriche e sperimentali hanno condotto a vari risultati innovativi e che in molti casi vanno oltre gli obiettivi previsti dal progetto. Inoltre esse hanno dato origine a diverse pubblicazioni comuni e presentazioni su invito, altre che allo sviluppo di strumentazione e all'addestramento di giovani ricercatori, come descritto in dettaglio nelle relazioni delle singole unità.

2.2 Problemi

La fabbricazione delle strutture bidimensionali in silicio macroporoso si è rivelata molto più complessa di quanto ipotizzato inizialmente. Sono state riscontrate diverse difficoltà nella messa a punto della litografia a fascio elettronico, necessaria a definire le strutture submicrometriche. Al momento il setup litografico funziona adeguatamente ed è in grado di raggiungere le risoluzioni necessarie alla realizzazione di reticoli micro-fotonici con il gap fondamentale ad 1.55 micron.

In secondo luogo sono sorti dei problemi inaspettati per quanto riguarda la qualità delle maschere dielettriche necessarie ad iniziare selettivamente l'attacco elettrochimico nei soli punti ove si vogliono crescere i pori. In particolare le maschere in nitruro depositate per LPCVD hanno mostrato una bassa adesione al substrato di silicio, fatto questo che induce una delaminazione del dielettrico durante l'attacco elettrochimico, con conseguente perdita del controllo sulla nucleazione dei pori. Al momento si stanno testando fette di silicio ricoperte da uno strato di nitruro a bassissimo stress, depositate dall'Università del Minnesota per PECVD.

3. Rendiconto delle attività presso le sedi partecipanti

n°	Responsabile	Università	Materiale inventariabile	Grandi Attrezzature	Materiale di consumo	Spese per calcolo ed elaborazione dati	Personale a contratto (escluse le borse di dottorato)	Dottorati di ricerca a carico del PRIN 2004	Servizi esterni	Missioni	Pubbli
1.	ANDREANI Lucio	Università degli Studi di PAVIA	6.348	0	11.539	0	14.793	0	1.207	5.744	
2.	GIORGIS Fabrizio	Politecnico di TORINO	8.944	0	1.546	0	6.138	0	0	2.926	
3.	PAVESI Lorenzo	Università degli Studi di TRENTO	10.240	0	13.594	0	29.586	0	0	6.539	
4.	COLOCCI Marcello	Università degli Studi di FIRENZE	3.814	0	2.002	0	18.148	0	0	1.803	
TOTALE			29.346	0	28.681	0	68.665	0	1.207	17.012	

4. Obiettivi per il secondo anno del programma

Gli obiettivi riguardanti i cristalli fotonici bidimensionali di silicio poroso sono da considerarsi a rischio, per via dei problemi di attacco chimico nel processo di apertura della maschera di nitrato, descritti nel punto precedente. Quindi fra i sistemi bidimensionali si è scelto di concentrarsi sulle guide d'onda di SOI, membrane di Silicio e nitrato di Silicio. Fra i sistemi tridimensionali, i notevoli progressi di fabbricazione e gli ottimi risultati fisici ottenuti sugli opali indicano che tali sistemi sono più promettenti rispetto alle strutture 3D di tipo Yablonovite. Fatti salvi questi punti, tutti gli altri obiettivi dell'intero progetto sono confermati e, in alcuni casi, già superati.

Data 14/01/2006 18:33

RELAZIONE ANNUALE

RESPONSABILE UNITÀ DI RICERCA

Anno 2004 - prot. 2004023725_001

Responsabile Scientifico dell'Unità di Ricerca:	ANDREANI Lucio
Università	Università degli Studi di PAVIA
Quota Cofinanziamento MIUR	87.500 €
Quota Cofinanziamento ATENEO	37.500 €
Totale finanziamento	125.000 €

Illustrazione dell'attività svolta

Le attività dell'Unità di Pavia hanno riguardato due aspetti principali:

- 1) studio sperimentale della propagazione di luce in cristalli fotonici;
- 2) descrizione teorica delle bande fotoniche e delle proprietà ottiche.

1a) Interferometria

Sono state effettuate misure di fase su multistrati di Silicio poroso prodotti a Trento, sia di tipo ordinato (microcavità accoppiate per effetti di slow wave) che di tipo intenzionalmente disordinato (per stati di necklace). Sul primo tipo di campioni è stata dimostrata la presenza di una banda con velocità di gruppo ridotta di circa un fattore cinque: i campioni sono stati inviati successivamente a Firenze dove sono state effettuate misure risolte in tempo. Invece sui campioni intenzionalmente disordinati le misure di fase hanno evidenziato la presenza di stati di necklace multipli, in cui il salto di fase è un multiplo intero di π . Entrambi i risultati sono innovativi e in corso di pubblicazione.

Inoltre sono state effettuate misure di fase su cristalli fotonici 3D (opali artificiali di polistirene). Per mezzo di una accurata analisi della dipendenza della fase dalla frequenza è stato possibile ottenere la fase assoluta, ossia una funzione continua della frequenza che si annulla a frequenza zero: partendo dalla fase assoluta si è poi ottenuto l'indice di rifrazione effettivo, senza bisogno di fare ipotesi di mezzo omogeneo. Dalla derivata della fase è stata ottenuta la velocità di gruppo, che ha mostrato effetti di rallentamento al band edge e velocità superluminali all'interno del gap fotonico. I risultati sono in corso di pubblicazione.

1b) Riflettanza risolta in angolo, normale e attenuata

Le misure più innovative sono state effettuate su guide d'onda lineari nel reticolo triangolare, realizzate in membrane sospese di silicio. Sono state effettuate misure di riflettanza totale attenuata (ATR) mediante l'uso di un prisma di Silicio, su strutture di dimensione 100x20 micron: il prisma si comporta come una lente, focalizzando il fascio e permettendo di misurare singoli difetti lineari su aree molto piccole. Sono state studiate guide d'onda lineari con larghezza di canale variabile, ossia guide di tipo W1.0, W1.2 e W1.5. Variando l'orientazione del campione rispetto al prisma è stato possibile misurare la dispersione dei modi di difetto lineare di parità opposta rispetto ad un piano verticale, e quindi di determinare la regione di propagazione guidata a singolo modo sotto alla linea di luce. Si è dimostrato che le guide W1.0 e W1.5 possiedono una regione a singolo modo, sotto alla linea di luce (quindi con perdite solo estrinseche dovute al disordine di fabbricazione) ed inoltre, nel caso della guida W1.5, con velocità di gruppo elevata: quindi la guida W1.5 risulta la più promettente per ottenere perdite di propagazione ridotte in membrane di Silicio. I risultati sono stati pubblicati su Phys. Rev. B.

1c) Tramissione in guida d'onda

Sono state misurate guide d'onda di Nitruro di Silicio prodotte a Trento e a Torino, sia non patternate che patternate con reticoli monodimensionali. Le misure sulle guide non patternate, eseguite con il metodo di cut-back su campioni clivati di lunghezza variabile, hanno permesso di determinare le perdite di propagazione assolute in un ampio intervallo spettrale dal vicino IR fino a tutto il visibile. Le misure su campioni patternati con reticoli 1D, sia periodici che contenenti cavità, hanno evidenziato la presenza di gap fotonici fino al quarto ordine e anche l'esistenza di modi di difetto nel gap fotonico. I risultati sono stati pubblicati su Appl. Phys. Lett.

1d) Tuning, switching, ottica non lineare

Sono state effettuate varie misure di generazione di terza armonica su cristalli fotonici di Silicio su isolante, che hanno evidenziato la presenza di effetti di risonanza quando il fascio di pompa ha la stessa frequenza e vettore d'onda di un modo quasi-guidato. I risultati sono stati pubblicati su Appl. Phys. B.

E' stato implementato un set-up per la misura della trasmissione utilizzando un laser accordabile da 1.63 a 1.35 micron, che sarà perfezionato nel corso del secondo anno per evidenziare effetti di tuning e switching delle bande fotoniche e della trasmissione. Il set-up deve essere completato con un laser impulsato di pompa, che sarà acquisito e installato nel secondo anno del progetto.

1e) Altre attività sperimentali:

E' stato sviluppato un set-up per la misura della luminescenza a temperature ambiente da guide d'onda fotoniche attive. Il sistema si presta alla misura della luminescenza emessa sia in guida d'onda che verticalmente. Il set-up è attualmente testato su guide d'onda luminescenti di Nitruro di Silicio prodotte a Torino.

2a) Bande fotoniche

Sono stati effettuati calcoli di bande fotoniche in sistemi di varia dimensionalità, in particolare su guide d'onda fotoniche 1D e 2D, allo scopo sia di design che di interpretazione delle misure. Sono stati studiati sia i reticoli 1D e cavità in guide fotoniche di Nitruro di Silicio, sia le guide lineari W1.0-W1.5 in membrane di Silicio. I risultati sono in ottimo accordo con gli esperimenti. Inoltre sono stati effettuati design di guide lineari e nanocavità per la successiva realizzazione in Silicio su Isolante e in membrane di Silicio.

2b) Proprietà ottiche

Lo sviluppo più interessante in questa direzione ha riguardato l'applicazione del metodo della matrice di scattering al calcolo delle proprietà ottiche degli opali. Poiché il metodo si applica a sistemi che si possono suddividere in strati omogenei lungo una direzione (z), nel caso degli opali le sfere sono state rappresentate con cilindri orientati lungo la direzione perpendicolare alla superficie, che è solitamente la [111]. Sono stati studiati modelli a uno, tre e cinque cilindri ed in tutti questi casi sono state trovate le condizioni ottimali perché la struttura fcc con cilindri riproduca le bande fotoniche dell'opale di sfere. Successivamente sono state calcolate le proprietà ottiche: riflessione, trasmissione, fase di trasmissione, diffrazione. Ne risulta un metodo vettoriale per il calcolo di tutte le proprietà ottiche degli opali nelle regioni di bassa e alta energia, che è superiore a tutti gli altri metodi attualmente disponibili. In particolare è stato possibile interpretare le misure di fase nella regione a bassa energia, effettuate a Pavia, e le misure di trasmissione ad alta energia effettuate da altri gruppi. I risultati sono in corso di pubblicazione, sia congiuntamente agli esperimenti che come lavoro teorico a sé stante.

2c) Perdite di propagazione in difetti lineari e fattori Q in nano-cavità, effetti di disordine

E' stato effettuato uno studio sistematico degli effetti di disordine in guide lineari con larghezza di canale variabile, sia su SOI che su membrane di Silicio, mediante il metodo di espansione nella base dei modi guidati e trattando la modulazione dielettrica dovuta al disordine in teoria delle perturbazioni. E' stato mostrato che la guide di tipo W1.5 ha una banda con perdite di propagazione ridotte di quasi un ordine di grandezza rispetto alla guida W1.0: la banda di alta trasmissione ha una ampiezza confrontabile nei due tipi di guida. Inoltre sono state confrontate le perdite di propagazione dovute al disordine nelle guide d'onda fotoniche con quelle nelle guide d'onda convenzionali (Silicon wires) e sono stati trovati risultati confrontabili nei due casi. Un metodo simile è stato applicato anche allo studio degli effetti di disordine sui fattori Q di nanocavità di tipo L3 (tre fori mancanti nel reticolo triangolare) in funzione dello spostamento dei buchi adiacenti. E' stato mostrato che il disordine riduce notevolmente gli elevati fattori Q previsti dalla teoria per il sistema ideale. I risultati sono stati pubblicati su Optics Express e su Photonics and Nanostructures.

Pubblicazioni 2005 dell'Unità di Pavia:

[1] D. Gerace, L.C. Andreani: "Strong exciton-light coupling in photonic crystal nanocavities", *Physica Status Solidi (c)* 2, 801-804 (2005)

[2] D. Gerace, M. Agio, L.C. Andreani and P. Lalanne: "Cavity modes in one-dimensional photonic crystal slabs", *Opt. Quantum Electron.* 37, 277-292 (2005)

[3] D. Gerace, L.C. Andreani: "Low-loss guided modes in photonic crystal waveguides", *Optics Express* 13, 4939-4951 (2005)

[4] M. Galli, D. Bajoni, F. Paleari, M. Patrini, G. Guizzetti, D. Gerace, M. Agio, L.C. Andreani, D. Peyrade, Y. Chen: "Measurement of Photonic Mode Dispersion and Linewidths in Silicon-on-Insulator Photonic Crystal Slabs", *IEEE Journal of Selected Areas in Communication* 23, 1402-1410 (2005).

[5] 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* 72, 045102 (2005).

[6] S. Cabrini, A. Carpentiero, R. Kumar, L. Businaro, P. Candeloro, M. Prasciolu, A. Gosparini, L.C. Andreani, M. De Vittorio, T. Stomeo, E. Di Fabrizio: , *Microel. Eng.* 78-79, 11 (2005).

[7] C. Comaschi, G. Vecchi, A.M. Malvezzi, M. Patrini, G. Guizzetti, M. Liscidini, L.C. Andreani, D. Peyrade, Y. Chen: Enhanced third-harmonic reflection and diffraction in Silicon on Insulator photonic waveguides, *Appl. Phys. B* 81, 305-311 (2005).

[8] L.C. Andreani, D. Gerace and M. Agio, Exciton-polaritons and nanoscale cavities in photonic crystal slabs, *Physica Status Solidi (b)* 242, 2197-2209 (2005).

[9] M. Galli, D. Bajoni, M. Patrini, G. Guizzetti, D. Gerace, L.C. Andreani, M. Belotti, Y. Chen: Single-mode versus multimode behavior in silicon photonic crystal waveguides measured by attenuated total reflectance, *Phys. Rev. B* 72, 125322 (2005).

[10] M. Agio and L.C. Andreani: "Photonic Bandgap Materials", in *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*, edited by G.F. Bassani, G. Liedl and P. Wyder (Elsevier, 2005), pp. 286-294

[11] S. Lettieri, F. Gesuele, P. Maddalena, M. Liscidini, L.C. Andreani, C. Ricciardi, V. Ballarini, F. Giorgis: Second-harmonic generation in hydrogenated amorphous Si(1-x)N(x) doubly resonant microcavities with periodic dielectric mirrors, *Appl. Phys. Lett.* 87, 191110 (2005).

[12] D. Gerace, M. Galli, D. Bajoni, G. Guizzetti, L. C. Andreani, F. Riboli, M. Melchiorri, N. Daldosso, L. Pavesi, G. Pucker, S. Cabrini, L. Businaro, and E. Di Fabrizio, Wide-band transmittance of one-dimensional photonic crystals carved in Si₃N₄/SiO₂ channel waveguides, *Appl. Phys. Lett.* 87, 211116 (2005).

Congressi principali:

Spie Photonics West – San Jose (California), 22-27 gennaio 2005 (M. Galli e D. Gerace)

Winter College on Optics and Photonics, Trieste, 7-18 febbraio 2005 (L.C. Andreani)

PECS-VI Heraklion (Grecia), 19-24 giugno 2005 (L.C. Andreani, M. Galli, D. Gerace)

ICQE-CLEO Tokyo, 10-14 luglio 2005 (M. Liscidini)

Summer School on Nanophotonics by NoE PHOREMOST, Erice, 1-7 agosto 2005 (A. Balestreri)

COST P11 meeting, Twente (Olanda), 1-4 ottobre 2005 (L.C. Andreani)

SPIE Europe, Varsavia (Polonia), 25-29 agosto 2005 (M. Liscidini)

Israelo-Italian Workshop on Optronics, Beer-Sheva (Israele), 30 novembre-1 dicembre 2005 (L.C. Andreani)

Addestramento di personale: sono stati inseriti diversi giovani a vari livelli nell'attività di ricerca, in particolare

Dario Gerace (post-doc)

Juan Galisteo Lopez (post-doc)

Michele Belotti (dottorando)

Marco Liscidini (dottorando)

Alessandra Balestreri (dottoranda)

Alberto Politi (laureando)

Dottorati di ricerca a carico del PRIN 2004

n°	Cognome	Nome	Inizio del contratto	Costo in euro	Note
----	---------	------	----------------------	---------------	------

Nota n. 282 del 20/02/2004

la data di attivazione deve essere compresa tra il 30/11/2004 e il 28/02/2005

Schema riassuntivo dei fondi utilizzati (cifre spese)

Voce di spesa	Spese indicate nella rideterminazione di base e/o rimodulazione	Cifra spesa	Descrizione
Materiale inventariabile	46.000	6.348	Modulo per laser cw accordabile nel vicino infrarosso
Grandi Attrezzature	0		
Materiale di consumo	20.000	11.539	Componenti ottici, fibre, altro materiale di consumo (toner ecc), piccole spese
Spese per calcolo ed elaborazione dati	0		
Personale a contratto (escluse le borse di dottorato)	40.000	14.793	Borsa di studio annuale
Dottorati di ricerca a carico del PRIN 2004	0		
Servizi esterni	3.000	1.207	Canoni manutenzioni, stampa poster
Missioni	10.000	5.744	Varie missioni nazionali ed estere
Pubblicazioni	1.000	0	Finora non sono state effettuate spese per pubblicazioni
Partecipazione / Organizzazione convegni	5.000	0	Finora non sono state effettuate spese su questa voce
Altro	0		
TOTALE	125.000	39.631	

RELAZIONE ANNUALE

RESPONSABILE UNITÀ DI RICERCA

Anno 2004 - prot. 2004023725_004

Responsabile Scientifico dell'Unità di Ricerca:	COLOCCI Marcello
Università	Università degli Studi di FIRENZE
Quota Cofinanziamento MIUR	54.700 €
Quota Cofinanziamento ATENEO	23.500 €
Totale finanziamento	78.200 €

Illustrazione dell'attività svolta

The activity of the Florence team in the first year has consisted in:

- 1) Preparation of materials, in particular global infiltration of photonic crystals with liquid crystals and the local infiltration of 2D photonic crystals with fluids and laser dye.
- 2) Optical experiments on 1D multi-layer structures, 2D infiltrated photonic crystals, and 3D photonic crystal opal systems.

1a. Liquid crystal infiltration was successfully performed on photonic crystal opals.

These opals were prepared by the Torino team (including visits from a member of the Florence team to the Torino group) and infiltrated with liquid crystal by the Florence team (including visits of a member of the Torino team to the Florence group). Silica nano spheres were synthesized with the Stoeber method with controlled sphere radii in the range of 60 nm to 320 nm with a standard deviation lower than 5%. The Silica opals were grown from these micro sphere suspensions, using a self-assembly technique based on dip-coating. These silica opals were infiltrated with the liquid crystal E7 (Merck). Liquid crystal E7 is nematic in the temperature range from -10 to 60 degrees Celsius, in which case it is birefringent with ordinary and extraordinary refractive index respectively $n_o=1.53$ and $n_e=1.75$. It was observed that upon infiltration, the stopband of the samples shifts to higher wavelengths due to the reduced refractive index contrast between the silica spheres and their environment, as expected. Also we found, however, an unexpected but very interesting difference in the behavior of samples obtained by dip-coating compared to samples prepared by natural sedimentation. This even led to the possibility of electric field switching of the photonic stopband in these samples. See below.

1b. Local infiltration of 2D photonic crystal structures.

Two dimensional photonic crystal structures as prepared by the Trento team and theoretically modeled by the Pavia team were locally infiltrated by the Florence group with fluids and laser dye. Also photonic crystal cavities, consisting of a large pore in a 2D photonic crystal environment consisting of periodically placed smaller holes, were infiltrated locally. An S-shaped waveguide structure was obtained by local infiltration. The first experiments on the emission from infiltrated laser dye were performed and the emission signal was imaged by the confocal microscope and Near-field microscope, working simultaneously.

2a. Optical characterization of photonic crystal opals prepared by Torino and Florence teams, using reflectance spectroscopy.

The optical properties of direct opals were characterized by means of angular and wavelength resolved reflectivity measurements. A tungsten lamp was used as light source and the reflected light was monitored by a spectrometer and silicon detector (resolution 0.5 nm, spectral range 450 to 1100 nm). A setup was realized in which the incident wavevector k_i could be rotated over a broad angular range (between 5 and 88 degrees with respect to the sample normal), and, in addition, the sample could be rotated freely in the x-z plane (sample plane) over an angle between 0 and 360 degrees, without moving the sample surface with respect to the illuminated spot, and both polarization channels could be analyzed independently. We observed an unexpected but very interesting behaviour for the liquid crystal infiltrated samples prepared by dip-coating (DC).

In addition to the observed red-shift of the stopband, the DC samples became birefringent after infiltration. We observed a wavelength difference in the location of the photonic stopband of as much as 32 nm for the two polarization channels. We decided to investigate further this birefringence after infiltration, which occurred even at zero electric or magnetic field. We then found that it was caused by spontaneous alignment of the liquid crystal inside the photonic crystal in the direction of the sample growth, that is parallel to the sample plane. The spontaneous alignment was caused by a nanometer scale anisotropy in the structure. This anisotropy was induced by the dip-coating synthesis.

This spontaneous alignment of the liquid crystal has enormous advantages for switching of the photonic stopband. It was found that an external electric field can switch this anisotropy by aligning the liquid crystal molecules from parallel to perpendicular with respect to the sample plane. This opens up the possibility to switch a photonic bandgap electrically. We have decided to explore

this possibility further in the second year of the project, for its advantages with respect to magnetic field switching.

2b. Time-resolved experiments on 1D periodic photonic structures.

Time-resolved experiments were performed by the Florence team on coupled microcavity structures as calculated by the Pavia team and synthesized by the Trento group. To that end, an optical gating technique was employed using femto second tunable pulses between 1400 nm and 1600 nm wavelength. We observed a significant delay of the optical pulses, corresponding to a group velocity suppression of $v_g / c_0 = 0.2$, without any observable deformation of the pulse shape. This group velocity reduction was constant over a broad wavelength range of tens of THz.

2c. Observation of optical necklace states.

By performing time-resolved transmission measurements on random 1D photonic structures we managed to observe, for the first time, optical necklace states of light. Wave propagation in a randomly fluctuating potential is dominated by Anderson localization effects, in particular by exponentially decaying localized modes. For optical waves this phenomenon can be studied efficiently in random multi-layer systems.

In recent years Pendry and Tartakovskii have shown that, contrary to common belief, not all states in 1-D disordered systems are Anderson localized. They predict that even in 1-D localized systems non-localized modes exist that extend over the sample via multiple resonances.

These non-localized modes, called necklace states, have a transmission coefficient close to 1 and become extremely rare upon increasing the sample thickness. Nevertheless they always dominate the average transmission coefficient, even at large thickness.

In time-resolved transmission experiments we managed to identify such optical necklace states amongst a collection of otherwise localized optical modes in disordered one-dimensional systems prepared by the Trento team. We observed characteristic high transmission peaks due to resonances inside the sample, and determined the localization length from the thickness dependence of the transmission. We demonstrated that one can distinguish between single resonance localized modes and multi-resonance non-localized modes in time-resolved transmission experiments. In addition, phase measurements performed by the Pavia team allowed to identify the number of resonances of each necklace mode. The observed number of necklace states was consistent with theoretical predictions.

Publications

1. M. Gurioli, F. Bogani, L. Cavigli, H. Gibbs, G. Khitrova, and D.S. Wiersma, Weak Localization of Light in a Disordered Microcavity, *Phys. Rev. Lett.* 94, 183901 (2005).
2. D.S. Wiersma, R. Sapienza, S. Mujumdar, M. Colocci, M. Ghulinyan, and L. Pavesi, Optics of nanostructured dielectrics, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 7, S190 (2005).
3. R. Sapienza, D. Delande, and D.S. Wiersma, Anisotropic weak localization of light: from isotropic scattering to ordered nematic liquid crystals, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* (in press) (2005).
4. M. Ghulinyan, C. Oton, Z. Gaburro, L. Pavesi, R. Sapienza, P. Costantino, and D.S. Wiersma, Time resolved optical Bloch oscillations in porous silicon superlattice structures, *Phys. Stat. Sol. A* (in press) (2005).
5. J. Bertolotti, S. Gottardo, D.S. Wiersma, M. Ghulinyan, and L. Pavesi, Optical necklace states in Anderson localized 1D systems, *Phys. Rev. Lett.* 94, 113903 (2005).
6. M. Ghulinyan, C. Oton, Z. Gaburro, L. Pavesi, C. Toninelli and D.S. Wiersma, Zener tunneling of light waves in an optical superlattice, *Phys. Rev. Lett.* 94, 127401 (2005).
7. M. Ghulinyan, C. J. Oton, L. Dal Negro, L. Pavesi, R. Sapienza, M. Colocci, and D.S. Wiersma, Light pulse propagation in Fibonacci quasicrystals, *Phys. Rev. B* 71, 094204 (2005).
8. D.S. Wiersma, R. Sapienza, S. Mujumdar, M. Colocci, M. Ghulinyan, L. Pavesi, Optics of nanostructured dielectrics, *J. Opt. Soc. Am. A*, in press (2005).
9. Francesca Intonti, Silvia Vignolini, Volker TÜRCK, Paolo Bettotti, Stefan Schweizer, Ralf Wehrspohn, Lorenzo Pavesi, Marcello Colocci and Diederik Wiersma, Rewritable photonic circuits, submitted.
10. Stefano Gottardo, Matteo Burrese, Francesco Geobaldo, Luca Pallavidino, Fabrizio Giorgis, and Diederik S. Wiersma, Tunable Optical Birefringence in Photonic Crystals, submitted.

Main conferences and lectures

- 14 February 2005, Invited lecture, Max Plank Institute for Complex Systems, Dresden, Germany, entitled: Light transport in complex photonic systems
- 18 February 2005, Invited lecture, Dept. of Physics and Institute for Nanostructures, Karlsruhe, Germany, entitled: Light in and from complex photonic materials
- 18 April 2005, Invited lecture, dept. of chemistry, Univ. of Toronto, Canada, entitled: Optical properties of complex photonic structures
- 12-17 June 2005, Invited keynote lecture, CLEO/QELS, Munich, Germany, entitled: Order and disorder in photonic materials: from Fibonacci superstructures to random lasers
- 1-8 August 2005, Director and lecturer at the 42nd course on quantum optics, entitled: Photonic Metamaterials: from micro to nano scale, at the Ettore Majorana Center in Erice, Italy.
- 19-25 August 2005, Invited talk PECSS VI conference, Crete, Greece, entitled: Controlling photonic materials by liquid crystal infiltration
- 5-9 September 2005, Invited talk, OECS conference, Southampton, UK, entitled: Localization of light in photonic materials

Training of human resources. Various young researchers are active in the scientific activity of this project, on the level of master and PhD students, and post-doc.

Matteo Burrese (master student)
Paola Costantino (master student)
Pierre Barthelemy (master student)

Costanza Toninelli (PhD student)
 Jacopo Bertolotti (PhD student)
 Silvia Vignolini (PhD student)
 Stefano Gottardo (post-doc)
 Riccardo Sapienza (post-doc)
 Francesca Intonti (post-doc)
 Volker Tuerck (post-doc)

Dottorati di ricerca a carico del PRIN 2004

n°	Cognome	Nome	Inizio del contratto	Costo in euro	Note
----	---------	------	----------------------	---------------	------

Nota n. 282 del 20/02/2004
 la data di attivazione deve essere compresa tra il 30/11/2004 e il 28/02/2005

Schema riassuntivo dei fondi utilizzati (cifre spese)

Voce di spesa	Spese indicate nella rideterminazione di base e/o rimodulazione	Cifra spesa	Descrizione
Materiale inventariabile	20.000	3.814	MICOS ITALIA (Alimentatore e driver)
Grandi Attrezzature	0		
Materiale di consumo	16.200	2.002	Thorlabs: 170 Eu, RS comp.:25 Eu; MICRALYNE: 471 Eu; MICOS ITALIA: 1336 Eu.
Spese per calcolo ed elaborazione dati	0		
Personale a contratto (escluse le borse di dottorato)	23.000	18.148	Cococo Marco Abbarchi:6049 Eu Cococo Silvia Vignolini: 8469 Eu Cococo Matteo Burrelli: 3630 Eu
Dottorati di ricerca a carico del PRIN 2004	0		
Servizi esterni	0		
Missioni	5.000	1.803	Rimborso missione di Stefano Gottardo a Toronto e Boston
Pubblicazioni	6.000	3.198	"Optical necklace stares..." Am. Inst. of Phys. "Quasi-two-dimensional.." Am. Inst. of Phys.
Partecipazione / Organizzazione convegni	8.000	424	Riborso missione di Riccardo Sapienza a Catania
Altro	0		
TOTALE	78.200	29.389	

Data 11/01/2006 15:32

RELAZIONE ANNUALE

RESPONSABILE UNITÀ DI RICERCA

Anno 2004 - prot. 2004023725_002

Responsabile Scientifico dell'Unità di Ricerca:	GIORGIS Fabrizio
Università	Politecnico di TORINO
Quota Cofinanziamento MIUR	59.500 €
Quota Cofinanziamento ATENEO	25.600 €
Totale finanziamento	85.100 €

Illustrazione dell'attività svolta

'Attività di ricerca'

L'attività di ricerca dell'Unità di Torino (che accorpa gruppi di Ricerca del Politecnico di Torino (Dip. di Fisica e Dip. Scienze dei Materiali) e del Laboratorio TASC-INFM-CNR di Trieste (gruppo LILIT) per il primo anno si è articolata sui seguenti punti:

- Processi per la realizzazione di guide d'onda planari a ridge e a cristallo fotonico 2D basati su Nitruro di Silicio passivo e luminescente
- Processi per la realizzazione di opali diretti di Silice con infiltrazioni di coloranti organici e Silicio

a) presso l'Unità di Torino sono state realizzate guide d'onda planari in Nitruro di Silicio sottostechiometrico ($a\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$, $x=0.5$) avente elevata efficienza di luminescenza a temperatura ambiente per studi di propagazione guidata con sorgente di emissione intrinseca. I primi prototipi di guide a ridge sono stati realizzati depositando bi-strati $\text{SiO}_2/a\text{-SiN:H}$ con tecnica di Plasma Enhanced CVD e successivo ottenimento del canale guidante in $a\text{-SiN:H}$ utilizzando litografia ottica e Reactive Ion Etching (RIE)

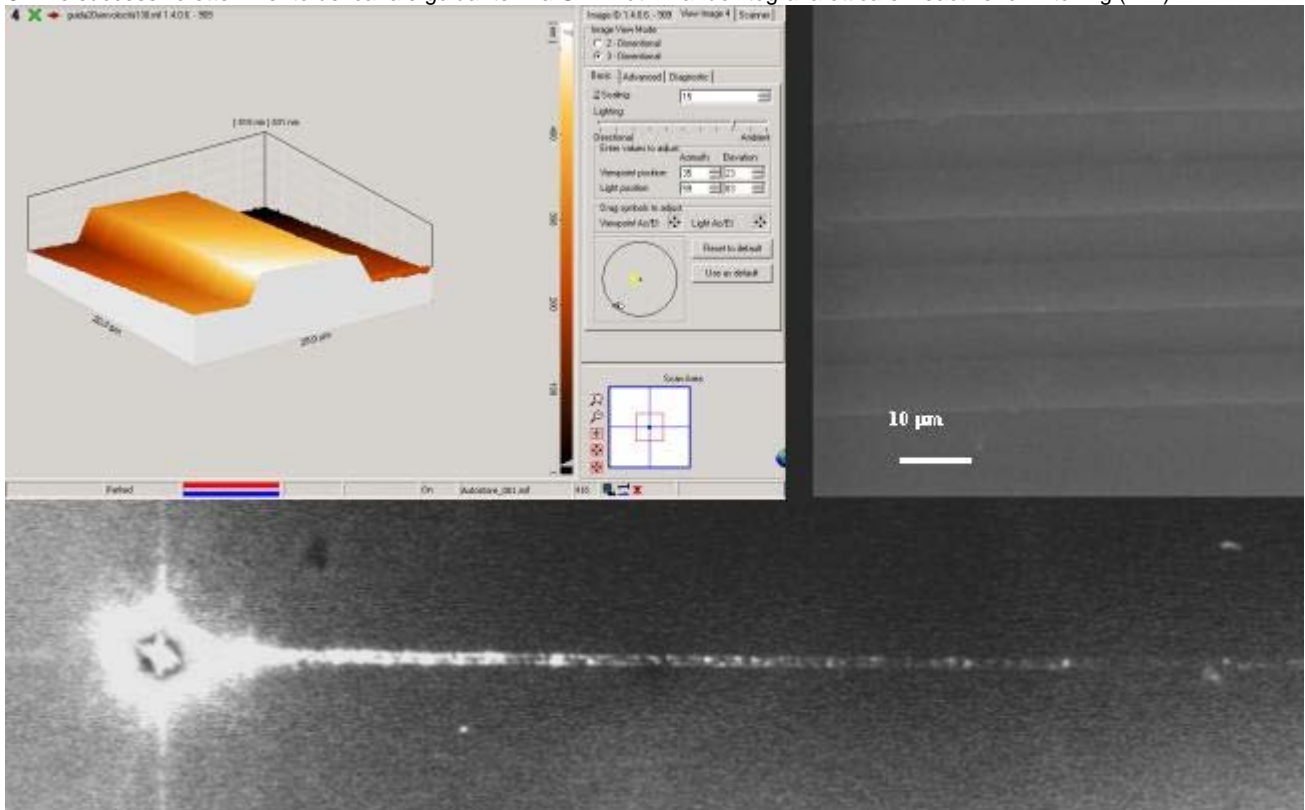


Fig.1 esempi di array di guide planari in $a\text{-SiN:H}$ (ampiezza canale 10 μm spessore 200 nm), caratterizzazione ottica di

propagazione guidata (eseguita presso Università La Sapienza di Roma-Prof. F. Michelotti)

Partendo da bistrati SiO₂/a-SiN:H, utilizzando processi di litografia a fascio elettronico e RIE sono state realizzate strutture a cristallo fotonico 2D con guide d'onda a difetto lineare. L'intento per il secondo anno di attività è quello di integrare guide a ridge taperate all'ingresso e all'uscita delle guide fotoniche, oltre che realizzare filtri a nanocavità inserite nelle guide luminescenti utilizzando la tecnica di Focus Ion Beam (FIB) disponibile presso il gruppo LILIT.

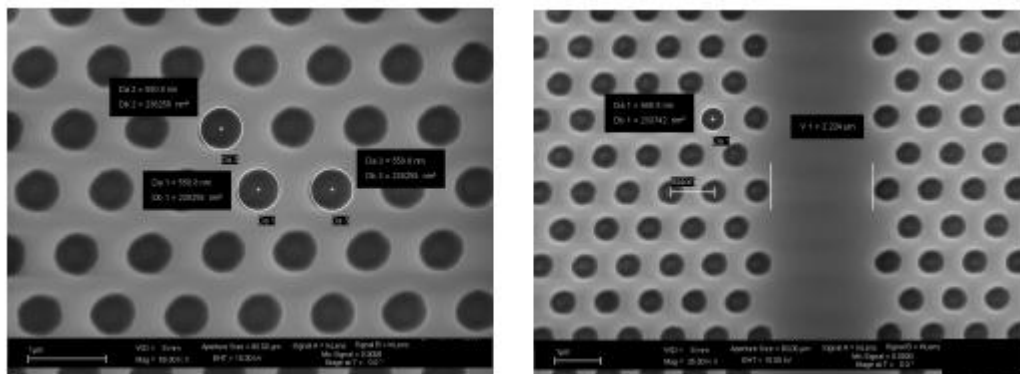


Fig. 2 esempi di strutture 2D realizzate su a-SiN:H sottostechiometrico luminescente

A questo proposito, cristalli fotonici 1D (cavità Fabry-Perot con specchi di Bragg ottimizzati per basse perdite di inserzione) sono stati realizzate con tecnica FIB su guide d'onda in a-Si₃N₄ (passivo otticamente, ottenuto da CVD termico).

b) Nell'ambito della realizzazione di strutture 3D, sono stati ottimizzati i processi di sintesi di nanosferule di Silice mediante idrolisi di tetra-etil-orto-silicato (TEOS). L'attuale procedura consente di realizzare sfere con diametri controllabili da 170 a 600 nm e dispersione del diametro inferiore al 5%.

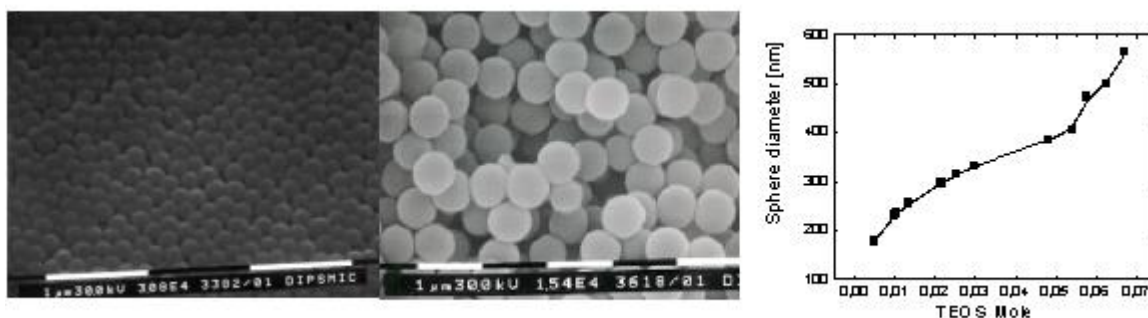


Fig.3 esempio di nanosfere di Silice (analisi SEM); il grafico evidenzia l'andamento monotono del diametro sfere in funzione delle moli di TEOS utilizzate durante la sintesi, nonché l'ampia gamma di taglie ottenibili.

Opali diretti a struttura fcc sono stati realizzati sia con tecnica di dip-coating (consistente nella deposizione dell'opale su substrato inserito inclinato nella soluzione colloidale contenente le nanosfere, a temperatura controllata, spessore ottenibile 1-20 micron) che con sedimentazione naturale (deposizione ottenuta sul fondo del baker contenente la soluzione colloidale, spessore ottenibile diverse centinaia di micron). La buona qualità delle strutture (a simmetria fcc) è stata evidenziata particolarmente per i campioni ottenuti da dip-coating che presentano polidomini con omogenea orientazione preferenziale. Le caratteristiche morfologiche sono state sondate con microscopie SEM ed AFM.

Ai fini di analizzare l'influenza della struttura fotonica sull'emissione spontanea, diversi opali sono stati infiltrati con coloranti organici con emissione nel visibile-vicino IR (Cianine e Ossazine). Alternative strutture sono state realizzate con opali cresciuti su film sottili di a-SiN:H luminescente. L'inibizione dell'emissione dei coloranti e dei film di Nitruro di Silicio in direzione normale rispetto alla superficie (111) degli opali è stata verificata in corrispondenza degli pseudo-gap (punto critico L nella prima zona di Brillouin associata alla struttura fcc).

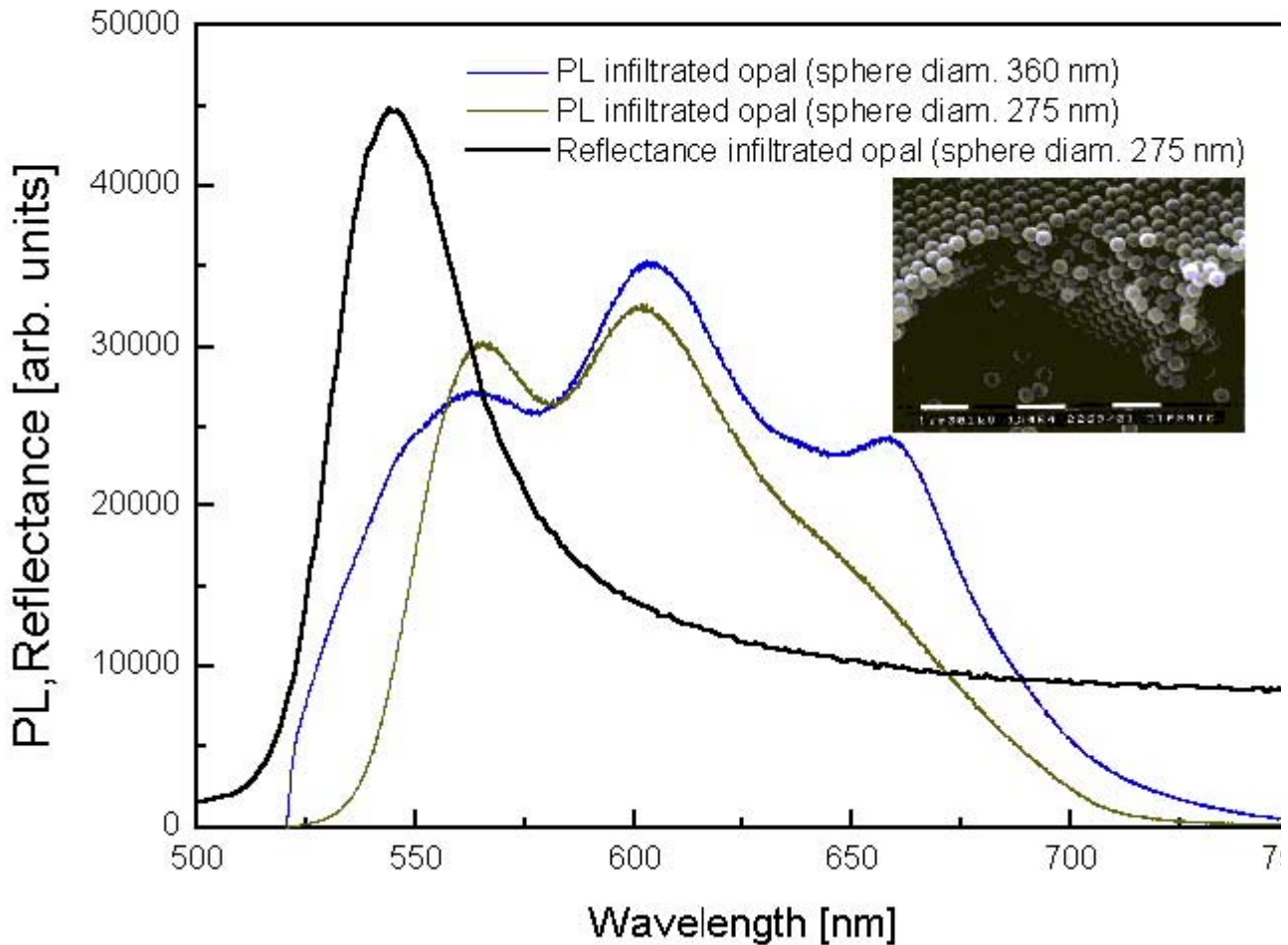


Fig. 4 spettri di luminescenza di 2 opali infiltrati con Cianina aventi differente passo reticolare (quindi diametro sfere costituenti); si evidenzia per l'opale con diametro sfere inferiore l'inibizione all'emissione in corrispondenza allo pseudo-gap evidenziato dal picco di riflettanza (configurazione di quasi-backscattering) sovrapposto agli spettri di emissione. L'inset mostra un'immagine SEM di un tipico opale diretto a base Silice.

Sono stati infine realizzati opali inversi di Silicio infiltrando gli opali in Silice con Silicio amorfo utilizzando un reattore di crescita CVD, con rimozione del template in Silice ottenuta con etching umido in HF. Opali diretti in Silice, infiltrati (Silice + Silicio) e inversi (Silicio) sono stati caratterizzati con spettroscopia di riflettanza ad angolo variabile che grazie al modeling basato sulle matrici di scattering ha permesso di evidenziare correlazioni con le bande fotoniche delle nanostrutture (attività caratterizz. e di simulazione svolte presso l'Unità di Pavia)

'Strumentazione acquisita e messa in opera'

E' stata acquisito con fondi del progetto un laser a ioni Ar implementato nel banco ottico di spettroscopia di fotoluminescenza stazionaria (in configurazione macro e micro) ampiamente usata per la caratterizzazione delle strutture luminescenti (guide planari e opali infiltrati con dye)

Si segnala l'acquisto di un microscopio SNOM (effettuato su altri fondi) che è in fase di allestimento per analisi spettroscopiche e verrà utilizzato nella caratterizzazione ottica a campo prossimo per le strutture 2D e 3D.

'Addestramento di personale'

Con fondi del progetto, è stata bandito un Assegno di Ricerca Post-dottorato sulla tematica 'Microscopia e spettroscopia ottica di nanostrutture fotoniche', posizione coperta da un giovane ricercatore sperimentale (dott. E. Descrovi) che attualmente si occupa di caratterizzazioni AFM/SNOM e di fotoluminescenza.

'Pubblicazioni 2005-2006 inerenti alla tematica'

- 'Synthesis, characterization and modelling of Silicon based opals', L. Pallavidino, D. Santamaria Razo, F. Geobaldo, A. Balestreri,

D. Bajoni, M. Galli, L. C. Andreani, C. Ricciardi, E. Celasco, M. Quaglio, F. Giorgis, J. Non-Cryst. Solids (2006 in press)
 - 'Amorphous Silicon Nitride: a suitable alloy for optical multilayered structures', C. Ricciardi, V. Ballarini, F. Giorgis, M. Galli, M. Liscidini, L. C. Andreani, M. Losurdo, G. Bruno, S. Lettieri, F. Gesuele, P. Maddalena, J. Non-Cryst. Solids (2006 in press)
 - 'Controlled light emission from dye-impregnated porous Silicon microcavities', A. Venturello, C. Ricciardi, F. Giorgis, S. Strola, G. Salvador, E. Garrone, F. Geobaldo, J. Non-Cryst. Solids (2006 in press)
 - 'Second-harmonic generation in hydrogenated amorphous-Si_{1-x}N_x doubly resonant microcavities with periodic dielectric mirrors', S. Lettieri, F. Gesuele, P. Maddalena, M. Liscidini, L. C. Andreani, C. Ricciardi, V. Ballarini, F. Giorgis, Appl. Phys. Lett. 87 (2005) 191110
 - 'Interface lithography: a hybrid lithographic approach for the fabrication of patterns embedded in three-dimensional structures', Romanato F, Kumar R, Di Fabrizio E, NANOTECHNOLOGY 16 (2005) 40
 - 'Tunable Birefringent Liquid Crystal Infiltrated Photonic Crystals', S. Gottardo, M. Burrelli, F. Geobaldo, L. Pallavidino, F. Giorgis, D. S. Wiersma, submitted to Phys. Rev. Lett.
 - 'Photon recycling in Fabry-Perot micro-cavities based on Si₃N₄ waveguides', F. Riboli, A. Recati, N. Daldosso, L. Pavesi, G. Pucker, A. Lui, S. Cabrini, E. Di Fabrizio, submitted to Photonics and Nanostructures, Fundamental and Application
 - 'Wide-band transmittance of one-dimensional photonic crystals carved in Si₃N₄/SiO₂ channel waveguides', D. Gerace, M. Galli, D. Bajoni, G. Guizzetti, L. C. Andreani, F. Riboli, M. Melchiorri, N. Daldosso, L. Pavesi, G. Pucker, S. Cabrini, L. Businaro, E. Di Fabrizio, submitted to Appl. Phys. Lett.

'Partecipazioni a scuole inerenti alla tematica'

Optical Interconnects 3rd Optoelectronic & Photonic Winter School, Sardinia (Trento), Italy, 27 February- 4 March 2005

'Partecipazioni a conferenze internazionali'

PECS VI : International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures Aghia Pelaghia, Crete, Greece, June 19-24, 2005

ICANS 21 International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Silicon, Lisbon, Portugal, September 2005

Dottorati di ricerca a carico del PRIN 2004

n°	Cognome	Nome	Inizio del contratto	Costo in euro	Note
----	---------	------	----------------------	---------------	------

Nota n. 282 del 20/02/2004

la data di attivazione deve essere compresa tra il 30/11/2004 e il 28/02/2005

Schema riassuntivo dei fondi utilizzati (cifre spese)

Voce di spesa	Spese indicate nella rideterminazione di base e/o rimodulazione	Cifra spesa	Descrizione
Materiale inventariabile	20.145	8.944	Laser Argon implementato in set-up per spettroscopia micro-Raman/fotoluminescenza
Grandi Attrezzature	0		
Materiale di consumo	38.525	1.546	Software simulazione, stampa Poster per presentazione Congressi, consumo clean room
Spese per calcolo ed elaborazione dati	0		
Personale a contratto (escluse le borse di dottorato)	18.200	6.138	Assegno di Ricerca dott. E. Descrovi (contratto annuale 1-9-05 31-8-06) pagamento periodo 1-9-05 31-12-05
Dottorati di ricerca a carico del PRIN 2004	0		
Servizi esterni	0		
Missioni	4.910	2.926	Missioni per meeting tra partners, partecipazioni a Congressi e Scuole specialistiche
Pubblicazioni	0		
Partecipazione / Organizzazione convegni	1.620	1.620	Iscrizioni a Congresso (F. Giorgis PECS VI : International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures Aghia Pelaghia, Crete, Greece, June 19-24, 2005) e scuola (E. Celasco Optical Interconnects 3rd Optoelectronic & Photonic

			Winter School, Sardagna (Trento), Italy, 27 February- 4 March 2005)
Altro	1.700	1.700	Utenze dipartimentali
TOTALE	85.100	22.874	

Data 11/01/2006 16:59

RELAZIONE ANNUALE

RESPONSABILE UNITÀ DI RICERCA

Anno 2004 - prot. 2004023725_003

Responsabile Scientifico dell'Unità di Ricerca:	PAVESI Lorenzo
Università	Università degli Studi di TRENTO
Quota Cofinanziamento MIUR	48.300 €
Quota Cofinanziamento ATENEO	20.700 €
Totale finanziamento	69.000 €

Illustrazione dell'attività svolta

Nell'ambito del progetto COFIN 2004 l'UdR di Trento si era posta i seguenti obiettivi:

PARTE A) Fabbricazione dei materiali passivi.

Suddivisa in 4 filoni di ricerca:

1. fabbricazione di cristalli fotonici (PC) unidimensionali a base di silicio nanoporoso,
2. fabbricazione di PC bidimensionali a base di silicio macroporoso,
3. fabbricazione di PC quasi-tridimensionali ottenuti realizzando reticoli bidimensionali su guide d'onda,
4. fabbricazione di PC tridimensionali in silicio macroporoso, modulando il diametro dei pori in profondità.

1. Sono state realizzate le strutture 1D, composte da multistrati di silicio poroso, in cui il reticolo dielettrico è ottenuto variando la porosità dei singoli strati e, di conseguenza, il loro indice di rifrazione.

Le strutture fabbricate hanno una struttura estremamente complessa e si pongono come stato dell'arte per quanto riguarda la realizzazione di multistrati silicio poroso. Grazie all'accurata modellizzazione teorica delle stesse ed all'ottima qualità dei campioni prodotti, è stato possibile misurare molti effetti legati alla presenza del reticolo fotonico. In particolare:

- Cavità ottiche accoppiate per lo studio del rallentamento della luce in mezzi dielettrici (Slow wave): la presenza di un superreticolo fotonico permette di rallentare notevolmente la velocità con cui si propaga la luce all'interno del cristallo fotonico. Nei campioni realizzati sono state ottimizzate strutture con 5 cavità ottiche accoppiate, in cui è stata massimizzata la larghezza del gap e minimizzata la velocità di gruppo dell'impulso che attraversa il campione. I campioni sono stati caratterizzati dal punto di vista della trasmissione a Trento, in seguito sono stati inviati alle UdR di Pavia e di Firenze che si sono occupate, della caratterizzazione ottica fine, includendo misure di fase (a Pavia) e della misura risolta in tempo (a Firenze). In particolare è da notare come, le strutture realizzate, permettano di rallentare gli impulsi senza che questi vengano distorti durante la trasmissione.

- Zener tunneling: in campioni multistrato, formati da 12 cavità accoppiate, è stato caratterizzato il tunneling Zener fotonico, tramite misure di trasmissione effettuate a Trento e risolte in tempo, svolte dall'UdR di Firenze.

- Zener dinamico: Le ultime misure su questo effetto sono state eseguite facendo fluire del gas all'interno dei PC, in questo modo la variazione di indice di rifrazione data dalla condensazione del gas nei nanopori, produce uno spostamento della posizione dei picchi di trasmissione. Queste strutture possono essere utilizzate come sensori.

- Necklace states: in sistemi completamente disordinati, sono state eseguite delle analisi spettroscopiche intese a studiare i cosiddetti "necklace states". In questo caso i campioni sono stati prodotti a Trento, mentre le misure di fase e trasmissione sono state eseguite presso l'UdR di Pavia.

- Optical lifter: è stato svolto un lavoro teorico teso a dimostrare la possibilità di utilizzare effetti dinamici delle strutture fotoniche per variare in maniera controllata l'energia di un impulso che si propaghi all'interno del PC.

2. La fabbricazione delle strutture bidimensionali in silicio macroporoso si è rivelata molto più complessa di quanto ipotizzato inizialmente. Sono state riscontrate diverse difficoltà nella messa a punto della litografia a fascio elettronico, necessaria a definire le strutture submicrometriche. Al momento il setup litografico funziona perfettamente ed è in grado di raggiungere le risoluzioni necessarie alla realizzazione di reticoli fotonici con il gap fondamentale ad $1.55 \mu\text{m}$.

In secondo luogo sono sorti dei problemi inaspettati per quanto riguarda la qualità delle maschere dielettriche necessarie ad iniziare selettivamente l'attacco elettrochimico nei soli punti ove si vogliono crescere i pori. In particolare le maschere in nitruro depositate per LPCVD hanno mostrato una bassa adesione al substrato di silicio, fatto questo che induce una delaminazione del dielettrico durante l'attacco elettrochimico, con conseguente perdita del controllo sulla nucleazione dei pori. Al momento si stanno testando fette di silicio ricoperte da uno strato di nitruro a bassissimo stress, depositate dall'Università del Minnesota per PECVD.

3. Sono state prodotte, in collaborazione con le UdR di Pavia e Trieste delle strutture unidimensionali in guide d'onda in nitruro. Le stesse sono state caratterizzate dal punto di vista della trasmissione a Trento e Pavia. I risultati sono stati soddisfacenti, tenendo conto del fatto che, finora, sono stati realizzati solo pochi campioni. In particolare si è ottenuta una buona corrispondenza tra i

sistemi simulati ed utilizzati per il design delle strutture effettivamente realizzate e le misure sperimentali in configurazione di trasmissione. Da notare che il design di questi campioni prevedeva un particolare "tapering" ad entrambe le estremità del reticolo fotonico, utilizzato per ottimizzare l'accoppiamento tra il modo di guida ed il modo di Bloch del cristallo fotonico.

4. Non essendo stato possibile realizzare le maschere litografiche non abbiamo ancora affrontato questo problema.

PARTE B) Studio dell'inserimento di materiali attivi

Questa parte dell'attività ha fortemente risentito dei ritardi nella fabbricazione dei PC operanti ad 1.55 μm . Si è messo a punto il processo di formazione della matrice vetrosa contenente gli ioni Erblio e si è dimostrato l'accoppiamento tra tali ioni e le nanoparticelle di silicio, anch'esse presenti nel dielettrico. Non sono state eseguite infiltrazioni in strutture fotoniche bidimensionali. Sono stati fabbricati alcuni campioni per l'UdR di Firenze che ha eseguito delle infiltrazioni localizzate utilizzando coloranti organici. A Trento sono stati infiltrati campioni a multistrato in silicio poroso, in configurazione di guida d'onda planare, con diversi coloranti organici (quali: Nile blu e R6G). Questi campioni sono stati ampiamente caratterizzati dal punto di vista delle loro proprietà ottiche, eseguendo misure di perdite di propagazione in guide, fotoluminescenza e misure di guadagno ottico. In particolare è stata caratterizzata la fotoluminescenza dei campioni impregnati con uno o più tipi di colorante, evidenziando in entrambi i casi, un comportamento più che lineare per quanto riguarda l'intensità del segnale di luminescenza al crescere della potenza di eccitazione (guadagno ottico, g). La verifica dell'esistenza di emissione stimolata è stata effettuata attraverso misure di spettroscopia VSL, in cui si è evidenziato un valore di g pari al valore delle perdite di propagazione nelle guide planari.

1. STRUMENTAZIONE ACQUISITA

- Setup di litografia a fascio elettronico

2. STRUMENTAZIONE REALIZZATA O MESSA IN OPERA

metodologia di impregnazione con coloranti organici di cristalli fotonici unidimensionali a base di silicio poroso

3. PRODOTTI DELLA RICERCA

- Utilizzo del tunnelling Zener in campo sensoristico, sfruttando l'elevata sensibilità data dalla condizione di risonanza.

- Realizzazione di una matrice sol gel con nanocristalli di silicio accoppiati a ioni erblio

4. PUBBLICAZIONI SU RIVISTE A DIFFUSIONE INTERNAZIONALE

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* 7, S190-S197 (February 2005).

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* 71, 094204-1,8 (15 March 2005).

Jacopo Bertolotti, Stefano Gottardo, Diederik S. Wiersma, Mher Ghulinyan and Lorenzo Pavesi "Optical necklace states in Anderson localized 1D systems", *Physical Review Letters* 94, 113903-1/4 (25 March 2005)

M. Ghulinyan, C. J. Oton, Z. Gaburro, L. Pavesi, C. Toninelli and Diederik Wiersma "Zener tunneling of light waves", *Physical Review Letters* 94, 127401-1/4 (1 April 2005).

E. Lorenzo, C. J. Oton, N. E. Capuj, M. Ghulinyan, D. Navarro Urrios, Z. Gaburro, L. Pavesi "Porous silicon-based rugate filters", *Applied Optics* 44, 5415-5421 (10 September 2005).

D. Gerace, M. Galli, D. Bajoni, G. Guizzetti, and L. C. Andreani, F. Riboli, M. Melchiorri, and L. Pavesi, G. Pucker, S. Cabrini, L. Businaro, and E. Di Fabrizio "Wide-band transmittance of one-dimensional photonic crystals carved in Si₃N₄/SiO₂ channel waveguides", *Applied Physics Letters* 87, 211116 (17 November 2005).

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", *Physica Status Solidi (c)* 2, 3283-3287 (2005).

E. Lorenzo, C. J. Oton, N. E. Capuj, M. Ghulinyan, D. Navarro-Urrios, Z. Gaburro, and L. Pavesi, "Fabrication and optimization of rugate filters based on porous silicon", *Physica Status Solidi (c)* 2 3227-3231 (2005).

5. PUBBLICAZIONI SU LIBRI O ATTI DI CONFERENZE

M. Ghulinyan, Z. Gaburro, L. Pavesi, C. J. Oton, C. Toninelli and D. Wiersma, "Zener Tunneling of light in an optical superlattice", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 829 B5.8.1-B5.8.6* (2005)

6. PARTECIPAZIONI A CONFERENZE INTERNAZIONALI

R. Sapienza, C. Toninelli, P. Costantino, and D. Wiersma M. Ghulinyan, C. J. Oton, L. Pavesi "Optical Analogue of Electronic Bloch Oscillations" PECS-VI International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (Aghia Pelaghia, Crete, Greece, June 19-24, 2005.)

F. Riboli, M. Melchiorri, N. Daldosso and L. Pavesi G. Pucker and A. Lui S. Cabrini and E. Di Fabrizio "1D photonic crystals on waveguide: filling Fabry-Perot microcavity with liquid crystals and matching the Bloch-modes with waveguide mode" PECS-VI International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (Aghia Pelaghia, Crete, Greece, June 19-24, 2005)

C. Toninelli, R. Sapienza, D.S. Wiersma, C.J. Oton, M. Ghulinyan, L. Pavesi "Light transport in complex photonic systems PECS-VI International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (Aghia Pelaghia, Crete, Greece, June 19-24, 2005)

M. Ghulinyan, Z. Gaburro, L. Pavesi, C. J. Oton, R. Sapienza, P. Costantino, C. Toninelli, D. Wiersma, "Bloch oscillations and resonant Zener tunneling of light" *Microtechnologies for the New Millennium 2005: conference Photonics materials, devices and applications* (Sevilla Spain 9-11 May 2005 (Invited Paper)

C. J. Oton, E. Lorenzo, N. E. Capuj, F. Lahoz, I. R. Martín, D. Navarro-Urrios, M. Ghulinyan, F. Sbrana, Z. Gaburro, L. Pavesi, "Porous silicon-based notch filters and waveguides", *Microtechnologies for the New Millennium 2005: conference Photonics materials, devices and applications* (Sevilla Spain 9-11 May 2005) [oral paper]

8. ADDESTRAMENTO DI PERSONALE

- Training sul setup di litografia a fascio elettronico

Dottorati di ricerca a carico del PRIN 2004

n°	Cognome	Nome	Inizio del contratto	Costo in euro	Note
----	---------	------	----------------------	---------------	------

Nota n. 282 del 20/02/2004

la data di attivazione deve essere compresa tra il 30/11/2004 e il 28/02/2005

Schema riassuntivo dei fondi utilizzati (cifre spese)

Voce di spesa	Spese indicate nella rideterminazione di base e/o rimodulazione	Cifra spesa	Descrizione
Materiale inventariabile	12.500	10.240	Optoprim rollerblock Products ceramic socket assembly Lot Oriel calibration lamp Fiber splicer Ocean Optics HL 2000
Grandi Attrezzature	0		
Materiale di consumo	14.914	13.594	Cassettiere sonde per microscopio etanolo Tpmj lampadine ad alogeni Stainless Steel Single fibra ottica fliashlamp diodo accoppiato single polished silicon silicon spese di trasporto heptene celle zscan Collimatori fibre etc TELEFONo CCD colori Pinzette
Spese per calcolo ed elaborazione dati	0		
Personale a contratto (escluse le borse di dottorato)	29.586	29.586	borsa post-dottorato di durata biennale
Dottorati di ricerca a carico del PRIN 2004	0		
Servizi esterni	0		
Missioni	10.000	6.539	missioni varie collaboratori alla ricerca
Pubblicazioni	0		
Partecipazione / Organizzazione convegni	2.000		
Altro	0		
TOTALE	69.000	59.959	

Data 09/01/2006 10:06