



Programmi di ricerca cofinanziati - Modello D Rendiconto del programma di ricerca - ANNO 2004 prot. 2004023725

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 per il controllo della propagazione e dell'emissione di luce
4. Settore principale del Programma di Ricerca:	FIS/03
5. Costo originale del Programma:	590.000 €
6. Quota Cofinanziamento MIUR:	250.000 €
7. Quota Cofinanziamento Ateneo:	107.300 €
8. Finanziamento totale:	357.300 €
9. Durata:	24 mesi

10. Obiettivo della ricerca eseguita

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

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, Nitruro 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 lineari (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 Erbio 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.

11. Descrizione della Ricerca eseguita e dei risultati ottenuti

Le attività del progetto si sono sviluppate lungo le linee previste, riguardanti lo studio di vari tipi di cristalli fotonici a base di Silicio con enfasi sugli effetti legati al controllo della propagazione e della emissione di luce. Su diversi tipi di strutture sono stati ottenuti risultati innovativi e di assoluto rilievo a livello internazionale, come testimoniato anche dall'alto numero di pubblicazioni su riviste di prestigio da parte dei gruppi partecipanti. Nel seguito verranno riassunti i risultati principali, suddivisi secondo i punti seguenti:

- 1) Cristalli fotonici monodimensionali (1D) di Silicio poroso;
- 2) Cristalli fotonici bidimensionali (2D) e in guida d'onda planare;
- 3) Cristalli fotonici tridimensionali (3D);
- 4) Teoria dei cristalli fotonici e dell'interazione radiazione-materia.

Per una descrizione dettagliata delle attività e delle tecniche di fabbricazione e misura si rimanda ai modelli C delle singole sedi (Pavia, Trento, Firenze, Torino che accorpa il laboratorio LILIT-TASC di Trieste).

1) CRISTALLI FOTONICI 1D DI SILICIO POROSO: MULTISTRATI E MICROCAVITA' ACCOPPIATE

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 (TN). Le strutture fabbricate sono estremamente sofisticate e rappresentano lo stato dell'arte per quanto riguarda la realizzazione di multistrati di silicio poroso. Grazie alla accurata modellizzazione teorica delle strutture ed alla ottima qualità dei campioni prodotti, è stato possibile evidenziare vari 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 (TN), sono stati misurati mediante interferometria in luce bianca (PV) e mediante trasmissione risolta in tempo (FI). 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. Infatti, previsioni teoriche indipendenti di Pendry e Tartakovskii (1987) indicano che in sistemi disordinati 1D non tutti gli stati sono localizzati esponenzialmente ma vi sono modi delocalizzati che dominano lo spettro di trasmissione. I campioni, dopo la prima caratterizzazione (TN), sono stati misurati per mezzo di trasmissione risolta in tempo (FI) 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 per mezzo di interferometria in luce bianca (PV) ed è stato mostrato che ogni stato di necklace con molteplicità n produce un salto di fase di $n \cdot \pi$ (greco), 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 stata dimostrata la presenza di tunnelling Zener fotonico (in analogia con il ben noto effetto per gli elettroni), tramite misure di trasmissione (TN) e risolte in tempo (FI). I campioni vengono cresciuti con un gradiente di periodo, in modo da variare la frequenza del modo di cavità simulando l'effetto di un campo elettronico. 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 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").

1d) E' stata dimostrata la bistabilità ottica, ossia lo switching, in reticoli fotonici 1D (TN, FI). Come strutture vengono usate le microcavità accoppiate con gradiente di periodo per il tunneling Zener fotonico e l'idea di base per lo switching prevede il flusso di vapore etanolo nei pori. Poiché la dimensione dei pori è inferiore al raggio critico, il vapore può condensare modificando l'indice di rifrazione degli strati, ma in presenza di un laser di pompa assorbito dal Silicio si ha evaporazione del vapore e ripristino della modulazione di indice di rifrazione iniziale.

2) CRISTALLI FOTONICI 2D IN GUIDA D'ONDA PLANARE: SILICIO SU ISOLANTE, NITRURO DI SILICIO

Le attività di ricerca su questo punto si sono focalizzate sui reticoli fotonici 2D realizzati in guida d'onda planare: in questi sistemi la propagazione della luce è controllata nel piano 2D dalle riflessioni di Bragg e verticalmente dalla riflessione totale all'interno della guida d'onda planare, ottenendo così il controllo completo della propagazione.

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) (TO, TS, PV in collaborazione con LPN-Marcoussis). Inoltre sono state realizzate membrane sospese di silicio mediante rimozione dello strato sottostante di ossido. Le misure più innovative sono state effettuate su guide d'onda lineari nel reticolo triangolare su membrana, con la tecnica di riflettanza totale attenuata o ATR mediante l'uso di un prisma di Silicio (PV): 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 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.

Guide di tipo W1 e W1.5 (cioè con larghezza di canale aumentata del 50%), anche contenenti riflettori e cavità, sono state misurate in trasmissione mediante un nuovo set-up con laser accordabile (PV). E' stata verificata la presenza di modi guidati e (nel caso di campioni con cavità) di risonanze associate a difetti localizzati. E' attualmente in corso lo studio degli effetti di tuning e switching delle bande fotoniche e della trasmissione guidata mediante un laser impulsato di pompa. Sulle guide d'onda fotoniche di SOI sono state effettuate varie misure di generazione di terza armonica, 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. Inoltre sono stati osservati e interpretati effetti di diffrazione nonlineare fino al terzo ordine.

2b) Sono state prodotte guide d'onda di nitruro di silicio in ossido (TN). Di queste guide sono state misurate le perdite di trasmissione con la tecnica di cut-back su campioni clivati di lunghezza variabile, sia per determinate lunghezze d'onda (TN) che su ampio spettro con luce bianca (PV). 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 delle strutture fotoniche monodimensionali, periodiche e contenenti cavità, utilizzando il nuovo sistema di Focused-Ion Beam o FIB (TS). Tali strutture sono state misurate mediante trasmissione in guida d'onda (TN, PV). 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) 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 (TO). 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). Sono state effettuate misure di trasmissione in guida per la caratterizzazione ottica (PV). 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. Successivamente sono state integrate guide a ridge con tapering all'ingresso e all'uscita delle guide fotoniche, e sono stati realizzati filtri a nanocavità inseriti nelle guide luminescenti utilizzando la tecnica FIB (TS).

2d) Infiltrazione di materiali attivi e guide d'onda riscrivibili - E' stata sviluppata una tecnica di micro-infiltrazione locale controllata (FI) per la realizzazione e/o infiltrazione di guide d'onda e nanocavità in cristalli fotonici bidimensionali. In una prima fase sono stati utilizzati cristalli fotonici di Silicio macroporoso con periodicità micrometrica (TN) che sono stati infiltrati mediante cristalli liquidi e coloranti laser (FI). Sono state realizzate file di pori e guide d'onda a S per mezzo della tecnica di infiltrazione locale. In una seconda fase sono state realizzate cavità fotoniche su membrane di Silicio (PV+LPN), consistenti di un foro grande in un cristallo fotonico 2D di fori più piccoli. Le strutture sono state progettate per l'infiltrazione locale del poro centrale e l'applicazione della tecnica di micro-infiltrazione ha avuto successo (FI). 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 (FI). La tecnica e i risultati sono fortemente innovativi a livello internazionale.

E' stato 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 (TN). 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). Inoltre sono state realizzate guide di polimetilmetacrilato (PMMA) su silicio poroso ossidato, ottenendo una guida a basso contrasto di indice di rifrazione su substrato di silicio, e anche queste guide sono state infiltrate con coloranti organici. I vari campioni sono stati caratterizzati otticamente, eseguendo misure di perdite di propagazione in guida, fotoluminescenza e 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 e la determinazione del guadagno g sono state effettuate attraverso misure variable stripe length (VLS) e shifting excitation spot (SES).

3) CRISTALLI FOTONICI TRIDIMENSIONALI: OPALI E OPALI INVERSI

3a) Nell'ambito della realizzazione di strutture 3D, sono stati ottimizzati (TO) i processi di sintesi di nanosferule di Silice mediante idrolisi di tetra-etil-orto-silicato (TEOS). La 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 beaker 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 (PV) 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 (TO) 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) Al fine di analizzare l'influenza della struttura fotonica sull'emissione spontanea, diversi opali sono stati infiltrati (TO) con coloranti organici con emissione nel visibile-vicino IR (Cianine e Ossazine). Strutture alternative sono state realizzate con opali cresciuti su film sottili di a-SiN:H luminescente. E' stata verificata l'inibizione dell'emissione dei coloranti e dei film di Nitruro di Silicio in direzione normale rispetto alla superficie (111) degli opali, in corrispondenza degli pseudo-gap (punto critico L nella prima zona di Brillouin 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, è la causa dell'allineamento spontaneo del cristallo liquido. 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, permettendo di ottenere lo switching elettrico del band gap fotonico. Rispetto allo switching in campo magnetico previsto originariamente nella proposta, gli effetti di anisotropia, allineamento del nematico e swiching in campo elettrico mostrano numerosi vantaggi e sono stati ampiamente studiati nel corso del progetto.

4) TEORIA DEI CRISTALLI FOTONICI E DELL'INTERAZIONE RADIAZIONE-MATERIA

4a) Bande fotoniche e perdite per diffrazione nelle guide d'onda fotoniche

E' stato formulato il metodo originale di espansione nella base dei modi guidati (Guided-Mode Expansion, GME) per il calcolo delle bande fotoniche e delle perdite per diffrazione nei cristalli fotonici 2D in guida d'onda planare (PV). Inoltre il metodo è stato esteso al calcolo delle perdite dovute al disordine, come descritto nel punto successivo 4c).

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. Ad esempio è stato studiato il reticolo triangolare di fori triangolari, che è risultato di interesse sia per la presenza di un gap completo nel modo guidato del primo ordine che per applicazioni all'ottica nonlineare. Sono stati studiati sia i reticoli 1D e cavità in guide fotoniche di membrane ad alto indice o 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 (PV). Inoltre sono state effettuati calcoli utilizzando il package MIT delle guide d'onda lineari e a S realizzati nei cristalli fotonici bidimensionali (FI).

4b) Proprietà ottiche

Sono stati calcolati gli spettri di riflessione e trasmissione delle guide d'onda fotoniche mediante il metodo della matrice di scattering (PV). Il metodo è stato poi esteso al calcolo degli spettri di emissione in guide d'onda attive, ossia contenenti uno strato di dipoli. Un altro sviluppo interessante 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. L'approssimazione a cinque cilindri è del tutto soddisfacente, non solo per la regione a bassa energia ma anche per quella ad alta energia e alto angolo.

Successivamente sono state calcolate le proprietà ottiche degli opali: 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 affidabile ed efficiente dal punto di vista computazionale. In particolare è stato possibile interpretare le misure di fase nella regione a bassa energia (PV). Inoltre è stato calcolato e discusso un interessante effetto detto di "Pendelloesung", che consiste in oscillazioni dell'intensità di luce diffratta nella regione di alta energia in funzione dello spessore del campione. L'effetto è dovuto all'interferenza fra due modi che si propagano alla stessa energia ma a diverso vettore d'onda.

Presso l'unità di Trento sono stati effettuati vari calcoli di propagazione nelle guide d'onda fotoniche con metodi FDTD. Inoltre sono state ottimizzate le configurazioni e studiate le geometrie di taper al fine di minimizzare le perdite per diffrazione nelle regioni di accoppiamento.

4c) 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 (PV). 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.

Mediante lo stesso metodo sono stati quantificati gli effetti del 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.

4d) Interazione radiazione-materia, ottica nonlineare

E' stato condotto uno studio approfondito dell'interazione fra modi fotonici ed eccitoni in guide d'onda fotoniche contenenti una quantum well. Sono state determinate le condizioni per avere accoppiamento forte, o polaritoni nei cristalli fotonici. Inoltre è stata studiata l'interazione radiazione-materia in nano-cavità fotoniche contenenti quantum dots e sono state formulate le condizioni per

l'accoppiamento forte.

E' stata studiata la generazione di armoniche con doppia risonanza in cristalli fotonici 1D contenenti cavità. Il metodo di analisi è basato sul concetto di mappe dei gap fotonici, in presenza di dispersione dell'indice dei materiali. Sono state determinate le condizioni per avere massimo scaling con il numero di periodi nei riflettori di Bragg. Lo scaling è esponenziale ed è massimo quando sono verificate le condizioni di phase-matching. Inoltre sono stati interpretati gli esperimenti di generazione di terza armonica su guide d'onda fotoniche di SOI mediante opportuna estensione del metodo della matrice di scattering.

I risultati del progetto sono l'oggetto di varie pubblicazioni comuni, elencate nei modelli C, che mostrano l'elevato livello di collaborazione raggiunto fra le unità partecipanti. Anche lo sviluppo di strumentazione e l'addestramento di giovani ricercatori sono state attività importanti, come riportato nei modelli C. In conclusione, sono stati raggiunti gli obiettivi iniziali e in molti casi si è potuto andare oltre, mantenendo la ricerca dei gruppi partecipanti e della rete al livello dello stato dell'arte internazionale con vari risultati di rilievo.

12. Problemi riscontrati nel corso della ricerca

La fabbricazione delle strutture bidimensionali in silicio macroporoso si è rivelata molto più complessa di quanto ipotizzato inizialmente. Dapprima sono state riscontrate diverse difficoltà nella messa a punto della litografia a fascio elettronico, necessaria a definire le strutture submicrometriche. 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 nitrato 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. Sono state testate diverse possibili soluzioni, fra cui la deposizione di uno strato di nitrato di silicio a bassissimo stress e la definizione spaziale dei siti di nucleazione dei fori mediante focused-ion beam (FIB). Al momento sta proseguendo l'ottimizzazione del processo di attacco in RIE della maschera di nitrato ad elevata resistenza anche all'etching in plasma. Il ritardo nella realizzazione del silicio macroporoso ha condizionato alcuni sviluppi successivi previsti dal progetto, soprattutto la realizzazione di guide d'onda e lo studio degli effetti di amplificazione in questo sistema, mentre sono stati ottenuti ottimi risultati sull'infiltrazione del silicio macroporoso utilizzando campioni già disponibili con periodicità superiori al micron. Per questi motivi, la ricerca sui cristalli fotonici bidimensionali si è concentrata sulle strutture 2D in guida d'onda, come riportato nel punto 2) del campo precedente, in linea con le tendenze della ricerca a livello internazionale.

Sulle strutture 3D sono stati evidenziati problemi nella fabbricazione della Yablonovite in dielettrico ad alto indice, a causa della formazione di nanowires di silicio al momento dell'infiltrazione del template metallico. Si è quindi scelto di focalizzare la ricerca sugli opali diretti e inversi, sui quali sono stati ottenuti ottimi risultati in termini di crescita di campioni.

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

n°	Università	Facoltà	Responsabile	Quota Ateneo	Cofinanziamento assegnato	Finanziamento totale	Pagato	Residuo da saldare (già fatturato)	Cifra impegnata	Spese globali sostenute
1.	Università degli Studi di PAVIA	Facoltà di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	ANDREANI Lucio	37.500	87.500	125.000	125.000	0	0	125.000
2.	Università degli Studi di FIRENZE	Facoltà di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	COLOCCI Marcello	23.500	54.700	78.200	76.530	0	1.670	78.200
3.	Politecnico di TORINO	Facoltà di INGEGNERIA III	GIORGIS Fabrizio	25.600	59.500	85.100	85.105	0	0	85.100
4.	Università degli Studi di TRENTO	Facoltà di SCIENZE MATEMATICHE FISICHE e NATURALI	PAVESI Lorenzo	20.700	48.300	69.000	68.950	0	0	69.000
	TOTALE			107.300	250.000	357.300	355.585	0	1.670	357.300

14. Risorse umane complessivamente ed effettivamente impegnate

(mesi uomo)

	I anno	II anno	TOTALE
personale universitario	36	34	70
altro personale	107	108	215
Personale a contratto a carico del PRIN 2004 (escluse le borse di dottorato)	42	41	83
Borse di dottorato	0	0	0

15. Modalità di svolgimento (dati complessivi)

	(numero)
partecipazioni a convegni pertinenti:	
in Italia	35
all'estero	40
articoli pertinenti pubblicati:	
su riviste italiane con referee	0
su riviste straniere con referee	67
su altre riviste italiane	0
su altre riviste straniere	2
comunicazioni a convegni/congressi internazionali pertinenti	56
comunicazioni a convegni/congressi nazionali pertinenti	19
rapporti interni	2
brevetti depositati	1

16. Tabella delle spese sostenute

n°	Responsabile (Cognome e Nome)	Università	Materiale inventariabile	Grandi Attrezzature	Materiale di consumo	Spese per calcolo ed elaborazione dati	Personale a contratto a carico del PRIN 2004	Dottorati di ricerca a carico del PRIN 2004	Servizi esterni	Missioni	Pubblicazioni
1.	ANDREANI Lucio	Università degli Studi di PAVIA	45.665	0	20.352	0	40.005	0	2.958	10.000	1.000
2.	COLOCCI Marcello	Università degli Studi di FIRENZE	20.469	0	16.670	0	22.911	0	0	5.127	3.200
3.	GIORGIS Fabrizio	Politecnico di TORINO	23.016	0	36.068	0	18.200	0	0	4.276	
4.	PAVESI Lorenzo	Università degli Studi di TRENTO	10.472	0	14.392	0	32.276	0	0	11.311	
TOTALE			99.622	0	87.482	0	113.392	0	2.958	30.714	4.200

(Per la copia da depositare presso l'Ateneo e per l'assenso alla elaborazione e diffusione delle informazioni riguardanti i programmi di ricerca presentati; D.lgs. 196/2003 del 30/06/2003 sulla "Tutela dei dati personali")

Data 11/01/2007 20:15

Firma