

COMPITI E SUDDIVISIONE FONDI TRA LE UNITÀ DI RICERCA
prot. 2005025391

Coordinatore Scientifico	Ilaria CRISTIANI
Ateneo	Università degli Studi di PAVIA
Titolo della Ricerca	Guide ottiche in SiGe: progettazione, fabbricazione, caratterizzazione e applicazione all'amplificazione Raman.
Finanziamento assegnato	Euro 244.000
Durata	24 Mesi

Obiettivo della Ricerca

Il programma di ricerca ha come obiettivo la progettazione, la fabbricazione e la caratterizzazione di guide d'onda basate sulla lega Silicio-Germanio (SiGe) e la loro applicazione all'amplificazione Raman. Tale programma si inquadra nell'obiettivo generale di sviluppare circuiti optoelettronici integrati per i sistemi fotonici di prossima generazione. L'idea è quella di posizionare sullo stesso substrato una serie di componenti che svolgono funzioni ottiche ed elettroniche. Il Silicio (Si) è sicuramente il materiale più promettente per questa applicazione e la guida d'onda è il componente di base per ogni circuito ottico.

Questo progetto si propone di studiare guide d'onda di nuova concezione, caratterizzate da un nucleo in SiGe e un mantello in Si, che siano monomodali, garantiscano un buon accoppiamento con la fibra ottica, abbiano perdite limitate, e presentino proprietà ottiche nonlineari adeguate a realizzare operazioni di elaborazione dei segnali quali amplificazione e conversione di frequenza.

La progettazione e la fabbricazione di questo tipo di guide pone una serie di problemi legati alla struttura dello strato SiGe: il primo obiettivo è quello di controllare e ottimizzare le condizioni di crescita dello strato SiGe. Infatti il profilo d'indice della guida dipende criticamente sia dal profilo di concentrazione di Germanio (Ge), sia dallo stato di stress ('strain') generato dal disadattamento delle costanti reticolari all'interfaccia tra SiGe e Si. Le conoscenze attuali sulla struttura dei difetti all'interfaccia non sono sufficienti per prevedere uno specifico comportamento ottico della guida. Uno degli obiettivi fondamentali del progetto è quello di stabilire una correlazione tra la struttura dello strato SiGe e le proprietà di propagazione della luce.

Il programma si propone di individuare la migliore struttura di guida a canale monomodale basata su SiGe per massimizzare l'efficienza dei fenomeni ottici nonlineari, con particolare attenzione all'amplificazione Raman. Scopo finale del progetto è quello di realizzare un amplificatore di luce ed un oscillatore laser in guida SiGe basati sull'effetto Raman.

Il progetto si sviluppa su tre fasi caratterizzate da specifici obiettivi:

Fase 1

L'obiettivo della prima fase è l'ottimizzazione dei parametri di crescita e di progettazione della guida. In questa fase verranno progettate e fabbricate guide d'onda planari di tipo Si/SiGe/Si e Si/SiGe/aria tramite la tecnica LEPCVD (low-energy plasma enhanced chemical vapour deposition): saranno realizzate sia guide con strati SiGe sottili 'strained', (spessore inferiore a 1 micrometro, concentrazione di Ge inferiore a 10%), sia strati più spessi con SiGe meccanicamente rilassato (spessori dell'ordine di qualche micrometro, concentrazione di Ge tipicamente tra 0.5 e 5 %).

Le guide planari saranno caratterizzate in termini di qualità dei materiali e delle strutture e di comportamento ottico:

a) al variare dei parametri di crescita, sarà valutata la qualità dei materiali in termini di contenuto di impurezze e regolarità morfologica e sarà realizzata un'analisi della presenza e delle proprietà delle dislocazioni e la determinazione della loro densità. Le strutture saranno inoltre analizzate mediante spettroscopia Raman per ricavare informazioni sulla composizione degli strati di SiGe e la presenza di 'strain' residuo. Misure di micro-Raman forniranno informazioni su eventuali gradienti di composizione presenti nelle strutture dovuti a possibili effetti di segregazione alle interfacce e sulla presenza di eventuali modulazioni del campo di 'strain';

b) verrà ricavata una dettagliata caratterizzazione dei modi spaziali di campo in funzione delle coordinate orizzontali e verticali e al variare della polarizzazione in uscita. Dalla valutazione delle dimensioni modali verranno ottenuti, tramite simulazione numerica, l'andamento e il valore del salto d'indice tra SiGe e Si e si avrà una valutazione della birifrangenza della struttura.

Verrà messo a punto un nuovo metodo di analisi della distribuzione delle dislocazioni, basato su una tecnica completamente ottica, tramite la misura combinata dell'intensità ottica di uscita in funzione della coordinata orizzontale e della trasmissione spettrale disordinata a larga banda. Per l'interpretazione delle misure sarà sviluppato un modello in grado di simulare il campo di deformazione introdotto da una griglia bidimensionale di dislocazioni. La mappatura del campo elastico sarà trasformata in quella dell'indice di rifrazione all'interno della guida bidimensionale SiGe.

Fase 2

L'obiettivo della seconda fase del progetto è lo studio e la fabbricazione di guide a canale in SiGe. Le guide a canale saranno accuratamente progettate per ottenere specifiche prestazioni ottiche:

a) basse perdite (< 0.8 dB/cm);

b) compromesso tra ridotte dimensioni modali per l'ottimizzazione delle prestazioni nonlineari e efficienza di accoppiamento da fibra ottica;

c) efficace riduzione delle perdite da FCA (free-carrier absorption) tramite riduzione del tempo effettivo di vita delle cariche libere nella regione spaziale in cui si propaga il modo;

d) opportune caratteristiche dispersive.

Le guide a canale saranno realizzate partendo dalla crescita della lega tramite LEPECVD, e verranno poi strutturate con litografia ottica e attacco anisotropo. Nel caso si vogliano ottenere bassi salti d'indice i canali di lega SiGe saranno immersi in Si con un'ulteriore deposizione epitassiale dopo l'attacco. L'analisi di composizione e strain delle guide sarà effettuata mediante la tecnica micro Raman.

Le prestazioni ottiche saranno analizzate tramite una serie di caratterizzazioni sperimentali che si concentreranno principalmente sulla misura delle perdite e del comportamento modale delle guide. L'assorbimento da cariche libere e il tempo di vita delle cariche nella regione modale verranno determinati tramite misure basate sulla tecnica di pump and probe. Verrà misurata la dispersione della velocità di gruppo delle varie strutture di guida.

Dal punto di vista teorico, per la prima volta sarà valutato l'impatto delle dislocazioni per il sistema Si/SiGe/Si nel caso quasi-unidimensionale: verrà determinata la distribuzione di deformazione reticolare nel Si circostante alla sezione della guida, anche attraverso simulazioni numeriche a scala ridotta con potenziali interatomici classici. Lo studio permetterà di comprendere, al variare della sezione della guida, l'influenza di difetti lineari estesi sul processo di rilascio dell'energia elastica accumulata

Fase 3

L'obiettivo della terza fase è la fabbricazione di un amplificatore e di un oscillatore laser Raman basati su una guida SiGe a canale. Verrà svolta una dettagliata caratterizzazione sperimentale riguardo ai seguenti punti: banda di emissione Raman spontanea delle strutture SiGe, spostamento in frequenza dell'onda Stokes in funzione della concentrazione di Ge e della struttura di guida adottata, guadagno di amplificazione stimolata.

Verranno verificate le prestazioni di alcune configurazioni sperimentali di amplificatori e laser in SiGe basato sull'effetto Raman. Nella parte finale del progetto verrà eseguito uno studio riguardo all'efficienza del fenomeno di conversione di frequenza innescato dall'effetto Raman (CARS - Coherent anti-Stokes Raman scattering) e alle condizioni di 'phase matching' per questo processo

Innovazione rispetto allo stato dell'arte nel campo

Lo sviluppo di circuiti optoelettronici integrati riveste una fondamentale importanza per i sistemi fotonici di prossima generazione. L'idea di base è di avere a disposizione una serie di componenti che svolgono funzioni ottiche e optoelettroniche, tutti integrati sullo stesso substrato. Il Silicio è sicuramente il materiale più interessante per questa applicazione dato il basso costo del materiale, l'elevata purezza e omogeneità delle fette disponibili commercialmente e infine il fatto che tutti i processi di fabbricazione si basano su una tecnologia estremamente matura. Molti gruppi sono attivi nel campo della fotonica basata su Si (Silicon photonics) e seguono approcci diversi per ottenere dispositivi attivi integrati come sorgenti di luce, modulatori e interruttori ottici. Il componente di base di ogni circuito ottico è la guida d'onda. I lavori riportati nella letteratura scientifica sono concentrati principalmente su due tipi di guida compatibili con la tecnologia in Si: le guide in ossido di Silicio (SiO_2) su Si (SOS, silica on silicon) e le guide in Si cresciute sopra un isolante (SOI, Silicon on insulator). Fino ad oggi, solo un numero limitato lavori scientifici ha considerato la fattibilità di guide d'onda basate sulla lega SiGe, in cui l'effetto di guida d'onda sia ottenuto in strutture epitassiali Si/SiGe (con un eventuale mantello superiore in Si) utilizzando lo strato SiGe come nucleo e il Si come mantello. Questa idea è molto interessante, poiché queste strutture possono essere realizzate in modo da avere un basso contrasto d'indice, che è un requisito importante per ottenere un comportamento monomodale. Inoltre è possibile modificare le proprietà ottiche della guida semplicemente variando la concentrazione di Germanio (Ge). Data la composizione cristallina del nucleo, queste guide sono molto promettenti per la realizzazione di dispositivi integrati e per l'utilizzo di fenomeni ottici nonlineari finalizzati alla elaborazione ottica dei segnali. Poiché le dimensioni della guida possono essere dell'ordine di alcuni micrometri, è necessario disporre di una tecnica di deposizione efficiente. I metodi più utilizzati per la deposizione di eterostrutture epitassiali SiGe/Si sono l'epitassia da fasci molecolari (MBE Molecular Beam Epitaxy) o diverse forme di deposizione da fase vapore (CVD Chemical Vapour Deposition). È stata recentemente inventata da uno dei proponenti di questo progetto, una nuova tecnica di crescita epitassiale chiamata Low-Energy Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (LEPECVD). L'utilizzo di LEPECVD è molto vantaggioso per la fabbricazione di guide d'onda, in quanto offre alti tassi di deposizione ad un basso carico termico.

L'attività di ricerca sulle guide SiGe è ad uno stadio preliminare e molti aspetti devono ancora essere chiariti. Due sono i punti cruciali da affrontare:

- a) le caratteristiche strutturali e le proprietà ottiche dello strato SiGe cresciuto su Si
- b) il comportamento ottico nonlineare delle guide SiGe

a) Le prestazioni ottiche di questo tipo di guida sono criticamente dipendenti dalle caratteristiche di crescita dello strato SiGe, quali la concentrazione di Ge, l'uniformità composizionale e la presenza di difetti all'interfaccia Si-SiGe. Un ruolo fondamentale è giocato dalla differenza tra la costante reticolare di Si e SiGe che può dare origine a campi locali di 'strain' che modificano la risposta dielettrica e quindi le condizioni di propagazione nella guida. La conoscenza e la possibilità di modellizzare i meccanismi microscopici attraverso cui un campo di deformazione elastica influisce sulle caratteristiche di propagazione della luce in strati SiGe è molto limitata. Rimane inoltre da esplorare l'effetto globale di una rete di dislocazioni che produca una modulazione periodica dell'indice di rifrazione su una griglia bidimensionale.

Poiché le proprietà ottiche della guida d'onda SiGe sono strettamente dipendenti dalle proprietà strutturali, per il successo delle operazioni di progettazione e fabbricazione è essenziale analizzare in dettaglio la qualità morfologica e strutturale delle guide depositate e la rivelazione di difetti e lo studio delle loro proprietà. Per questo tipo di applicazioni sono state sviluppate numerose tecniche sperimentali, quali la Microscopia Elettronica in Trasmissione (TEM), Microscopia Elettronica a Scansione (SEM), la spettroscopia di fotoluminescenza (PL), la spettroscopia Raman, le tecniche Electron Beam Induced Current (EBIC) e Light Beam Induced Current (LBIC).

In particolare la spettroscopia micro-Raman, con risoluzione spaziale inferiore a 1 micrometro, è stata applicata con successo allo studio dello stress in circuiti integrati e in guide d'onda SiGe/Si. L'interesse per tale tecnica risiede anche nel fatto che le frequenze Raman di SiGe dipendono in modo caratteristico dalla composizione della lega e dallo 'strain'.

b) L'interesse per l'ottica integrata in Si è motivato anche dalle proprietà nonlineari di questo materiale: rispetto alla fibra ottica l'effetto Raman è 10^4 più efficiente in Si, mentre l'effetto Kerr è solo 10^3 volte più efficiente. Inoltre, l'elevato confinamento ottico fornito dal regime di propagazione guidata rende ancora più efficace l'interazione nonlineare. In particolare il fenomeno di diffusione stimolata Raman rappresenta una delle tecniche più promettenti per ottenere generazione e amplificazione di luce in Si. Rispetto ai vari approcci presentati in letteratura, l'emissione Raman offre il vantaggio di poter essere sfruttata in strutture integrate convenzionali e di non richiedere alcun drogaggio o nanostrutturazione del materiale. Inoltre, con una opportuna scelta della lunghezza d'onda di pompa, è possibile ottenere amplificazione a tutte le lunghezze d'onda di interesse per le telecomunicazioni.

Molto recentemente è stata dimostrata emissione laser Raman in Si sia in regime continuo da un gruppo della Intel sia in regime impulsato da un gruppo dell'Università della California.

Inoltre la non linearità di tipo Raman in Si, offre la possibilità di realizzare il processo di conversione di frequenza tramite un fenomeno risonante di miscelazione a quattro onde chiamato CARS (Coherent-AntiStokes-Raman Scattering)

Il limite fondamentale all'utilizzo dell'amplificazione Raman, e in generale di tutti i processi non lineari, è rappresentato dall'assorbimento da carica libera (FCA- free carrier absorption) generata tramite il processo di assorbimento a due fotoni. Una soluzione efficace è quella di ridurre le dimensioni dell'area modale nella guida in Si o di inglobare la guida in una giunzione p-i-n polarizzata inversamente. Un'altra soluzione per la riduzione della FCA consiste nell'utilizzare una pompa impulsata. Se la durata dell'impulso è molto inferiore rispetto al tempo di vita delle cariche e il periodo di ripetizione è molto maggiore, l'effetto di FCA diventa trascurabile. E' evidente l'importanza di un disegno accurato della guida al fine di sfruttare tutte le potenzialità offerte dall'interazione Raman. Inoltre, con l'introduzione di Ge nel nucleo, lo spostamento in frequenza dell'onda Stokes e la banda di amplificazione possono essere finemente ingegnerizzate modulando la concentrazione di Ge o lo stress meccanico dovuto al disadattamento tra le costanti reticolari.

In conclusione, le guide basate sulla lega SiGe potrebbero costituire un componente estremamente flessibile con elevate potenzialità sia per la progettazione e realizzazione di circuiti ottici integrati, sia per le applicazioni ai fenomeni ottici non lineari. La ricerca scientifica su questo tipo di guide è ancora ad uno stadio preliminare e molti problemi sono tuttora aperti a partire dalla struttura del materiale in sé fino alla risposta non lineare della guida.

Criteri di verificabilità

Il presente progetto è strutturato in tre fasi che sono caratterizzate da obiettivi specifici e ben differenziati. Riteniamo quindi che i criteri ottimi di verifica debbano basarsi sulla valutazione del grado di adempimento degli obiettivi proposti in ciascuna fase e sulla qualità dei risultati raggiunti

Fase 1

L'obiettivo generale della prima fase del progetto consiste nella fabbricazione di guide d'onda planari di tipo Si/SiGe/Si e Si/SiGe/aria tramite la tecnica LEPECVD. Verranno realizzate sia guide con strati SiGe sottili 'strained', (spessore < 1 micrometro, concentrazione di Ge < 10%), sia guide con strati più spessi con SiGe meccanicamente rilassato (spessori dell'ordine di qualche micrometro, concentrazione di Ge tipicamente tra 0.5 e 5 %).

La qualità dei risultati raggiunto potrà essere valutata secondo i seguenti criteri:

- a) Capacità di controllare la qualità dei materiali in termini di contenuto di impurezze e regolarità morfologica e della presenza e delle proprietà delle dislocazioni;
- b) Completa caratterizzazione e capacità di controllo delle proprietà ottiche degli strati Si Ge cresciuti;
- c) Progettazione, realizzazione e caratterizzazione di guide ottiche planari basate sulla lega SiGe. L'esito di questo punto dovrà permettere di ottenere guide monomodali, sia a larga area modale, sia a piccola area modale, con perdite inferiori a 1 dB/cm;
- d) Sviluppo di un metodo di analisi della distribuzione delle dislocazioni, basato su una tecnica completamente ottica;
- e) Individuazione della relazione tra il campo elastico dovuto alle dislocazioni e le proprietà ottiche del materiale in termini di variazione di indice di rifrazione all'interno della guida bidimensionale SiGe.

Fase 2

L'obiettivo generale della seconda fase del progetto consiste nello studio e la fabbricazione di guide a canale in SiGe. Le guide saranno realizzate partendo dalla crescita della lega tramite LEPECVD, e verranno poi strutturate con litografia ottica e attacco anisotropo. Per ottenere bassi salti d'indice i canali di lega SiGe saranno immersi in Si con un'ulteriore deposizione epitassiale dopo l'attacco.

La qualità dei risultati raggiunti potrà essere valutata secondo i seguenti criteri:

- a) Fabbricazione di guide con perdite < 0.8 dB/cm;
- b) Compromesso tra ridotte dimensioni modali per l'ottimizzazione delle prestazioni non lineari e efficienza di accoppiamento (o da fibra ottica o da obiettivo) ;
- c) Efficace riduzione delle perdite da FCA (free-carrier absorption) tramite riduzione del tempo effettivo di vita delle cariche libere nella regione spaziale in cui si propaga il modo;
- d) Capacità di valutare l'impatto delle dislocazioni per il sistema Si/SiGe/Si nel caso quasi-unidimensionale. Determinazione della distribuzione di deformazione reticolare nel Si circostante alla sezione della guida. Lo studio permetterà di prevedere le dimensioni minime critiche della sezione della guida per la nucleazione di dislocazioni.

Fase 3

L'obiettivo generale della terza fase è la fabbricazione di un amplificatore Raman basati su una guida SiGe a canale

La qualità dei risultati raggiunti potrà essere valutata secondo i seguenti criteri:

- a) Completa caratterizzazione delle proprietà Raman delle strutture SiGe: spostamento in frequenza dell'onda Stokes in funzione della concentrazione di Ge e della struttura di guida adottata, guadagno di amplificazione stimolata;
- b) Capacità di progettazione di guide ottimizzate per la riduzione delle perdite da FCA e il potenziamento del comportamento non lineare;
- c) Progettazione e verifica delle prestazioni di alcune configurazioni sperimentali di amplificatori Raman;
- d) Progettazione di efficienti cavità Raman e verifiche preliminari sul funzionamento di oscillatori basati sull'effetto Raman;
- e) Valutazione dell'efficienza del fenomeno di conversione di frequenza innescato dall'effetto Raman (CARS - Coherent anti-Stokes Raman scattering) e delle condizioni di 'phase matching' per questo processo.

Elenco delle Unità di Ricerca

Sede dell'Unità	Università degli Studi di PAVIA
Responsabile Scientifico	Ilaria CRISTIANI
Finanziamento assegnato	Euro 65.400

Compito dell'Unità

L'Unità di ricerca dell'Università di Pavia avrà il compito di studiare sperimentalmente il comportamento ottico lineare e nonlineare delle guide d'onda SiGe. Il ruolo di questa Unità è quindi quello di fornire in tutte le fasi del progetto, la sintesi e la verifica dell'attività di progettazione, fabbricazione, simulazione e caratterizzazione strutturale svolte da tutte le Unità aderenti al progetto. L'Unità di Pavia sarà inoltre responsabile di tutte le operazioni di lucidatura e finitura ottica delle guide. Per quanto riguarda le guide planari, compito dell'Unità di Pavia sarà quello di caratterizzare otticamente le strutture Si/SiGe/Si in funzione della concentrazione di Ge e dello spessore della guida. Delle guide verrà fornita una completa caratterizzazione dei modi spaziali di campo, in funzione delle coordinate orizzontali e verticali e al variare della polarizzazione in uscita.

Verrà studiata una nuova tecnica per valutare la presenza di dislocazioni e la loro distribuzione spaziale nelle guide combinando la misura dell'intensità di uscita in funzione della coordinata orizzontale e la misura della trasmissione spettrale di sorgenti a larga banda (ASE, sorgenti laser accordabili con impulsi di durata pari a 100 fs)

L'Unità di Pavia valuterà le perdite delle guide planari tramite tecniche di 'cut-back'. Nella seconda fase del progetto, compito di questa Unità sarà la verifica delle prestazioni ottiche delle guide a canale.

I punti principali dell'attività sono i seguenti:

- misura delle perdite delle guide a canale tramite la tecnica 'cut-back' o tramite altre tecniche riportate in letteratura
- Misura delle dimensioni modali dei modi TE -TM. Da questa analisi, svolta in stretta collaborazione con l'Unità Insubria e Milano Bicocca, sarà ricavato il salto d'indice della guida e si otterranno indicazioni sulla migliore struttura di confinamento da adottare (guida 'rib' o sepolta) e sul tipo di materiale da utilizzare come mantello di ricopertura.
- Misure di assorbimento da carica libera e valutazione del tempo di vita dei portatori nelle varie strutture sotto analisi. Le misure verranno effettuate tramite tecniche di 'pump and probe'.
- Caratterizzazione della dispersione della velocità di gruppo nell'intervallo di lunghezze d'onda di interesse (attorno a 1.5 micrometri).

Nella terza fase del progetto i compiti dell'Unità di Pavia saranno finalizzati alle misure nonlineari di emissione Raman sulle guide a canale. Lo scopo iniziale sarà quello di acquisire una informazione completa riguardo alla banda di emissione Raman spontanea delle strutture SiGe e allo spostamento in frequenza dell'onda Stokes in funzione della concentrazione di Ge e della struttura di guida adottata, in regime co- e contro-propagante tra pompa e segnale. Inoltre, tramite misure di amplificazione stimolata, verrà ricavato il coefficiente di guadagno Raman anche in funzione della polarizzazione dei campi interagenti. Le misure verranno effettuate tramite una sorgente di impulsi ai picosecondi di durata e lunghezza d'onda accordabili. Si valuterà anche l'opportunità di effettuare misure di guadagno di emissione stimolata Raman utilizzando una pompa in continua. Nella parte finale del progetto verranno provate alcune configurazioni sperimentali per la realizzazione di un laser in SiGe basato sull'effetto Raman. Inoltre saranno eseguite verifiche preliminari riguardo all'efficienza del fenomeno di conversione innescato dall'effetto Raman (CARS - Coherent anti-Stokes Raman scattering) e alle condizioni di 'phase matching' per questo processo.

Sede dell'Unità	Politecnico di MILANO
Responsabile Scientifico	Hans VON KAENEL
Finanziamento assegnato	Euro 78.500

Compito dell'Unità

L'Unità del Politecnico di Milano avrà il compito di fabbricare tutte le strutture di guida d'onda che verranno progettate e utilizzate dalle altre Unità aderenti al progetto. La prima fase del progetto sarà dedicata alla fabbricazione di guide d'onda planari Si/SiGe/Si tramite il processo chiamato low-energy plasma enhanced chemical vapour deposition (LEPECVD). Verranno determinati i contenuti in Ge ottimali (nell'ordine del percento), lo spessore dello strato di SiGe e della copertura di Si ottimali compatibili con i seguenti requisiti (1) ottenimento di una guida monomodale e accoppiamento efficiente con fibre ottiche, (2)rilassamento dello stato di compressione con dislocazioni da disadattamento reticolare ('misfit') della maggior lunghezza possibile, o (3) rilassamento dello stato di compressione trascurabile.

La qualità dell'interfaccia Si-SiGe sarà studiata con una combinazione di microscopia elettronica a trasmissione (TEM) e spettrometria a retrodiffusione di Rutherford (RBS), in collaborazione con l'ETH di Zurigo. Oltre al TEM, attacchi chimici selettivi saranno usati per studiare la struttura delle dislocazioni e in particolare per valutare la densità di dislocazioni affioranti. Lo stato di compressione degli strati di lega SiGe sarà valutato tramite diffrazione a raggi X ad alta risoluzione (HRXRD- high-resolution X-ray diffraction) in collaborazione con la Interstate University of Applied Sciences in Buchs, Svizzera.

La seconda fase del progetto sarà dedicata alla realizzazione di guide d'onda a canale combinando la crescita epitassiale, tecniche di attacco a ioni reattivi (RIE) o chimico, e la crescita epitassiale della copertura in Si. Le guide a canale saranno realizzate

partendo dalla crescita della lega tramite LEPECVD, e verranno poi strutturate con litografia ottica e attacco anisotropico. Per poter ottenere salti d'indice bassi i canali di lega saranno poi immersi in Si con un'ulteriore deposizione epitassiale dopo l'attacco. L'analisi dei difetti dopo la crescita della copertura in Si sarà di estrema importanza per avere una guida a basse perdite. Allo scopo di facilitare e velocizzare questa analisi, alcuni passi del processo, quali la rimozione dei danni con attacco chimico, lavaggio RCA e bagno in acido fluoridrico saranno eseguiti anche su film di lega non strutturati. Lo scopo sarà di minimizzare la rugosità di superficie durante la pulizia per permettere la crescita di strati di copertura di Si di buona qualità tramite LEPECVD. Infine, durante la III fase del progetto, verranno studiate tecniche per l'ottimizzazione della geometria delle guide d'onda a canale secondo le informazioni ricevute dalle Unità di Pavia, Milano-Bicocca e Insubria.

Sede dell'Unità	Università degli Studi INSUBRIA Varese-Como
Responsabile Scientifico	Daniele FACCIO
Finanziamento assegnato	Euro 37.400

Compito dell'Unità

L'Unità di ricerca Insubria sarà responsabile di tutta l'attività di progettazione delle guide e della simulazione numerica dei processi di interazione Raman. Questa Unità avrà inoltre il compito di supportare l'Unità di Pavia per l'analisi e l'interpretazione dei risultati sperimentali.

Per quanto riguarda la progettazione delle guide verranno affrontati in particolare i seguenti punti:

- 1) Scelta della struttura. Verranno studiate tutte le configurazioni possibili di guida con nucleo in SiGe e mantello in Si (per es. guida planare, rib, channel etc.) che sfrutti al meglio le proprietà dei singoli materiali e della loro combinazione. Particolare attenzione sarà prestata al problema del massimo spessore di SiGe strained che può essere cresciuto su un substrato di Si. Verrà valutata l'utilità di strati ad indice modulato (graded index layers) e di eventuali strati mantello superiore (cap layer) con concentrazioni diverse di Ge per minimizzare gli effetti deleteri dovuti al rilassamento dello stress meccanico e per ottenere guide efficaci delle dimensioni desiderate. Si cercherà il migliore compromesso tra allargamento della banda Raman, proprietà guidanti della guida ottica e riduzione degli effetti deleteri dovuti allo strain.
- 2) Massimizzazione dell'intensità luminosa nella guida per l'interazione Raman. Verranno valutate attentamente le dimensioni minime di guida permesse per evitare che le perdite di propagazione rendano inefficace l'amplificazione Raman. Inoltre verranno studiati vari metodi per accoppiare la luce di pompa da una fibra esterna sul chip di Si, minimizzando le perdite ottiche. Verranno progettati tapers ponendo particolare attenzione ad alcuni aspetti critici, come le dimensioni finali ed iniziali delle guide e la lunghezza su cui avviene la trasformazione adiabatica. Inoltre, verrà studiato l'utilizzo d'altri materiali come per esempio polimeri per la sola zona del 'taper'.
- 3) Riduzione del contributo di FCA (free carrier absorption) mediante disegni opportuni della guida ottica. Verrà valutato l'effetto delle interfacce SiGe/Si, dei difetti in corrispondenza di queste interfacce e anche la mobilità delle cariche attraverso di esse. Si studierà la possibilità di utilizzare una giunzione di tipo p-i-n per rimuovere velocemente le cariche libere dalla guida ottica.
- 4) Studio di guide d'onda micro- e nano-strutturate per aumentare l'efficienza e la funzionalità dell'amplificatore o convertitore Raman.
- 5) Ottimizzazione del processo di conversione di frequenza. Il disegno delle guide dovrà tenere conto della possibilità di ingegnerizzare le differenze di fase tra le onde interagenti, riuscendo in questo modo a rendere il processo più efficiente. Le dimensioni (altezza e larghezza) della guida saranno studiate opportunamente per ottenere lo stesso indice di rifrazione efficace tra la frequenza di Stokes e di anti-Stokes che saranno separate di circa 30 THz, per una fissata frequenza di pompa. Per ottenere queste bisognerà valutare il comportamento dispersivo della guida.

Sede dell'Unità	Università degli Studi di MILANO-BICOCCA
Responsabile Scientifico	Mario GUZZI
Finanziamento assegnato	Euro 62.700

Compito dell'Unità

L'Unità di ricerca di Milano-Bicocca avrà il compito di svolgere una dettagliata caratterizzazione sperimentale dei materiali e delle strutture di interesse per il progetto. Inoltre avrà il compito di fornire un contributo teorico per la modellizzazione del rilascio di strain nelle diverse strutture e delle proprietà dei materiali che derivano da tale rilascio.

Per l'attività sperimentale verranno utilizzate diverse tecniche: spettroscopia di fotoluminescenza (PL) e spettroscopia Raman in diverse condizioni di eccitazione, Electron Beam Induced Current (EBIC) e Light Beam Induced Current (LBIC). Verranno considerati differenti aspetti:

- 1) Analisi della qualità dei materiali, Si e leghe SiGe a basso contenuto di Ge, in termini di contenuto di impurezze e presenza di difetti. Questa attività verrà svolta principalmente mediante misure di PL a bassa temperatura. Le caratteristiche degli strati epitassiali verranno analizzate in relazione alle diverse condizioni di crescita. Di particolare interesse sarà lo studio dello spettro di PL nella regione delle transizioni eccitoniche, da cui possono essere dedotte la frazione molare della lega e informazioni sulla

presenza di difetti di punto ed estesi e sulle fluttuazioni di composizione.

2) *Analisi della presenza e delle proprietà delle dislocazioni da 'misfit' e determinazione della loro concentrazione. Questa verrà svolta principalmente mediante analisi delle figure di attacco chimico con microscopia ottica, microscopia elettronica a scansione (SEM) e misure EBIC e/o LBIC.*

3) *Analisi dei materiali e delle strutture mediante spettroscopia Raman. Spettri Raman misurati in configurazione macro permetteranno di analizzare la composizione degli strati di SiGe e la presenza di strain residuo. L'analisi macro Raman verrà effettuata mediante l'utilizzo di sorgenti a differente energia, quindi con differente profondità di penetrazione nel materiale, allo scopo di sondare le proprietà dei diversi strati delle strutture. Infine, informazioni qualitative sulla presenza di difetti e su fenomeni di segregazione alle interfacce potranno essere dedotte anche dallo studio della forma e dell'intensità delle strutture caratteristiche degli spettri Raman.*

Verranno effettuate inoltre misure di micro-Raman sia sulle guide planari sia su quelle a canale per ottenere informazioni su eventuali gradienti di composizione e su eventuali modulazioni nel campo di strain.

L'attività teorica dell'Unità di Ricerca Milano-Bicocca sarà concentrata principalmente su due aspetti:

1) *Comprensione dei meccanismi che determinano l'interazione tra la modulazione del passo reticolare dovuta alle dislocazioni e la propagazione del segnale luminoso. A questo scopo verrà implementato un modello di continuo elastico, che sia in grado di simulare il campo di deformazione introdotto da una griglia bidimensionale di dislocazioni da misfit ortogonali. Sarà considerata sia una strategia analitica basata su modelli consolidati, sia un approccio numerico, basato sull'applicazione alle dislocazioni del metodo ad elementi finiti. Verrà quindi analizzata la dipendenza del campo elastico dallo spessore della guida SiGe e dalla sua composizione. La mappatura del campo elastico sarà poi trasformata in quella dell'indice di rifrazione all'interno della guida bidimensionale SiGe.*

2) *Analisi della guida d'onda unidimensionale SiGe immersa in Si. In primo luogo verrà determinata la distribuzione di deformazione reticolare indotta dal misfit con il Si circostante la guida. Lo studio si focalizzerà poi sulla comprensione delle modalità di rilascio dello strain in presenza di dislocazioni, al variare delle dimensioni laterali della guida. Tali scopi verranno perseguiti principalmente tramite simulazioni atomistiche, con l'eventuale ausilio di modellizzazioni basate sulla teoria elastica.*
