

INTRODUZIONE

Parecchi sono stati i progressi ottenuti negli ultimi anni nel campo della fotonica integrata, molti dei quali indirizzati all'industria delle telecomunicazioni per lunghezze d'onda di $1.5\mu\text{m}$.

Il silicio ha ricevuto un interesse sempre crescente poiché le sue proprietà permettono di utilizzarlo nella produzione di varie apparecchiature elettroniche ed optoelettroniche. Dispositivi fotonici basati su questo semiconduttore sono stati suggeriti fin dagli anni '80 [1]. Le difficoltà che oggi ci si propone di superare sono rappresentate dalle perdite di propagazione che questa tecnologia comporta. C'è però da dire che i recenti progressi delle tecniche di micro e nanofabbricazione, hanno dimostrato che è possibile realizzare componenti fotonici ultracompatti e performanti superando le tradizionali limitazioni di questa tecnologia.

La ricerca nel campo dell'ottica basata su silicio è stata in preparazione per più di dieci anni, ma soltanto adesso è stata dimostrata la fattibilità di dispositivi sia attivi che passivi dalle ottime prestazioni: nuove tecnologie ed avanzate tecniche di fabbricazione sono state implementate per produrre guide d'onda dalle dimensioni ridotte (*small waveguides*) e con basse perdite.

Utilizzando guide d'onda submicrometriche 'a canale' o di tipo *ridge*, sono stati progettati svariati dispositivi passivi sfruttando la tecnologia in silicio [2]. Essi includono: accoppiatori (*multimode interference couplers*), multiplatori a divisione di frequenza (WDM), filtri basati su interferometri Mach-Zender. La ricerca si è orientata in questa direzione soprattutto per ragioni economiche. Questi dispositivi richiedono, infatti, costi di produzione più vantaggiosi se comparati a quelle apparecchiature basate su fibre ottiche e su guide dalle dimensioni (alcune decine di micron) più grandi (*large oxide-based waveguides*).

Guide d'onda basate sulla tecnologia *Silicon-On-Insulator* (S-O-I) sono una piattaforma promettente per la realizzazione di circuiti ottici e dispositivi microfotonici, essenziali per il futuro delle reti ottiche. Queste guide consentono un ottimo confinamento della radiazione grazie

all'ampia differenza di indice di rifrazione tra il silicio e l'ossido. Tale confinamento rende inoltre possibile la realizzazione di strutture di tipo *bend* con raggi di curvatura dell'ordine di pochissimi micron.

L'attenzione dei ricercatori verso il silicio è dovuta anche al fatto che esso è un materiale le cui proprietà possono essere modificate attraverso opportuni trattamenti. Come alternativa al silicio cristallino, ad esempio, il silicio amorfo idrogenato (a-Si:H) è di gran lunga quello che ha maggiormente polarizzato l'interesse soprattutto nel campo fotovoltaico. Tra le principali caratteristiche che lo hanno storicamente favorito e portato ad una matura fase di sviluppo ci sono: il suo elevato coefficiente di assorbimento per la radiazione nello spettro visibile, la possibilità di sintetizzarlo in film sottili su substrati di qualsiasi natura e dimensione utilizzando una quantità di materiale semiconduttore inferiore a quella di un *wafer* di silicio cristallino, costi energetici di produzione nettamente inferiori.

Anche il silicio poroso (realizzato creando all'interno del silicio cristallino delle cavità o pori) ha attirato l'interesse di molti progettisti. Si tratta di un materiale molto versatile le cui applicazioni si estendono nel campo dell'optoelettronica e della microlavorazione del silicio. Consente la fabbricazione di dispositivi ottici attivi e passivi (LED, guide d'onda, fotodiodi, etc.) e sensori di gas, che estendono le applicazioni del silicio anche alla sensoristica, fino ad oggi appannaggio di altri materiali. Questi dispositivi potrebbero essere, inoltre, integrati insieme ai rispettivi circuiti di pilotaggio e controllo, con enormi vantaggi sia da un punto di vista tecnologico che da un punto di vista economico.

In questo elaborato di tesi è stato condotto uno studio sperimentale sul comportamento modale e sulle perdite di propagazione di guide d'onda S-O-I submicrometriche al variare della geometria e del tipo di silicio utilizzato come strato guidante. I risultati ottenuti rappresentano una buona base per il progetto dei dispositivi prima accennati; si è infatti posta particolare attenzione sulla verifica delle condizioni di mono-modalità, che spesso rappresenta un requisito fondamentale per il loro funzionamento.

Nel capitolo 1 vengono analizzate, dal punto di vista elettromagnetico e ottico, le caratteristiche della propagazione di un'onda elettromagnetica all'interno di strutture guidanti dielettriche elementari, come le guide d'onda planari che, pur essendo un'astrazione matematica, permettono di comprendere con un approccio analitico non eccessivamente complicato, le caratteristiche fondamentali della propagazione guidata. Vengono illustrati i principali tipi di guide d'onda, facendo successivamente un'analisi con l'ottica geometrica e

con le tecniche di risoluzione numerica. Il capitolo si conclude con uno studio sulla progettazione di guide d'onda *rib* singolo-modo con geometria submicrometrica.

Nel capitolo 2 vengono esposti i principali meccanismi di perdita nella propagazione. Esse sono principalmente rappresentate dallo *scattering* (diffusione) superficiale. Quindi viene messo in risalto come i processi di fabbricazione giocano in questo senso un ruolo fondamentale.

Nel capitolo 3 viene fatta una trattazione generale sul silicio e sulle tecniche di deposizione (*Chemical vapour deposition, sputtering*) e di micro-fabbricazione (litografie, *etching*) più comuni nel campo dell'optoelettronica. Sono descritte le caratteristiche principali dei materiali amorfi e le proprietà che l'idrogeno conferisce al silicio. Viene poi fatta una breve descrizione sul processo di realizzazione del silicio poroso (PS) e sulla tecnica di ossidazione *laser* dello stesso.

Nel capitolo 4 viene analizzato il *software* di simulazione ***Rsoft Photonics CAD*** utilizzato per lo studio e l'analisi della propagazione ottica finalizzata alla progettazione e all'ottimizzazione dei dispositivi. Particolare attenzione è stata posta sull'algoritmo utilizzato FD-BPM (metodo di propagazione dei raggi alle differenze finite), sui metodi di approssimazione e sugli algoritmi di risoluzione.

Infine, nel capitolo 5 vengono riportati i risultati delle simulazioni effettuate su diverse guide d'onda S-O-I con dimensioni geometriche variabili, sempre mantenute al di sotto del micrometro. Lo studio è stato condotto prendendo in considerazione strutture in silicio cristallino, in silicio amorfo idrogenato e in silicio poroso, concentrando particolare attenzione sulle condizioni di monomodalità e sulle perdite di propagazione.