

TESINA PER L'ESAME DI STATO
A.S. 2012/2013

ICT
(Information and Communication
Technology)

di Francesco Fiusco

REALIZZAZIONE DI UNA GUIDA D'ONDA

Il presente contributo, elaborato dallo studente **Francesco Fiusco** dell'I.T.I.S. "E. Majorana" di Brindisi, è connesso alle attività scientifiche e laboratoriali svolte durante lo "Stage a Tor Vergata", promosso dal MIUR (Direzione Generale per gli ordinamenti scolastici e per l'autonomia scolastica) e tenuto presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Roma Tor Vergata in due fasi:

Stage Estivo dal 18 al 22 giugno 2012;

Stage Invernale dal 4 al 8 febbraio 2013.

Le attività didattiche previste dal Programma dello Stage sono state realizzate all'interno di tre gruppi di ricerca, guidati da docenti del Dipartimento di Fisica.

I responsabili delle attività laboratoriali del Modulo "Materiali per l'ICT (Information and Communication Technology)"

Dott. Paolo Proposito



Dott. Fabio De Matteis



Il Direttore degli "Stage a Tor Vergata"

Prof. Nicola Vittorio



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI ROMA
DIPARTIMENTO
DI
FISICA

Indice

1. Introduzione
2. Vantaggi della trasmissione ottica
3. Principio fisico di funzionamento
4. Dispositivi base per la conduzione di luce
5. Realizzazione di una guida d'onda canale
6. Caratterizzazione delle guide e inserzione della luce

Introduzione

Negli ultimi decenni si è verificato uno sviluppo impressionante delle tecnologie di comunicazione, portando a progressi (si pensi alla telefonia mobile, a Internet, a calcolatori da prestazioni elevatissime con dimensioni via via più ridotte) inimmaginabili fino a dieci o venti anni fa. A occuparsi delle modalità di trasmissione e interpretazione dei dati (di qualunque tipo essi siano) è l'ICT, cioè l'**Information and Communication Technology**, con lo sviluppo di protocolli e metodi di trasmissione delle informazioni che siano il più efficienti ed economici possibili. Infatti, oltre ad amministrare la definizione di protocolli e metodi "ad alto livello" (cioè le applicazioni pratiche più vicine all'uso comune, in altre parole calcolatori e reti), rientra tra gli scopi dell'ICT progettare e costruire nuovi materiali e mezzi di trasmissione, entrando, quindi, nel merito del livello **fisico** di trasmissione di informazioni.

Fin dagli albori dell'informatica il mezzo trasmissivo privilegiato è quello elettrico (i circuiti sono **elettronici**), perché i dispositivi elettronici sono relativamente economici e di facile realizzazione. Inoltre, i materiali semiconduttori (come il silicio, componente base della circuitistica elettronica) presentano proprietà che li rendono particolarmente adatti a questo tipo di applicazioni. Infatti, il silicio è divenuto il re dei materiali per l'informatica, poiché è anche alla base dei circuiti integrati, componenti fondamentali dei calcolatori. Tuttavia, negli ultimi anni si prospetta sempre più conveniente la possibilità di usare un altro mezzo trasmissivo al posto dell'elettricità: la **luce**. La luce può essere usata alla stessa stregua degli elettroni per trasmettere informazioni, tramite dispositivi come le **guide d'onda** o le più conosciute **fibre ottiche** che hanno la funzione del filo di rame nei circuiti elettrici.

L'interesse venutosi a sviluppare intorno all'ottica ha portato a studi e realizzazioni di reti di piccole e/o medie dimensioni, nonché di collegamenti a lunga distanza. Inoltre, si è cominciato a parlare di **ottica integrata**, vale a dire la realizzazione degli attuali circuiti integrati in modo ottico. Rilevante importanza ha, da questo punto di vista, lo studio di componenti come modulatori, amplificatori, filtri e rivelatori da applicare su substrati (chip) in modo da replicare i circuiti integrati.

Esempio di circuito ottico integrato

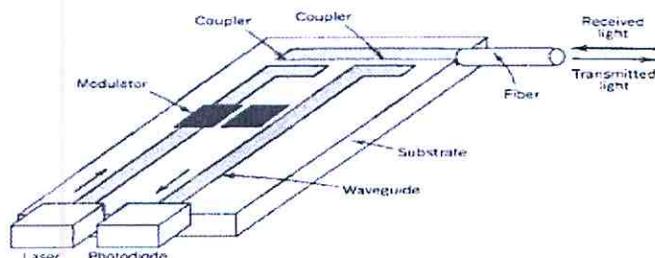


Figure 7.0-2 An example of an integrated-optic device used as an optical receiver/transmitter. Received light is coupled into a waveguide and directed to a photodiode where it is detected. Light from a laser is guided, modulated, and coupled into a fiber.

Vantaggi della trasmissione ottica

L'uso della luce al posto degli elettroni nella trasmissione di informazioni presenta diversi vantaggi:

- Miglioramento delle prestazioni rispetto all'elettronica: la luce viaggia a 300 000 km/s, cioè la massima velocità raggiungibile. Gli elettroni, invece, viaggiano a velocità minore e sono influenzati dalle caratteristiche resistive del mezzo. Inoltre, cambiamenti di temperatura possono portare a sensibili cali di prestazioni;
- Riduzione di costi e ingombri: i componenti ottici sono, almeno in linea teorica, più piccoli e meno costosi di quelli elettronici;
- Ridotto consumo energetico: gli elettroni sono massivi, quindi si ha bisogno di una certa quantità di energia per "muoverli"; i fotoni, invece, hanno massa a riposo nulla, quindi si spende meno energia per "muoverli";
- Assenza del fenomeno del cross-talking: due fili vicini, se percorsi da correnti variabili, fanno interferenza e quindi vi sono possibili perdite di informazione in entrambi. In sistemi ottici questo non avviene;

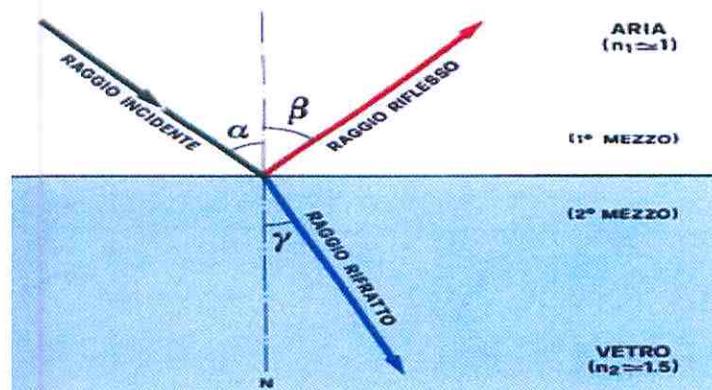
Inoltre, un'altra caratteristica rilevante è la possibilità di costruire circuiti ottici su substrati di silicio, permettendone l'integrazione coi normali circuiti integrati (**optoelettronica**).

Principio fisico di funzionamento

I dispositivi ottici devono essere in grado di convogliare e condurre la luce. Come si fa ad ottenere questo fenomeno?

Essi si basano sulla cosiddetta **riflessione totale**, che è un caso particolare della **rifrazione**. La rifrazione è un fenomeno che si verifica quando un raggio di luce passa da un mezzo ad un altro con caratteristiche ottiche differenti. In altre parole, la luce viene deviata quando passa da un mezzo trasparente ad un altro che ha un **indice di rifrazione diverso** (l'indice di rifrazione permette di quantificare quanto la luce è veloce in una data sostanza. Esso è definito come $n = \frac{c}{v}$, dove c è la velocità della luce nel vuoto e v è la velocità della luce nel mezzo; quindi, è sempre > 1).

La rifrazione è quel fenomeno che si verifica, ad esempio, quando immergiamo una matita nell'acqua e ci sembra spezzata: ciò è dovuto al fatto che i raggi, sull'interfaccia, vengono deviati (rifratti) dall'acqua. La situazione, in modo generale, viene rappresentata in questo modo:



Gli angoli di incidenza e di rifrazione θ_i e θ_r , (rispettivamente α e γ in figura) sono legati dalla **Legge di Snell**(o legge della rifrazione):

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$$

Dove n_1 ed n_2 sono gli indici di rifrazione dei due mezzi. Nel caso in cui si passi da un mezzo più rifrangente ad uno meno rifrangente, l'angolo di rifrazione può essere di 90° , portando quindi ad una **riflessione** (detta, appunto, totale) del raggio che può quindi propagarsi all'interno della guida per "rimbalzi" successivi. L'angolo di incidenza a cui si ha riflessione totale viene chiamato **angolo limite** (o critico), ed è dato da:

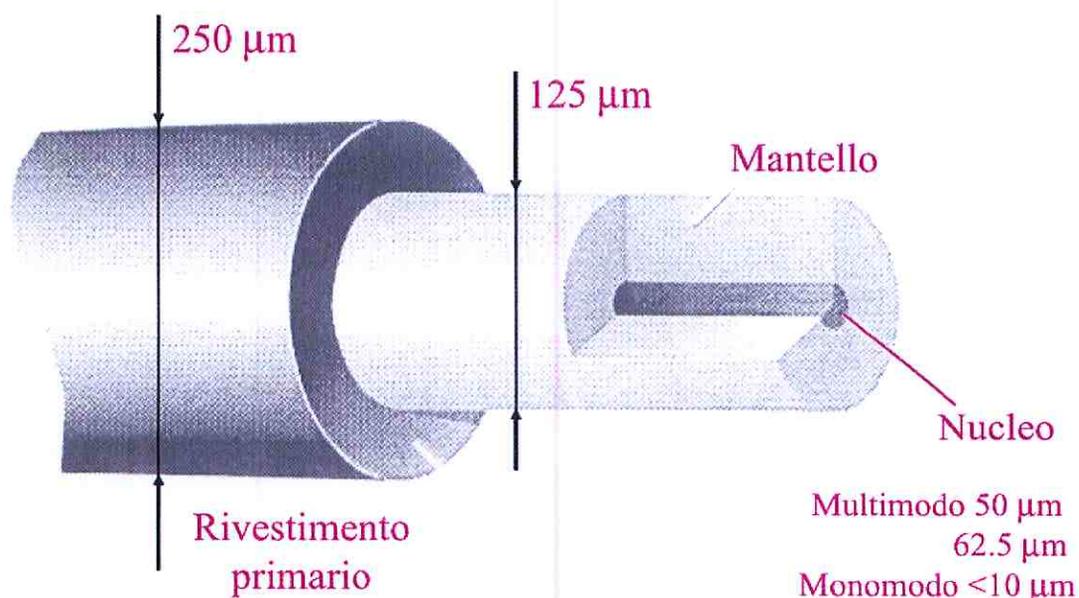
$$\theta_i = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

Poiché l'angolo di rifrazione è 90° e il seno di 90° è 1, la legge di Snell può essere scritta come sopra. Dalla formula di cui sopra emerge anche che la riflessione totale può avvenire solo quando si passa da un mezzo più rifrangente ad uno meno rifrangente (altrimenti l'equazione sarebbe impossibile). Quindi, la luce viene inserita nelle guide con l'angolo limite, in modo che possa essere condotta all'interno per riflessioni successive, con perdite trascurabili.

Dispositivi base per la conduzione di luce

I componenti fondamentali di conduzione sono le **fibre ottiche** e le **guide d'onda**.

Le fibre ottiche sono costituite da un sottile strato di vetro (da $10 \mu\text{m}$ a qualche decina) detto **core**, rivestito da uno strato, anch'esso vetroso, detto **cladding** (mantello) di diametro di circa $125 \mu\text{m}$, con indice di rifrazione di poco inferiore al core (per permettere la riflessione totale). Il tutto è rivestito da una guaina di plastica per limitare le abrasioni meccaniche (lo spessore di questo rivestimento è di circa $250 \mu\text{m}$)



Le guide d'onda sono, invece, strutture lineari di sezione solitamente rettangolare o circolare che sono in grado di convogliare e condurre onde elettromagnetiche.

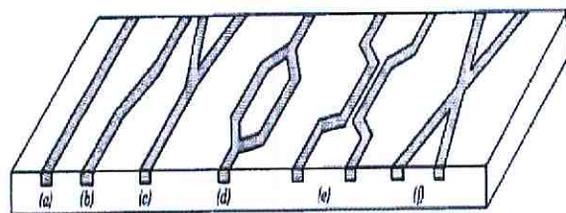


Figure 7.3-4 Different configurations for waveguides: (a) straight; (b) S bend; (c) Y branch; (d) Mach-Zehnder; (e) directional coupler; (f) intersection.

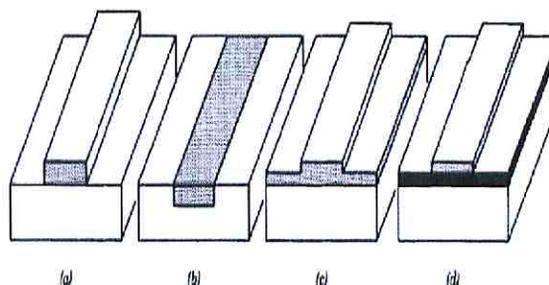


Figure 7.3-3 Various types of waveguide geometries: (a) strip; (b) embedded strip; (c) rib or ridge; (d) strip loaded. The darker the shading, the higher the refractive index.

Durante lo stage abbiamo costruito una guida d'onda canale.

Realizzazione di una guida d'onda canale

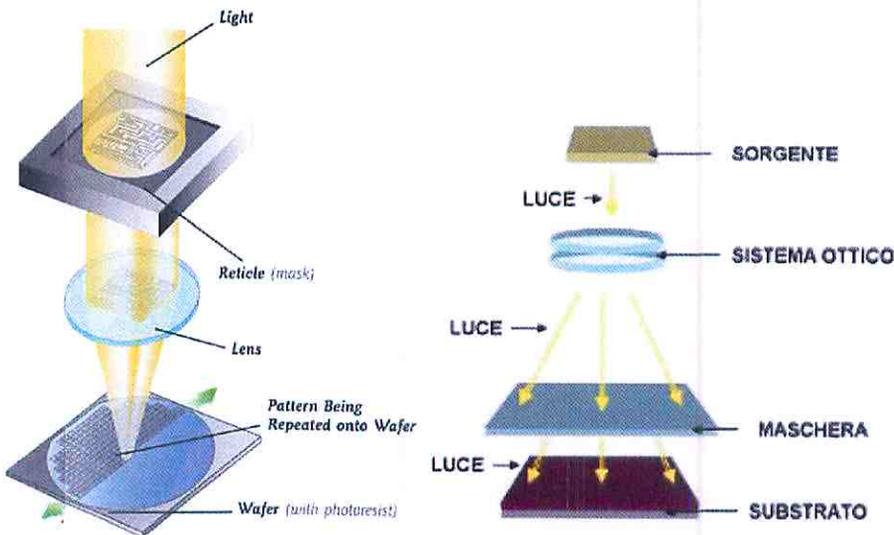
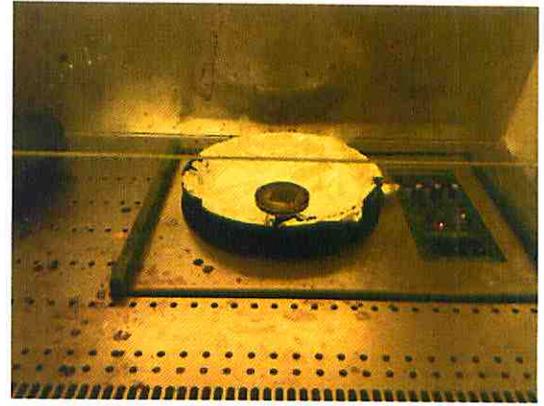
Si è partiti da un substrato di Si, su cui era depositato uno strato di ossido di silicio SiO_2 ($n = 1.46$) di alcuni micrometri. Per costruire la guida si è proceduto alla deposizione dello strato guidante sul substrato, con una tecnica chiamata **sol-gel**. Tale tecnica permette di avere uno strato guidante di indice di rifrazione maggiore posto uniformemente sul substrato. Il processo sol-gel consta di 3 fasi:

- **Idrolisi:** formazione di una sospensione colloidale di particelle nel liquido (acqua). E' il cosiddetto **sol**;
- **Condensazione:** le particelle polimerizzano per policondensazione, creando un materiale al contempo resistente ed elastico. Per creare il disegno delle guide d'onda, la condensazione viene stimolata con la luce UV attraverso un processo detto **fotolitografia**, che permette di imprimere qualsiasi disegno sulla guida;
- **Essiccamento:** trattamento termico (cottura in forno) per rimuovere solventi in eccesso e ottenere la sostanza finita

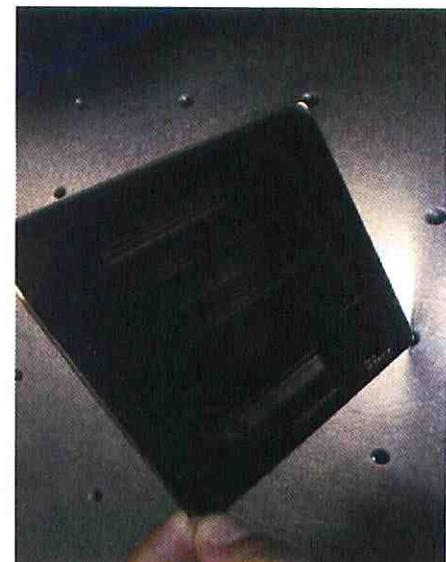
Nel caso specifico della guida d'onda, lo strato guidante è un polimero ibrido, vale a dire costituito da una **parte organica** e una **inorganica**. Ciò presenta il vantaggio di unire le caratteristiche vetrose degli ossidi (spesso a base di silicio o titanio) all'elasticità dei polimeri di carbonio ibridato sp^3 . Durante lo stage, si è partiti da propossido di titanio $\text{Ti}(\text{n-OC}_3\text{H}_7)_4$ come precursore inorganico e da TMSPM (Trimetossisililpropil metacrilato), per ottenere un sol-gel di Ti/TMSPM. Il metodo seguito è il seguente:

- Preparazione della soluzione contenente titanio (IV) propossido e TMSPM, che saranno i componenti base del film; a essi viene aggiunto acido cloridrico come catalizzatore e l'**Irgacure 184**, una molecola detta **fotoiniziatore** che, esposta alla luce UV, darà il via alla policondensazione;

- Pulizia del substrato di Si/SiO₂ e deposizione del film Ti/TMSPM in camera pulita tramite un processo detto **spin coating**. Esso consiste nel porre alcune gocce della soluzione sul substrato e farlo ruotare a grande velocità, di modo che la forza centrifuga faccia espandere in modo uniforme la soluzione sul substrato; velocità più o meno alte producono film più o meno sottili;
- Cottura (**pre-baking**): in forno a 82°C-83°C per circa 80 minuti, in modo da eliminare i solventi in eccesso;
- **Esposizione**: questa è una delle fasi più importanti del processo fotolitografico. Il campione viene illuminato con una radiazione UV, in modo da iniziare la fotopolimerizzazione. Però, sopra il campione è posizionata una maschera di quarzo (trasparente alle radiazioni UV) su cui sono incisi con cromo i disegni da imprimere sul substrato (l'incisione di solito viene effettuata con litografia a fascio elettronico). In tal modo, polimerizzano solo le zone di campione effettivamente illuminate dalla luce, mentre le altre rimangono allo stato di sol. Così è possibile riportare sul substrato qualsiasi disegno.



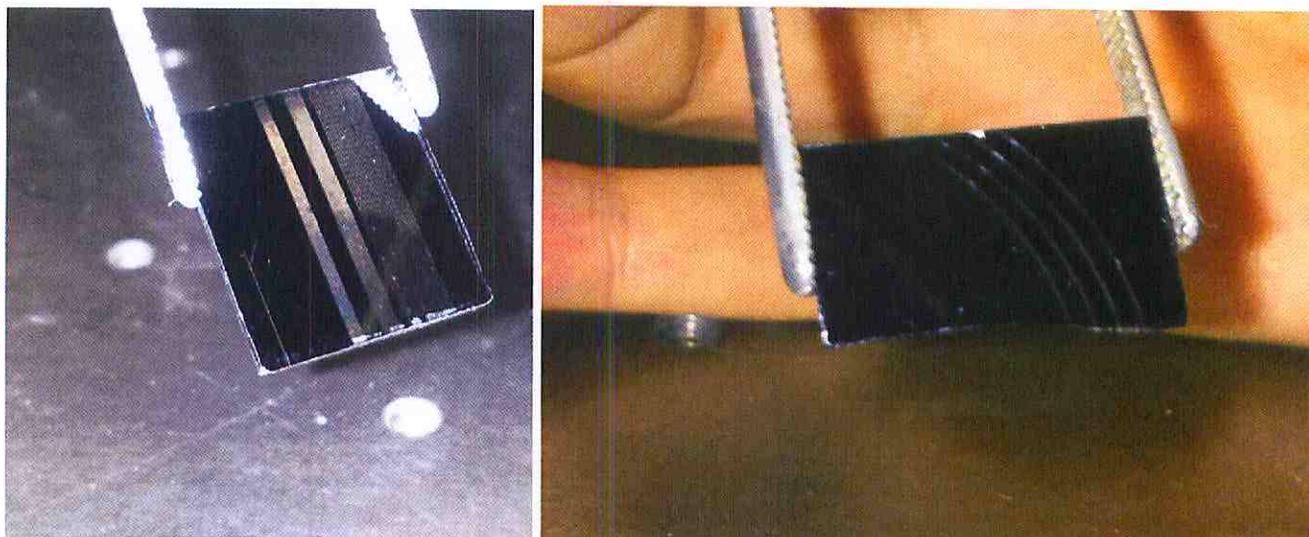
Rappresentazioni del funzionamento del processo fotolitografico



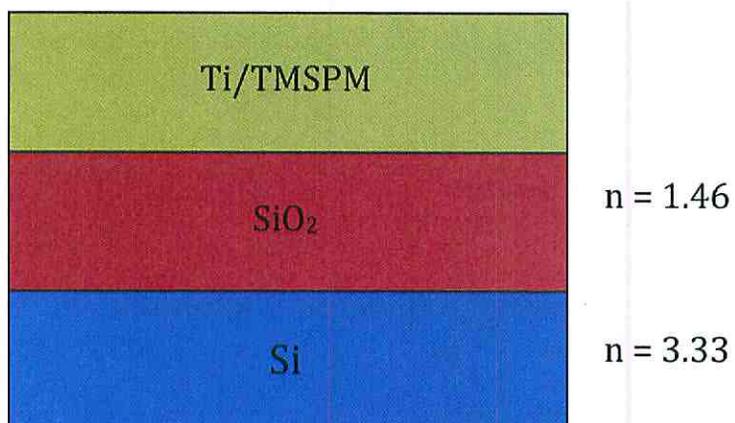
Maschera usata per la fotolitografia

- **Sviluppo**: il campione, dopo l'esposizione, viene immerso in una soluzione alcolica (nel caso in esame IPA, alcool isopropilico), che lava via tutta la soluzione non polimerizzata. In questo modo, rimangono sul campione solo i disegni impressi fotolitograficamente. Il lavaggio viene effettuato con tempi variabili (comunque nell'ordine di un minuto o due nella maggior parte dei casi);
- **Post-baking**: il campione viene nuovamente messo in forno per un'ora a 120°C.

Il risultato finale è il seguente:



Nelle foto si evidenziano i canali incisi (si ha, quindi, la possibilità di incidere disegni di ogni tipo). In sezione, la struttura della guida rispecchia questo schema:

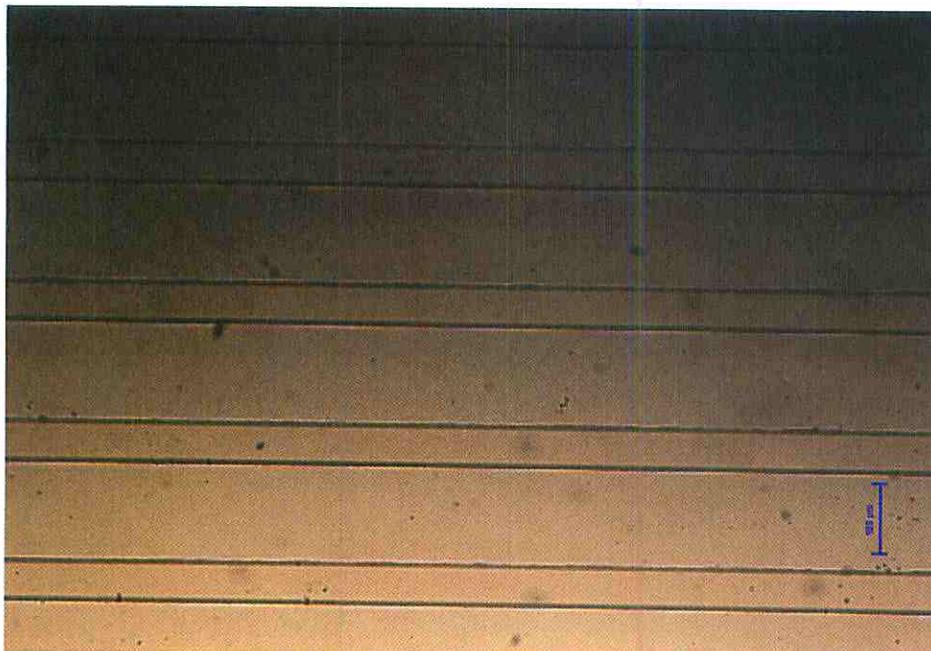


Il film Ti/TMSPM ha indice di rifrazione maggiore del SiO₂.

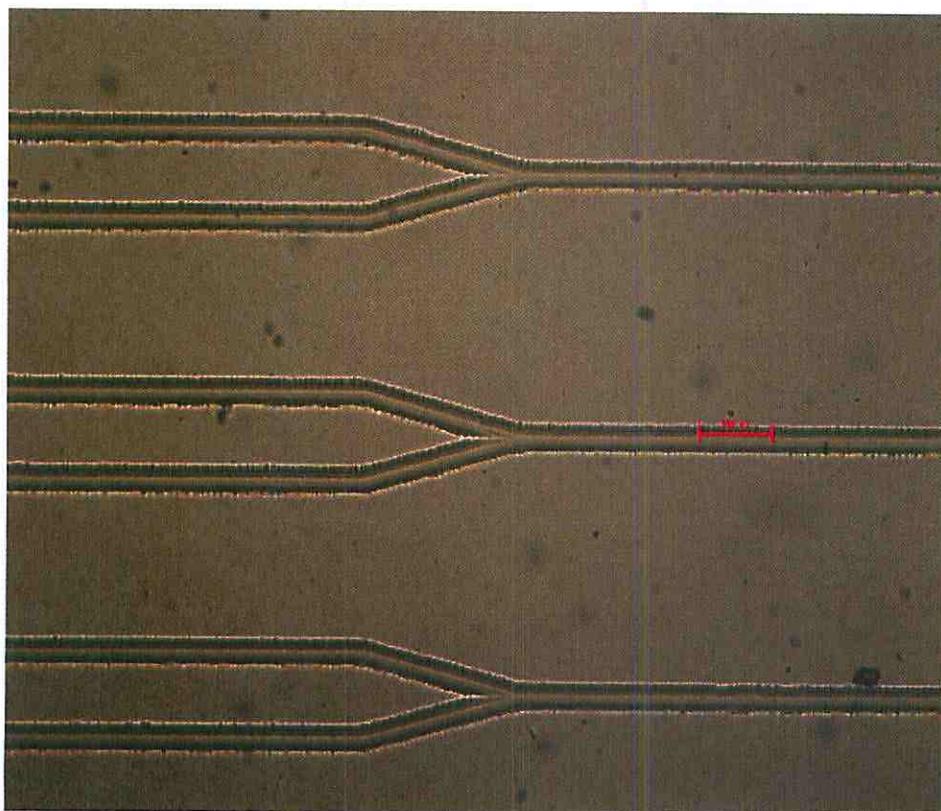
Caratterizzazione delle guide e inserzione della luce

Le guide sono state caratterizzate (osservate) con diversi metodi per individuare eventuali errori nel processo di produzione. Successivamente, è stata inserita luce al loro interno per verificare che le guide effettivamente la conducessero. Le osservazioni sono state le seguenti:

Microscopio ottico



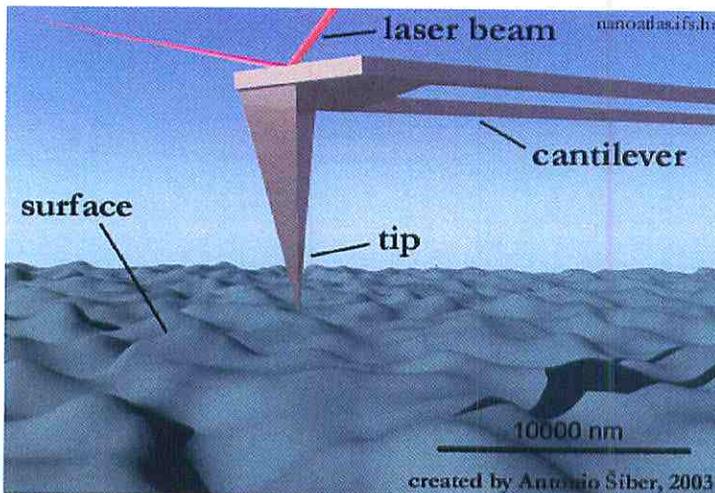
Configurazione lineare



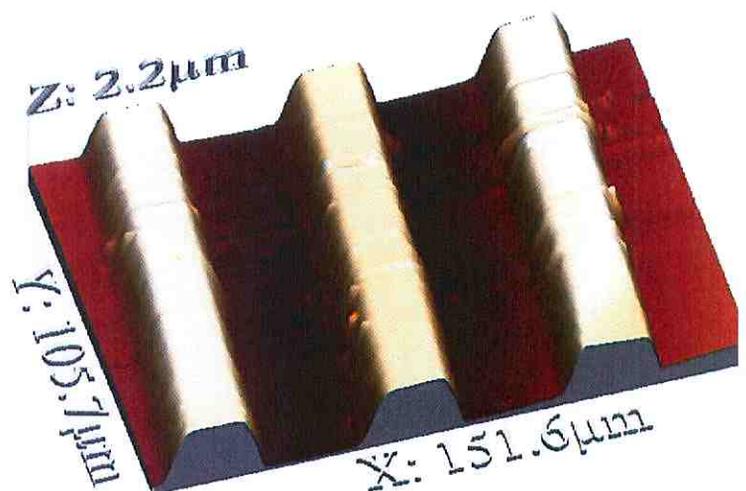
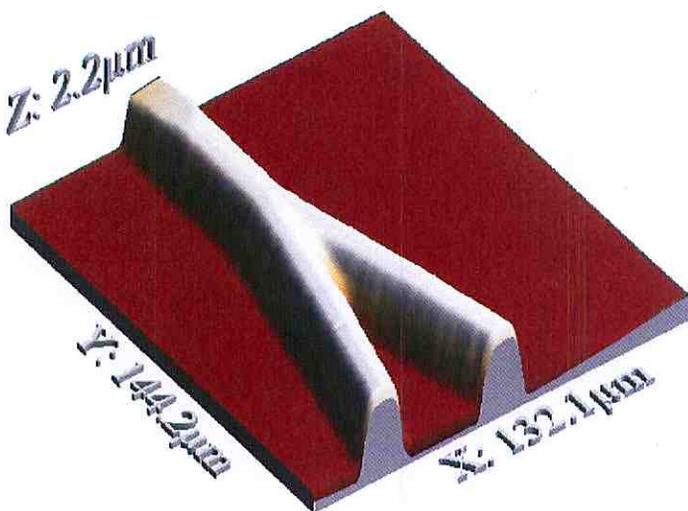
Configurazione beamsplitter

Caratterizzazione al microscopio AFM

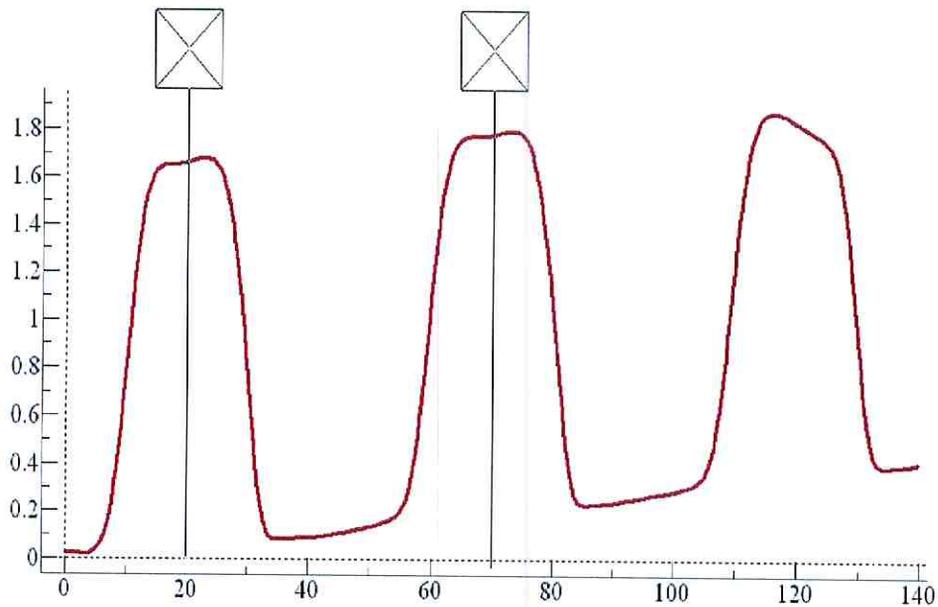
Il microscopio AFM (Atomic Force Microscopy) si basa sulla forza repulsiva tra gli atomi. In particolare, vi è una leva (cantilever), fatta in alluminio per garantirle una certa elasticità, alla cui estremità vi è una punta di dimensioni atomiche. La forza repulsiva tra gli atomi fa oscillare il cantilever, su cui è puntato un fascio laser. La deviazione del laser viene registrata da un fotodiode e, man mano che il cantilever spazza tutto il campione, dalla deviazione del laser è possibile ricostruire la morfologia della superficie.



Principio di funzionamento del microscopio AFM



Rendering 3D delle guide elaborato col software WSxM

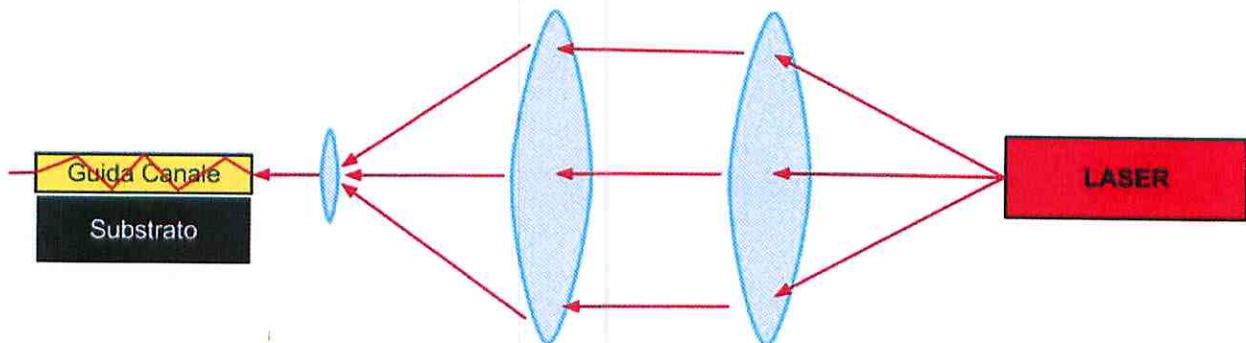


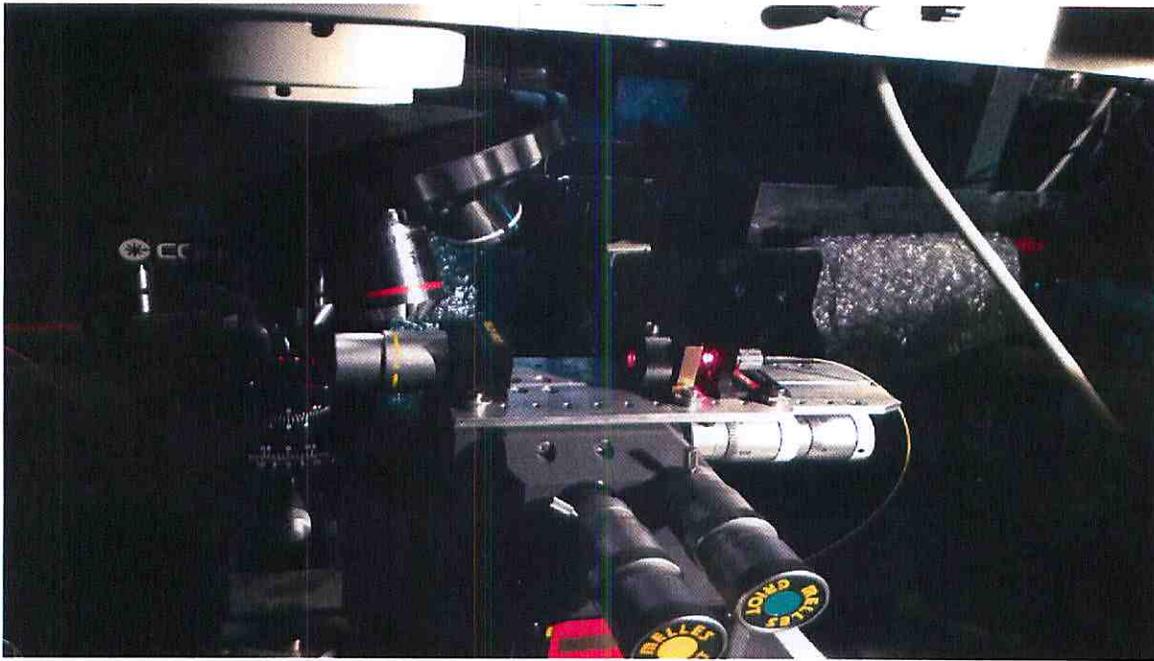
Profilo della guida:

- *Larghezza della guida misurata $\approx 27 \mu\text{m}$*
- *Altezza $\approx 1.6 \mu\text{m}$*
- *Distanza tra due guide $\approx 50 \mu\text{m}$*

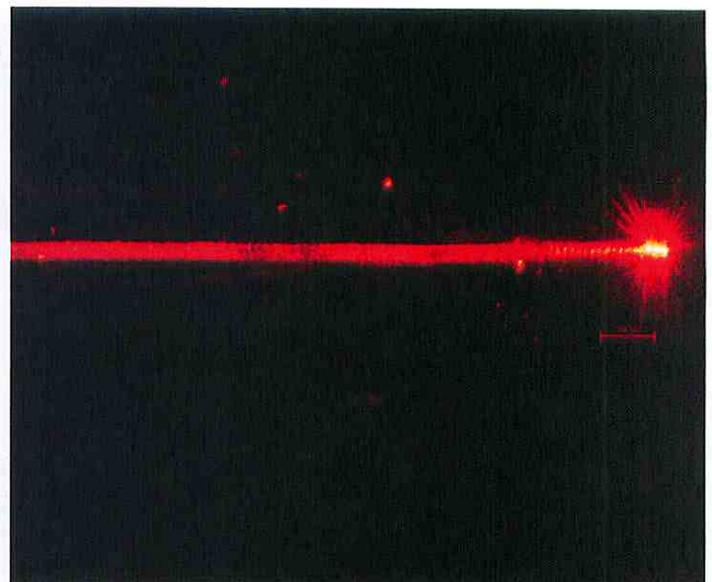
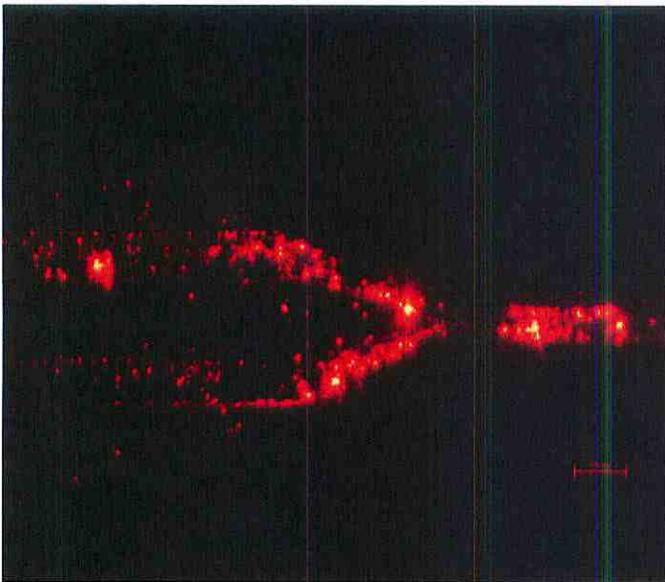
Inserizione della luce nella guida

Per inserire la luce nella guida, abbiamo focalizzato un fascio laser all'ingresso del canale con delle lenti (obiettivo di microscopio), in modo che le dimensioni ne consentissero l'accoppiamento. Per ottenere una tale precisione è stato usato un blocco che permette di effettuare movimenti nanometrici. Il setup utilizzato è il seguente:





Una volta che la luce si accoppia con le guide, al microscopio ottico si evidenzia la conduzione:



In realtà, il fatto che sia possibile vedere la luce condotta indica che ci sono delle impurità nella guida. Infatti, se ci sono delle impurità (come granelli di polvere), questi deviano la luce in tutte le direzioni (è il cosiddetto **scattering** della luce); i raggi visibili nelle foto soprastanti sono dovuti proprio allo scattering. In teoria, sarebbero dovuti essere visibili solo gli spot d'ingresso e di uscita della luce. Ciononostante, il risultato ottenuto è più che soddisfacente.