

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

ICT
(Information and Communication
Technology)

di Valeria Ruffo

OTTICA INTEGRATA

Il presente contributo, elaborato dalla studentessa **Valeria Ruffo** dell'I.T.I.S. "Giovanni XXIII" di Roma, 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"

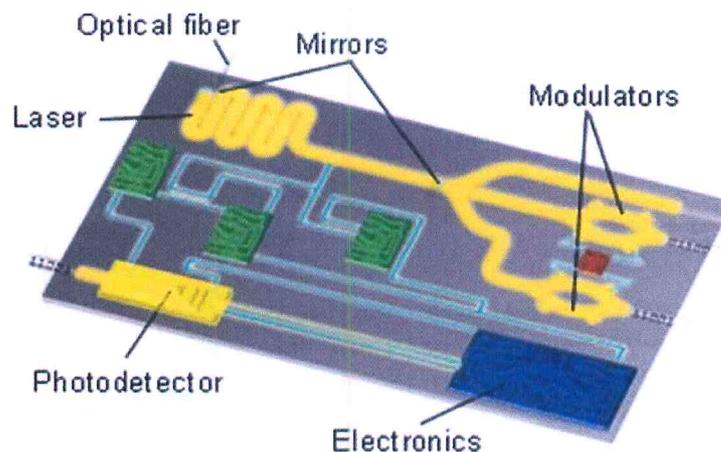
Prof. Nicola Vittorio



Fin dall'antichità l'uomo ha studiato e sviluppato tecniche per poter ampliare le sue possibilità di comunicazione a platee sempre più vaste e a distanze sempre crescenti. Basti pensare all'importanza che tutte le civiltà hanno sempre attribuito a teatri, luoghi di riunione e di cerimonie di massa e alle tante tecnologie di comunicazione sviluppate nel corso della storia, dai segnali visivi e sonori al telegrafo o la radio.

Al giorno d'oggi le diverse tecniche usate in questo campo possono essere raggruppate nella cosiddetta ICT (Information and Communication Technology) che studia come migliorare le comunicazioni e la trasmissione di dati cercando di migliorare le prestazioni dei moderni dispositivi. L'argomento che abbiamo trattato nello Stage presso L'Università di Roma Tor Vergata ha riguardato dei dispositivi di base dell'ICT: le guide d'onda.

L'ottica in guida d'onda è utile per la trasmissione di luce a lunga distanza ed ha importanti applicazioni che costituiscono il campo dell'ottica integrata che consente di realizzare dispositivi miniaturizzati o dispositivi optoelettronici. L'ottica integrata è, in altre parole, la tecnologia di integrare dispositivi ottici e componenti per la generazione, la ricombinazione, la modulazione, la rivelazione di luce su un singolo substrato (chip).



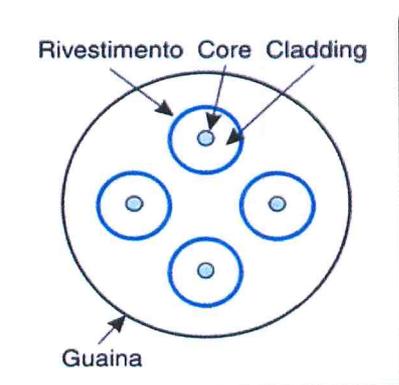
A differenza dei normali sistemi di comunicazione basati sull'elettronica, la comunicazione in fibra ottica permette di superare i limiti di velocità delle comunicazioni con componenti elettronici. Infatti, un segnale viaggia su fibra ad una velocità pari a quella della luce, ed esso può convogliare una gran quantità di dati che possono anche raggiungere alcuni gigabyte/sec.

Le fibre ottiche sono immuni da disturbi di natura elettromagnetica (come il "cross talk" e per questo si può dire che garantiscono un maggior grado di sicurezza in ambito militare) grazie al diverso sistema usato per il "trasporto" dei segnali, la luce. Richiedono un basso consumo di energia in quanto non c'è corrente che fluisce e, inoltre, i materiali utilizzati sono più leggeri, meno ingombranti e più economici.

Le fibre ottiche, furono inventate negli anni settanta, qualche anno dopo l'invenzione del Laser.

Le prime fibre ottiche, avevano la dimensione di una lenza da pesca ed erano poco flessibili dato che erano composte esclusivamente da vetro. Le fibre ottiche sono così sottili che al primo sguardo possono apparire come capelli

inguinati. La fibra ottica è costituita solo da materiali trasparenti. Nella sua struttura presenta una parte interna, chiamata **core**, rivestita dal **cladding** (o mantello); entrambi sono composti in prevalenza da silice (che è l'elemento base del vetro). Quando ci si riferisce ad una fibra con due numeri, per esempio 50/125, si fa riferimento ai diametri del core e del cladding espressi in micron.



Fibre ottiche, dette **monomodo**, al cui interno viaggia luce generata da un diodo emettitore poi captata dal diodo ricevente, sono impiegate in molte applicazioni di elettronica avanzata. Il sistema prevede che un qualsivoglia segnale sia prima convertito in forma digitale ed inviato, per la trasmissione, al diodo emettitore il quale darà origine ad una luce ad impulsi modulata in modo da trasmettere un codice binario; dall'altro capo il diodo ricevente capterà la luce che sarà poi trattata, a seconda dei casi, da un convertitore digitale-analogico o altro dispositivo. Il concetto di base su cui si basa una guida d'onda è la riflessione totale.

La riflessione e la rifrazione della luce

La maggior parte dei corpi risulta visibile perché riceve luce da una sorgente e la diffonde tutta intorno: questi corpi vengono detti illuminati. Il Sole, i laser e tutti i tipi di lampade e lampadine sono sorgenti di luce primaria, invece, tutti i corpi illuminati sono sorgenti di luce secondaria.

La luce, come il suono, si propaga mediante onde dette onde luminose. Al contrario delle onde sonore, però, essa si propaga anche nel vuoto. La luce viaggia a circa 300.000 km/s. Se osserviamo, in una stanza buia la luce che filtra attraverso una finestra, possiamo notare, grazie al

pulviscolo, che i raggi luminosi sono perfettamente rettilinei. La luce emessa da una sorgente luminosa, si propaga in linea retta in tutte le direzioni e va a colpire gli oggetti che, a seconda del materiale di cui sono fatti, si comportano in modo diverso quando vengono illuminati. Alcuni, come il vetro, lasciano passare la luce; altri, come il legno, costituiscono una barriera impenetrabile alla luce visibile; altri, infine, come un foglio di carta velina, manifestano un comportamento intermedio.

La riflessione

I corpi illuminati possono quindi essere: trasparenti se si lasciano attraversare dalla luce; opachi se non lasciano passare la luce; traslucidi se fanno passare la luce ma disperdendola in tutte le direzioni; in questo caso non è possibile individuare la sorgente da cui essa proviene.

Quando la luce incontra un corpo opaco si dice che viene riflessa se è stata deviata in una sola direzione, o si dice che è stata diffusa, se viene deviata in più direzioni.

Si ha il fenomeno della riflessione ogni volta che un fascio di luce, dopo aver colpito un corpo non trasparente lucido e levigato, "rimbalza" sulla sua superficie e viene deviato in un'altra direzione.

Il raggio di luce che arriva sulla superficie lucida e levigata (raggio incidente) viene "rimandato indietro" (raggio riflesso) in una direzione diversa.

Il fenomeno della riflessione rispetta le seguenti leggi:

I legge della riflessione. Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale (retta perpendicolare alla superficie all'oggetto nel punto di incidenza) sono situati nello stesso piano, detto piano di incidenza.

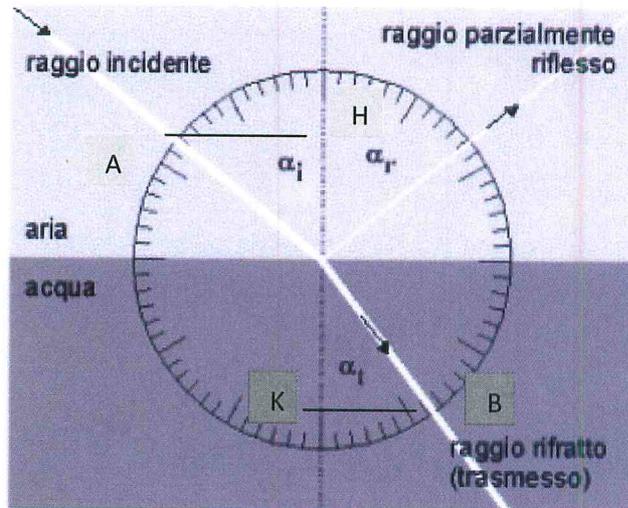
II legge della riflessione. L'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza (entrambi misurati in riferimento alla normale).

La rifrazione

Sappiamo che i raggi luminosi nell'aria si propagano in linea retta e che nell'acqua si propagano nello stesso modo. Tuttavia, la velocità della luce nei due mezzi trasparenti è diversa, perché diversa è la loro densità. I raggi luminosi, perciò, nel passaggio da un mezzo meno denso (l'aria) ad uno più denso (acqua) rallentano e vengono deviati: questo fenomeno è detto rifrazione della luce. Il raggio incidente propagandosi nell'aria raggiunge la superficie di separazione dei due mezzi trasparenti (aria e acqua) e forma, con la perpendicolare a questa superficie, un angolo che prende il nome di angolo di incidenza. Il raggio luminoso prosegue

nell'acqua, deviando la direzione che aveva nell'aria e prende così il nome di raggio rifratto. Il raggio rifratto forma, con la perpendicolare alla superficie di separazione, un angolo più piccolo detto angolo di rifrazione, che si avvicina alla perpendicolare più dell'angolo di incidenza.

Angolo di incidenza e angolo di rifrazione sono sempre diversi, ma appartengono allo stesso piano insieme alla normale nel punto di incidenza (I legge della rifrazione).



Se la luce si propaga, invece, dall'acqua verso l'aria, ossia da un mezzo più denso a uno meno denso, l'angolo di rifrazione è maggiore dell'angolo di incidenza, per cui il raggio rifratto si allontana dalla perpendicolare alla superficie di separazione dei due mezzi trasparenti.

La seconda legge della rifrazione dice che il rapporto fra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione è costante.

$$\text{sen}\alpha_i / \text{sen}\alpha_t = \text{costante}$$

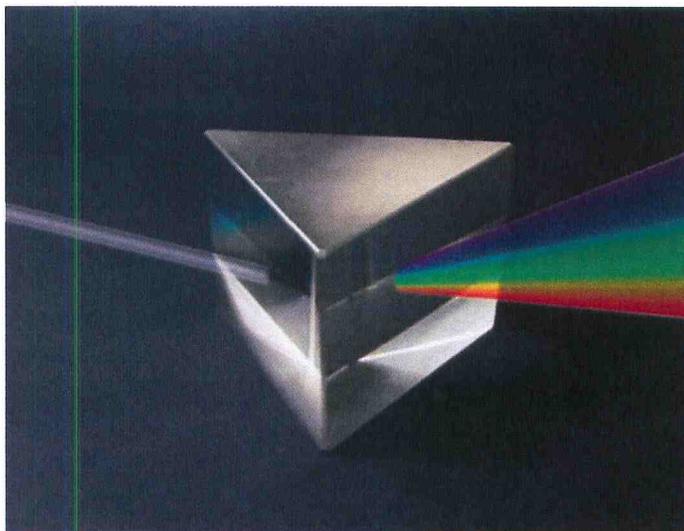
Sperimentalmente si verifica che il rapporto fra i segmenti AH e BK (segmenti perpendicolari alla normale che intersecano la circonferenza nei punti di intersezione del raggio incidente e del raggio rifratto) è sempre lo stesso al variare dell'angolo di incidenza.

$$\text{sen}\alpha_i / \text{sen}\alpha_t = AH/BK$$

Se non vogliamo ricorrere alla costruzione geometrica dei segmenti AH e BK si può applicare la seguente formula dove, invece, il valore della costante è uguale dal rapporto fra l'indice di rifrazione del secondo mezzo e l'indice di rifrazione del primo mezzo.

$$\text{sen}\alpha_i / \text{sen}\alpha_t = n_2/n_1$$

La luce bianca è formata da luce che può essere raggruppata in sette colori (rosso, arancio, giallo, verde, azzurro, indaco e violetto). Ognuno di essi ha in media lunghezza d'onda, frequenza e velocità diverse. Quando il fascio luminoso bianco colpisce un prisma subisce due volte (perché due sono le facce del prisma che incontra) il fenomeno della rifrazione. I sette fasci colorati (di cui è composta la luce bianca) sono rifratti secondo un angolo diverso a seconda della loro lunghezza d'onda, perché l'indice di rifrazione del vetro ($n = \text{velocità di propagazione nel vuoto} / \text{velocità di propagazione nel mezzo}$) di cui è costituito il prisma è diverso per le varie lunghezze d'onda. Ciò dà origine a un ventaglio di colori nel quale i raggi della luce rossa (700 nm) risultano i meno deviati e quelli violetti (400 nm) i più deviati.



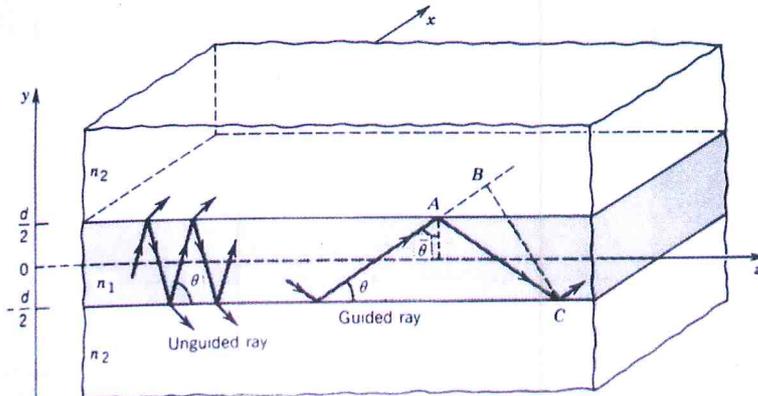
Avendo riassunto i motivi per cui preferire l'ottica integrata ai metodi di comunicazione basati sull'elettronica e dopo aver spiegato secondo quali fenomeni della fisica funzionano, posso iniziare ad illustrare come abbiamo costruito le guide d'onda durante lo stage.

Innanzitutto, è importante dire che abbiamo costruito le guide d'onda mediante il processo SOL-GEL. Attraverso questo processo è possibile produrre vetri o materiali ibridi (plastico/vetrosi) con semplici reazioni a bassa temperatura partendo da composizioni controllate e ottenendo così vetri più omogenei composti da una parte inorganica che si può integrare con i circuiti elettrici e una parte organica che ne migliora le proprietà. Il processo SOL-GEL si può dividere in tre tappe: idrolisi (formazione di particelle solide nel liquido), condensazione (evoluzione in gel), essiccamento (trattamenti termici di trasformazione in ossido ceramico).

Fasi di laboratorio:

Fase 1

Abbiamo iniziato la costruzione delle guide d'onda tagliando dei Wafer di silicio con una punta di diamante per preparare i substrati delle future guide. Sulla superficie di ogni wafer è presente uno strato di ossido di silicio che ha indice di rifrazione 1,46 minore del silicio 3,3. Questo è



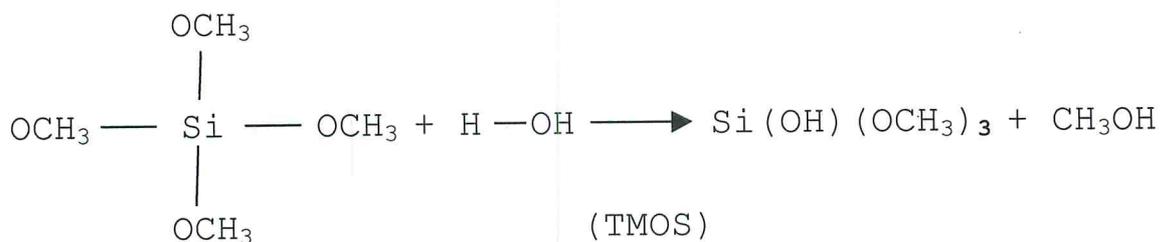
importante perché per avere la riflessione totale è necessario che l'indice di rifrazione della guida sia maggiore dell'indice di

rifrazione degli strati confinanti.

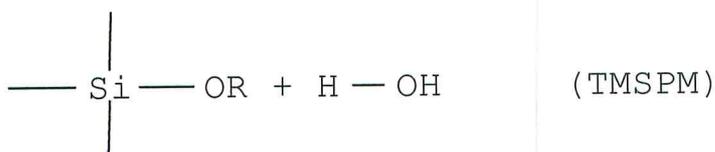
Fase 2

Preparazione del materiale costituente della guida.

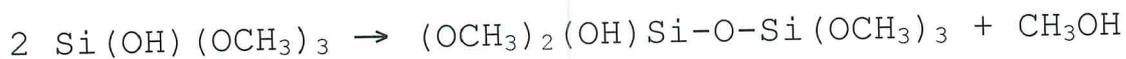
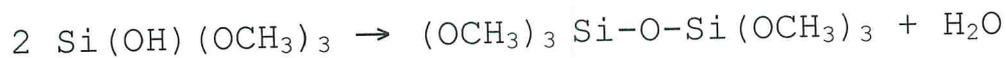
Il precursore del materiale vetroso è il TMOS (TetraMetilOrtoSilicato), un alcossido di metallo. A contatto con l'acqua si produce mediante reazione di idrolisi alcol metilico (CH₃OH) e un gruppo silanolo.



La componente organica, invece, è il TMSPM che ha la funzione di migliorare le proprietà meccaniche del film.



Dopodiché i gruppi silanolo reagiscono tra di loro (e con i radicali alcolici) mediante policondensazione. Per rallentare la policondensazione è presente nella soluzione, che oramai sta divenendo gel, un agente chelante (acido acetico) che ha la funzione di schermare i precursori dall'acqua per ottenere un risultato migliore avendo una reazione più completa.



I gruppi silanolo ottenuti tendono a formare dei legami. La reazione può avvenire secondo due meccanismi: attacco di un gruppo silanolo al silicio di un'altra molecola con liberazione di una molecola d'acqua, oppure si ha un attacco con espulsione di una molecola di alcol in caso di un monomero parzialmente idrolizzato.

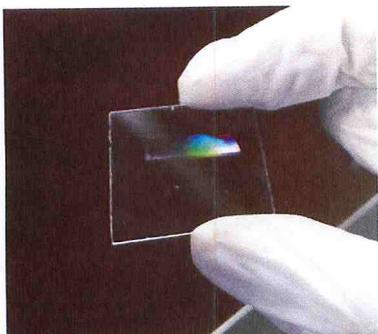
Fase 3

In camera pulita abbiamo depositato un sottile strato di gel sul substrato mediante lo spin coating, successivamente abbiamo messo le guide in un forno per l'essiccamento.

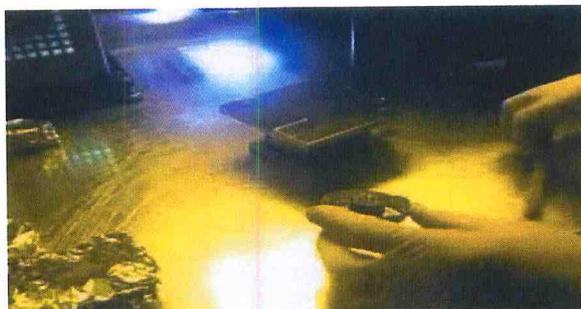


Fase 4

Abbiamo fabbricato tramite un materiale particolarmente malleabile chiamato PDMS degli stampi per copiare dei master di reticoli. Una volta presa l'impronta dei master (mold) abbiamo impresso i mold sulle guide sulle quali avevamo precedentemente spinnato uno strato di Ti/TMSPM con aggiunta di IRGACURE 184 come elemento catalizzatore per la fotopolimerizzazione.

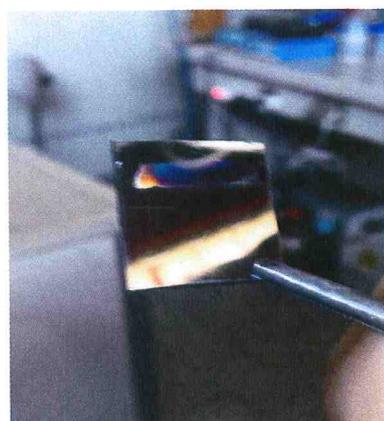


Abbiamo coperto la zona della guida che non doveva essere sottoposta a fotopolimerizzazione e abbiamo esposto ogni campione ad una lampada UV.



Dopo l'esposizione alla lampada UV ogni campione è stato lavato con alcol isopropilico per togliere il Ti/TMSPM non fotopolimerizzato.

Finita la fabbricazione delle guide d'onda planari, abbiamo fatto una verifica dei campioni misurando il passo reticolare e la fedeltà fra i master e le repliche sul Ti/TMSPM attraverso il microscopio ottico, il microscopio AFM, e la misura diffrattometrica.



Mediante il microscopio ottico abbiamo osservato la qualità dei reticoli e abbiamo misurato il passo reticolare.

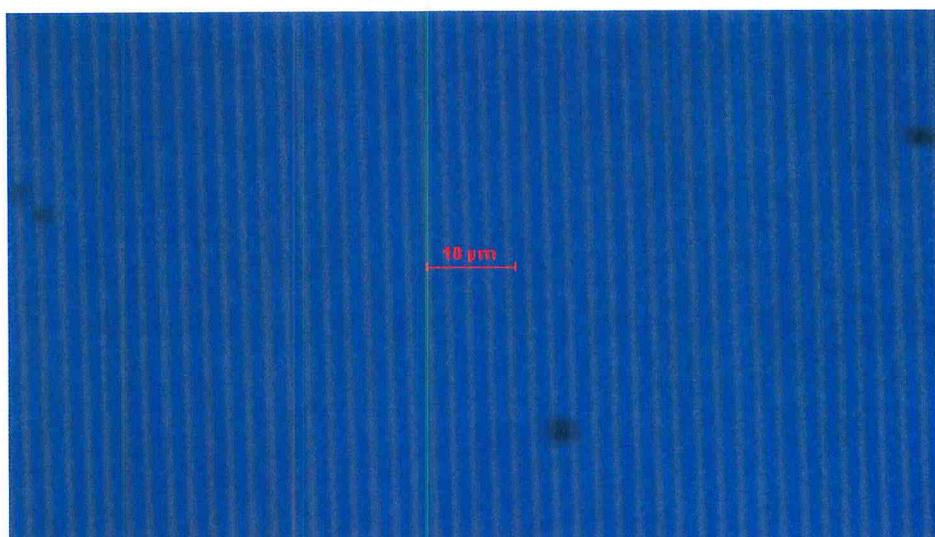
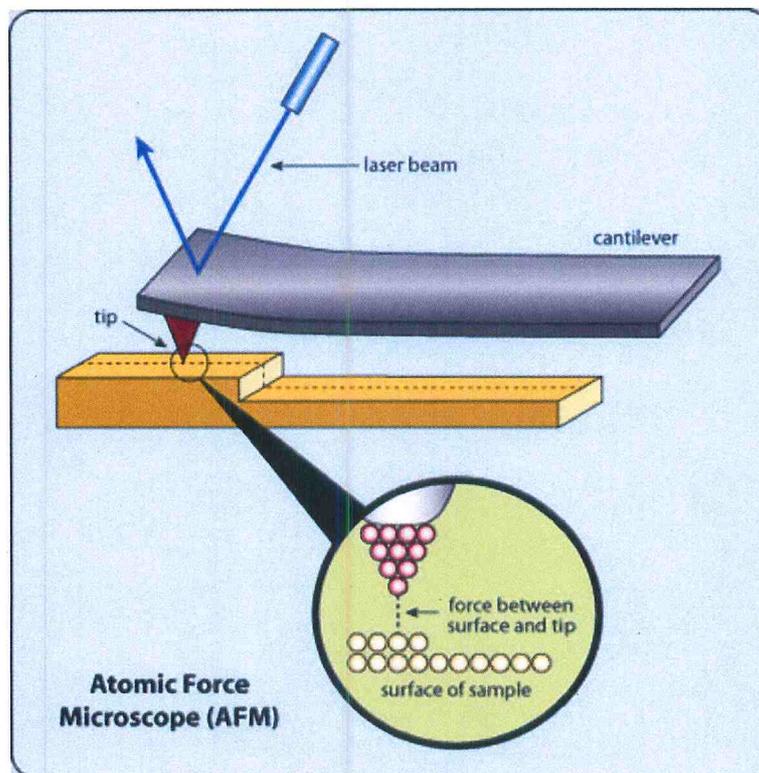


Immagine presa con il microscopio ottico

Il microscopio AFM (Atomic Force Microscopy)

Il microscopio AFM ha una maggiore risoluzione laterale rispetto al microscopio ottico, quindi ci da la possibilità di misurare l'altezza della guida. A differenza del microscopio ottico, che ingrandisce le immagini tramite un sistema di lenti, il microscopio AFM presenta una punta che si avvicina al campione al punto di subire la forza repulsiva degli atomi del campione stesso. La punta è collegata ad un cantilever: una piccola asticella di materiale molto flessibile generalmente alluminio. La deflessione del raggio laser puntato sull'estremità del cantilever varia all'oscillare della punta, e quindi è possibile ricostruire al computer l'immagine del campione misurando la luce laser riflessa dal cantilever con un fotodiodo sensibile alla posizione.

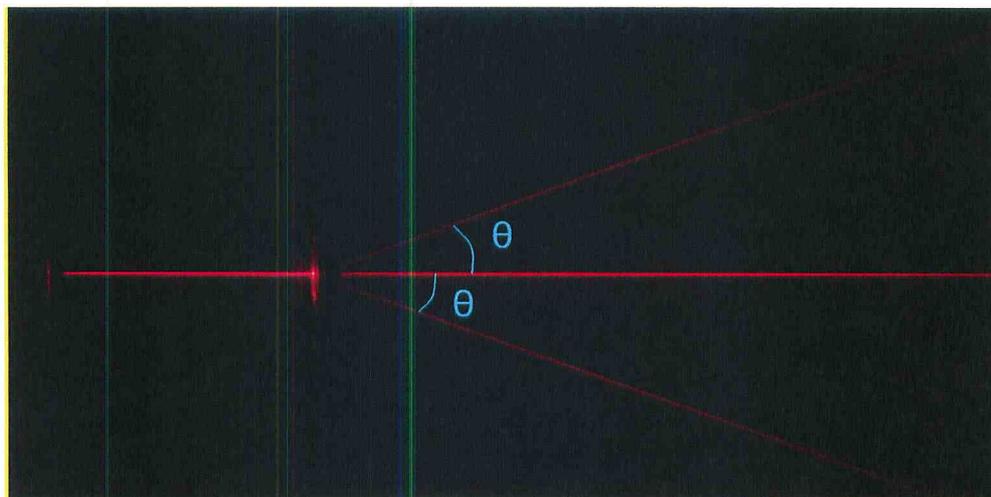


Infine, abbiamo verificato la fedeltà dei reticoli riprodotti tramite PDMS con i master mediante la misura diffrattometrica. In questo caso, abbiamo contato gli ordini di diffrazione e abbiamo misurato l'angolo dei raggi diffratti.

Il reticolo di diffrazione è un componente ottico sulla cui superficie è incisa una trama di linee parallele, uguali ed equidistanti, a distanze confrontabili con la lunghezza d'onda della luce. Un fascio luminoso monocromatico che incide su un reticolo dà origine ad un fascio trasmesso e a vari fasci diffratti. Questo perché quando la luce attraversa un

foro, paragonabile alla sua lunghezza d'onda, ogni punto del fronte d'onda può essere considerato come sorgente di onde secondarie aventi la stessa frequenza dell'onda principale (principio di Huygens).

Misurando la distanza angolare fra gli spot dei raggi diffratti possiamo risalire al passo reticolare e viceversa, grazie alla seguente formula $d \sin \theta = m \lambda$ dove d rappresenta il passo reticolare, m è l'ordine di diffrazione e λ è la lunghezza d'onda della luce. Quindi $\theta = \arcsin(m \lambda / d)$



Dai dati sperimentali riportati nella tabella seguente possiamo osservare che i reticoli di diffrazione con passo reticolare maggiore quando sono attraversati da un raggio laser generano più ordini di diffrazione.

Tabella dati sperimentali

	Ordine di diffrazione (m)	Angolo	Passo reticolare (d)
Master 1	1	30,70°	1042nm
Replica 1	1	31,10°	1030nm
Master 2	2	28,87°	2204nm
Replica 2	2	29,37°	2171nm

Le guide d'onda planari sono in grado di condurre la luce riflettendola solo su due piani paralleli grazie al fenomeno della riflessione totale (interna).

Se c'è un'interferenza costruttiva di due fronti in fase ($\lambda = \text{multiplo di un numero intero}$) si può imporre una condizione in cui dopo due riflessioni l'onda riproduce esattamente se stessa. I campi che soddisfano ciò sono i *modi* della guida d'onda. I *modi* sono campi che mantengono la stessa distribuzione trasversale e la stessa polarizzazione a tutte le distanze lungo la guida d'onda

$$m = \sin\theta c / (\lambda/2d)$$

Quindi la condizione è soddisfatta solo per certi angoli, detti angoli critici dei quali possiamo calcolare il seno mediante la seguente formula:

$$\sin\theta = m\lambda/2d$$

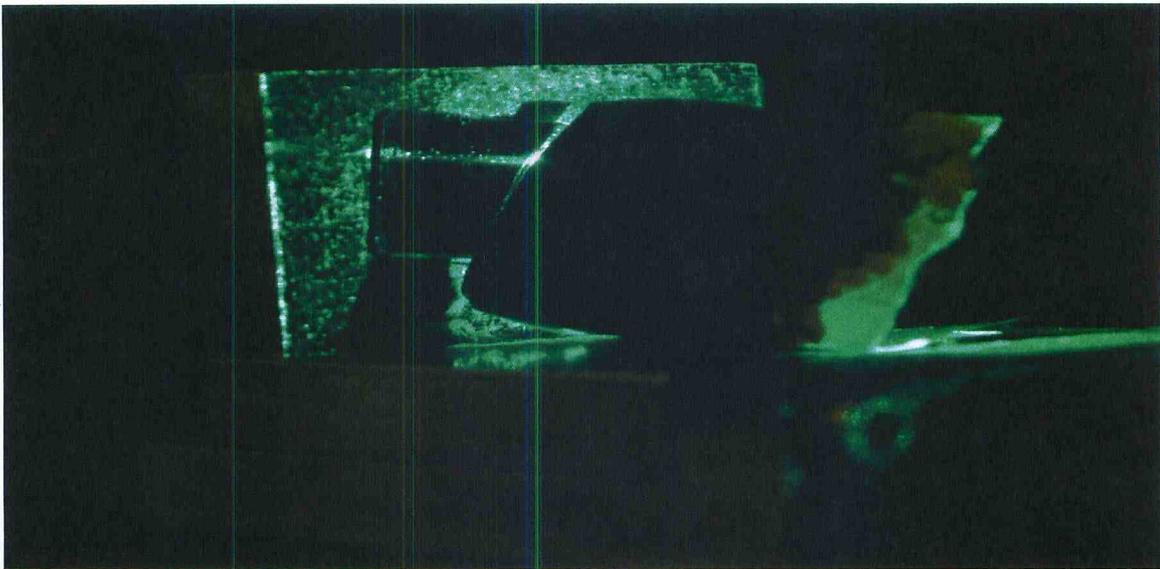
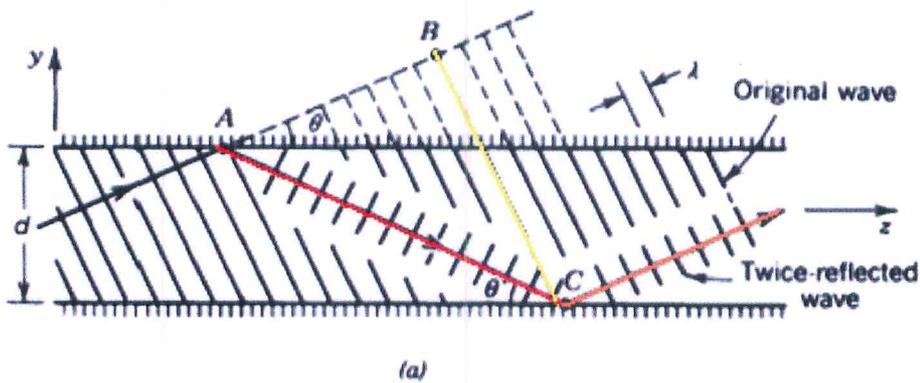
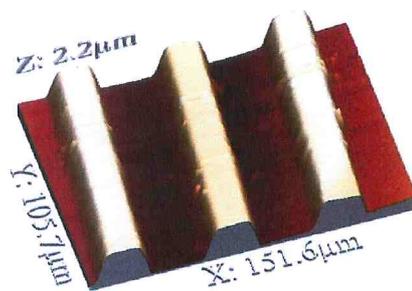
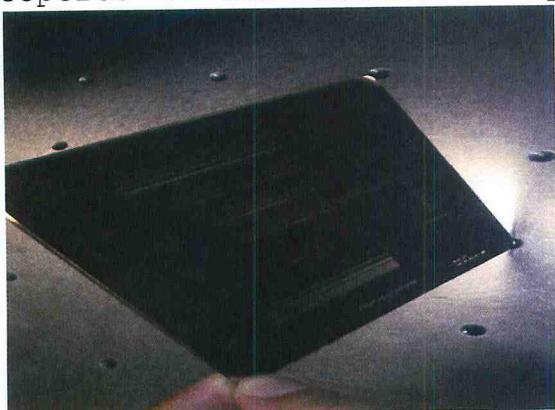


Foto della propagazione della luce nella guida planare fabbricata da noi durante lo stage.

Durante la seconda settimana dello stage, abbiamo costruito delle guide canale, ovvero delle guide d'onda in cui possiamo incanalare la luce che viene riflessa sull'intera superficie della guida, cosicchè la guida può assumere diverse conformazioni (curva, beam splitter, ecc.) a seconda delle necessità.

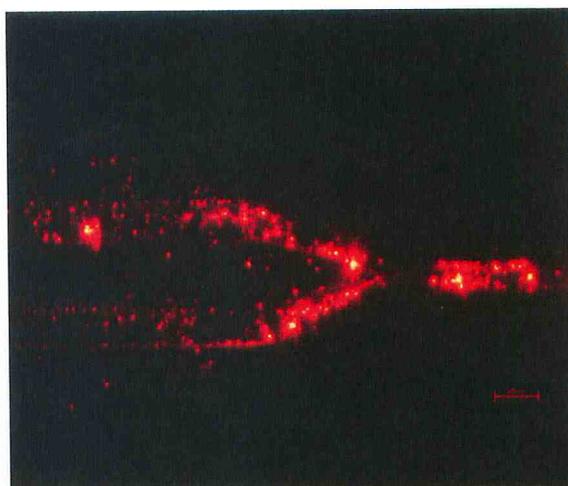
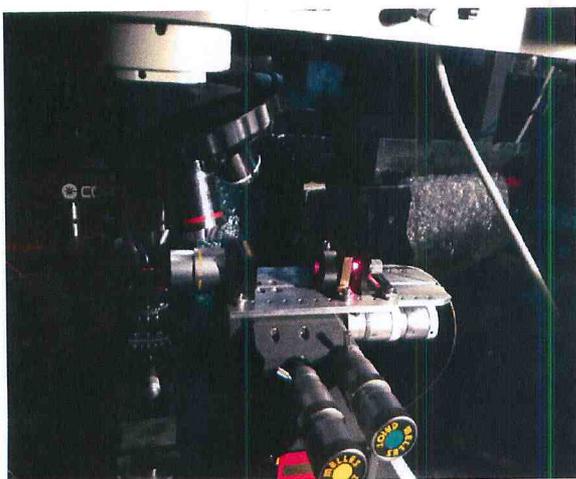


In laboratorio abbiamo preparato il materiale ibrido delle future guide mediante il processo sol-gel descritto precedentemente. Dopo una fase di pre-baking abbiamo applicato la litografia ai campioni, ovvero ogni campione è stato coperto da una maschera di quarzo e materiale metallico, per



poi esporli alla luce ultravioletta emessa dalla lampada. Il quarzo, a differenza del materiale metallico, è trasparente alla luce ultravioletta, quindi il resist negativo si è fotopolimerizzato nelle zone illuminate, mentre le zone in ombra sono state rimosse mediante il bagno in

isopropanolo. Dopo il post-baking abbiamo potuto osservare le guide d'onda canale utilizzando dapprima il microscopio ottico per verificarne la qualità e poi il microscopio AFM per prenderne le misure. Dopo aver fatto delle osservazioni sui risultati ottenuti, abbiamo accoppiato la luce in alcune guide canale, mediante un set up di lenti che avevano la funzione di rimpicciolire lo spot del laser per puntarlo direttamente in una guida d'onda per osservarla al microscopio.



E' stato possibile osservare le guide d'onda grazie allo scattering, ovvero una parziale dispersione della luce incanalata all'interno di esse a causa di alcune piccole imperfezioni.

Una delle proprietà principali della comunicazione in fibra ottica consiste proprio nel trovare un mezzo di comunicazione che non subisca dispersione. Infatti, nonostante un po' di scattering, noi ci riteniamo soddisfatti dei risultati ottenuti.