

**TESINA PER L'ESAME DI STATO
A.S. 2015/2016**

Dispositivi Ottici per ICT

di *Matteo Minardi*

Il presente contributo, elaborato dallo **studente Matteo Minardi** del Liceo Scientifico "Touschek" di Grottaferrata (RM), è connesso alle attività scientifiche e laboratoriali svolte durante lo "**Stage a Tor Vergata**" - promosso dal Piano nazionale Lauree Scientifiche e tenuto presso i laboratori della Macroarea di Scienze MFN dell'**Università degli Studi di Roma Tor Vergata** in due fasi:

- Stage Estivo dal 15 al 19 Giugno 2015;
- Stage Invernale dal 8 al 12 febbraio 2016.

Le attività didattiche previste nel Programma dello Stage sono state realizzate in cinque gruppi di ricerca, guidati da docenti dell'Università di Roma Tor Vergata.

Il responsabile scientifico del Modulo "Dispositivi Ottici per ICT"

Dott. Paolo Proposito



Il Direttore degli "Stage a Tor Vergata"

Prof. Nicola Vittorio



INDICE

1. Introduzione.....	2
2. Ottica in guida d'onda.....	3
2.1. Vantaggi dei dispositivi ottici.....	3
2.2. Il principio alla base dell'ottica in guida d'onda: la riflessione totale.....	3
2.2.1.La riflessione della luce.....	3
2.2.2.La rifrazione della luce	4
(dimostrazione tramite il principio di Fermat).....	4
2.2.3.La riflessione totale.....	5
3. Strutture per la trasmissione di luce a lunga distanza: la fibra ottica.....	6
4. Strutture per la trasmissione di luce a breve distanza: ottica integrata.....	7
4.1. Guide d'onda canale.....	7
5. Realizzazione di una guida d'onda canale.....	8
5.1. Realizzazione del film.....	8
5.1.1.Precursore inorganico.....	8
5.1.2.Idrolisi del titanio (IV propossido).....	9
5.1.3.Precursore organico.....	9
5.1.4.Idrolisi del TMSPM.....	9
5.1.5.Unione dei precursori e condensazione.....	10
5.1.6.Essiccamento.....	10
5.2. Deposizione del film sul substrato.....	11
5.3. Fotolitografia ottica.....	11
6. Caratterizzazione di una guida d'onda canale.....	12
6.1. Microscopio ottico.....	13
6.2. Microscopio a forza atomica.....	13
7. Inserzione della luce nella guida d'onda	15
Bibliografia	16

1. Introduzione

Con l'evolversi delle industrie, tra la fine del XIX secolo e l'inizio del XX secolo, si assiste ad una profonda trasformazione della civiltà occidentale: la nascita della società di massa, l'avvento delle macchine, il rinnovamento del pensiero operato dalle nuove scoperte e dalle nuove teorie scientifiche, lo sviluppo delle comunicazioni. In questo periodo viene infatti inventato il telegrafo (1844), poi il telefono (1871), fino ad arrivare alla prima trasmissione transatlantica con onde radio (1901) e alla nascita del cinema. Nell'ambito dei trasporti si espande ampiamente la rete ferroviaria, l'automobile diventa accessibile anche al ceto medio (Model-T 1908), viene costruito il primo aeroplano (1903).

Queste invenzioni si traducono in una velocizzazione delle comunicazioni, in un nuovo modo di pensare e di vivere, più dinamico. La vita acquista un nuovo ritmo: “la magnificenza del mondo si arricchisce di una bellezza nuova: la bellezza della velocità” (Marinetti).

In questo contesto storico-culturale, il 20 Febbraio 1909, con la pubblicazione del primo *Manifesto futurista* sul quotidiano “Le Figaro”, da parte di Filippo Tommaso Marinetti, nasce l'avanguardia storica del Futurismo, di cui la velocità è uno dei valori principali. Questa viene infatti teorizzata addirittura come religione-morale nel manifesto del 1916, *La nuova religione-morale della velocità* di Marinetti, con lo scopo di “difendere l'uomo dalla decomposizione determinata dalla lentezza, dal ricordo, dall'analisi, dal riposo e dall'abitudine”.

Trattandosi di una religione, Marinetti scrive che “se pregare vuol dire comunicare con la divinità, correre a grande velocità è una preghiera”. Ne consegue quindi la “santità della ruota e della rotaia”; sono “luoghi abitati dal divino” i treni, i motori, le automobili, le biciclette e le motociclette, l'elettricità, le macchine, i quali vengono esaltati anche dalla pittura futurista che li rende i suoi soggetti privilegiati. Ne è un esempio il dipinto di Balla “Velocità astratta” in cui, ormai non più riconoscibile, la sagoma di un'automobile, parzialmente ripetuta e traslata nello spazio, si confonde in un succedersi e sovrapporsi di forme disposte in sequenza, come a fissare i suoi successivi avanzamenti.

La velocità assume un valore così importante proprio perché “una grande velocità d'automobile o d'aeroplano consente di abbracciare e di confrontare rapidamente diversi punti lontani della terra”, poiché “i chilometri e le ore non sono eguali, ma variano, per l'uomo veloce, di lunghezza e di durata”.

Se provassimo a contestualizzare le idee e le tesi che Marinetti sosteneva un secolo fa, ci accorgeremmo di quanto queste possano risultare attuali nella nostra società, ancor più influenzata dalla velocità. Oggi, grazie alla rivoluzione tecnologica, possiamo “abbracciare e confrontare” i “diversi punti lontani della terra” in maniera quasi istantanea, possiamo visitare città o musei grazie alla realtà virtuale, assistere ad una conferenza o comunicare in tempo reale con chiunque vogliamo, ovunque si trovi, non solo vocalmente, ma anche visivamente.

La ricerca nel campo dei dispositivi ottici per ICT (Information and Communication Technology) si propone proprio l'obiettivo di rendere sempre più efficienti e veloci i sistemi di informazione e comunicazione cosicché “l'energia umana centuplicata dalla velocità dominerà il Tempo e lo Spazio”.

2. Ottica in guida d'onda

Una guida d'onda è una struttura (dispositivo ottico) capace di confinare un'onda elettromagnetica, come la luce, guidandola dunque attraverso un percorso definito tra due estremità.

L'ottica in guida d'onda è perciò utile per la trasmissione di luce a lunga distanza (fibre ottiche), e ha importanti applicazioni nel campo dell'ottica integrata.

2.1. Vantaggi dei dispositivi ottici:

VELOCITA':

Grande capacità di trasporto di informazione o velocità di trasmissione. Ad esempio la fibra ottica può arrivare nelle reti domestiche ad una velocità di 1Gb/s che, se confrontata con la velocità di circa 20 Mb/s delle più comuni rete ADSL, risulta essere circa 50 volte maggiore.

COSTI RIDOTTI:

1. La bassa attenuazione del segnale rende possibile la trasmissione su lunga distanza senza ripetitori e quindi elimina il costo di questi ultimi
2. L'uso di materiali vetrosi a base di Silicio, più facilmente reperibili e meno costosi del rame (il Silicio è l'elemento più comune della crosta continentale dopo l'ossigeno)

PESI ED INGOMBRI RIDOTTI:

I pesi e gli ingombri minori sono di grande vantaggio per settori come l'avionica e per i satelliti

BASSO CONSUMO DI ENERGIA:

C'è un minore consumo di energia in quanto non c'è corrente che fluisce

IMMUNITA' AL CROSS-TALK:

Assenza del fenomeno del crosstalk, ovvero del fenomeno secondo cui un filo attraversato da corrente variabile genera un campo magnetico variabile che può indurre, in un cavo vicino, una differenza di potenziale e quindi una corrente indotta spuria

MAGGIORE SICUREZZA MILITARE:

Il confinamento del segnale all'interno della fibra rende impossibile l'intercettazione dall'esterno, garantendo quindi una sicurezza della trasmissione

MAGGIORE SICUREZZA:

1. L'assenza di corrente elettrica elimina il problema della messa a terra, rischi di scariche e cortocircuiti
2. Maggiore resistenza a molteplici condizioni meteorologiche
3. Possibilità di contatto con fluidi senza rischi

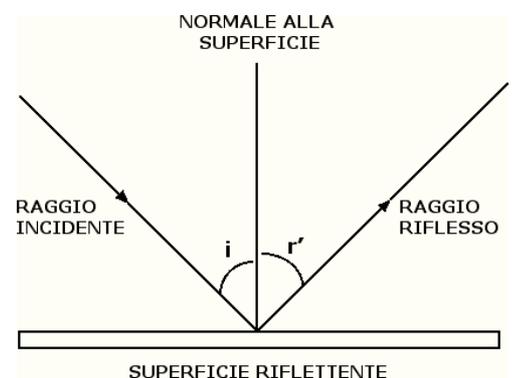
2.2. Il principio alla base dell'ottica in guida d'onda: la riflessione totale

2.2.1. La riflessione della luce

Il raggio incidente, la normale e il raggio riflesso giacciono tutti sullo stesso piano (il piano del foglio).

L'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza

$$i = r'$$



2.2.2. La rifrazione della luce (dimostrazione tramite il principio di Fermat)

Schematizziamo il cammino di un raggio di luce che subisce rifrazione con una spezzata chiusa AEB come in figura.

Fermat si propone di ricavare la legge di rifrazione determinando il punto E che rende minimo il tempo di percorrenza della spezzata. Il tratto AE viene percorso in aria, mentre EB in acqua. È noto che la velocità della luce in un mezzo omogeneo è costante; supponendo che l'aria e l'acqua attraversati dal raggio siano due mezzi omogenei, chiamiamo v_1 la velocità della luce nell'aria e v_2 la velocità della luce nell'acqua.

L'obiettivo di Fermat può essere scomposto in due passi:

- determinare la funzione "tempo di percorrenza della spezzata AEB"
- determinare il minimo di tale funzione

Per quanto riguarda il primo obiettivo, sia a la misura della lunghezza di AH, b quella di BK, d quella di HK e indicata con x la misura della lunghezza di HE, applicando il teorema di Pitagora, si ha:

$$AE = \sqrt{a^2 + x^2}; \quad EB = \sqrt{b^2 + (d-x)^2}$$

Il tempo di percorrenza di AE è

$$t_1 = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{v_1}$$

mentre il tempo di percorrenza di BE è

$$t_2 = \frac{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}{v_2}$$

La funzione "tempo di percorrenza della spezzata AEB" è quindi espressa dall'equazione:

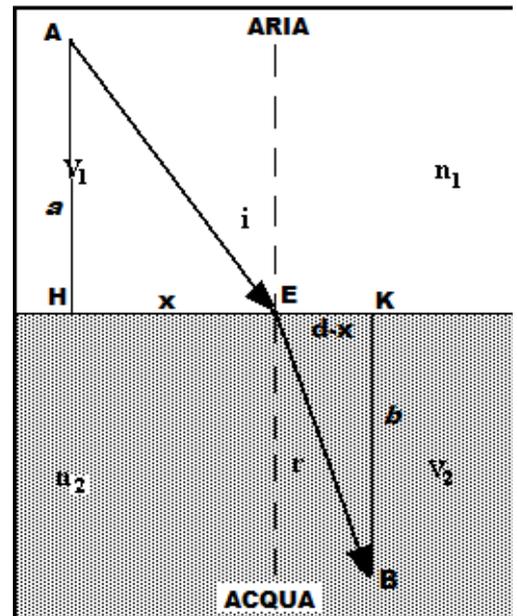
$$f(x) = t_1 + t_2 = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}{v_2}$$

Calcoliamo la sua derivata:

$$f'(x) = \frac{x}{v_1 \sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{d-x}{v_2 \sqrt{b^2 + (d-x)^2}}$$

Per il principio di Fermat, il valore x cercato deve rendere minima $f(x)$, quindi deve essere

$$f'(x) = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{x}{v_1 \sqrt{a^2 + x^2}} = \frac{d-x}{v_2 \sqrt{b^2 + (d-x)^2}}$$



Ossia:

5

$$\frac{\frac{x}{\sqrt{a^2+x^2}}}{\frac{d-x}{\sqrt{b^2+(d-x)^2}}} = \frac{v_1}{v_2}$$

Il numeratore del primo membro è il coseno dell'angolo $A\hat{E}H$, mentre il denominatore è il coseno dell'angolo $B\hat{E}K$. Passando ai complementari degli angoli $A\hat{E}H$ e $B\hat{E}K$, ossia agli angoli di incidenza i e di rifrazione r formati con i raggi incidente e rifratto con la normale alla superficie di separazione dei due mezzi, otteniamo la legge di rifrazione:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$$

La velocità della luce dipende dal mezzo nel quale essa sta viaggiando. Ad esempio, nel vuoto la velocità della luce è circa $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. In generale la velocità v della luce in un mezzo è determinata dall'indice di rifrazione n del mezzo, così definito:

$$n = \frac{c}{v}$$

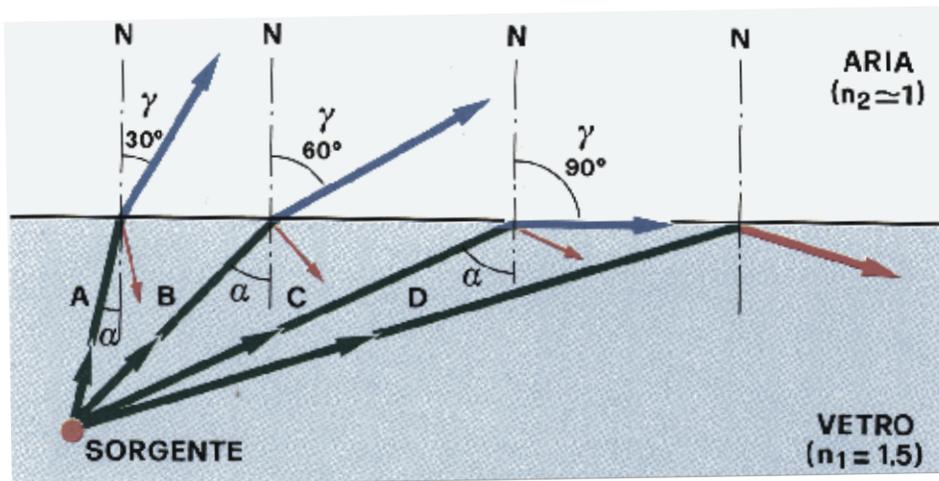
Possiamo quindi riscrivere la precedente relazione come

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1/c}{v_2/c}$$

Ottenendo così la *Legge di Snell-Cartesio*

$$\sin i \, n_1 = \sin r \, n_2$$

2.2.3. La riflessione totale



Supponiamo che la luce passi da un mezzo con certo indice di rifrazione n_1 a un mezzo con indice di rifrazione minore n_2 . Per un certo angolo limite il raggio rifratto non passa più nel secondo mezzo, ma è diretto parallelamente alla superficie di separazione. In questo caso, mostrato con il raggio C, l'angolo di rifrazione è 90° . Per angoli di incidenza maggiori di questo angolo limite, come nel caso del raggio D, si osserva che tutta la luce è riflessa internamente. Questo fenomeno è

noto come riflessione totale interna.

Possiamo calcolare l'angolo limite della riflessione totale ponendo $r = 90^\circ$ nella legge di Snell-Cartesio:

$$\sin i \, n_1 = \sin 90^\circ \, n_2 = n_2$$

Angolo limite i per la riflessione totale

$$\sin i = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{con } n_2 < n_1$$

3. Strutture per la trasmissione di luce a lunga distanza: la fibra ottica

Ogni singola fibra ottica è composta di due strati concentrici di materiale trasparente estremamente puro: un nucleo cilindrico centrale, o core, e un mantello o cladding attorno ad esso. Il core presenta un diametro molto piccolo di circa $10 \mu\text{m}$, mentre il cladding ha un diametro di circa $125 \mu\text{m}$. I due strati sono realizzati con materiali con indice di rifrazione diverso, il cladding deve avere un indice di rifrazione minore rispetto al core.



Fig. 2 Struttura di una fibra ottica

La luce infatti entra nel core a un certo angolo superiore a quello limite (nella figura θ_a) e si propaga mediante una serie di riflessioni alla superficie di separazione fra i due materiali del core e del cladding.

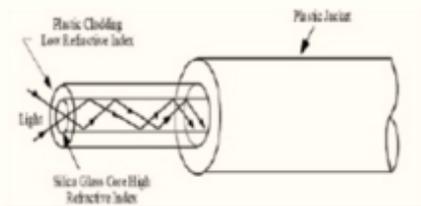


Fig. 3 Schema di funzionamento di una fibra ottica

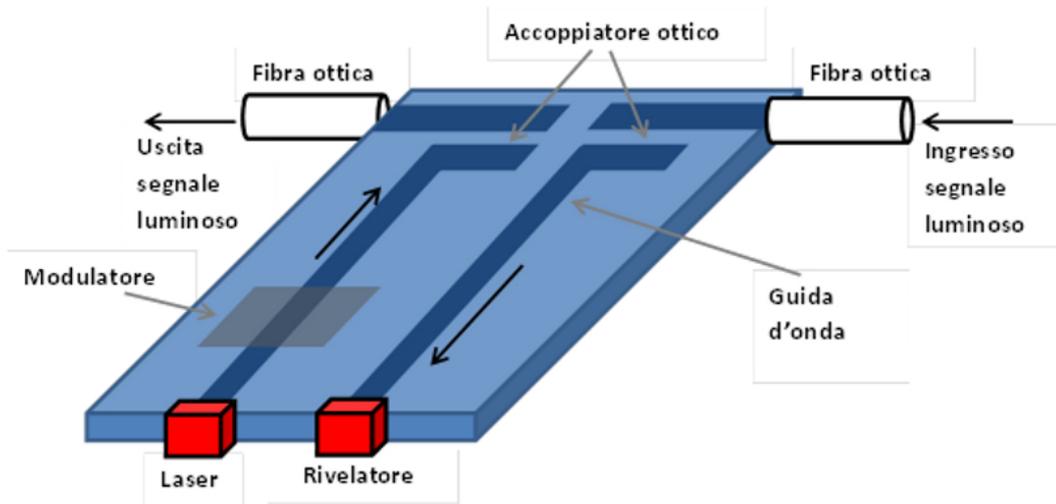


Fig. 4 Condizione di riflessione totale all'interno di una fibra ottica

All'esterno della fibra vi è una guaina protettiva polimerica (jacket) che serve da protezione e a dare resistenza agli stress fisici e alla corrosione, ed evitare il contatto tra la fibra e l'ambiente esterno. Il core e il cladding della fibra ottica possono essere realizzati in silice oppure in polimeri plastici.

4. Strutture per la trasmissione di luce a breve distanza: ottica integrata

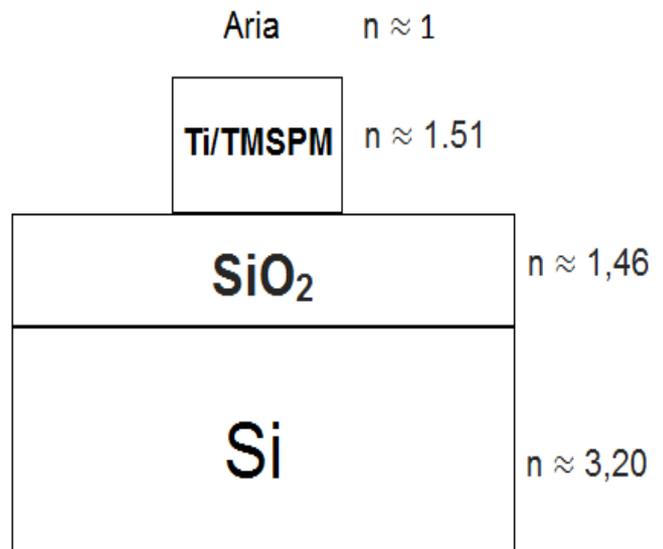
L'ottica integrata è la tecnologia che integra dispositivi ottici e componenti per la generazione, la ricombinazione, la modulazione, la rivelazione di luce su un singolo substrato (chip).



4.1. Guide d'onda canale

La guida d'onda canale è una struttura capace di guidare la luce confinandola sia in altezza (sull'asse y) che in larghezza (sull'asse x).

Nel corso dello stage presso i laboratori dell'Università degli studi di Roma Tor Vergata (15-19 giugno 2015 e 8-12 febbraio 2016) abbiamo realizzato una guida d'onda canale, costituita da un substrato di Silicio spesso circa $700\text{-}800\mu\text{m}$ e con indice di rifrazione $n \approx 3,20$, da uno strato superiore di Ossido di silicio (SiO_2) spesso circa $8\mu\text{m}$ e con indice di rifrazione $n \approx 1,46$ e da un ultimo strato, che rappresenta la guida vera e propria, costituito un film ibrido in Ti/TMSPM spesso circa $2\mu\text{m}$, largo circa $30\mu\text{m}$ e con indice di rifrazione $n \approx 1,51$.



La luce si propaga all'interno della guida rimanendo confinata in quest'ultima grazie al fenomeno fisico della riflessione totale interna, possibile per angoli di incidenza superiori all'angolo limite poiché l'indice di rifrazione $n \approx 1,51$ del film risulta maggiore sia di quello $n \approx 1,46$ dell'Ossido di silicio, sia di quello $n \approx 1$ dell'aria.

5. Realizzazione di una guida d'onda canale

La guida d'onda viene realizzata partendo dal substrato di Si e SiO₂ già fabbricato.

Successivamente viene prodotto in laboratorio il film ibrido in Ti/TMSPM, che verrà poi depositato sul substrato con metodo dello spin-coating.

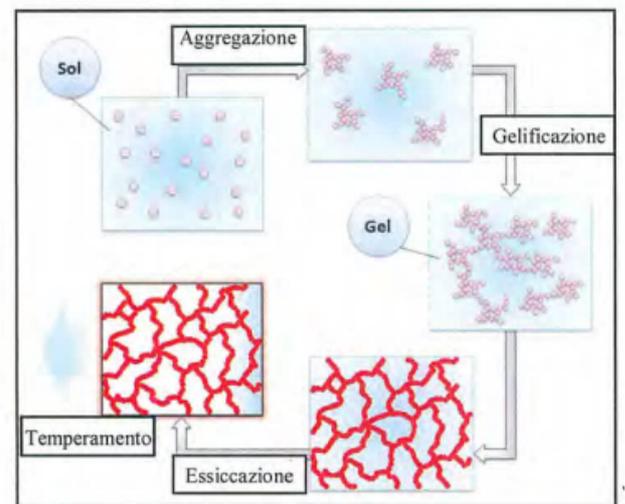
Infine, poiché la guida d'onda canale ha una struttura particolare, confinata non solo in altezza, ma anche in larghezza, si andrà a rimuovere selettivamente la parte del film che non costituisce la struttura guidante, tramite fotolitografia ottica.

5.1. Realizzazione del film

Il film è realizzato tramite metodo sol-gel, ovvero un metodo per la fabbricazione a basse temperature di materiali ceramici, dunque solidi, che parte da precursori liquidi di natura inorganica e organica.

Il processo si divide in tre fasi:

1. Idrolisi: Formazione di una sospensione colloidale di particelle solide nel liquido (Sol)
2. Condensazione: Processo di trasformazione del Sol in Gel (parte solida continua all'interno del liquido)
3. Essiccamento: Trasformazione attraverso dei trattamenti termici in ossido ceramico (il liquido evapora e rimane un solido)



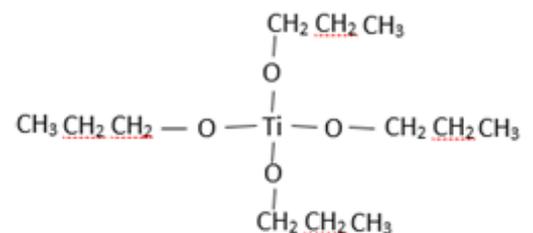
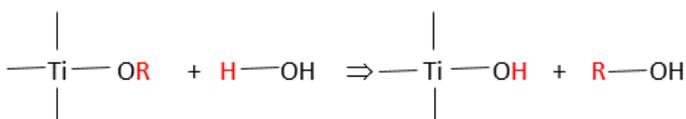
5.1.1. Precursore inorganico

Il precursore inorganico conferisce al film una struttura vetrosa, quindi con elevata trasparenza che permette il passaggio della luce al suo interno, ma è caratterizzato da una bassa elasticità.

Il precursore usato è un alcossido (M (OR)_n) contenente un metallo M, legato ad ossigeno e a radicali alchilici R del tipo C_nH_{2n+1}, nel nostro caso il Titanio (IV) propossido (Ti(OC₃H₇)₄)

5.1.2. Idrolisi del Titanio (IV propossido)

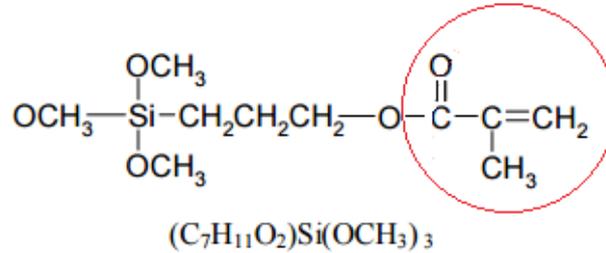
Nella fase "Sol" il precursore reagisce con l'acqua con una reazione di idrolisi spontanea a temperatura ambiente con liberazione di alcool



5.1.3. Precursore organico

Il precursore organico conferisce al film proprietà plastiche, quali una maggiore elasticità e malleabilità, che diminuiscono le probabilità di fratture nelle guide.

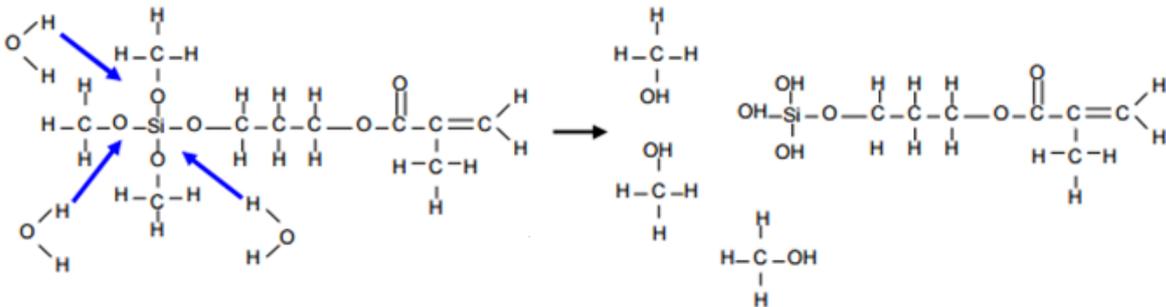
(TMSPM)



Il precursore usato è il TMSPM (3-(Trimethoxysilyl)propylmethacrylate), caratterizzato dal gruppo metacrilato (cerchiato in rosso) che sotto opportune condizioni di illuminazione, con radiazione elettromagnetica ultravioletta, apre il doppio legame ossigeno-carbonio inducendo la fotopolimerizzazione del materiale, la quale migliora il processo di condensazione della struttura ibrida organica/inorganica finale.

5.1.4. Idrolisi del TMSPM

Il TMSPM viene unito all'alcool isopropilico (con funzione di diluente) e acido cloridrico (HCl) diluito in acqua (catalizzatore per l'idrolisi) così da innescare la reazione di idrolisi.



5.1.5. Unione dei precursori e condensazione

Successivamente le due soluzioni vengono unite (con l'aggiunta di Irgacure 184 che fungerà poi da fotoiniziatore della reazione di polimerizzazione) per creare il film ibrido, ovvero di composizione organico-inorganica.

Nella fase "Gel" avviene il processo di condensazione in cui le molecole dei precursori legano tra loro con produzione di acqua ed alcool

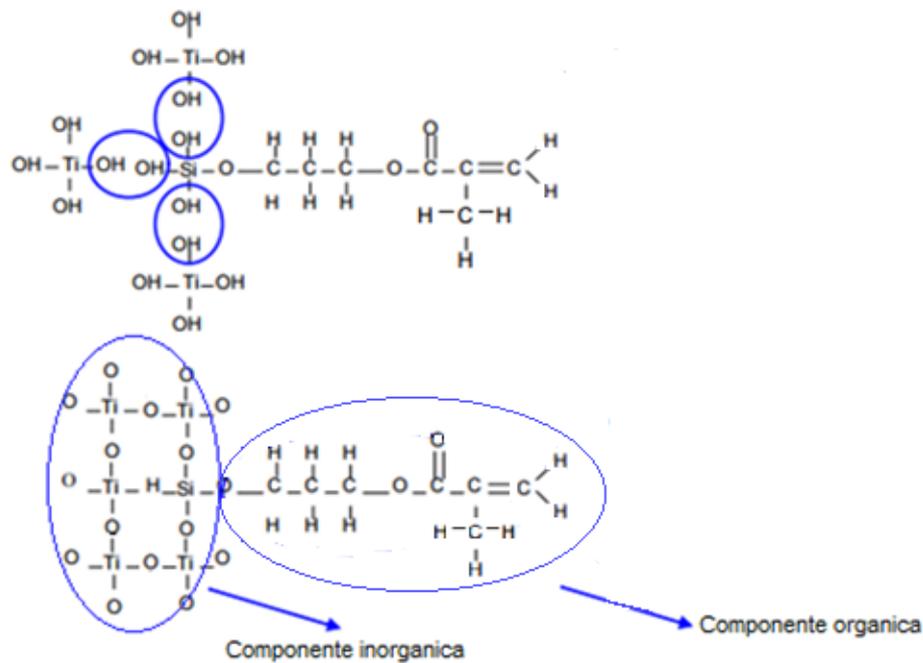


Figura 2.2: Processo Sol-Gel per il Ti/Tmspm.

5.1.6. Essiccamento

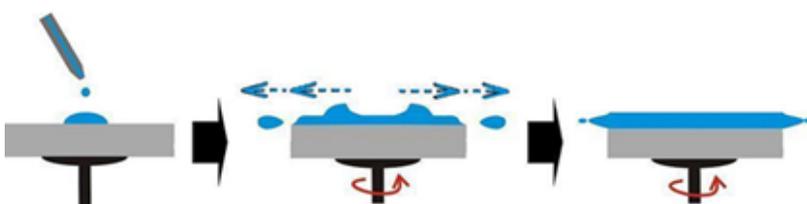
Nel processo di essiccamento i prodotti delle reazioni di condensazione come alcool e acqua evaporano lasciando solamente la parte ossido ceramica. Questo processo causa un restringimento del volume che può produrre fratture in un film rigido. Grazie all'utilizzo del precursore organico ciò non avviene.

5.2. Deposizione del film sul substrato

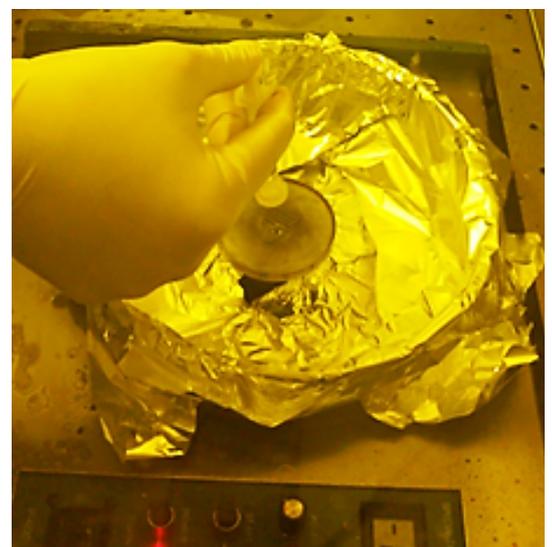
La deposizione del film prodotto con metodo Sol-Gel avviene tramite spin-coating.

Con questo metodo la soluzione è deposta sul substrato collocato su una piattaforma ruotante, con velocità di rotazione di circa 6000 giri al minuto che permette di ottenere degli spessori del film estremamente piccoli (circa 2 μ m).

Il processo avviene in camera pulita in modo da ridurre la contaminazione da polveri.



Schematizzazione del processo di spin-coating.



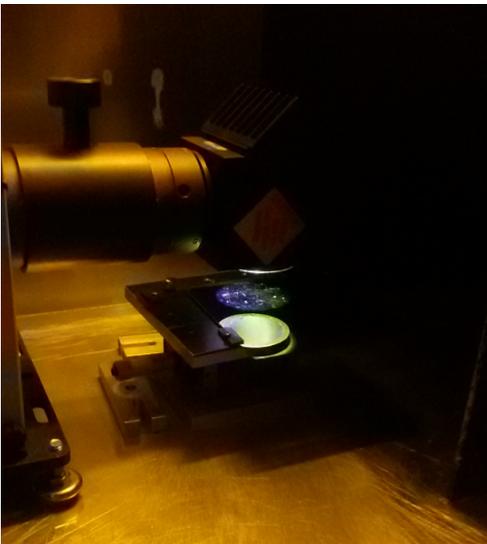
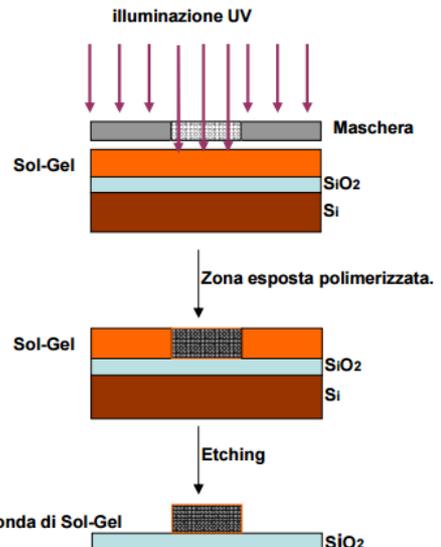
Deposizione del film sul substrato collocato sulla piattaforma ruotante.

5.3. Fotolitografia ottica

La fotolitografia è un processo usato per la rimozione selettiva di parti del substrato. Viene usata per trasferire un disegno geometrico da una maschera ad un materiale sensibile alla luce (resist) depositato su un substrato. Nel nostro caso il resist è proprio la soluzione solgel che abbiamo realizzato.

La maschera è una lastra di quarzo su cui è depositato un sottile strato di Cromo, e presenta zone di trasparenza e di opacità in corrispondenza del disegno geometrico da riprodurre.

Il processo fotolitografico inizia quindi il posizionamento della maschera a contatto con il substrato. Successivamente viene accesa la sorgente ultravioletta che, grazie alla trasparenza della maschera in corrispondenza del disegno, fotopolimerizza il film fotosensibile (resist) di Ti/TMSPM. Infine attraverso un bagno di sviluppo in Isopropanolo la parte non fotopolimerizzata viene eliminata, mentre rimane quella polimerizzata che costituisce la nostra guida per la luce.



Esposizione del film alla luce ultravioletta.

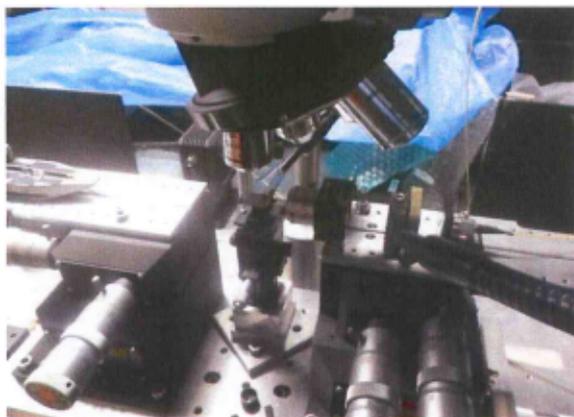


Isopropanolo e becher usati per il bagno di sviluppo.

diante tecnica

6. Caratterizzazione di una guida d'onda canale

Una volta realizzate le guide canale abbiamo proceduto alla loro caratterizzazione tramite microscopio ottico e tramite microscopio a forza atomica (AFM).



Microscopio ottico utilizzato



Microscopio a forza atomica (AFM) utilizzato

6.1. Microscopio ottico

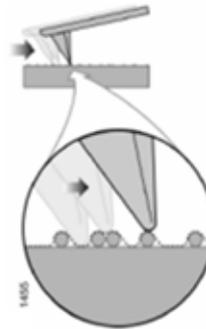
Utilizzando il microscopio ottico abbiamo ottenuto un'immagine bidimensionale della guida d'onda, in cui si possono distinguere i canali nei quali viaggia il segnale luminoso.



Immagine guida d'onda canale tramite microscopio ottico

6.2. Microscopio a forza atomica (AFM)

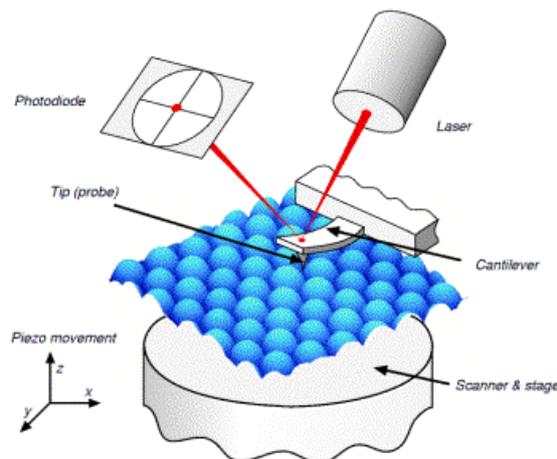
I microscopi a forza atomica (AFM) forniscono un'immagine della superficie del film nello spazio su scala nanometrica, sfruttando l'interazione tra gli atomi della superficie e gli atomi di un'opportuna sonda. Quest'ultima è una punta di materiale non metallico (solitamente silicio), idealmente costituita da un singolo atomo.



Schematizzazione interazione sonda-campione

L'apparato AFM consiste di tre elementi principali: sonda, controllo elettronico e interfaccia software. Operando congiuntamente essi convertono il risultato dell'interazione punta-campione in un'immagine topografica della superficie.

Per rivelare gli spostamenti della sonda si utilizza un fascio laser che, riflesso dal supporto della punta su un fotodiodo sensibile alla posizione, permette al sistema elettronico di elaborare i movimenti della punta e quindi l'immagine della superficie del campione.



Attraverso l'AFM abbiamo ottenuto un'immagine tridimensionale, un'immagine bidimensionale e un profilo estremamente precisi della guida d'onda canale.

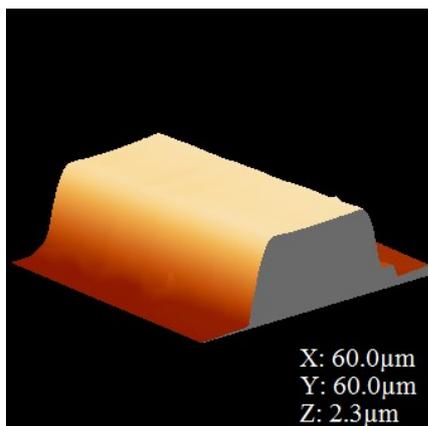


Immagine tridimensionale guida d'onda canale tramite AFM

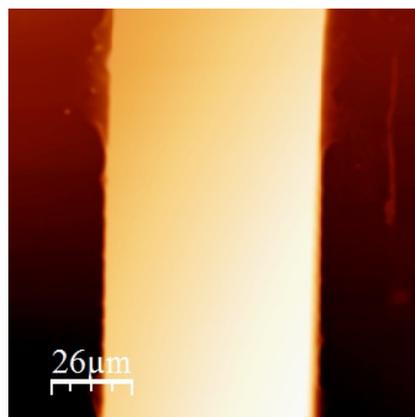
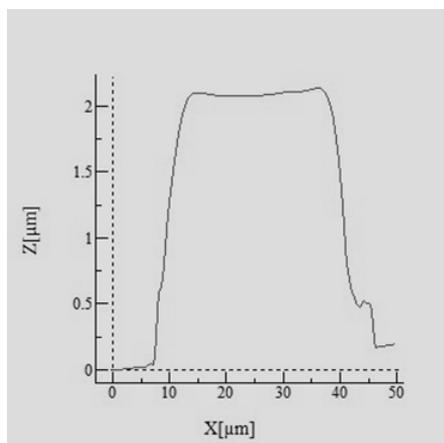


Immagine guida d'onda canale bidimensionale tramite AFM



Profilo guida d'onda canale tramite AFM

7. Inserzione della luce nella guida d'onda

Infine abbiamo proceduto all'inserzione di un fascio luminoso all'interno della guida canale realizzata. Per fare ciò abbiamo utilizzato un raggio laser opportunamente focalizzato tramite un sistema di lenti e il microscopio ottico (collegato allo schermo di un computer) per poter osservare il punto di inserzione. Una volta accoppiato il raggio luminoso, questo, propagandosi grazie al fenomeno della riflessione totale interna, esce al termine della guida dallo spot visibile in foto.

Teoricamente non dovremmo vedere alcuna presenza di luce sulla superficie della guida, bensì solamente il raggio entrante e lo spot di uscita, tuttavia questa è visibile poiché vi è una presenza indesiderata di particelle di polvere nella nostra guida, dovuta al fatto che l'intero procedimento di realizzazione andrebbe fatto in camera pulita. Infatti le particelle di polvere producono il fenomeno dello scattering, ovvero della dispersione del raggio di luce che viaggia in guida.



Inserzione della luce in guida d'onda

Bibliografia

Bergamini, Trifone, Barozzi, *Matematica.blu 2.0*, Bologna, Zanichelli editore S.p.A., 2013

Catena, Berrilli, Davoli, Proposito, *STUDENTI-RICERCATORI per cinque giorni: Gli "Stage a Tor Vergata"*, Springer, 2013

Verdone M., *Il futurismo*, Roma, Newton Compton editori s.r.l., 1994

Walker, *Dalla meccanica alla fisica moderna*, Milano-Torino, Pearson Italia, 2013

Documenti acquisiti durante lo Stage presso l'università di Tor Vergata