



**UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA**



**DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA  
DELL'INFORMAZIONE**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA ELETTRONICA**

**“PROGETTAZIONE DI UN ACCOPPIATORE DI FIBRE OTTICHE PER  
COMUNICAZIONE TRAMITE LUCE INFRAROSSA”**

**Relatrice: Prof. / Dott. Maria Guglielmina Pelizzo**

**Laureando: Marco Perlini**

**ANNO ACCADEMICO 2022 – 2023**

**Data di laurea 06/03/2023**



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>4</b>
	Imec	5
<b>2</b>	<b>Prima fase: progettazione e simulazioni</b>	<b>8</b>
	2.1 Principi teorici	8
	2.1 Progettazione del circuito ottico	16
	2.2 Risultati delle simulazioni	19
<b>3</b>	<b>Seconda fase: fase sperimentale</b>	<b>22</b>
	3.1 Fabbricazione e caratterizzazione delle microlenti	22
	3.2 Cronologia dei test	29
<b>4</b>	<b>Terza fase: test di performance ottiche</b>	<b>39</b>
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>43</b>
	<b>Fonti</b>	<b>44</b>

# 1 Introduzione

La luce è sempre più utilizzata nelle moderne tecnologie di comunicazione per via della sua altissima velocità e soprattutto bassissima potenza richiesta per poter essere generata. La fotonica è la branca dell'ottica che studia i fotoni e la loro propagazione, l'ingegneria applica le sue scoperte alle tecnologie per poter trarne vantaggi. Il canale ottico più utilizzato è la fibra ottica per via dei suoi bassi costi, la facilità d'uso e soprattutto le bassissime perdite di energia e l'alta frequenza a cui può operare. La radiazione infrarossa è la più utilizzata per comunicare, per avere il merito di essere la radiazione elettromagnetica che si propaga nella fibra con la minore attenuazione a parità di distanza.

Questa tesi riguarda il progetto svolto durante il mio tirocinio presso la imec Gent, centro di ricerca dell'università di Gent (Belgio). Durante questa esperienza ho potuto mettere in pratica ciò che ho imparato in questi anni universitari, scoprendo a mia volta nuove cose. Il progetto a cui ho preso parte riguarda la progettazione di un accoppiatore di fibre ottiche, ovvero un dispositivo ottico che, sfruttando le leggi di propagazione e diffrazione della luce, è in grado di mettere in comunicazione l'uscita di una fibra con l'ingresso di un'altra. Vedremo spiegato in seguito le fasi in cui è stato diviso il progetto, le sue possibili applicazioni e le mie conclusioni personali.



Logo dell'azienda

## **Imec <sup>1</sup>**

L'Interuniversity MicroElectronics Centre (IMEC) è un'organizzazione internazionale di ricerca e sviluppo, attiva nei campi di nanoelettronica e tecnologie digitali. La sua sede principale si trova a Leuven, in Belgio, ed è supervisionata da delegati dell'industria, università fiamminghe e dal governo fiammingo. Impiega più di 4000 dipendenti e possiede più di 12000 metri quadrati di camera bianca in tutto il mondo.

Imec nasce nel 1984 sotto la spina del governo fiammingo di allora, con lo scopo di potenziare l'industria di microelettronica tramite laboratori di ricerca avanzata, l'applicazione di ingegneria di progettazione e la produzione di semiconduttori. Inizialmente possedeva un'unica sede, ubicata in Belgio, ma con il tempo l'organizzazione è cresciuta espandendosi fino ai Paesi Bassi, gli Stati Uniti e Asia.

Al giorno d'oggi, grazie alla sua crescita, è arrivata ad occuparsi di più rami legati al mondo dell'elettronica. I campi di ricerca più importanti sono citati qui in seguito.

## **Scaling dei microprocessori <sup>2 3 4 5</sup>**

Sin dagli anni ottanta il fenomeno dello scaling, ovvero quello di costruire dispositivi basati su semiconduttori con dimensioni sempre minori, è diventato una costante nello sviluppo dell'elettronica a livello mondiale. Complice di questo è stata la legge di Moore, che prevede che queste dimensioni si sarebbero dimezzate circa ogni 18 mesi e che divenne l'obiettivo da inseguire per i costruttori e progettatori di microchip. Imec si occupa di scaling avanzato, ovvero il livello di scaling che ha fatto sì che i transistor moderni raggiungessero dimensioni di poche unità di nanometro, ed è considerato uno dei leader mondiali in questo settore. L'attuale sfida è quella di riuscire a produrre MOSFET aventi una dimensione di 2 nm.

## **Energia e smart energy <sup>6 7 8</sup>**

Imec effettua ricerche in smart energy, ovvero la disciplina il cui scopo è migliorare l'efficienza energetica di dispositivi, sia a bassa che ad alta potenza, grazie a controllori integrati che ne monitorano i consumi e mediante algoritmi di controllo ne regolano la potenza. Questo porta ad un risparmio energetico e ad una conseguente riduzione dei costi di utilizzo, essendo minore l'energia consumata per far lavorare il determinato macchinario.

Nel settore generale dell'energia Imec si occupa di ricerche sulla produzione ed immagazzinamento di energia elettrica, tramite pannelli fotovoltaici e batterie ad alta potenza.

Entrambi i settori operano per andare sempre più verso un'energia sostenibile, il primo riducendone i consumi e il secondo producendola tramite energie pulite e con stoccaggi più efficienti.

### **Smart cities e internet of things<sup>9</sup>**

Uno dei progetti a lungo termine di Imec è quello di trasformare le principali città fiamminghe in smart cities, ovvero città che, grazie ad un insieme di strategie di pianificazione urbanistica e utilizzo di tecnologia intelligente, mirano all'ottimizzazione dei servizi pubblici e di conseguenza all'aumento della qualità urbana e della vita.

In modo simile Imec opera nel campo dell'internet of things, ovvero l'integrazione di internet in oggetti comuni, in modo da poter dare ad essi la possibilità di comunicare a loro volta con altri oggetti al fine di fornire informazioni e servizi agli utenti. Uno degli attuali obiettivi dell'organizzazione è quello di creare il più grande laboratorio per le applicazioni di internet of things in Europa.

### **Optoelettronica e fotonica**

Imec possiede un intero reparto dedicato all'optoelettronica e alla fotonica, diviso in più gruppi di ricerca in base alle applicazioni da sviluppare.

Una di queste riguarda lo sviluppo della comunicazione a bassa potenza tramite l'utilizzo di luce visibile o infrarossa come sorgente e la fibra ottica come suo mezzo di trasporto.

Un altro gruppo di ricerca sviluppa sensori ottici in grado di captare luce visibile, infrarossa e ultravioletta per varie applicazioni, tra cui la costruzione di immagini digitali o la misurazione dell'intensità della stessa.

Si occupa inoltre di packaging, ovvero la protezione di circuiti elettronici dagli agenti esterni. Il packaging è molto importante per l'integrità del circuito da considerare per via delle proprietà di protezione meccanica, termica, chimica, elettromagnetica, ed elettrostatica che esso può conferire. La scelta di materiali per substrati e superstrati sono un esempio elementare di packaging, ed essa non è semplice per via dei vari fattori da considerare che variano in base all'applicazione. Per esempio un circuito che tende a surriscaldarsi necessiterà di un packaging che gli permetta di confluire bene il calore verso l'esterno, uno che deve essere elettricamente isolato avrà bisogno di un packaging di tipo

isolante, uno che deve essere messo al riparo da disturbi luminosi o elettromagnetici esterni necessiterà un altro tipo ancora di packaging e così via.

### **Applicazioni biomedicali** <sup>10 11 12 13 14</sup>

Anche la biomedica è un settore coinvolto dall'Imec, diviso anch'esso in più gruppi di ricerca vista la varietà delle sue applicazioni.

Nel campo delle neuroscienze Imec sviluppa sensori neurali, la cui sfida principale sta nel riuscire a ricavare dati di alta qualità dal nostro cervello tramite sensori che non debbano necessitare di interventi invasivi per poter essere utilizzati. All'inizio della loro storia infatti, per diagnosticare o monitorare eventuali malattie del cervello, i sensori dovevano essere applicati sulla superficie cranio, e per far ciò si doveva ovviamente ricorrere ad interventi chirurgici. Grazie all'evoluzione di queste tecnologie si è potuto creare sensori sempre meno invasivi, fino ad arrivare a quelli odierni che possono essere applicati sulla testa senza dover effettuare incisioni nel cranio o nella cute. Questi sensori hanno molte applicazioni, tra le varie ricerche tutt'ora in sviluppo se ne ha una il cui scopo è quello di decodificare e quindi capire meglio le cause e gli effetti della demenza sul cervello. Un'altra punta a sviluppare queste tecnologie per poter generare modelli tridimensionali del cervello studiato tramite i dati ricavati, con addirittura la precisione di una singola cellula.

Un'altra applicazione biomedica riguarda lo sviluppo di sensori atti a monitorare la salute dell'uomo tramite la misurazione di parametri biologici. Questi sensori risultano importanti soprattutto quando il corpo umano si trova in particolari condizioni, come per esempio in assenza di gravità. Un gruppo di ricerca infatti sviluppa questa tecnologia per monitorare la salute degli astronauti quando rimangono nello spazio per lunghi periodi di tempo.

Infine abbiamo il ramo della tecnologia biomedica indossabile, ovvero la tecnologia che può essere applicata su determinate parti del corpo per lunghi intervalli di tempo, senza risultare scomoda per l'indossatore. Questi dispositivi possono per esempio monitorare la salute del feto e il suo sviluppo durante la gravidanza, oppure registrare il battito cardiaco di una persona quando necessita di essere tenuto in osservazione. Altre applicazioni includono sensori che possono essere ingoiati per registrare aspetti meccanici e chimici dello stomaco durante la digestione, diagnosticando eventuali anomalie e problemi.

## **2 Prima fase: progettazione e simulazioni**

### **2.1 Principi teorici**

La prima parte del progetto è stata caratterizzata da simulazioni volte a capire e prevedere il comportamento del circuito ottico in base a parametri prestabiliti. Questi erano per esempio lo spessore degli strati di vetro dove poggiano le lenti, le dimensioni delle stesse e le distanze tra un elemento ottico e l'altro. Per queste simulazioni il software utilizzato è stato OpticStudio dell'azienda Zemax.

Per comprendere al meglio il funzionamento del circuito ottico analizziamo innanzitutto quello dei suoi principali componenti.

#### **La fibra ottica**

Iniziamo dal canale di comunicazione da noi utilizzato, la fibra ottica. Essa ha una storia recente e, nonostante la sua semplicità, si tratta di una delle più grandi invenzioni del settore elettronico e delle telecomunicazioni.

Essa è composta da due strati concentrici di un materiale trasparente molto puro, solitamente diossido di silicio. Lo strato più interno è detto nucleo o core, quello più esterno mantello o cladding. La luce viaggia all'interno del nucleo con un certo angolo rispetto all'asse del cavo e rimbalza ogni volta che viene a contatto con il mantello. Ciò avviene perché l'indice di rifrazione del nucleo (circa 1,5) è più alto di quello del mantello (solitamente 1,475), di conseguenza se l'angolo in ingresso è minore di un certo valore, detto angolo critico, varrà il teorema della riflessione totale.

Il nucleo ha solitamente un diametro di circa 10  $\mu\text{m}$ , mentre il mantello 125  $\mu\text{m}$ , al fine di smorzare eventuali fasci di luce che non vengono riflessi. Entrambi gli strati sono poi avvolti da due strati protettivi, detti buffer e jacket, che conferiscono al cavo una maggiore resistenza meccanica e chimica.



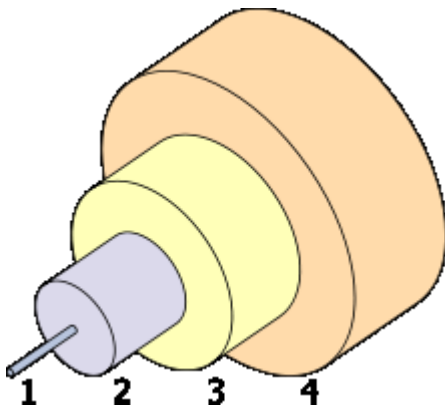


Figura 2.1: Struttura tipica di un cavo di fibra ottica. 1) Nucleo, 2) Mantello, 3) buffer, 4) Jacket

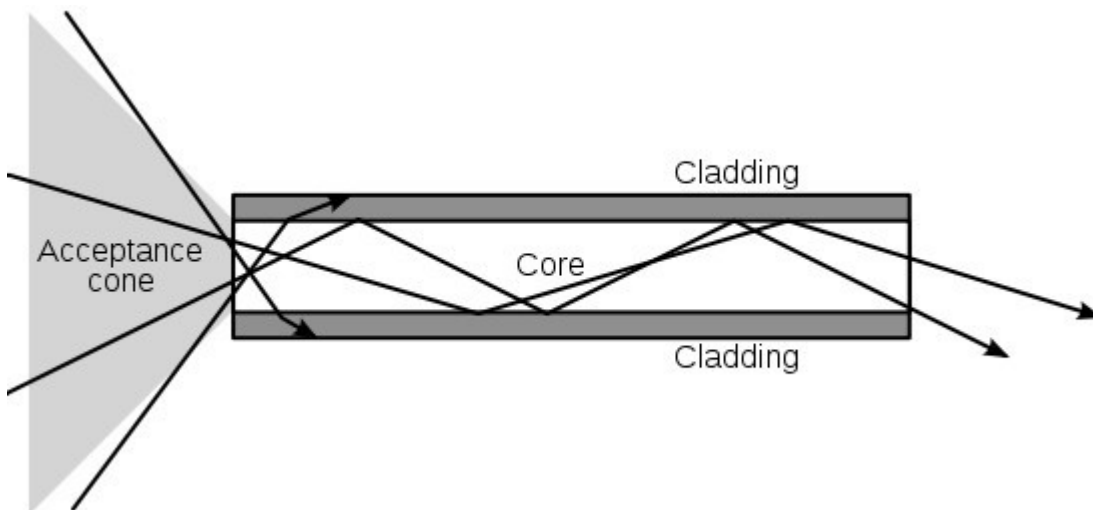


Figura 2.2: Schema di funzionamento di una fibra ottica. La luce entrante all'interno del cono di accettazione rimbalza in continuazione e viaggia all'interno della fibra, quella entrante con angoli maggiori di quello critico entra nel mantello e viene dissipata.

Il primo modello di fibra nasceva nel 1956 e veniva utilizzata per il funzionamento di un gastroscopio. Le sue prestazioni in termini di dissipazione di energia su unità di distanza erano piuttosto basse, ma ciò non presentava un problema vista la lunghezza limitata dei cavi. Nel 1965 lo scienziato Charles Kuen Kao, grazie ai suoi studi, intuì che le perdite di energia erano correlate alle impurità presenti nella fibra. Capì quindi che grazie a livelli di purezza più elevati le prestazioni delle fibre avrebbero potuto superare di gran lunga quelle dei cavi coassiali in rame, i principali mezzi di trasmissione allora utilizzati, e di conseguenza sarebbero potute diventare la nuova frontiera per le comunicazioni a lunga distanza. Fissò un valore convenzionale di  $20 \frac{dB}{km}$  come valore massimo di attenuazione che una fibra avrebbe dovuto tollerare. Nel 1970 alcuni ricercatori americani riuscirono a creare una fibra ottica con attenuazione di  $17 \frac{dB}{km}$ , riuscendo quindi a raggiungere e superare il traguardo fissato da

Kuen Kao. Dopo pochi anni gli stessi scienziati riuscirono a produrre una fibra dall'attenuazione di soli  $4 \frac{dB}{km}$ .

Grazie alla sua scoperta, Kuen Kao vinse il premio Nobel per la fisica nel 2009.

Al giorno d'oggi le fibre ottiche hanno prestazioni ancora migliori in termini di dissipazione. Queste dipendono però, oltre dal già citato grado di purezza, anche dalla frequenza dell'onda che vi viaggia attraverso. Questo è dovuto dalla somma di diversi fenomeni ottici dipendenti dalla frequenza dell'onda interessata, tra cui lo Scattering di Rayleigh (direttamente proporzionale al valore di frequenza), l'assorbimento infrarosso del diossido di silicio (inversamente proporzionale al valore di frequenza) e dai picchi di assorbimento delle impurità presenti nella fibra. Queste impurità si trovano solitamente sotto forma ionica, per via del fatto che perdono o acquistano elettroni quando gli atomi che le compongono si legano con le molecole di diossido di silicio (dal punto di vista pratico possono essere considerati come dei drogaggi indesiderati). Le impurità più presenti sono atomi di  $Cu^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$  e, soprattutto,  $OH^-$ . Quest'ultima crea un notevole picco di assorbimento alla lunghezza d'onda di  $1,38 \mu m$ . Per via sperimentale di è potuto tracciare la funzione di attenuazione per unità di distanza nella fibra, che vede la presenza di due punti di minimo. Questi punti di minimo rappresentano quindi le lunghezze d'onda utilizzate per la comunicazione e corrispondono a  $\lambda = 1310 nm$  e  $\lambda = 1550 nm$ . Per questo motivo si è deciso che la radiazione infrarossa debba essere quella utilizzata nella comunicazione tramite fibre ottiche.

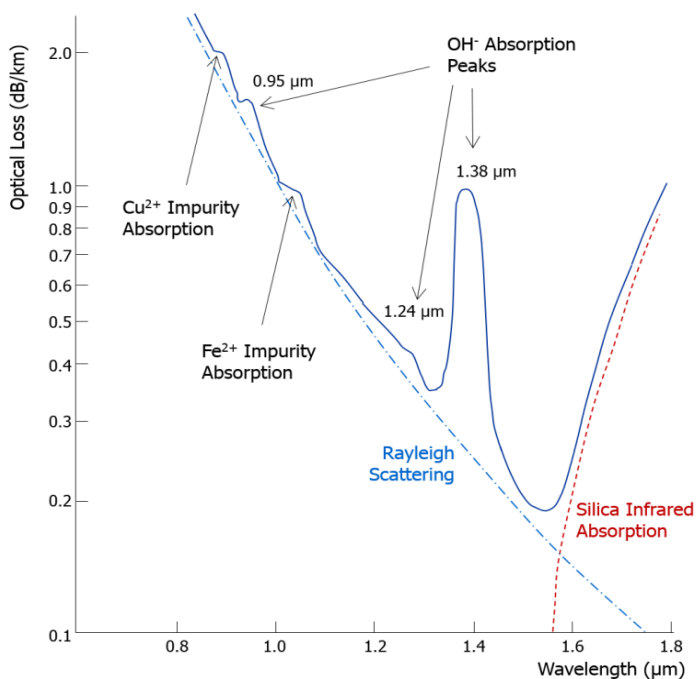


Figura 2.3: Attenuazione della luce nella fibra in funzione della lunghezza d'onda

## Il laser

Il laser rappresenta la nostra sorgente di luce all'interno del nostro progetto. La luce del laser possiede la rara proprietà di essere monocromatica, ovvero di essere formata da fotoni aventi tutti la stessa frequenza. Ovviamente in natura non è possibile ottenere una fonte di luce perfettamente monocromatica ma, essendo le altre componenti spettrali molto limitate, essa può essere considerata come tale. Un'altra proprietà del laser che viene in nostro favore è quella di propagarsi attraverso un fascio ristretto, al contrario di ciò che avviene con altri tipi di luce che si propagano all'interno di un angolo solido. La propagazione del fascio laser è approssimabile con buona approssimazione ad un fascio gaussiano, vale a dire con un fascio che perde in modo esponenziale densità potenza man mano che ci si allontana dal centro dello stesso. Il punto debole del fascio laser sta nella sua divergenza, vale a dire che il suo diametro aumenta man mano che ci si allontana dalla sorgente. Per descrivere questo fenomeno definiamo innanzitutto la lunghezza di Rayleigh  $Z_R$ , ovvero la distanza alla quale il valore diametro diventa  $\sqrt{2}$  volte il valore iniziale. Per un fascio gaussiano è calcolata nel seguente modo:

$$Z_R = \frac{\pi w_0^2 n(\lambda)}{\lambda}$$

Dove:

- $n(\lambda)$  è l'indice di rifrazione del mezzo dove il laser si sta propagando;
- $\lambda$  la lunghezza d'onda del fascio laser;
- $w_0$  il valore del diametro alla sorgente.

Supponendo ora che il fascio si propaghi lungo la direzione  $z$ , il diametro  $w(z)$  in funzione della distanza  $z$  dalla sorgente è pari a:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_R}\right)^2}$$

Notiamo che per una grande distanza il raggio cresce con essa in modo circa lineare, perciò per queste distanze la forma del fascio è approssimabile ad un cono. Si può quindi definire un angolo  $\Theta$  come angolo di divergenza del laser, ovvero l'angolo compreso tra i due asintoti diagonali della funzione  $w(z)$ .

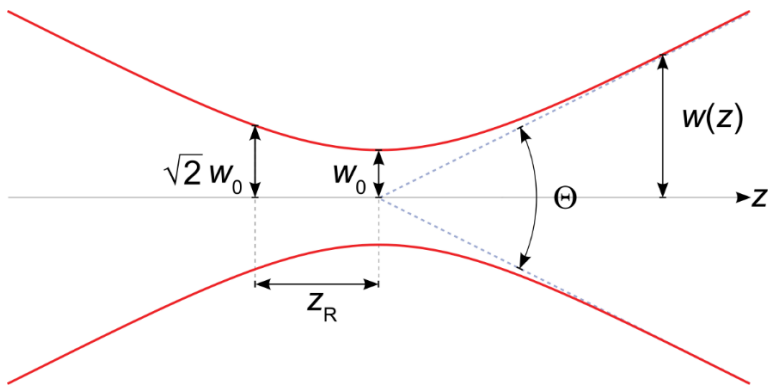


Figura 2.4: Vista laterale di un fascio gaussiano

La divergenza del laser è un inconveniente perché l'aumento della superficie trasversale del fascio riduce la densità di potenza dello stesso, inoltre causa problemi nelle applicazioni in cui il fascio debba rimanere concentrato in piccoli diametri per far sì che esse operino in modo corretto. Vedremo più avanti come può essere ovviato questo problema.

## Reticoli di diffrazione

La diffrazione è uno dei fenomeni ottici più comuni e osservabili. Essa non è altro che una deviazione della traiettoria di un'onda, che avviene quando l'onda stessa incontra un ostacolo nel suo cammino. Perché avvenga la diffrazione la dimensione dell'ostacolo deve essere equiparabile con quella della lunghezza dell'onda. In determinati casi il fenomeno della diffrazione può essere causato volontariamente, se esso può giocare a nostro vantaggio. Un esempio in cui ciò avviene è il reticolo di diffrazione. Un reticolo di diffrazione è, nella definizione generale, un componente ottico la cui superficie presenta una trama di linee parallele, uguali ed equidistanti, e a distanze confrontabili con la lunghezza d'onda della luce incidente. La distanza tra una fenditura e l'altra è detta passo.

Un fascio di luce incidente sul reticolo di diffrazione subisce un cambio di traiettoria, che dipende dalla lunghezza d'onda della luce incidente. Di conseguenza, se la luce non è monocromatica, si avranno le diverse lunghezze d'onda che la compongono deviate in direzioni differenti, altrimenti, se è monocromatica come nel nostro caso, essa sarà deviata verso una sola direzione.

Lo scopo del reticolo di diffrazione in questo progetto è quello di catturare la luce uscente dalla fibra ottica, convogliarla lungo il reticolo stesso ed infine farla uscire in direzione della seconda fibra, che continuerà il trasporto della luce. Il vantaggio dell'utilizzo del reticolo di diffrazione per la trasmissione della luce è quello della semplicità di cattura del raggio entrante e della direzionalità di quello uscente. Lo svantaggio del suo utilizzo è dato dal fatto che esso introduce perdite, principalmente costituite dalla riflessione in ingresso e diffrazione indesiderata durante il tragitto interno. Si può quindi definire un valore di rendimento del reticolo di diffrazione.

Nel nostro progetto il reticolo di diffrazione è stato realizzato tramite una microstrip in silicio, presentante fenditure avente passo uguale alla lunghezza d'onda della luce laser.

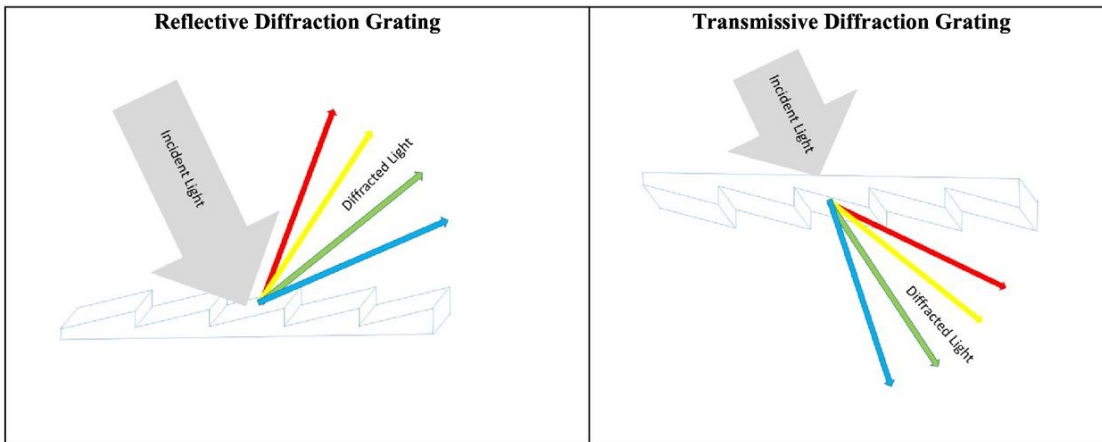


Figura 2.5: Due tipi di reticoli di diffrazione: riflettente e trasmissivo

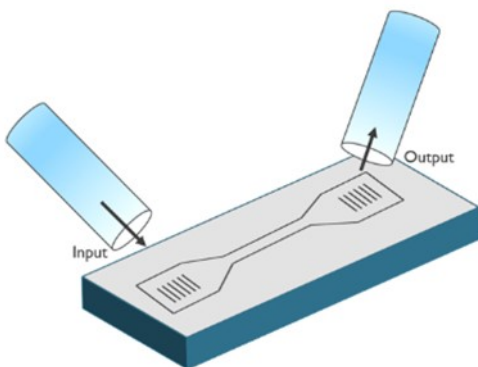


Figura 2.6: Schema di utilizzo del reticolo di diffrazione all'interno del progetto

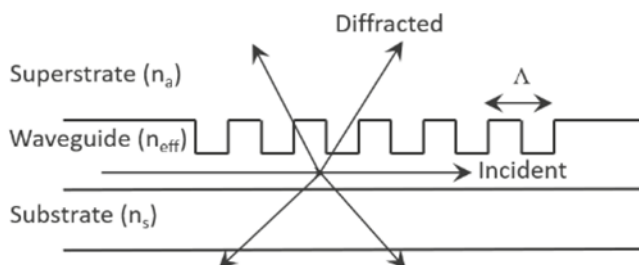


Figura 2.7: Perdite all'interno del reticolo di diffrazione

## Lenti

Una lente è un elemento ottico che può far divergere o concentrare un raggio di luce che vi passa attraverso. È costituita da un materiale trasparente, solitamente vitreo o plastico, e può presentare varie forme. Quella da noi usata nel nostro progetto è a sezione di sfera, e una lente avente questa forma possiede tre parametri dimensionali distinti: diametro (e di conseguenza raggio), altezza e raggio di curvatura. Quest'ultimo sarà indicato ogni tanto con la sigla ROC (Radius of Curvature).

Vale la disequazione:

$$\text{altezza} \leq \text{raggio} \leq ROC$$

Nel caso particolare in cui i tre elementi della disequazione sono uguali, la lente avrà la forma di una semisfera.

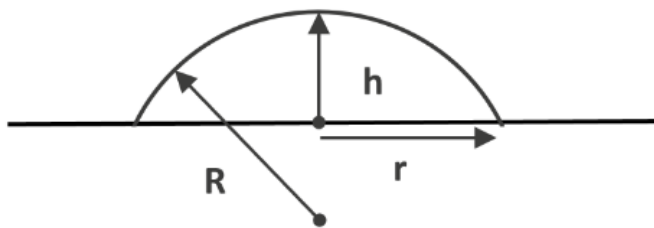


Figura 2.8: Vista laterale di una lente: altezza  $h$ , raggio  $r$  e raggio di curvatura  $R$

Come detto in precedenza lo scopo della lente è quello di far concentrare o divergere un raggio di luce vi passa attraverso. Esiste inoltre una terza operazione che essa può svolgere, quella che ci interessa per questo progetto: collimare, ovvero rendere il laser cilindrico, annullando quindi qualsiasi convergenza e divergenza. Non è ovviamente possibile avere una collimazione perfetta in quanto il laser, per sua natura, tenderà sempre ad essere convergente o divergente. Tuttavia tramite la collimazione si riduce l'angolo di divergenza e si fa sì che il valore del diametro del fascio luminoso possa essere approssimato a costante per piccoli intervalli di spazio.

Nel caso di lente concentrante è possibile conoscere il punto in cui il fascio raggiunge la massima concentrazione grazie ad una distanza chiamata distanza focale, indicata convenzionalmente con la lettera  $f$ . Essa è direttamente proporzionale in modo lineare al raggio di curvatura della lente, infatti minore sarà esso e minore sarà la distanza tra la lente e il punto focale. La relazione tra queste due grandezze si calcola facilmente con la formula:

$$ROC = f \frac{n-1}{n}$$

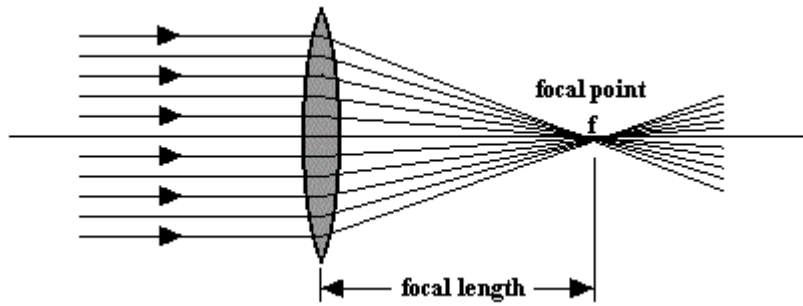


Figura 2.9: Immagine descrittiva del punto e della distanza focale

## 2.2 Progettazione del circuito ottico

La fibra di ingresso poggia sulla microstrip in silicio, che cattura il fascio laser e lo porta verso lo strato di vetro su cui poggia la prima lente. Qui diverge a causa della natura della luce laser, raggiungendo il diametro massimo di  $40\ \mu\text{m}$ . Quando incontra la lente citata avviene la collimazione, che ferma la divergenza e permette al fascio di viaggiare in aria mantenendo il suo diametro costante per un breve ma sufficiente tratto. Qui viaggia attraverso l'aria finchè non incontra la seconda lente, che lo concentra per farlo tornare alle dimensioni di partenza ed entrare nella fibra ottica in uscita. Qui sotto è riportato lo schema del circuito ottico descritto.

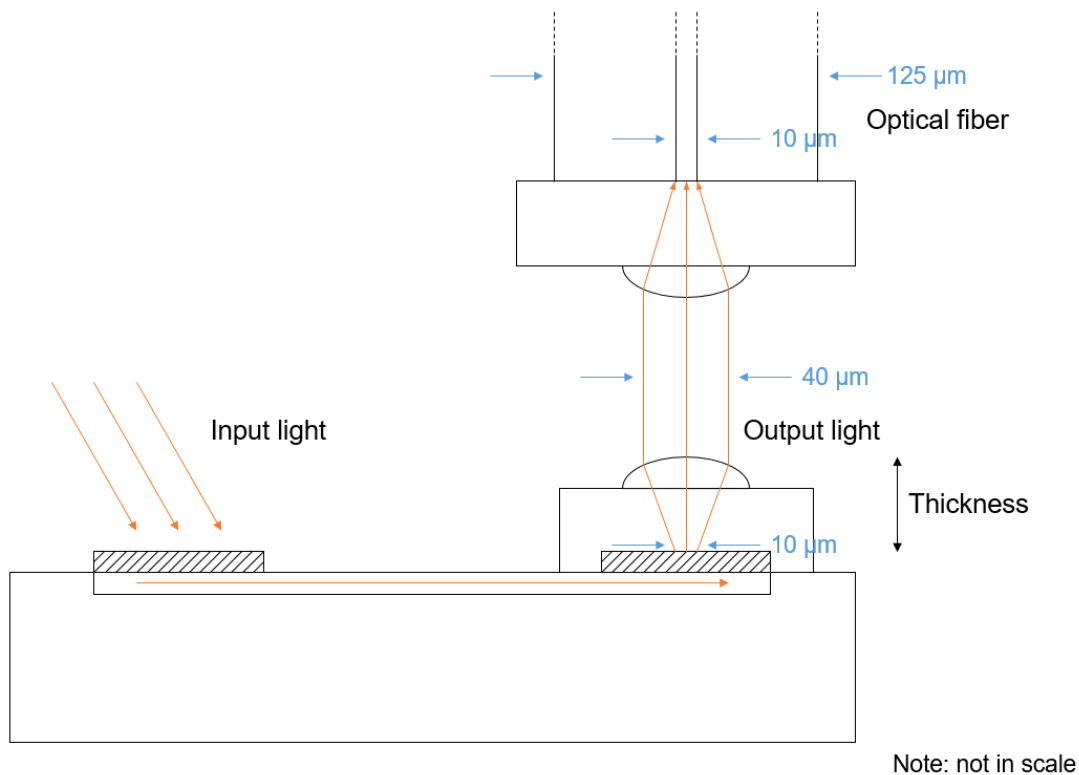


Figura 2.10: Layout del circuito

Lo scopo della collimazione è quello di far sì che la fibra in uscita possa essere libera di allontanarsi o avvicinarsi per brevi distanze. È ovviamente possibile fare lo stesso per la fibra in entrata. Per questo progetto utilizziamo due lenti e due strati di vetro di uguali dimensioni.

Nel nostro progetto abbiamo deciso di prendere il raggio di curvatura come parametro di riferimento e di tralasciare l'altezza e il diametro, dopo aver assegnato loro un valore fisso. Questi valori sono stati, rispettivamente, di  $15\ \mu\text{m}$  e  $50\ \mu\text{m}$ . Per avere una prima stima dello spessore dello strato di vetro



dobbiamo trovare il raggio di curvatura delle lenti, per far ciò fisseremo il punto focale  $f$  ad una distanza pari allo spessore del vetro. Riprendiamo la formula de raggio del fascio laser nello spazio:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_R}\right)^2}$$

Sostituiamo  $z$  con lo spessore del vetro  $T$  e  $w(z)$  con la dimensione finale del fascio  $w_f$  e otteniamo:

$$w_f = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{T}{Z_R}\right)^2}$$

Infine rovesciando la formula otteniamo:

$$T = Z_R \sqrt{\left(\frac{w_f}{w_0}\right)^2 - 1}$$

Con i dati che abbiamo a disposizione:

$$\lambda = 1550 \text{ nm}, n(\lambda) = 1.444, w_0 = 5 \text{ }\mu\text{m}$$

$$\text{Ricaviamo } Z_R = \frac{\pi w_0^2 n(\lambda)}{\lambda} = 73.17 \text{ }\mu\text{m}$$

Ed, essendo  $w_f = 20 \text{ }\mu\text{m}$ , ricaviamo  $T = 283 \text{ }\mu\text{m}$

Infine, essendo  $T = f$ , troviamo il raggio di curvatura con la formula

$$ROC = f \frac{n-1}{n} = 87 \text{ }\mu\text{m}$$

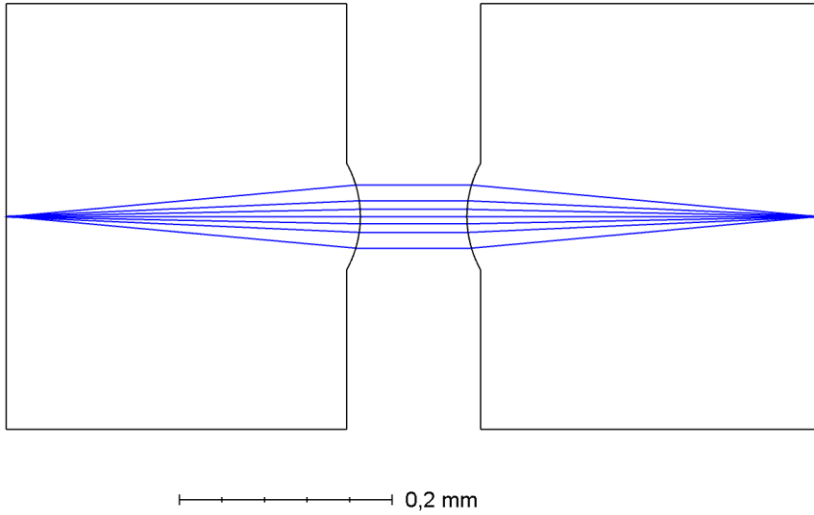


Figura 2.11: Modello circuitale ottenuto dalla simulazione

Abbiamo ora trovato una prima stima del raggio di curvatura delle lenti e dello spessore dei due strati di vetro. Dobbiamo ora assottigliare leggermente quest'ultimo, in quanto i calcoli fino ad adesso effettuati servivano per calcolare la posizione del punto focale, dove la dimensione del fascio è minore dei  $10\ \mu\text{m}$  che vogliamo avere in uscita. Grazie alle simulazioni è stato facilmente possibile trovare il valore richiesto, ovvero  $263\ \mu\text{m}$ .

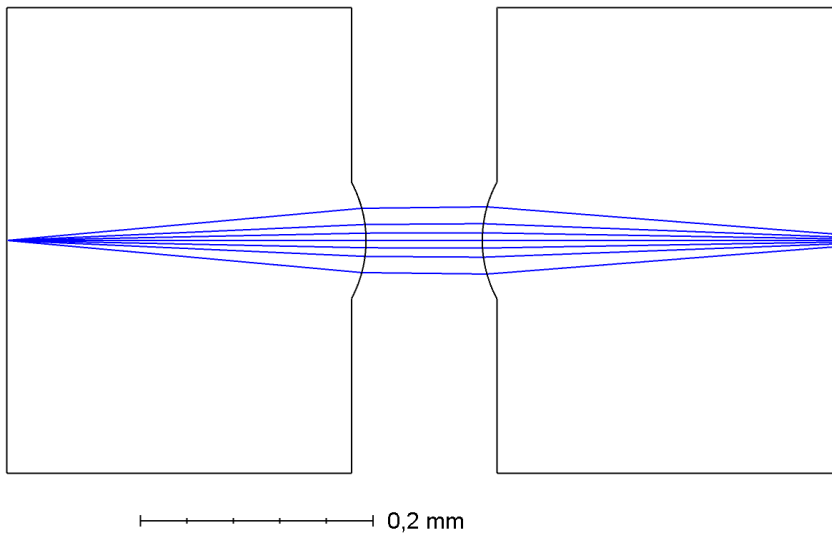


Figura 2.12: Modello circuitale dopo l'assottigliamento dei vetri

## 2.2 Risultati delle simulazioni

Ora la sfida è stata trovare, per un dato range di valori di raggio di curvatura delle lenti, il valore dello spessore degli strati di vetro tale che la collimazione sia la migliore possibile. Ogni simulazione ha inoltre rilevato le dimensioni del fascio collimato, la sua lunghezza di Rayleigh e l'efficienza dell'accoppiatore. Quest'ultima è solamente un'efficienza parziale, risulta infatti avere valori molto elevati perchè non tiene conto delle varie riflessioni presenti nel circuito e dello scattering all'interno della microstrip di silicio.

Come ci aspettavamo lo spessore ottimale dello strato di vetro, le dimensioni del fascio collimato e la distanza di rayleigh sono aumentati linearmente con il valore del raggio di curvatura.

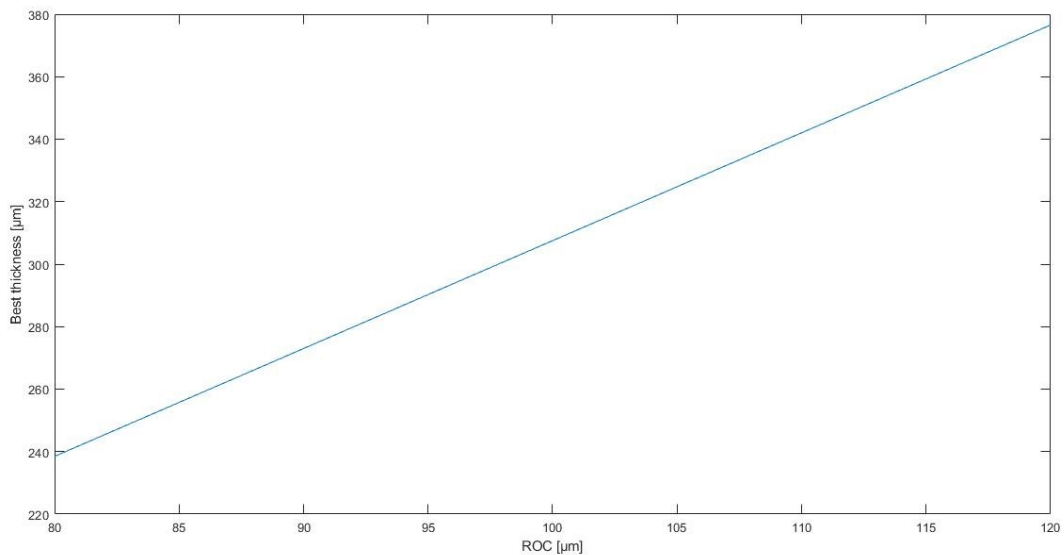


Figura 2.13: Grafico ROC - Spessore ottimale del vetro

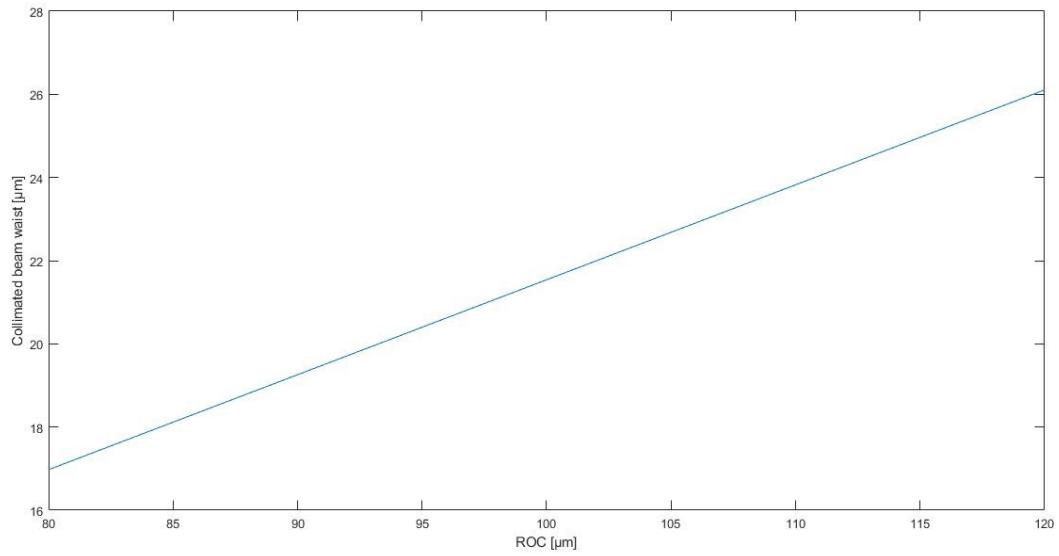


Figura 2.14: Grafico ROC – Dimensione del raggio collimato

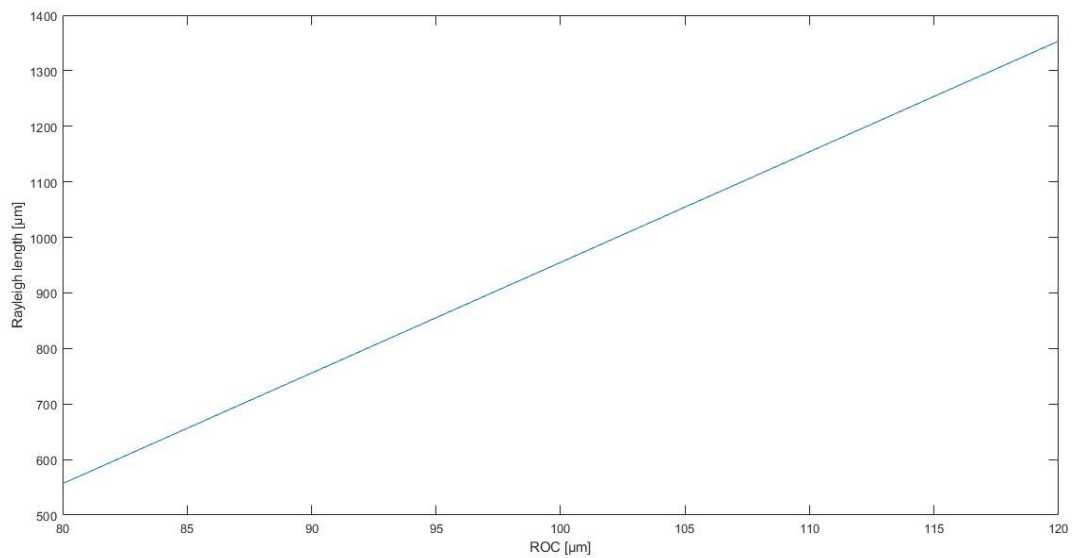


Figura 2.15: Grafico ROC - Distanza di Rayleigh. Quest'ultima è un indicatore di quanto la fibra in uscita possa allontanarsi dal chip in silicio prima che la collimazione non possa più essere considerata come ottimale.

Abbiamo infine il grafico dell'efficienza. Vediamo come il massimo sia raggiunto, logicamente, per i valori di ROC che consentono al fascio di avere dimensioni il più vicino possibile a  $10 \mu\text{m}$  al raggiungimento della fibra in uscita.

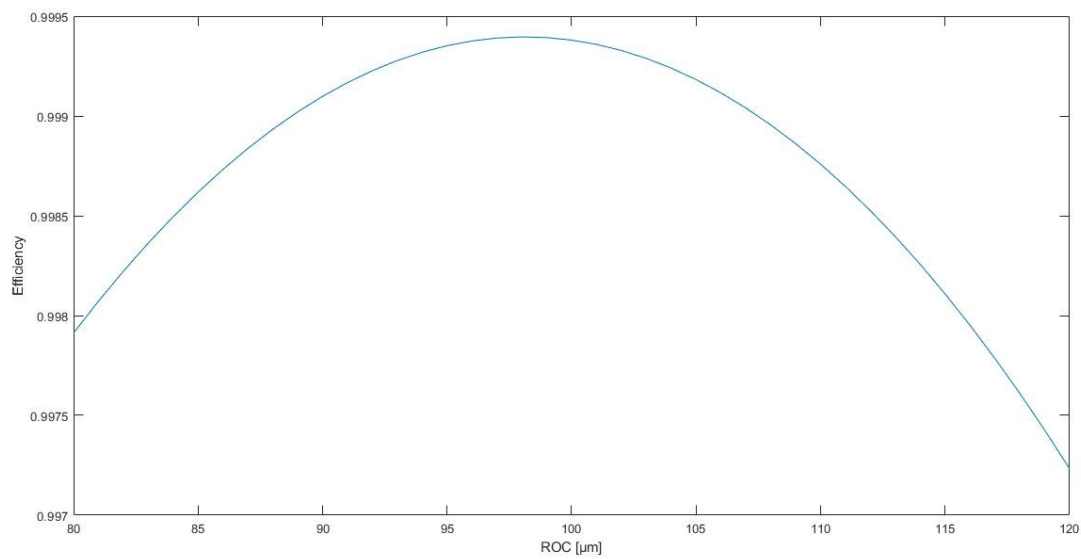


Figura 2.16: Grafico ROC - Efficienza

### 3 Seconda fase: fase sperimentale

#### 3.1 Fabbricazione e caratterizzazione delle microlenti

Dopo aver concluso le simulazioni è iniziata la seconda fase del progetto, ovvero quella della fabbricazione delle microlenti in camera bianca. Avevamo a disposizione un wafer di vetro diviso in 24 campioni, in ognuno dei quali si trovavano centinaia di microlenti. Allo stato iniziale esse erano composte di poliresistor e poggiavano sullo strato di vetro del wafer.

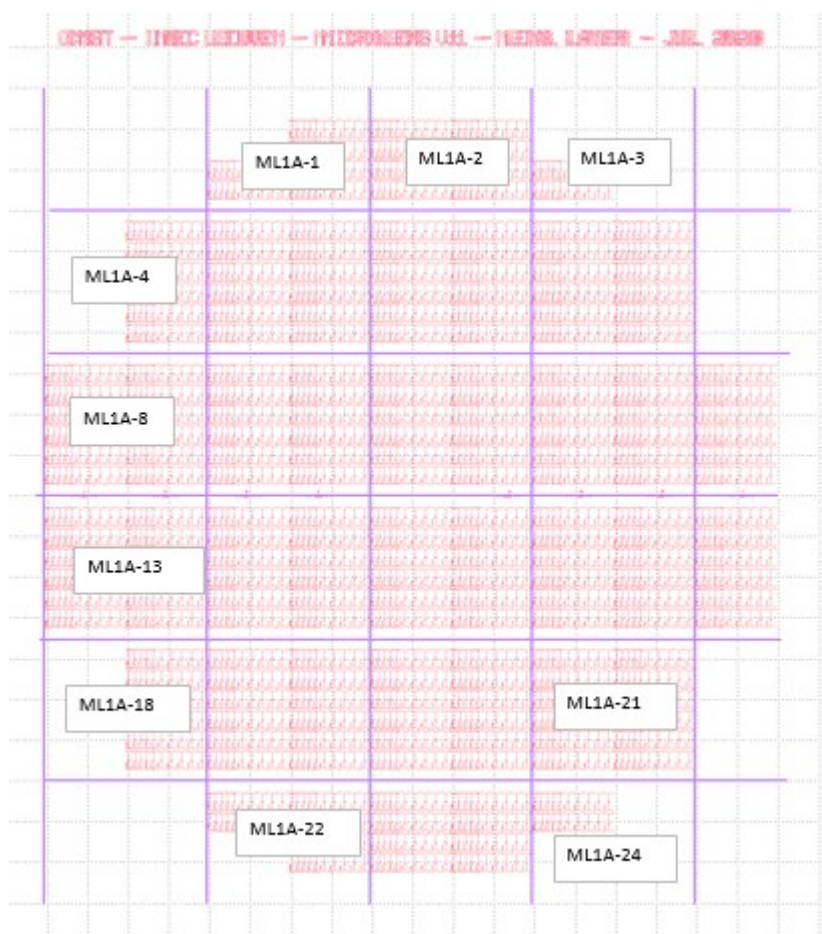


Figura 3.1: Il wafer di microlenti da noi usato, suddiviso in 24 campioni.

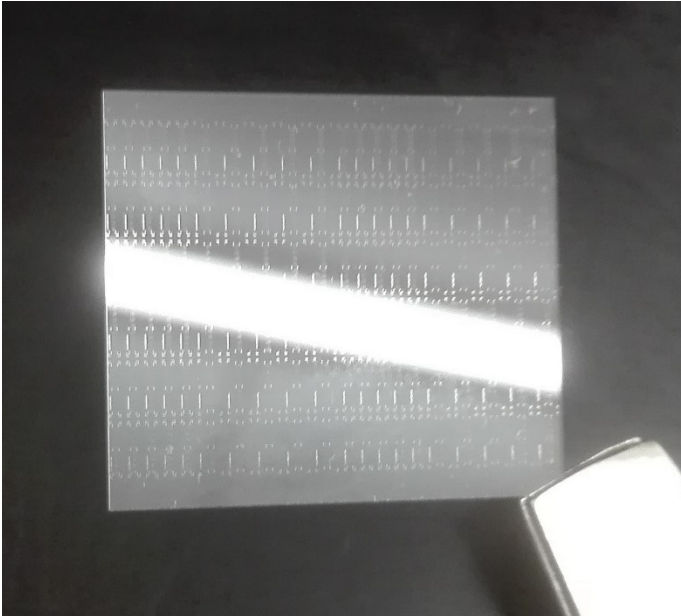


Figura 3.2: Fotografia di ML1A-5, uno dei campioni utilizzati

Per creare le microlenti di vetro ogni campione viene sottoposto ad un fascio di ioni ad alta energia tramite una etching machine. Dopo il processo di incisione sia il vetro che il poliresistor vengono consumati di un certo spessore, questi due spessori dovevano essere i più simili possibile. Se così fosse stato avremmo consumato vetro e poliresistor di una quantità uguale a quello dell'altezza della lente, e si sarebbe quindi proiettata la forma della lente sul vetro. Saremmo quindi passati ad avere una lente in vetro da una in poliresistor.

La etching machine aveva molti parametri regolabili al suo interno, tra i quali potenza del fascio di ioni e del campo elettromagnetico eccitante, tempo di lavoro, percentuale e quantità di flusso dei gas all'interno della camera di incisione del macchinario, la pressione all'interno della stessa e la temperatura. Lo scopo di questa fase era trovare la giusta combinazione di parametri per far sì che lo spessore di vetro consumato fosse lo stesso di quello del poliresistor.

Si misurava innanzitutto l'altezza della lente prima dell'incisione a ioni, poi, dopo di essa, si misurava nuovamente l'altezza. Con un solvente si rimuoveva il poliresistor residuo e si effettuava infine la misura della parte di lente in vetro rimasta. Sottraendo la terza misura alla seconda si trovava lo spessore del poliresistor non consumato dall'incisione, e sottraendo questo spessore alla prima misura trovava invece lo spessore di poliresistor consumato. Infine, dividendo lo spessore di vetro consumato con quello del poliresistor consumato, ottenevamo il rapporto di consumo tra i due. L'obiettivo era di rendere il valore di questo rapporto uguale ad 1, che avrebbe significato che vetro e poliresistor erano stati consumati in modo uguale. Un rapporto minore di 1 significava che il vetro era stato consumato meno del poliresistor, al contrario un rapporto maggiore di 1 significava che il vetro era stato consumato in maniera maggiore. Nella maggior parte dei casi le misure hanno dato come

risultato un rapporto minore di 1, per via del fatto che in generale il vetro è più resistente all'incisione ionica rispetto al poliresistor.

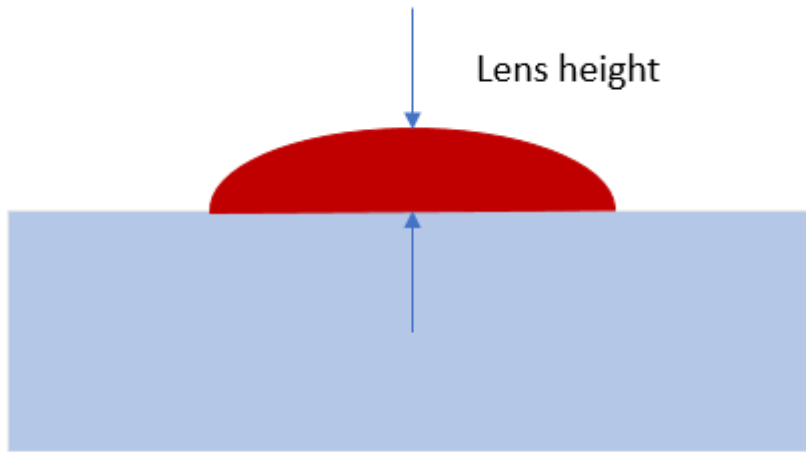


Figura 3.3: Schema di una lente prima dell'incisione ionica. In rosso è indicato il poliresistor, in grigio il vetro. Le frecce indicano invece la prima misura

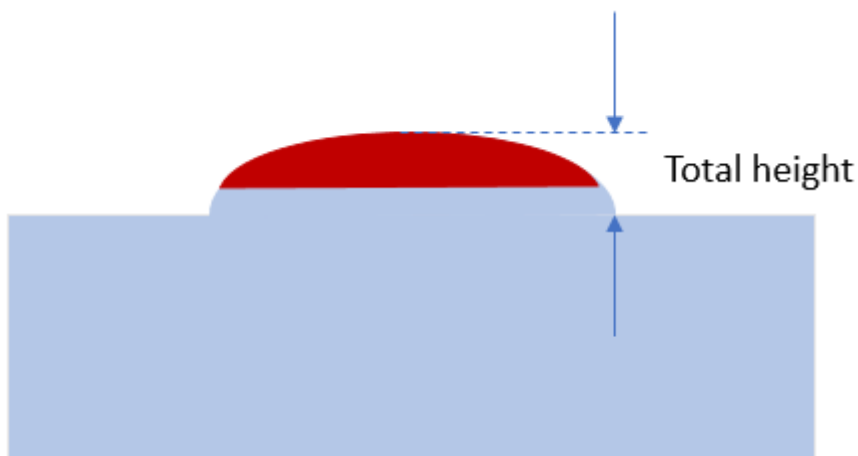


Figura 3.4: Schema di una lente dopo l'incisione ionica. Si nota come sia vetro che poliresistor vengano consumati dal fascio di ioni. Le frecce indicano la seconda misura



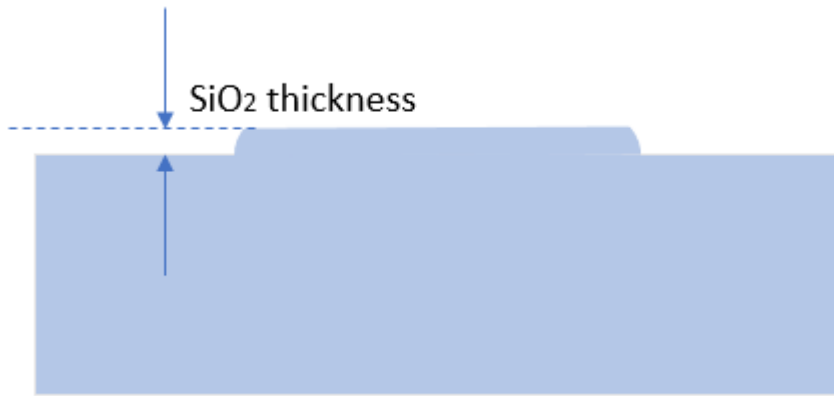


Figura 3.5: Schema di ciò che rimane della lente dopo la pulizia con il solvente. Le frecce indicano la terza misura

Le misure venivano effettuate tramite un interferometro, uno strumento in grado di misurare distanze tramite l'utilizzo di luce e dei fenomeni legati ad essa, come riflessione e interferenza. Grazie ad esso è quindi possibile analizzare irregolarità superficiali con grande precisione, anche nanometriche.

Questi sono i parametri dell'interferometro utilizzato:

- Modello: Wyko NT3300, Veeco
- Tipo scansione: Verticale
- Passo minimo di scansione: 160 nm
- Numero di obiettivi: 3 (zoom 5x, 20x, 50x)
- Software di supporto: Vision



Figura 3.6: Interferometro utilizzato per effettuare le scansioni

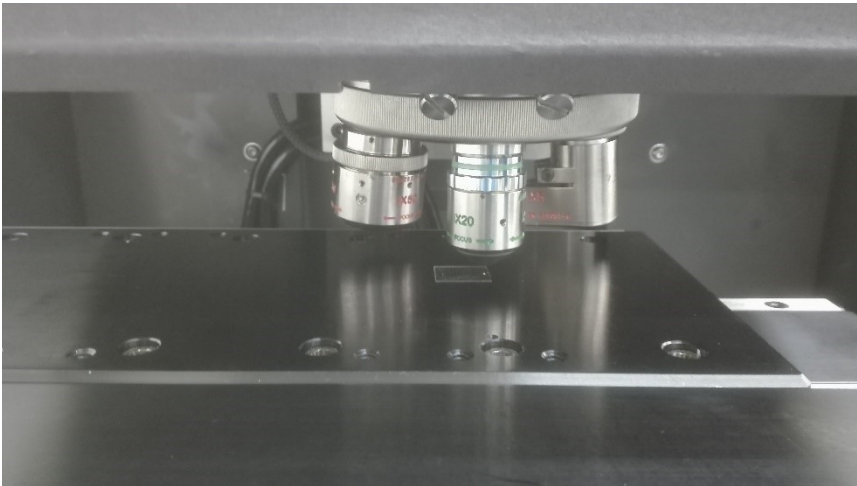


Figura 3.7: Particolare dei tre obiettivi. La piattaforma nera è in grado di muoversi nel piano xy



Figura 3.8: Tastiera con joystick per muovere la piattaforma con il campione. Con il monitor si osservavano le proprie operazioni

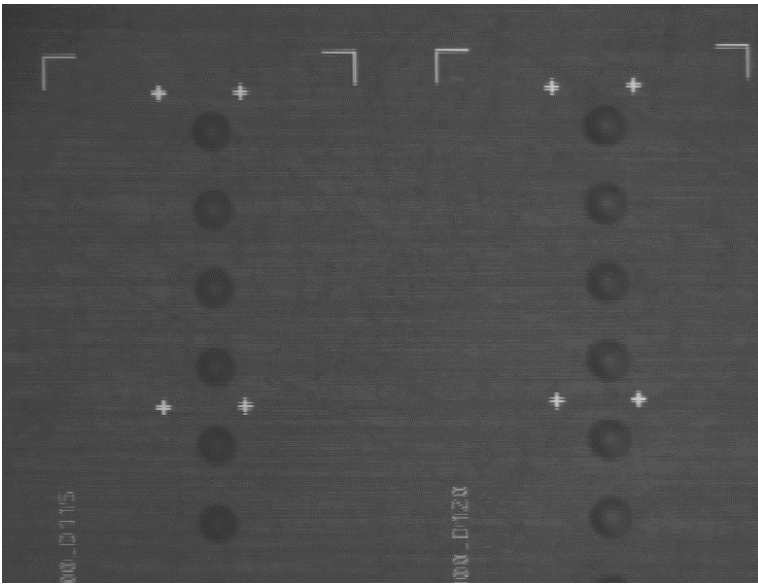


Figura 3.9: Particolare di un campione visto dall'interferometro. Si notano due array di lenti in poliresistor

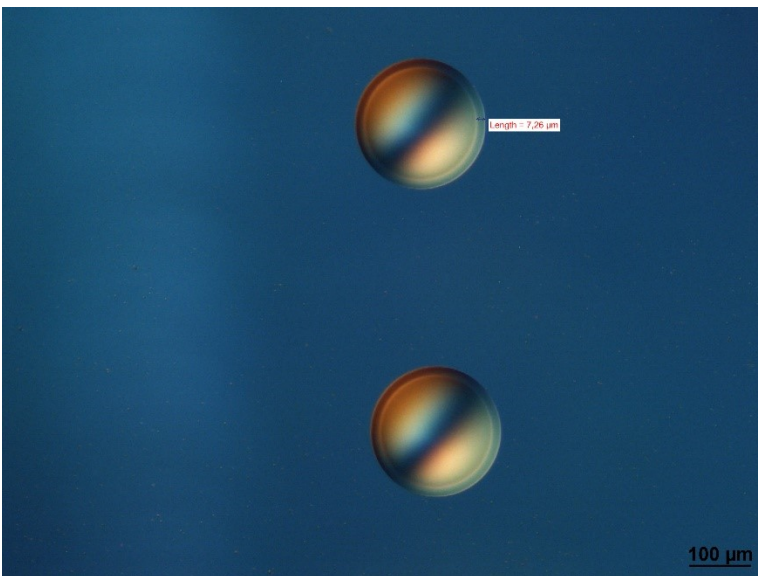


Figura 3.10: Lenti viste al microscopio dopo l'intaglio ionico. Si possono notare la base in vetro e la parte residua in poliresistor

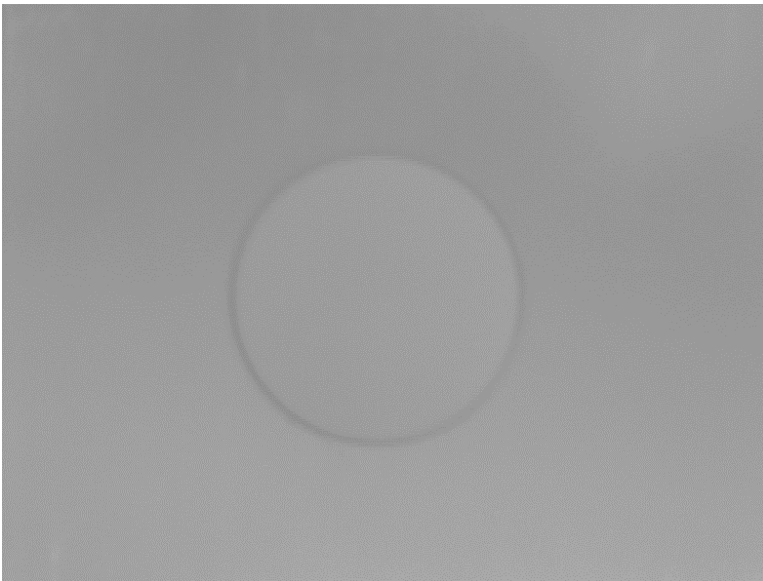


Figura 3.11: Lente vista dall'interferometro dopo la pulizia con il solvente. Si nota la superficie in vetro completamente piatta

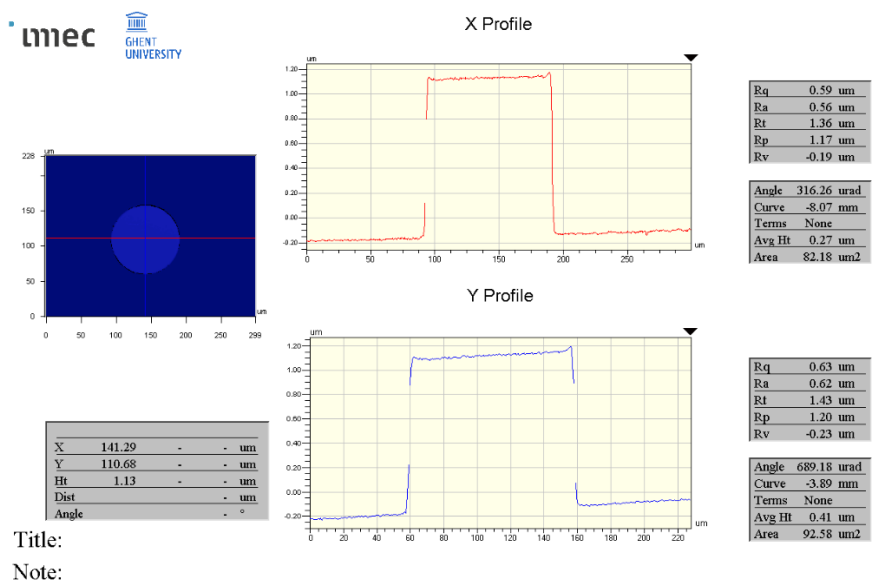


Figura 3.12: Schermata di misura dell'altezza di una lente dopo la pulizia con il solvente

Talvolta utilizzavamo anche un microscopio per controllare lo stato di salute delle lenti dopo l'intaglio.

### 3.2 Cronologia dei test

Ogni campione era caratterizzato dalla presenza di array di lenti aventi 5 possibili valori di diametro:

- 100  $\mu m$
- 105  $\mu m$
- 110  $\mu m$
- 115  $\mu m$
- 120  $\mu m$ .

Come si può facilmente notare, al momento non erano purtroppo disponibili dei campioni aventi lenti di diametro del valore impostato nelle simulazioni. Abbiamo deciso comunque di utilizzare i nostri campioni nell'attesa che fossero stati disponibili dei nuovi, operando sulle lenti aventi diametro pari a 100  $\mu m$ , essendo il valore più vicino a quello utilizzato nelle simulazioni. Per ogni campione venivano misurate 3 lenti poste in punti diversi dello stesso.

Per il campione numero 1 abbiamo impostato i seguenti parametri nella etching machine:

- Potenza = 400W
- Tempo di incisione = 15 minuti
- Flusso di  $CHF_3$  = 50 sccm (90.9%)
- Flusso di  $CF_4$  = 5 sccm (9.1%)

Sono riportati qui in seguito i valori delle misure:

Sample	Lenses	Lens height ( $\mu m$ )	Total height ( $\mu m$ )	SiO <sub>2</sub> height ( $\mu m$ )	Resist thickness ( $\mu m$ )	Etched resist depth ( $\mu m$ )	Etch ratio
MLA1-1	Lens 1	12.78	12.77	1.22	11.55	1.23	0.992
	Lens 2	12.70	12.65	1.25	11.40	1.30	0.962
	Lens 3	12.53	12.47	1.28	11.19	1.34	0.955

Come si può notare il valore dell'etch ratio è molto simile ad 1, tuttavia il processo di etching risulta poco efficiente in quanto in 15 minuti è stato possibile consumare poco più di un micrometro di

poliresistor e vetro. È quindi necessario trovare dei parametri che rendano l'etching più efficiente e meno dispendioso in termini di tempo ed energia.

Per il campione numero 2 abbiamo raddoppiato la potenza di incisione e mantenuto gli altri parametri uguali:

- Potenza = 800W
- Tempo di incisione = 15 minuti
- Flusso di CHF<sub>3</sub> = 50 sccm (90.9%)
- Flusso di CF<sub>4</sub> = 5 sccm (9.1%)

Questi sono i risultati ottenuti:

Sample	Lenses	Lens height (µm)	Total height (µm)	SiO <sub>2</sub> height (µm)	Resist thickness (µm)	Etched resist depth (µm)	Etch ratio
MLA1-2	Lens 1	12.43	11.70	3.11	8.59	3.84	0.810
	Lens 2	12.33	11.62	3.11	8.51	3.82	0.814
	Lens 3	12.52	11.76	3.00	8.76	3.76	0.798

Possiamo notare che gli spessori di vetro e poliresistor consumati sono entrambi più che raddoppiati, ma abbiamo avuto un calo dell'etch ratio. Di conseguenza possiamo concludere che i valori dei primi non dipendono linearmente dalla potenza, e quello del secondo non rimane costante con essa.

Il campione numero 3 non è stato utilizzato per via del basso numero di lenti che esso conteneva. Abbiamo quindi deciso di passare direttamente al campione numero 4. Da quest'ultimo in poi si è deciso di tenere appoggiati i campioni su uno strato di silicio durante l'etching.

Per questo campione si è deciso di mantenere gli stessi parametri del campione precedente:

- Potenza = 800W
- Tempo di incisione = 15 minuti
- Flusso di CHF<sub>3</sub> = 50 sccm (90.9%)
- Flusso di CF<sub>4</sub> = 5 sccm (9.1%)

Sample	Lenses	Lens height ( $\mu\text{m}$ )	Total height ( $\mu\text{m}$ )	SiO <sub>2</sub> height ( $\mu\text{m}$ )	Resist thickness ( $\mu\text{m}$ )	Etched resist depth ( $\mu\text{m}$ )	Etch ratio
MLA1-4	Lens 1	12.70	11.62	3.46	8.16	4.54	0.762
	Lens 2	12.95	11.77	3.38	8.39	4.56	0.741
	Lens 3	13.34	11.20	3.48	7.72	5.62	0.619

Solamente cambiando il materiale di substrato abbiamo migliorato il consumo degli strati di vetro e poliresistor, ma con un ulteriore calo dell'etch ratio. Notiamo che quest'ultimo è particolarmente basso per la lente numero 3, abbiamo quindi voluto considerare questo valore come alterato da errori di intaglio.

Per i campioni numero 5 e 6 abbiamo mantenuto invariati i parametri di tempo e potenza, ovvero:

- Potenza = 800W
- Tempo di incisione = 15 minuti

riducendo però la percentuale di flusso CHF<sub>3</sub> in entrambi. Per il campione 5 le percentuali della miscela sono state cambiate in questo modo:

- Flusso di CHF<sub>3</sub> = 45 sccm (81.8%)
- Flusso di CF<sub>4</sub> = 10 sccm (18.2%)

Sample	Lenses	Lens height ( $\mu\text{m}$ )	Total height ( $\mu\text{m}$ )	SiO <sub>2</sub> height ( $\mu\text{m}$ )	Resist thickness ( $\mu\text{m}$ )	Etched resist depth ( $\mu\text{m}$ )	Etch ratio
MLA1-5	Lens 1	12.34	10.80	3.50	7.30	5.04	0.694
	Lens 2	12.11	9.70	3.45	6.25	5.86	0.589
	Lens 3	12.28	10.70	3.48	7.22	5.06	0.688

Mentre per il campione 6 abbiamo utilizzato questa miscela:

- Flusso di CHF<sub>3</sub> = 49 sccm (89.1%)
- Flusso di CF<sub>4</sub> = 6 sccm (10.1%)

Sample	Lenses	Lens height ( $\mu\text{m}$ )	Total height ( $\mu\text{m}$ )	SiO <sub>2</sub> height ( $\mu\text{m}$ )	Resist thickness ( $\mu\text{m}$ )	Etched resist depth ( $\mu\text{m}$ )	Etch ratio
MLA1-6	Lens 1	12.38	11.14	3.43	7.71	4.67	0.734
	Lens 2	12.43	11.21	3.41	7.80	4.63	0.737
	Lens 3	12.22	10.93	3.47	7.46	4.76	0.729

Dai risultati di entrambi abbiamo dedotto che il CF<sub>4</sub> aiuta ad incidere il vetro e il poliresistor, ma rende peggiore l'etch ratio. Di conseguenza la sua quantità di flusso non deve essere aumentata ma diminuita.

Per i campioni 7 e 8 abbiamo quindi deciso di fare il contrario di ciò che abbiamo fatto per i precedenti, ovvero aumentare la percentuale di CHF<sub>3</sub> a discapito di quella di CF<sub>4</sub>.

Per il campione 7 abbiamo utilizzato questa miscela:

- Potenza = 800W
- Tempo di incisione = 15 minuti
- Flusso di CHF<sub>3</sub> = 52 sccm (94.5%)
- Flusso di CF<sub>4</sub> = 3 sccm (5.5%)

Sample	Lenses	Lens height ( $\mu\text{m}$ )	Total height ( $\mu\text{m}$ )	SiO <sub>2</sub> height ( $\mu\text{m}$ )	Resist thickness ( $\mu\text{m}$ )	Etched resist depth ( $\mu\text{m}$ )	Etch ratio
MLA1-7	Lens 1	12.24	11.06	3.48	7.58	4.66	0.747
	Lens 2	12.27	11.24	3.42	7.82	4.45	0.769
	Lens 3	13.39	12.31	3.51	8.80	4.59	0.765

Per il campione 8 invece questa:

- Flusso di CHF<sub>3</sub> = 53.5 sccm (97.3%)
- Flusso di CF<sub>4</sub> = 1.5 sccm (2.7%)



Sample	Lenses	Lens height ( $\mu\text{m}$ )	Total height ( $\mu\text{m}$ )	SiO <sub>2</sub> height ( $\mu\text{m}$ )	Resist thickness ( $\mu\text{m}$ )	Etched resist depth ( $\mu\text{m}$ )	Etch ratio
MLA1-8	Lens 1	12.25	11.38	3.23	8.15	4.10	0.788
	Lens 2	12.50	11.66	3.36	8.30	4.20	0.800
	Lens 3	12.03	11.35	3.43	7.92	4.11	0.835

Notiamo che in effetti, rispetto al campione numero 4, una maggiore percentuale di CHF<sub>3</sub> porta ad un aumento dell'etch ratio a discapito di un minor consumo di vetro e poliresistor.

Per provare un'erosione completa del poliresistor abbiamo deciso, per il campione numero 9, di utilizzare la etching machine per un'ora intera anziché i consueti 15 minuti. Gli altri parametri rimangono invariati rispetto a quelli usati per il campione numero 8:

- Potenza = 800W
- Tempo di incisione = 60 minuti
- Flusso di CHF<sub>3</sub> = 53.5 sccm (97.3%)
- Flusso di CF<sub>4</sub> = 1.5 sccm (2.7%)

Sample	Lenses	Lens height ( $\mu\text{m}$ )	Total height ( $\mu\text{m}$ )	SiO <sub>2</sub> height ( $\mu\text{m}$ )	Resist thickness ( $\mu\text{m}$ )	Etched resist depth ( $\mu\text{m}$ )	Etch ratio
MLA1-9	Lens 1	12.22	9.54	9.54	0	12.22	0.781
	Lens 2	12.23	9.90	9.90	0	12.23	0.809
	Lens 3	11.92	9.31	9.31	0	11.92	0.781

Come previsto il poliresistor è stato questa volta completamente consumato, lasciando sul campione lenti fatte completamente di vetro. Notiamo che, essendo l'etch ratio ancora lontano dal valore unitario, la lente in vetro ha un'altezza che differisce non di poco da quella originale. A causa del basso valore dell'etch ratio abbiamo capito che è ancora presto per provare un'incisione completa, ed è quindi necessario trovare altri parametri per avere miglioramenti.

Per il campione numero 10 abbiamo provato ad utilizzare una miscela composta solamente da CHF<sub>3</sub>, escludendo completamente il CF<sub>4</sub> dalla reazione:

- Potenza = 800W
- Tempo di incisione = 15 minuti
- Flusso di CHF<sub>3</sub> = 55 sccm (100%)
- Flusso di CF<sub>4</sub> = 0

Sample	Lenses	Lens height (µm)	Total height (µm)	SiO <sub>2</sub> height (µm)	Resist thickness (µm)	Etched resist depth (µm)	Etch ratio
MLA1-10	Lens 1	12.08	11.04	3.10	7.94	4.14	0.749
	Lens 2	12.06	11.13	3.27	7.86	4.20	0.779
	Lens 3	12.13	11.08	3.26	7.82	4.31	0.756

I risultati di questo campione indicano un abbassamento dell'etch ratio e una pressochè invariata profondità di incisione dei materiali. Tuttavia essi non sono attendibili in quanto, subito dopo questa incisione, si è scoperto un guasto al macchinario e ci siamo dovuti fermare per una decina di giorni per le riparazioni necessarie.

Quando il macchinario è stato riparato abbiamo ripetuto l'esperimento sul campione numero 11, cambiando questa volta il flusso totale di gas:

- Potenza = 800W
- Tempo di incisione = 15 minuti
- Flusso di CHF<sub>3</sub> = 75 sccm (93.8%)
- Flusso di CF<sub>4</sub> = 5 sccm (6.2%)

Sample	Lenses	Lens height (µm)	Total height (µm)	SiO <sub>2</sub> height (µm)	Resist thickness (µm)	Etched resist depth (µm)	Etch ratio
MLA1-11	Lens 1	12.26	11.35	3.65	7.70	4.56	0.800
	Lens 2	12.23	11.40	3.68	7.72	4.51	0.816
	Lens 3	12.34	11.43	3.70	7.73	4.61	0.803

Questo è stato il miglior risultato ottenuto fino a quel momento. Abbiamo quindi capito che oltre a variare le percentuali di gas era anche necessario aumentare il loro flusso all'interno della macchina, più precisamente quello relativo al  $\text{CHF}_3$ .

Abbiamo ripetuto lo stesso test per il campione numero 12 per poter essere più sicuri della validità dei risultati:

Sample	Lenses	Lens height ( $\mu\text{m}$ )	Total height ( $\mu\text{m}$ )	$\text{SiO}_2$ height ( $\mu\text{m}$ )	Resist thickness ( $\mu\text{m}$ )	Etched resist depth ( $\mu\text{m}$ )	Etch ratio
MLA1-12	Lens 1	12.48	11.70	3.50	8.20	4.28	0.818
	Lens 2	13.42	12.60	3.70	8.90	4.52	0.819
	Lens 3	12.12	11.50	3.65	7.85	4.27	0.855

Ed effettivamente si sono dimostrati simili.

Per il campione numero 13 abbiamo provato a dimezzare la potenza per provare a verificare che effettivamente una minore potenza corrisponde ad un etch ratio migliore:

- Potenza = 400W
- Tempo di incisione = 15 minuti
- Flusso di  $\text{CHF}_3$  = 75 sccm (93.8%)
- Flusso di  $\text{CF}_4$  = 5 sccm (6.2%)

Sample	Lenses	Lens height ( $\mu\text{m}$ )	Total height ( $\mu\text{m}$ )	$\text{SiO}_2$ height ( $\mu\text{m}$ )	Resist thickness ( $\mu\text{m}$ )	Etched resist depth ( $\mu\text{m}$ )	Etch ratio
MLA1-13	Lens 1	11.96	10.35	1.96	8.39	3.57	0.549
	Lens 2	13.12	12.90	2.15	10.75	2.37	0.907
	Lens 3	11.71	11.16	2.10	9.06	2.65	0.792

Abbiamo scartato la prima delle tre misure in quanto differisce molto con le altre due, sempre sotto l'ipotesi che sia stata oggetto di errori durante l'intaglio. Notiamo che complessivamente l'etch ratio è aumentato e la profondità di incisione è maggiore della metà rispetto al campione precedente, nonostante la potenza si sia dimezzata. Questi risultati sono quindi migliori rispetto ai precedenti.

Abbiamo quindi deciso di utilizzare questa combinazione di parametri per tutti i campioni successivi, variandone altri che fino al momento abbiamo tralasciato, come potenza del campo elettromagnetico e pressione. Non dispongo purtroppo di questi dati per i campioni utilizzai fino ad ora, ma mi sono invece noti per i campioni successivi.

Per il campione numero 14 abbiamo quindi usato questi parametri secondari:

- Potenza campo elettromagnetico = 150 W
- Pressione = 3 mTorr

Sample	Lenses	Lens height (µm)	Total height (µm)	SiO <sub>2</sub> height (µm)	Resist thickness (µm)	Etched resist depth (µm)	Etch ratio
MLA1-14	Lens 1	11.75	11.80	2.01	9.79	1.96	1.03
	Lens 2	12.15	12.20	1.97	10.23	1.92	1.03
	Lens 3	11.89	12.00	1.98	10.02	1.87	1.06

Questa volta l'etch ratio ha superato il valore unitario, siamo quindi andati a consumare il vetro maggiormente del poliresistor.

Per il campione numero 15 abbiamo provato ad abbassare la potenza del campo elettromagnetico e a mantenere invariato il valore della pressione:

- Potenza campo elettromagnetico = 100 W
- Pressione = 3 mTorr

Sample	Lenses	Lens height ( $\mu\text{m}$ )	Total height ( $\mu\text{m}$ )	SiO <sub>2</sub> height ( $\mu\text{m}$ )	Resist thickness ( $\mu\text{m}$ )	Etched resist depth ( $\mu\text{m}$ )	Etch ratio
MLA1-15	Lens 1	11.70	11.93	1.69	10.24	1.46	1.16
	Lens 2	11.91	12.29	1.77	10.52	1.39	1.27
	Lens 3	11.84	12.13	1.73	10.4	1.44	1.20

Qui abbiamo avuto un calo dello spessore di vetro consumato e un aumento ulteriore dell'etch ratio, portando quindi ad avere un doppio peggioramento dei risultati.

Quindi, per il campione numero 16, abbiamo riportato la potenza del campo elettromagnetico al valore precedente e aumentato leggermente il valore della pressione. Abbiamo inoltre deciso di utilizzare direttamente un etching di 110 minuti per vederne gli effetti sulle lenti completamente consumate:

- Potenza campo elettromagnetico = 150 W
- Pressione = 4 mTorr

Sample	Lenses	Lens height ( $\mu\text{m}$ )	Total height ( $\mu\text{m}$ )	SiO <sub>2</sub> height ( $\mu\text{m}$ )	Resist thickness ( $\mu\text{m}$ )	Etched resist depth ( $\mu\text{m}$ )	Etch ratio
MLA1-16	Lens 1	11.64	10.63	10.63	0	11.64	0.913
	Lens 2	12.11	12.00	12.00	0	12.11	0.991
	Lens 3	13.09	12.40	12.40	0	13.09	0.947

Qui abbiamo deciso di fermarci temporaneamente con le prove di fabbricazione per passare ai test ottici. Abbiamo deciso di effettuarli sulla lente numero 2 di questo campione, essendo quella che presenta il valore di etch ratio più alto.

Sia prima che dopo l'incisione abbiamo effettuato la misura del raggio di curvatura delle lenti. Questo è stato possibile grazie ad una particolare funzione dell'interferometro. I risultati sono stati i seguenti:

Sample	Lenses	ROC before etching ( $\mu\text{m}$ )	ROC after etching ( $\mu\text{m}$ )
MLA1-16	Lens 1	170	190
	Lens 2	140	140
	Lens 3	150	160

Le misure avevano una precisione di 10  $\mu\text{m}$ . Notiamo che tutte le lenti hanno avuto un incremento del raggio di curvatura dopo l'intaglio, ciò è dovuto al fatto che esse non hanno mantenuto perfettamente la loro forma originale dopo il processo. Notiamo che anche in questo caso non è stato purtroppo possibile utilizzare lenti che avessero il valore di raggio di curvatura impostato nelle simulazioni.

## 4 Terza fase: test di performance ottiche

Arrivati a questo punto ci siamo trasferiti in un laboratorio ottico per effettuare test sulla capacità collimatrice della lente. Il campione contenente la lente scelta è stato posizionato su una piattaforma motorizzata, questa era in grado di muoversi con precisione di  $10^{-1} \mu m$  nelle tre direzioni dello spazio. Sul campione, sulla facciata opposta a quella della lente, viene appoggiato un cavo di fibra ottica da cui sarebbe fuoriuscito un fascio laser infrarosso di lunghezza d'onda di  $1310 \text{ nm}$ . È stata scelta questa lunghezza d'onda perché non era al momento disponibile in laboratorio una fibra che potesse trasportare correttamente una luce di lunghezza d'onda di  $1550 \text{ nm}$ . In una seconda piattaforma è stato posizionato invece un sensore ottico in grado di captare la radiazione infrarossa. Il circuito ottico è il seguente: il laser passa attraverso una fibra, incontra lo strato di vetro e successivamente la lente collimatrice. Viaggia in aria ed incontra infine il sensore ottico, in grado di convertire la luce catturata in un'immagine bitmap. La piattaforma su cui poggia il campione rimane fissa, mentre quella su cui poggia il sensore viene fatta allontanare con un passo di  $300 \mu m$  ad ogni misura. Ogni immagine catturata è stata poi convertita in un grafico tridimensionale che ne mostra la luminosità per ogni pixel. È in questo modo possibile capire come cambia la densità di potenza del fascio, e le sue dimensioni, in base alla distanza del sensore dalla lente.

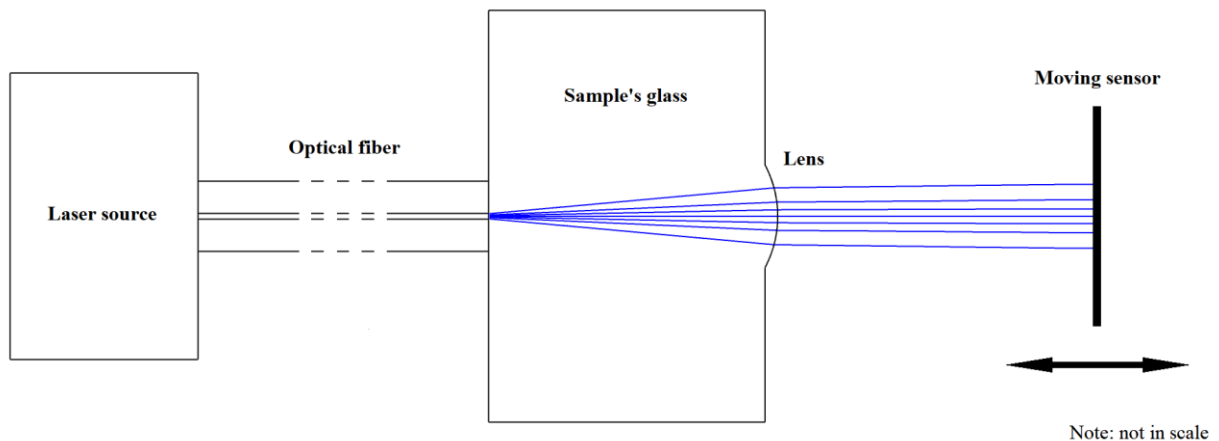


Figura 4.1: Modello del circuito ottico utilizzato per i test di performance

La distanza lente - sensore da cui abbiamo iniziato le misure corrispondeva a qualche millimetro. Non è possibile stabilire con precisione il suo valore, ma era comunque sufficientemente elevato per poter considerare lineare la crescita del diametro del fascio lungo la distanza (valeva la relazione  $z \gg Z_R$ ). Chiameremo convenzionalmente 0 questa distanza. Sempre per convenzione, abbiamo deciso di

misurare il diametro dove il valore di potenza del fascio era un decimo rispetto a quello del punto di picco.

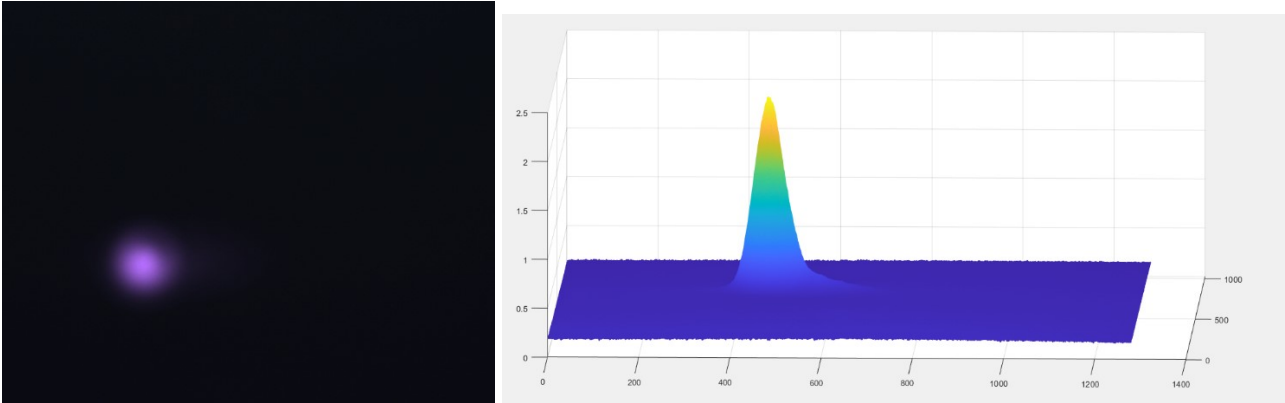


Figure 4.2 e 4.3: Immagine catturata durante la prima misura e relativo grafico ottenuto

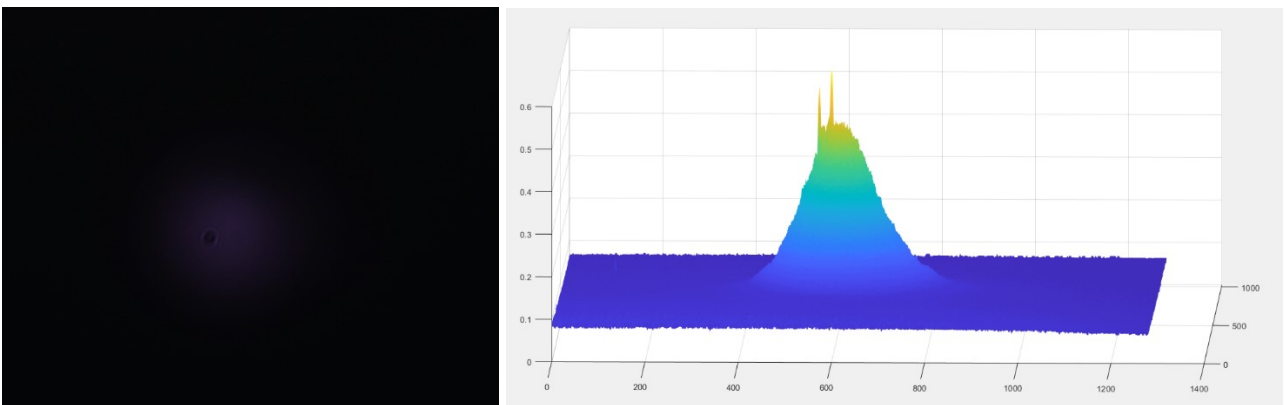


Figure 4.4 e 4.5: Immagine catturata dalla misura a 21 mm di distanza e relativo grafico ottenuto. Si nota in entrambe uno scattering dovuto ad un'imperfezione della lente



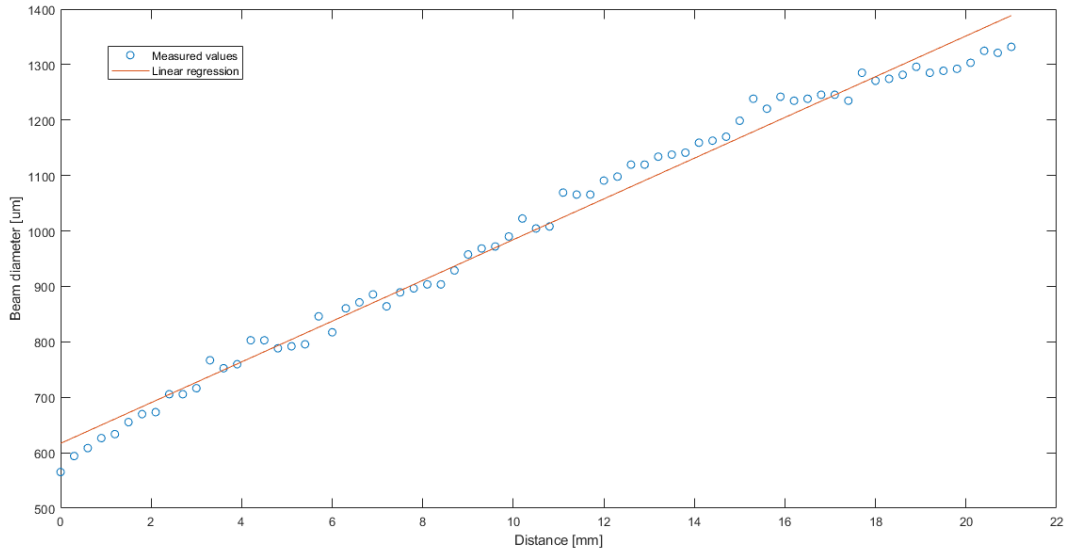


Figura 4.6: Grafico delle misure effettuate. La retta rossa indica la regressione lineare delle stesse

Il valore del coefficiente lineare  $m$  della retta ottenuta con la regressione lineare è di  $36,74 \frac{\mu m}{mm}$ , che rappresenta la velocità di crescita del diametro del fascio lungo la distanza.

Da questo valore possiamo ricavare l'angolo di divergenza del laser. Dalla relazione

$$\tan \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = m$$

Otteniamo

$$\theta = \tan^{-1} m = 36,72 \text{ mrad}$$

Per capire se la lente ha effettuato una buona collimazione possiamo calcolare l'angolo di divergenza del laser in condizioni di spazio libero. Calcoliamo innanzitutto la distanza di Rayleigh per un laser con lunghezza d'onda di 1310 nm:

$$Z_R = \frac{\pi w_0^2 n(\lambda)}{\lambda} = 59.95 \mu m$$

Con  $n(\lambda) = 1$

Partendo dalla funzione del diametro del fascio nella distanza:

$$d(z) = 2 * w(z) = 2w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_R}\right)^2}$$

Calcoliamo la sua derivata:

$$\frac{d}{dz}(d(z)) = \frac{2w_0}{Z_R^2} \frac{z}{\sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_R}\right)^2}}$$

Che per  $z \gg Z_R$  diventa:

$$\frac{d}{dz}(d(z)) \approx \frac{2w_0}{Z_R} = 166.8 \frac{\mu m}{mm}$$

Che corrispondono ad un angolo di divergenza di

$$\theta' = \tan^{-1} m' = 165.3 \text{ mrad}$$

Abbiamo visto che la lente ha reso minore l'angolo di divergenza. Ci si sarebbe aspettato un risultato migliore, ma ricordiamo che i parametri relativi alla lunghezza d'onda del laser, spessore del vetro e raggio di curvatura della lente erano diversi da quelli ottimali impostati nelle simulazioni. Il risultato risulta comunque accettabile.

## **5 Conclusioni**

La mia esperienza di tirocinio si è purtroppo conclusa prima che potessi vedere la fine del progetto, pertanto non mi è stato possibile vedere il risultato finale del lavoro.

Sono comunque soddisfatto di aver avuto la possibilità di svolgere questa attività di tirocinio ed di vedere applicate sul campo le esperienze che ho acquisito durante i miei anni universitari. Mi è stato anche possibile comprendere il mare che si trova in mezzo tra la teoria e la pratica, in quanto anche se alla fine dell'università si ha la sensazione di sapere tutto in realtà non si sa mai abbastanza, e non si ha mai finito di imparare.

## Fonti

- 1 <https://www.flandersinvestmentandtrade.com/invest/en/news/imec-flanders-opens-new-state-art-rd-center>
- 2 <https://www.cnet.com/science/imec-intel-samsung-from-an-obscure-town-comes-the-big-brains-behind-your-next-gadget/>
- 3 <https://www.nytimes.com/2015/06/24/business/international/qualcomm-in-venture-with-chinese-chip-maker.html?searchResultPosition=1>
- 4 [https://www.eejournal.com/industry\\_news/new-standard-allows-stacked-dies-in-3d-integrated-circuits-to-connect-with-test-equipment/](https://www.eejournal.com/industry_news/new-standard-allows-stacked-dies-in-3d-integrated-circuits-to-connect-with-test-equipment/)
- 5 <https://www.semiconductor-digest.com/imec-and-rapidus-sign-memorandum-of-cooperation-to-collaborate-on-advanced-semiconductor-technologies/>
- 6 <https://www.imec-int.com/en/smart-energy>
- 7 <https://www.eetimes.com/imec-doubles-energy-density-of-its-solid-state-batteries/>
- 8 <https://phys.org/news/2009-09-imec-large-area-solar-cells.html>
- 9 <https://smart.flanders.be/>
- 10 <https://www.leuvenmindgate.be/news/a-joint-venture-of-4-leuven-mindgate-members-receives-1-million-to-research-into-parkinsons>
- 11 <https://www.missionlucidity.com/project/brain-chip>
- 12 <https://www.newelectronics.co.uk/content/news/imec-awarded-nasa-grant-to-advance-space-health-diagnostics>
- 13 <https://www.cnbc.com/2016/12/30/wearables-gradually-move-beyond-the-wrist-and-into-hearts-and-minds-literally.html>
- 14 <https://venturebeat.com/mobile/imec-develops-a-wearable-fetal-ecg-monitor-for-pregnant-moms/>