



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN Ingegneria Informatica

**“INTERCONNESSIONI OTTICHE SU CHIP
E SILICON PHOTONICS”**

Relatore: Prof./Dott. Zanoni Enrico

Laureando/a: Crosariol Emilio

ANNO ACCADEMICO 2022 – 2023

Data di laurea 13/03/2023

Questa tesi è dedicata alla mia famiglia che mi ha sempre sostenuto e ha sempre creduto in me e a tutti gli amici con cui ho condiviso la strada, le fatiche e le soddisfazioni.

Un ringraziamento va anche al mio relatore Zanoni che mi ha fatto appassionare alla sua materia e che con il suo aiuto concreto e diretto mi ha permesso di arrivare fin qui.

SOMMARIO

- 1 INTRODUZIONE
 - 1.1 CONTESTUALIZZAZIONE STORICA
 - 1.2 I SEMICONDUTTORI
- 2 ATTUALI CIRCUITI INTEGRATI
 - 2.1 UTILIZZO DEL SILICIO
 - 2.1.1 I circuiti integrati
 - 2.1.2 Il drogaggio di un semiconduttore
 - 2.1.3 Perché il silicio
 - 2.2 COMPONENTI PRINCIPALI
 - 2.2.1 Teoria della giunzione p-n
 - 2.2.2 Tecniche di fabbricazione
 - 2.2.3 Mosfet
 - 2.2.4 Laser
- 3 INTERCONNESSIONI OTTICHE
 - 3.1 VANTAGGI E SVANTAGGI
 - 3.1.1 Vantaggi
 - 3.1.2 Svantaggi
 - 3.2 SOLUZIONI PROPOSTE E TECNOLOGIE
 - 3.2.1 Un punto di partenza
 - 3.2.2 Accoppiamento componenti
 - 3.2.3 La sorgente luminosa
 - 3.2.4 Waveguide e Silicon Photonics
 - 3.2.5 WDM
- 4 CONCLUSIONI
- 5 REFERENZE

1 INTRODUZIONE

1.1 CONTESTUALIZZAZIONE STORICA

Alla base di un qualsiasi computer digitale moderno vi è un insieme di interruttori elettronici che controllano l'informazione binaria utilizzata. Agli inizi del 1900 il componente utilizzato per realizzare tale scopo era il triodo inventato da Lee De Forest nel 1906. Questo tipo di valvola funzionava bloccando / permettendo il passaggio di corrente da un morsetto ad un altro controllandone il funzionamento tramite la polarizzazione degli elettrodi (anodo e catodo) e tramite la tensione applicata ad un terzo morsetto (da qui il nome triodo) collegato ad una griglia interposta tra anodo e catodo che fungeva da elemento di controllo. L'utilizzo della corrente elettrica come fondamento dei dispositivi digitali rende ovvio l'utilizzo di connessioni elettriche tra i componenti.

Con l'utilizzo dei semiconduttori e con i primi circuiti integrati nella seconda metà del 1900, si è andato a replicare il funzionamento di quello che era il triodo in una versione più piccola, più efficiente e più performante e questo ha portato con sé anche una netta evoluzione dal punto di vista delle connessioni on-chip, chip-to-chip e via dicendo. Le velocità di trasferimento delle informazioni via cavo e la potenza richiesta per l'invio di tali informazioni stanno però aprendo le porte alla ricerca di un nuovo sistema per le connessioni dei componenti che riesca a stare al passo con le performance raggiunte (e richieste) dai più moderni processori.

L'utilizzo di interconnessioni ottiche sembra essere invitante sotto svariati aspetti rispetto ad altre soluzioni già in parte adottate, ma porta con sé delle problematiche non banali da risolvere.

1.2 I SEMICONDUTTORI

Una panoramica sui semiconduttori è utile per capire alcune delle motivazioni per cui l'utilizzo di sistemi ottici possa essere conveniente o no avendo a che fare con questo tipo di materiali. I semiconduttori sono materiali la cui resistività si trova tipicamente tra quella di un materiale conduttore con una resistività nell'ordine di $\rho=10^{-3}$ e quella di un isolante con resistività dell'ordine di $\rho=10^5$. In particolare, il silicio ha una resistività, ad una temperatura di circa 300 K di $\rho=10^3$. Il silicio è un cristallo perfetto semiconduttore in cui tutti gli atomi sono legati tra loro da legami covalenti; allo zero assoluto nessun elettrone è in grado di uscire dai legami covalenti e la resistività aumenta al punto da rendere isolante il materiale.

Il silicio permette di realizzare transistor MOS (Metallo Ossido Semiconduttore) a canale n e a canale p, e circuiti integrati in tecnologia CMOS (Complementary MOS);

è quindi l'unico materiale che permette di realizzare processori e memorie con decine di miliardi di transistor sullo stesso chip. Si noti però che per la costruzione di emettitori di luce come LED (Light Emitting Diodes) o LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) il silicio è inutilizzabile ed è necessario l'uso di altri materiali (come l'Arseniuro di Gallio) che abbiano energy gap diretto; in questi, quando gli elettroni ricombinano con le lacune all'interno della giunzione p-n, l'energia viene rilasciata come radiazione luminosa e non come calore (quest'ultimo processo di ricombinazione "non radiativo" prevale nel silicio, materiale a gap indiretto). La necessità di utilizzare materiali diversi è una delle difficoltà principali riscontrate per l'impiego della tecnologia ottica nei chip.

2 ATTUALI CIRCUITI INTEGRATI

2.1 UTILIZZO DEL SILICIO

2.1.1 I CIRCUITI INTEGRATI

Con circuito integrato si intende un insieme di componenti elettronici che vengono create direttamente su un unico strato di semiconduttore (di solito silicio ma anche altri materiali) tramite processi chimico-fisici.

Tutti i componenti all'interno di un chip LSI (Large Scale Integration) devono essere connessi tra loro; l'aumento della complessità dei circuiti integrati ha fatto sì che il ritardo di propagazione dovuto alle linee di interconnessione sia il fattore dominante nel definire la velocità di operazione dei sistemi digitali. Data la diffusione di architetture parallele o sistemi multicore, oltre alle interconnessioni "intra-chip" sono importanti anche quelle "chip-to-chip".

2.1.2 IL DROGAGGIO DI UN SEMICONDUTTORE

Tramite processi chimici si può drogare un semiconduttore immettendo all'interno del reticolo cristallino degli atomi del 5° livello in alcune zone e atomi del 3° livello in altre. Ipotizzando di usare il silicio come base, si possono creare zone drogate con atomi aventi cinque elettroni di valenza detti donatori. A questo scopo si può usare il fosforo. Gli atomi del quinto gruppo si legano a quattro atomi di silicio lasciando un elettrone con bassa energia di legame, al quale basta quindi poca energia per uscire dal legame e diventare un elettrone libero. Analogamente si possono creare zone drogate con atomi aventi tre elettroni di valenza detti accettori. Per questo drogaggio si può usare il boro. Gli atomi del terzo gruppo, nel formare i legami con i 4 atomi di silicio, lasciano uno dei legami con un elettrone in meno creando quella che viene definita lacuna.

Si indica con N_D la concentrazione di impurezze pentavalenti e con N_A la concentrazione di impurezza trivalenti. La legge di azione di massa ci dice che in una determinata zona vi è una concentrazione di donatori e una di accettori, rispettivamente n e p e che sussiste la seguente relazione:

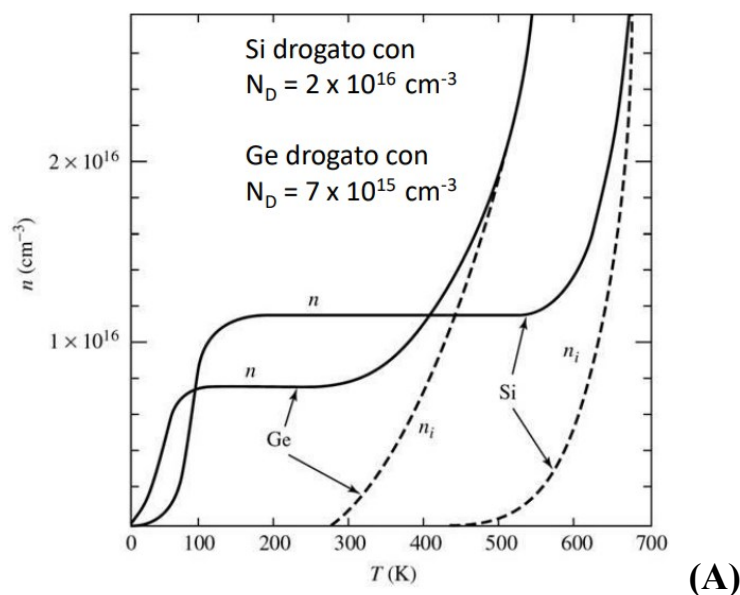
$$n \cdot p = n_i^2$$

ovvero il prodotto delle concentrazioni rimane costante. Si può definire la zona di tipo n se $N_A = 0$ e quindi $n \approx N_D$ ovvero se la concentrazione di elettroni liberi è circa uguale alla densità di atomi donatori. Viceversa, si definisce una zona di tipo p se $N_D = 0$ e quindi $n \approx N_A$.

2.1.3 PERCHÉ IL SILICIO

Il silicio è il secondo elemento più abbondante sulla terra dopo l'ossigeno. Nel silicio puro o intrinseco il numero di elettroni liberi è fortemente dipendente dalla temperatura se però si introduce drogante n , la concentrazione di elettroni si mantiene costante e circa pari alla concentrazione di donatori in un ampio intervallo di temperature attorno alla temperatura ambiente di 300K, o "zona estrinseca", come si può notare in figura (A). Si può inoltre notare nella stessa figura come il Germanio abbia una zona estrinseca minore e in un range di temperatura inferiore alla temperatura ambiente (normalmente assunta pari a 300 K).

In oltre il silicio ha delle buone proprietà elettroniche quali velocità e mobilità di deriva di elettroni e lacune, può essere ossidato ad alte temperature creando Biossido di Silicio (SiO_2), un materiale impermeabile ai droganti e che funge da dielettrico: il silicio è l'unico materiale semiconduttore con il quale si possono realizzare a basso costo circuiti integrati in tecnologia CMOS.



I COMPONENTI PRINCIPALI

2.1.4 TEORIA DELLA GIUNZIONE P-N

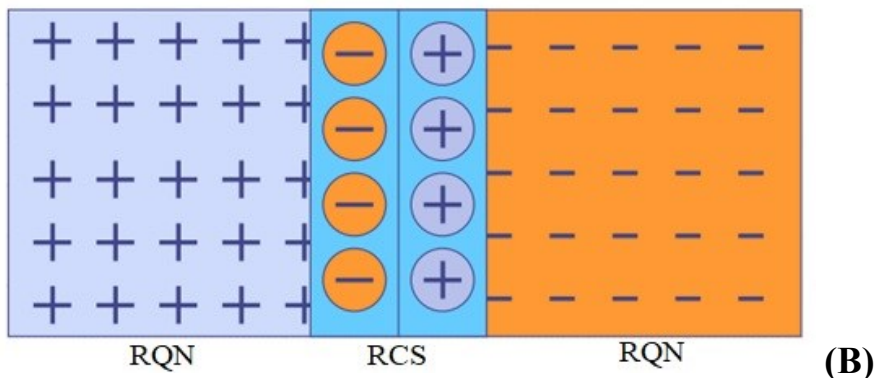
Supponendo di avere due blocchi di silicio drogati in maniera opposta, mettendoli a contatto si avrà una corrente di diffusione dovuta al gradiente di concentrazione non uniforme e dall'agitazione termica degli elettroni. La cui densità è:

$$J_{\text{diffusione}} = q (D_n \frac{\partial n}{\partial x} - D_p \frac{\partial p}{\partial x})$$

Si creeranno quindi tre zone distinte due quelle quali dette Regioni Quasi Neutre (RQN) divise da una zona detta Regione di Carica Spaziale (RCS) in cui vi è un campo elettrico dovuto allo spostamento degli elettroni degli atomi donatori (che perdono un elettrone) e delle lacune gli atomi accettori (che guadagnano un elettrone). Un esempio è mostrato in figura **(B)** In questa situazione il materiale si trova in una condizione di equilibrio in cui la corrente di diffusione è ostacolata dal campo elettrico presente nella regione RCS. Questo campo crea quella che viene definita una barriera di potenziale V_0 che un elettrone deve oltrepassare per riuscire a passare da un blocco all'altro. Per avere passaggio di corrente (di deriva) con densità:

$$J = q (p\mu_p + n\mu_n) E$$

con μ_p = velocità di deriva delle lacune, μ_n = velocità di deriva degli elettroni ed E = campo elettrico esterno fornito, bisogna ridurre la barriera di energia che impedisce il moto dei portatori per diffusione (lacune dalla zona p alla zona n, viceversa per gli elettroni). Si applica un campo elettrico contrario a quella della barriera. È dunque permesso il passaggio di corrente solo nel caso in cui la d.d.p. fornita alla giunzione è nel senso positivo nella zona p e negativo nella zona n. Si ha quindi un diodo costruito su due regioni di silicio drogate in maniera opposta e messe a contatto tra loro.



È importante notare che l'applicazione di una d.d.p. non modifica le condizioni di equilibrio del sistema ma permette solo il passaggio di corrente.

TECNICHE DI FABBRICAZIONE

Un monocristallo di silicio ad altissima purezza viene cresciuto in lingotti cilindrici a partire dalla silice e viene poi tagliato in dischi detti wafer. I wafer vengono poi scaldati e ossidati e, tramite l'utilizzo di apposite maschere viene rimosso selettivamente lo strato di ossido e si può procedere con il drogaggio del silicio scoperto. Vi sono principalmente due sistemi di impiantazione degli atomi: tramite una soluzione con atomi droganti o tramite impiantazione ionica. A questo, tramite l'utilizzo di tecniche fotolitografiche e l'utilizzo di attacchi chimici, si possono creare tasche di drogaggio di tipo **n** e **p** in maniera selettiva e allineata.

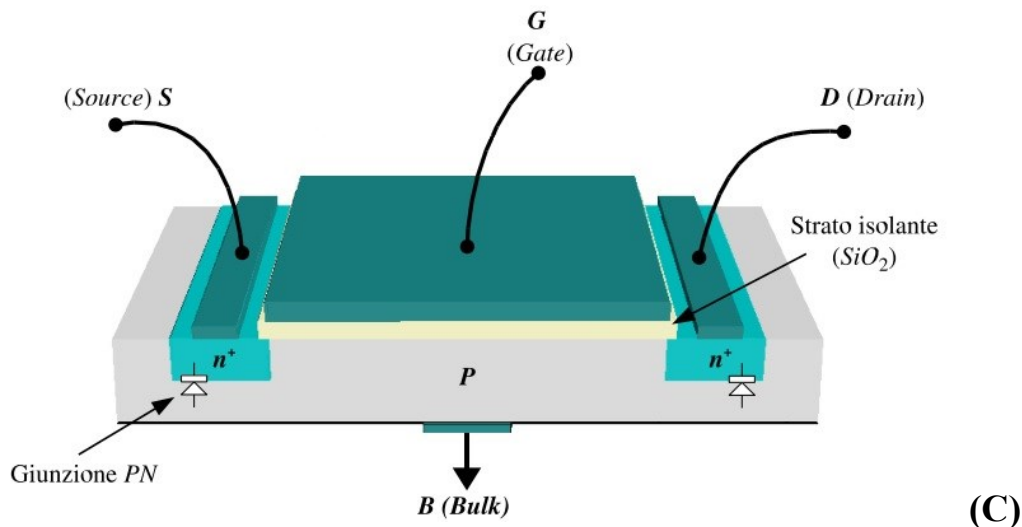
Queste tecniche assieme ad altre vengono largamente utilizzate per la costruzione di circuiti integrati e, come vedremo, sarà di particolare interesse riuscire a sfruttarle anche per la costruzione di sistemi ottici.

2.1.5 MOSFET

Il principio di funzionamento che sta alla base di questo componente si basa ancora sulle giunzioni p-n ma al contrario del diodo il passaggio di corrente è modulato tramite l'effetto di campo. Cioè quell'effetto per cui è possibile modulare una corrente orizzontale tramite l'applicazione di un campo elettrico verticale.

Si prende quindi un wafer di silicio nel quale è stata realizzata una regione drogata p e si creano due regioni di tipo n separate tra loro. Su queste vengono realizzati i contatti di Drain e Source (sono interscambiabili tra loro, il MOSFET è simmetrico). Nella zona centrale, drogata p, si cresce o deposita un dielettrico (es. SiO_2) e si forma la struttura MOS; il contatto al metallo viene chiamato gate. Nel caso in cui non venga applicata tensione al Gate le due tasche formano due diodi contropolarizzati, che in ogni caso bloccano il passaggio di corrente. Applicando invece una tensione al Gate rispetto al substrato o di silicio, o "bulk", si crea un campo elettrico che attrae gli elettroni del silicio drogato p verso l'interfaccia tra l'ossido e il semiconduttore.

Nel momento in cui viene applicata una tensione $V_{GB} > V_{Tn} > 0$ con V_{Tn} = Tensione di soglia (che dipende dalla struttura del componente) si crea un canale di elettroni liberi tra le due diffusioni n, con il conseguente passaggio di corrente tra i due morsetti Gate e Drain.



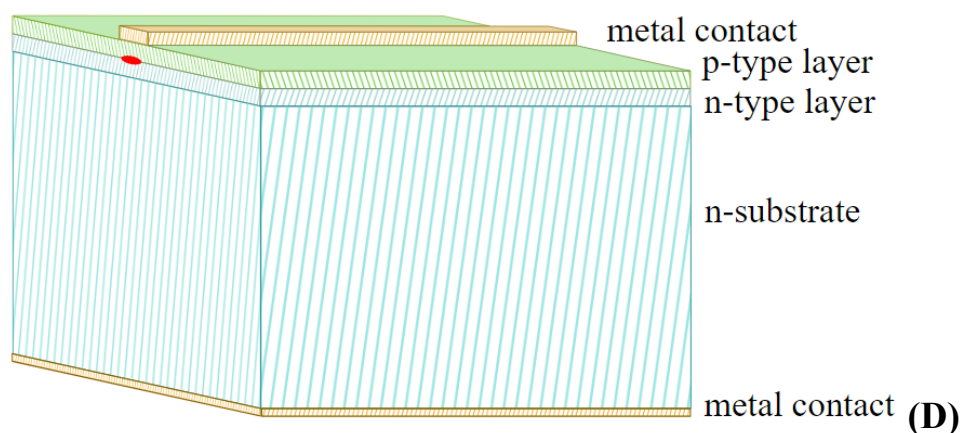
Il passaggio di corrente varia in funzione della tensione applicata tra Drain e Source V_{DS} e tra Gate e Bulk V_{GB} . Nell'elettronica digitale questo sistema sta alla base di componenti quali il CMOS: una composizione di un nMOSFET (quello descritto in precedenza) e un pMOSFET (sostanzialmente con lo stesso principio dell'altro ma con regioni di tipo **n** e **p** invertite).

2.1.6 LASER

È di particolare interesse lo studio preliminare e basilare del laser come componente in materiale semiconduttore. Detto anche diodo laser si basa anch'esso sulla tecnologia a giunzione p-n. Come già accennato nel paragrafo 1.2 il silicio in questo caso non è particolarmente adatto vista la tendenza al rilascio indiretto dell'energia in forma di calore. Si utilizzano quindi materiali con gap diretto che sono buoni emettitori di luce. Nel laser, come in altri tipi di diodi, nel momento in cui il diodo viene polarizzato direttamente le lacune e gli elettroni si spostano da una regione all'altra. Quando una lacuna e un elettrone si trovano all'interno di una stessa area, l'elettrone può ricombinarsi con una lacuna e di conseguenza emettere un fotone con un'energia pari a quella del materiale semiconduttore della zona di ricombinazione. Questa emissione spontanea, alimentata dalla corrente iniettata nel diodo, è alla base del funzionamento di un LED.

Nei diodi laser, si sfrutta la possibilità di realizzare una "inversione di popolazione" ovvero una regione nella quale un'elevata concentrazione di elettroni e di lacune può esistere per un intervallo di tempo non trascurabile; in questa situazione un fotone con una energia uguale all'energy gap può stimolare la ricombinazione di una coppia elettrone-lacuna originando un altro fotone con eguale frequenza e fase. Si ha quindi una ricombinazione stimolata e un'amplificazione dell'intensità ottica. Confinando la regione di ricombinazione in maniera da riflettere la luce, una parte dei fotoni sarà riflesso molte volte amplificando l'onda per emissione stimolata. Se l'amplificazione

riesce a superare le perdite dovute all'assorbimento delle pareti, il laser si accenderà. L'immagine **(D)** mostra un esempio di struttura di un semplice diodo laser.



3 INTERCONNESSIONI OTTICHE

3.1 VANTAGGI E SVANTAGGI

3.1.1 VANTAGGI

Negli anni svariati passi avanti nelle performance dei processori hanno portato ad un incremento significativo delle velocità con cui i dati vengono processati. L'evoluzione delle connessioni e quindi della trasmissione dei dati intra-chip e chip-to-chip invece non è stata altrettanto marcata e il ritardo dovuto alla comunicazione tra vari componenti sta diventando significativo per lo sviluppo di sistemi elettronici ad alte performance. Varie soluzioni sono state prese in considerazione come lo sviluppo 3D di circuiti integrati per minimizzare le distanze relative tra i componenti ma le interconnessioni ottiche on-chip possono essere altrettanto interessanti come soluzione al problema.

Le interconnessioni ottiche, infatti, risultano favorevoli sotto vari punti di vista: meno interferenza tra comunicazioni vicine (crosstalk), immunità ai disturbi elettromagnetici, maggiore flessibilità per quanto riguarda il design di interconnessioni intra-chip e chip-to-chip, fino addirittura a connessioni esterne al chip (board-level).

Un altro importante punto a favore riguarda un guadagno in densità di banda rispetto ad una normale connessione elettrica. La tecnologia WDM (Wave length-Division Multiplexing) permette infatti di sfruttare a pieno le potenzialità delle comunicazioni ottiche differenziando e inviando simultaneamente le informazioni in diverse lunghezze d'onda nelle linee guida ottiche.

3.1.2 SVANTAGGI

Vi sono svariati problemi che ancora rendono difficile lo sviluppo e l'utilizzo delle tecnologie ottiche nei chip. Vengono qui riportate le principali che verranno poi discusse nel corso della tesi.

Un primo problema riguarda il consumo di energia dovuto alla conversione dei segnali elettro-ottico (EO) e viceversa ottico-elettrico (OE). A questo si aggiunge il fatto che il numero di punti in cui c'è bisogno di convertire il segnale (e quindi il numero di componenti atti a questo scopo e il conseguente consumo) risulta essere molto elevato il che rende ancora più complesso il problema.

Una seconda problematica sta nel costo e nella difficoltà di costruire dei componenti ottici integrati e, anche se recenti studi hanno permesso la costruzione di elementi ottici integrati sui chip ad un costo relativamente favorevole, rimane difficile per ora oltrepassare questo scoglio.

Un terzo problema, come già accennato in precedenza, sta nei materiali utilizzati per i componenti di conversione EO e OE e soprattutto per quanto riguarda le guide d'onda. Siccome l'abbattimento dei consumi è uno delle sfide maggiori per questa tecnologia, c'è bisogno di ridurre al massimo la perdita ottica del segnale lungo il percorso. Per fare questo c'è bisogno di un materiale che abbia un basso indice di rifrazione (indice che quantifica la diminuzione di velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche quando attraversano un materiale) e, come vedremo, il silicio (Si) o il biossido di silicio (SiO_2) comunemente utilizzati non sono adatti a questo scopo.

3.2 SOLUZIONI PROPOSTE E TECNOLOGIE

3.2.1 UN PUNTO DI PARTENZA

Svariati studi, uno tra tanti [1], sono stati fatti per l'utilizzo delle interconnessioni ottiche nei chip. Alcune di queste, che personalmente reputo particolarmente interessanti, riguardano l'utilizzo di queste tecnologie per la distribuzione del clock di sistema. Penso sia un buon punto di partenza per affrontare la tematica dal punto di vista tecnico anche se poi il vero obiettivo non è fermarsi alla distribuzione del clock ma riuscire a sviluppare interconnessioni ottiche che sostituiscano in toto (o quasi) le comunicazioni intra-chip. Il problema sta nei milioni di componenti richiesti per inviare e soprattutto per ricevere i segnali dai singoli transistor.

Uno studio [2] prende in considerazione l'ipotesi ponendo l'attenzione al fatto che in un sistema elettricamente interconnesso non è possibile inviare simultaneamente il segnale di clock e i segnali di dati utili senza mescolarli. Un altro limite sta nella

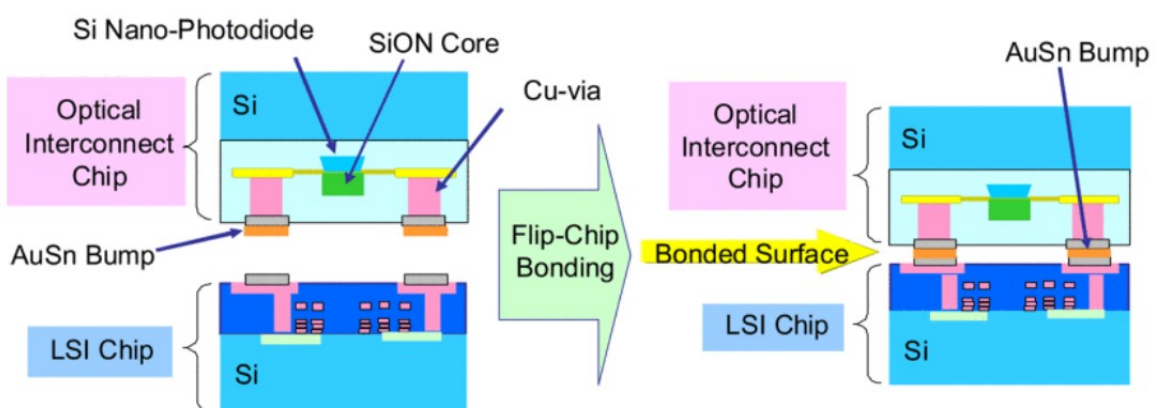
codifica 8b/10b [3] tipicamente utilizzata nelle trasmissioni seriali ad alta velocità in cui i segnali di dati vengono codificati assieme al segnale di clock per sincronizzare la comunicazione. Questo rende meno efficiente l'invio dei dati andando a diminuire l'effettivo quantitativo di informazioni trasmesse.

Le sfide, dunque, sono molte e negli anni svariate soluzioni sono state proposte per superare uno ad uno gli ostacoli. Di seguito sono riportate alcune soluzioni che rispondono ad alcune problematiche principali:

1. Come unire ottica ed elettronica nei chip
2. Come sviluppare una sorgente luminosa
3. Che materiali usare per le guide ottiche
4. Come trarre vantaggio dalle interconnessioni ottiche (WDM)

3.2.2 ACCOPPIAMENTO COMPONENTI

Rendere efficiente e accessibile l'integrazione tra l'elettronica dei chip LSI e l'ottica è un primo fondamentale passo per riuscire a sfruttare questa tecnologia. Come dimostrato da [2] e [4] al posto di utilizzare prismi, specchi o altri sistemi che richiedano una precisione difficilmente raggiungibile, è possibile utilizzare dei piedini metallici per accoppiare la parte elettrica con quella ottica. Come si nota in figura (E) un primo strato con componenti elettriche e transistor viene costruito separatamente da un secondo strato con fotodiodi e modulatori. I due strati vengono uniti tramite l'ausilio di "pad" metallici per l'allineamento aumentando la tolleranza a circa un terzo della dimensione dei pad.



(E)

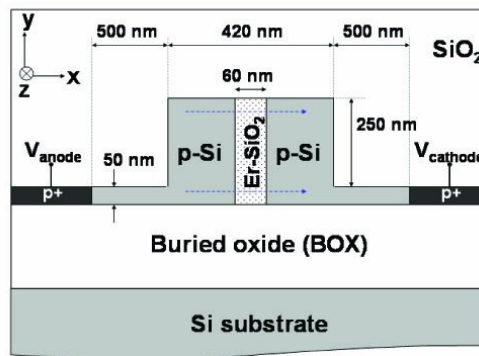
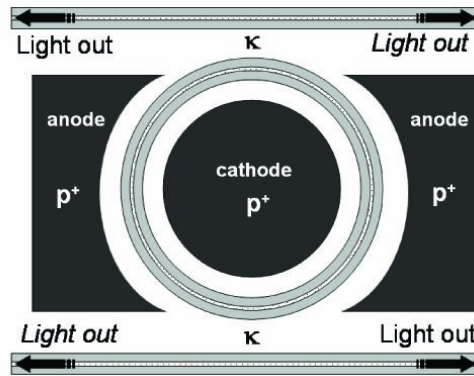
3.2.3 LA SORGENTE LUMINOSA

Nell'esempio preso in considerazione nel precedente paragrafo la sorgente luminosa è considerata esterna. Le motivazioni sono molteplici e, anche se è lecito pensare che, soprattutto prendendo in considerazione l'opzione di sviluppare questa tecnologia per inviare il segnale di clock, le sorgenti luminose siano in numero molto maggiore rispetto al numero di fotodiodi e modulatori necessari, sarebbe un grande vantaggio poter emettere segnali ottici direttamente dal chip.

Chiariamo meglio questo concetto: non è impensabile che la sorgente luminosa sia esterna al chip, dopotutto anche nei chip LSI la sorgente che alimenta i componenti è esterna e dunque si potrebbe in ogni caso optare per l'utilizzo di un efficiente laser III-V che fornisca il segnale ottico. In oltre il discorso è anche dibattuto poiché solitamente l'efficienza di un emettitore laser diminuisce all'aumentare della temperatura e di solito i chip dei computer appunto sono caldi. Focalizziamoci però negli studi per creare efficienti emettitori laser direttamente nel substrato di silicio.

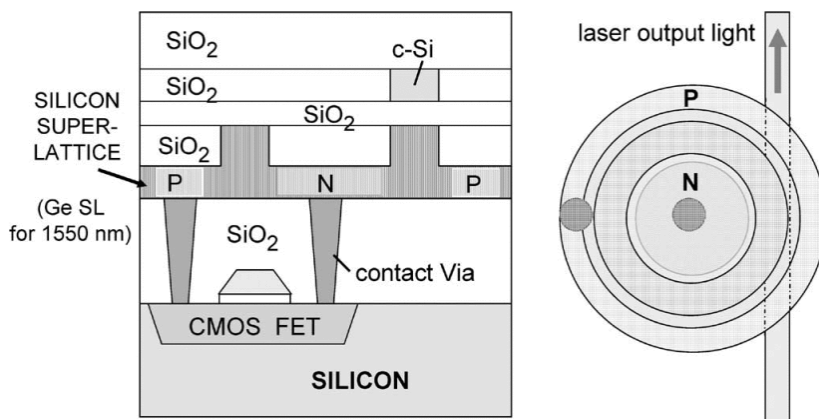
Un primo approccio proposto da uno studio [5] in merito all'integrazione di elettronica e fotonica in questo senso suggerisce l'utilizzo di un laser Raman sviluppato principalmente da UCLA [6] e Intel. Se nelle prime versioni di questi dispositivi il guadagno era relativamente basso rispetto alle dimensioni, le performance sono aumentate con il tempo e inoltre le tecniche di costruzione sono compatibili con quelle di fabbricazione dei CMOS e utilizzano una composizione Si-Ge. L'unico vero svantaggio è che questi laser necessitano di un pompaggio ottico per poter funzionare. (serve un'altra fonte luminosa per azionare questi laser).

Una seconda soluzione proposta [7] è quella di un ipotetico emettitore laser alimentato elettricamente e con struttura compatibile a quella CMOS. Questi LASER si basano su una struttura ad anello di silicio drogato con Erblio. Questa proposta individua una serie di possibili configurazioni per la creazione di laser che emettano luce con lunghezza d'onda di $1.54 \mu\text{m}$, solitamente utilizzata per le comunicazioni su fibra ottica, aprendo la porta a possibili scenari di utilizzo. In figura (F) è possibile vedere la configurazione pensata e proposta dal suddetto studio. Un sottile strato di biossido di silicio drogato (Er-SiO_2) è circondato da delle barriere di Silicio p. La struttura ad anello crea un risonatore ad anello che oltre a intensificare l'onda luminosa (cosa fondamentale in un laser) funge anche da "filtro" per le lunghezze d'onda desiderate.



(F)

Un'ultima proposta sviluppata dagli stessi ricercatori [5] è quella di una struttura in tre strati basati sul Silicio e Germanio. Il punto di forza di questo tipo di LASER è che viene costruito direttamente sopra al CMOS con tecniche tradizionali. Si sfrutta la tecnologia del risonatore ad anello accoppiato alla guida d'onda posta sopra. Questo laser **p-i-n** mostrato schematicamente in figura (G), alimentato elettricamente direttamente dal transistor, grazie appunto alla sua forma ad anello, emette onde di lunghezza controllata. In particolare la lunghezza d'onda dipende dalle specifiche dell'anello quali le dimensioni e il materiale con il rispettivo indice di rifrazione. La luce emessa viene poi incanalata nella guida d'onda e trasmessa ad altri dispositivi. Questo dispositivo è compatto ed efficiente anche se richiede una precisione nell'accoppiamento dei vari componenti che non è facile da ottenere. Soprattutto per quanto riguarda il risonatore con la guida d'onda.



(G)

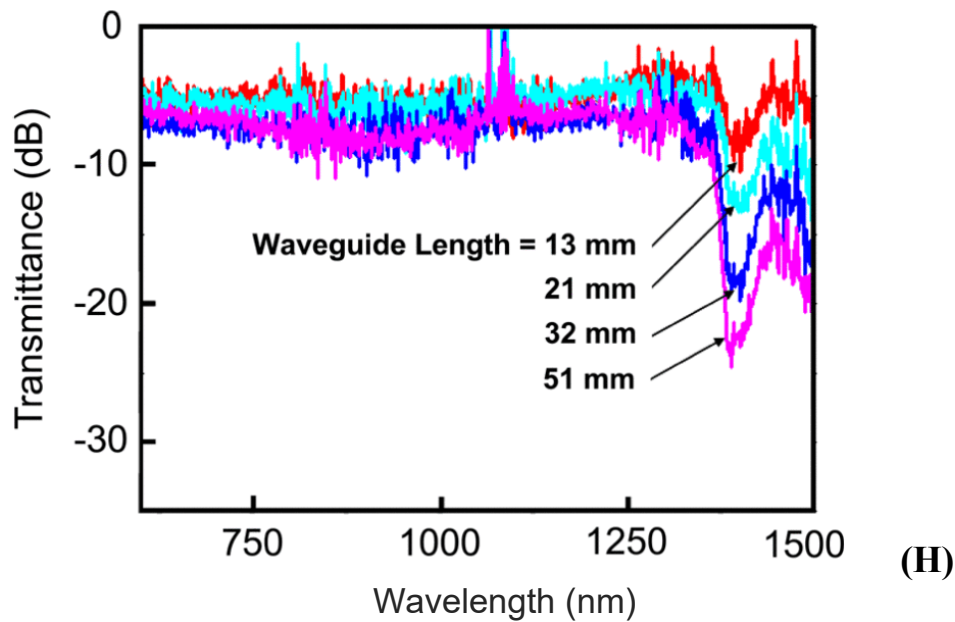
Per quanto riguarda invece l'integrazione di laser III-V nel silicio la sfida è ancora aperta. Vi sono esperimenti di crescita di materiali III-V nel silicio per epitassia o di posizionamento diretto di questi materiali sullo strato Si/SiGe. Sono necessari altri studi per capire le potenzialità, i costi e le prestazioni elettro-ottiche.

3.2.4 WAVEGUIDE E SILICON PHOTONICS

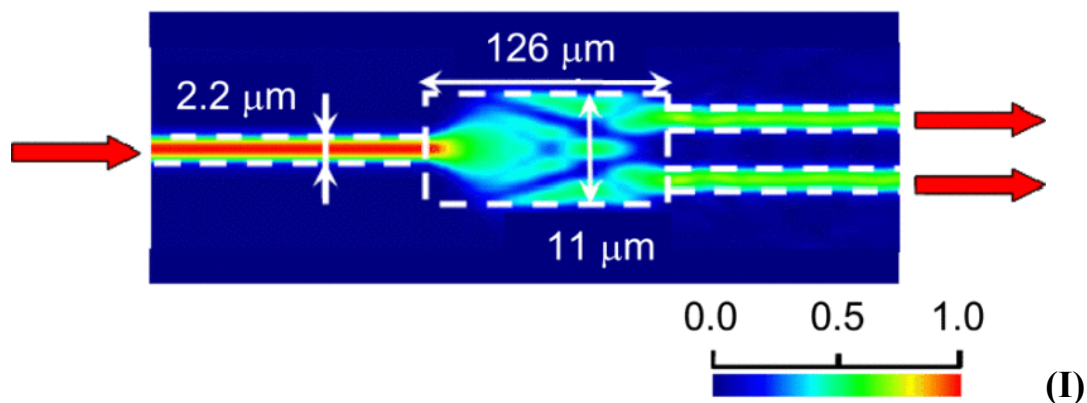
Creare delle guide (Waveguides) per le onde ottiche direttamente sfruttando il silicio come mezzo di trasmissione (Silicon Photonics) è di fondamentale importanza per riuscire a integrare le connessioni ottiche nei chip.

Sono di seguito proposti 2 approcci ma prima è interessante notare che i fotodiodi in silicio sono degli ottimi rilevatori per lunghezze d'onda minori di $1.2 \mu\text{m}$. Tant'è che il silicio viene tipicamente utilizzato per celle fotovoltaiche proprio per la sua capacità di assorbire la luce con determinate lunghezze d'onda. Tipicamente però le comunicazioni ottiche utilizzano lunghezze d'onda più lunghe. Quando ci si è accorti che il silicio risulta trasparente a lunghezze d'onda maggiori di $1.2 \mu\text{m}$ si è iniziato a studiare l'utilizzo del silicio come effettivo mezzo di propagazione del segnale (attorno a $1.3/1.55 \mu\text{m}$). L'utilizzo di un altro materiale al posto del silicio sarebbe più facile ma non bisogna dimenticare che l'obiettivo è quello di riuscire ad integrare le connessioni ottiche nei chip e per farlo bisogna che anche le guide d'onda siano integrabili e realizzabili tramite tecniche utilizzate comunemente per i componenti dei chip.

Un primo approccio proposto anche dalla ricerca sopracitata [2] è quello di utilizzare luce con lunghezza d'onda di circa $770\text{-}850 \text{ nm}$ in questo spettro, come accennato, il silicio non è trasparente e quindi viene utilizzato un materiale dielettrico (SiON oppure SiN_x) circondato da SiO_2 . Purtroppo, il silicio rimane comunque un materiale poco favorevole per il suo indice di rifrazione elevato. In ogni caso i risultati sono stati favorevoli sotto certi punti di vista. Come mostrato in figura **(H)** il materiale SiON risulta avere una buona trasparenza tra i 650 nm e i 1300 nm . Con radiazioni di lunghezza 850 nm circa il segnale non ha grosse perdite in dB e questo apre le porte ad eventuali connessioni anche chip-to-chip.



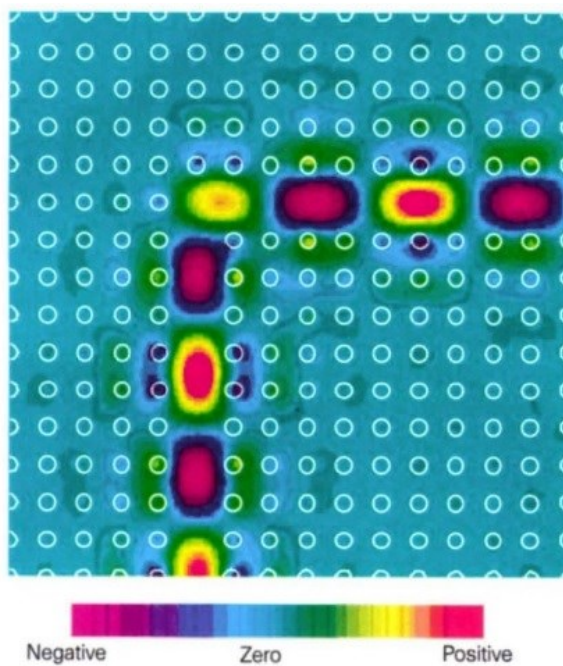
Il team ha sviluppato un prototipo funzionante di distribuzione del segnale luminoso a partire da una sorgente esterna, inviando il segnale su una guida ottica costruita con la tecnica appena presentata riuscendo a dividere un singolo segnale luminoso con delle ramificazioni come in figura (I). È interessante notare che a queste lunghezze d'onda si ha il vantaggio di poter usare come fotodiodi dei normali (e quindi semplici e poco costosi) foto rilevatori al silicio. Come accennato in precedenza infatti il silicio è ottimo per l'assorbimento di onde di lunghezza inferiore ai $1.2 \mu\text{m}$.



Questa tecnologia ha però anche dei limiti: il primo limite è che le lunghezze d'onda utilizzate non sono quelle che si usano solitamente per le comunicazioni ottiche (queste ultime corrispondono ai minimi di assorbimento delle fibre ottiche); un secondo limite è quello di non riuscire a contenere la perdita di efficienza nelle “lunghe” distanze precludendo l'utilizzo per comunicazioni chip-to-chip se non con una fonte di luce laser esterna al chip (come in effetti è stato fatto nell'esperimento) che sia abbastanza potente; il terzo limite è rappresentato dal fatto che, come avviene per le fibre ottiche, non è possibile fare curve strette senza “perdere luce” negli angoli. In altre parole, non è possibile in ogni caso far fare alla guida angoli retti. Questo comporta la necessità di maggiore spazio per far fare curve ampie alle guide.

La soluzione nella quale si ripone la maggiore fiducia è quella che riguarda l'utilizzo di PhCs (Silicon Photonic Crystals) con PhW (Photonic Wire). Come prima cosa la lunghezza d'onda utilizzata è più elevata rispetto al caso precedente. Si utilizzano onde comprese tra i 1550 nm e i 1580 nm che sono le lunghezze d'onda solitamente usate per le comunicazioni WDM in fibra ottica (che, come vedremo, sarà utile anche per altri scopi). Per rendere apprezzabile l'effetto di queste tecnologie è necessario che le dimensioni delle strutture che saranno presentate seguentemente siano comparabili a quelle delle lunghezze d'onda utilizzate. In particolare, attorno ai μm .

Il concetto su cui si basa questa tecnologia e su cui si basano questi materiali (i PhC) è quello di riuscire a modificare le proprietà di un fotone all'interno di un semiconduttore cristallino in maniera analoga a quanto questi materiali fanno con gli elettroni. L'approccio dei PhC infatti è quello di creare una struttura reticolare nel mezzo di propagazione della luce che abbia differenti indici di rifrazione per riuscire a creare un "bandgap fotonico", ovvero un range di frequenze in cui le onde non riescono a propagarsi (quindi non esistono) all'interno del PhC. Questo range "proibito" sussiste solo se la struttura del PhC non ha imperfezioni. In particolare, nel momento in cui andiamo a inserire delle imperfezioni in un punto, in quel punto le onde luminose possono nuovamente esistere. Una ricerca [8] mostra (anche se in una scala di grandezza ben più elevata, nell'ordine dei mm) come sia possibile guidare la luce attraverso una guida facendole compiere anche angoli retti e con un'efficienza molto elevata.

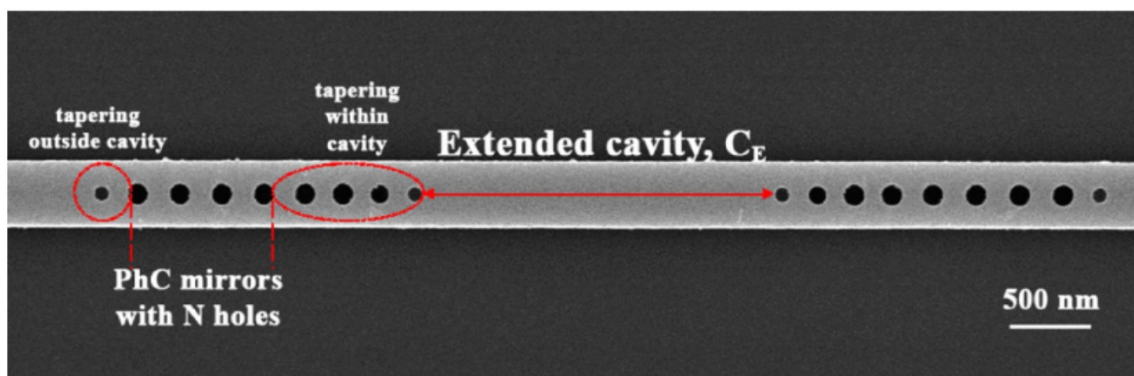


(L)

Come mostrato in figura (L) è stato creato un reticolo di asticelle dielettriche (imperfezioni) identificate dai cerchietti bianchi, tra un'asticella e l'altra c'è aria. Nella fase di progettazione e costruzione alcune di queste asticelle sono state rimosse per

creare una sorta di strada per le onde luminose formando anche un angolo retto e infine un segnale luminoso è stato immesso nella struttura. La dimensione delle asticelle, la distanza tra loro e la dimensione della cavità formatasi dopo la rimozione di alcune delle asticelle è stata studiata in modo da rendere proibito il range di frequenze utilizzato dalla fonte luminosa grazie alla rifrazione di tali onde contro le asticelle. In altre parole, la luce non riesce a propagarsi nel reticolo se non nella zona liberata e quindi viene “guidata” dal punto di immissione della luce all’altro.

Allo stesso modo è possibile creare una struttura simile creando delle imperfezioni sotto forma di fori in uno strato di silicio. L’indice di rifrazione del silicio sarà diverso da quello dell’aria presente nei fori e l’effetto sarà paragonabile a quello descritto pocanzi. Nella maniera più semplice è possibile creare le imperfezioni in uno strato di silicio posizionato sopra ad uno strato di supporto in SiO_2 e tramite tecniche litografiche fare dei fori in maniera selettiva. Negli anni svariati studi sono stati fatti per comprendere le potenzialità di questa tecnologia e sono stati fatti grandi passi avanti nello studio delle strutture dei reticoli. Si è dimostrato [9], [10] infatti che andando a variare le dimensioni, le distanze, le posizioni e il numero di imperfezioni è possibile aumentare il fattore di qualità Q per delle specifiche lunghezze d’onda (ad esempio attorno a $1.5 \mu\text{m}$). Un esempio in figura (M) mostra struttura monodimensionale di imperfezioni inserite in uno strato di silicio sorretto da una base di SiO_2 in cui la cavità è stata estesa per aumentare il fattore Q e che il numero di imperfezioni, la periodicità e le dimensioni non sono costanti.

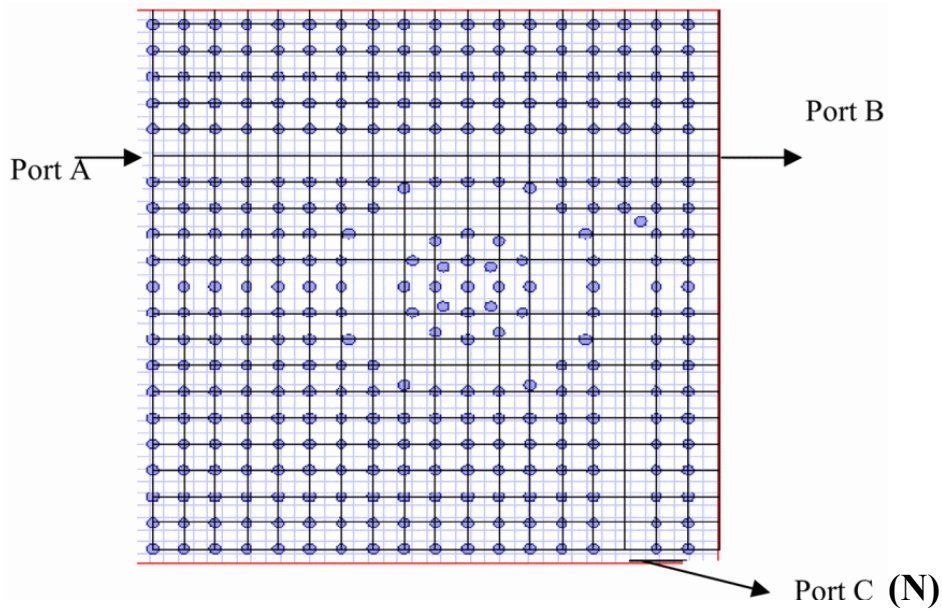


(M)

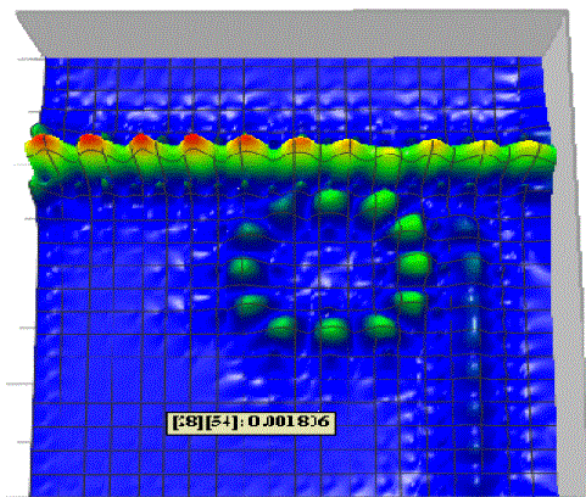
Tramite i PhC è possibile quindi creare delle waveguides di dimensioni molto ridotte ed è possibile guidare le onde anche in angoli stretti permettendo così l’integrazione nei chip.

Tramite la tecnologia utilizzata per le waveguide appena proposta è possibile anche creare i cosiddetti risonatori ad anello già accennati nel paragrafo 3.2.3. Andando infatti a creare delle imperfezioni puntiformi (cioè una sola imperfezione nel reticolo; un’imperfezione puntiforme può essere un risonatore utilizzato in specifiche applicazioni) o creando un anello di imperfezioni [11] come mostrato in figura (N) e

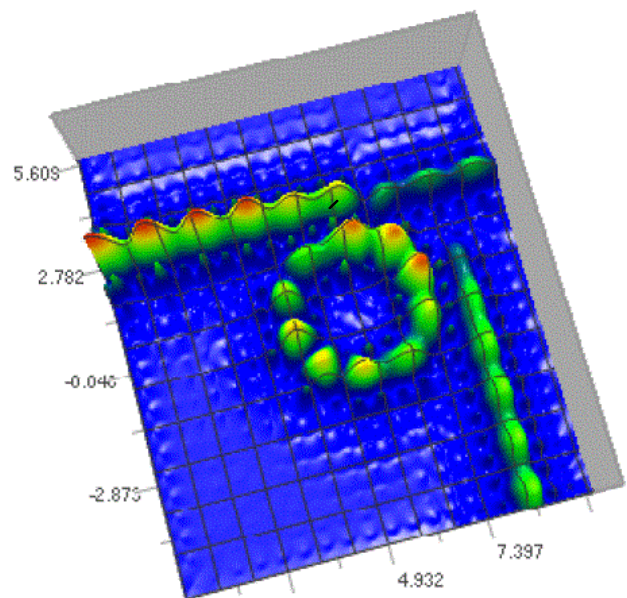
possibile creare un “filtro” grazie alle proprietà di risonanza dell’anello che permettono l’esistenza di luce solo in un range di lunghezza d’onda.



Inoltre, è possibile direzionare la luce in una guida rispetto ad un'altra variando la lunghezza d’onda di questa (stando all’interno del range ammesso dalla proprietà di filtraggio del risonatore) come mostrato in figura **(O.a)** con luce a lunghezza d’onda $\lambda = 1360 \text{ nm}$ e **(O.b)** con $\lambda = 1480 \text{ nm}$



(O.a)



(O.b)

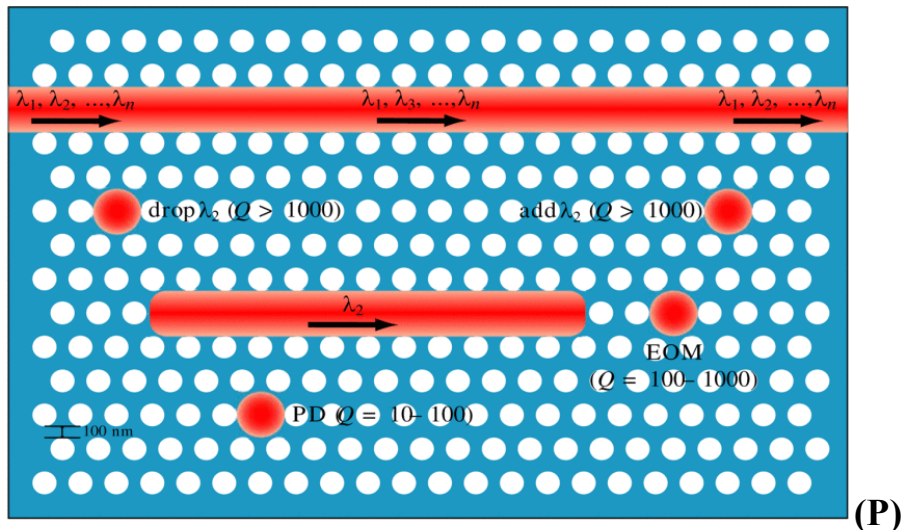
3.2.5 WDM

Wavelength Division Multiplexing (WDM) è una tecnologia largamente utilizzata nelle telecomunicazioni. Nelle comunicazioni in fibra ottica si sfrutta la larga banda disponibile per effettuare una moltiplicazione di vari segnali su diverse lunghezze d'onda. Ciascun canale viene assegnato ad una lunghezza d'onda diversa e successivamente tutte le onde vengono combinate in un unico segnale e inviate nel canale di trasmissione. Allo stesso modo si può sfruttare questa tecnologia per inviare diversi segnali in un'unica guida d'onda.

In particolare, riprendendo il concetto della distribuzione del segnale di clock, è interessante l'utilizzo della WDM per l'invio simultaneo del segnale di clock e dei dati diretti da/verso i vari componenti integrati. Per riuscire a sfruttare questa tecnologia però è necessario disporre di alcuni componenti da riuscire ad integrare nel chip. In particolare, è indispensabile avere: multiplexer, demultiplexer, moltiplicatori, sorgenti laser, fotorecettori e risonatori per poter gestire i segnali; inoltre serve poter guidare i segnali attraverso guide d'onda che permettano la moltiplicazione (se le specifiche delle waveguides non sono idonee i vari segnali si possono interferire tra loro).

Con le soluzioni viste precedentemente è possibile ottenere alcuni dei componenti richiesti grazie all'applicazione congiunta di più tecnologie e con dovuti studi caso per caso. È possibile integrare componenti ottiche direttamente in uno strato soprastante quello elettrico, è possibile generare luce direttamente tramite componenti elettroottiche integrate e condurle lungo guide d'onda costruite su Silicon Photonics.

L'insieme di tecnologie utilizzate per la costruzione di queste componenti vengono in realtà impiegate anche per la realizzazione dei restanti componenti necessari alla definitiva integrazione delle interconnessioni ottiche. È possibile, infatti, creare risonatori inserendo delle imperfezioni puntiformi in un reticolo Phc [12] è utilizzarli per "prelevare" (drop) da una waveguide onde con determinate lunghezze d'onda senza modificare il flusso delle altre. È possibile creare fotorecettori (Photodetector – PD) e modulatori elettroottici (ElectroOptic Modulator – EOM) [13][14] sempre utilizzando tecniche legate al Phc studiando le necessità di materiali e specifiche a seconda del componente richiesto è dalle sue specifiche. L'immagine **(P)** riporta una schematizzazione dell'esperimento svolto dallo studio [12].



L'integrazione di tutti i componenti sopra citati in un unico chip rimane ancora una sfida ma sono promettenti alcuni recenti risultati per quanto riguarda le dimensioni ridotte che si riescono ad ottenere, gli elevati fattori di qualità Q , le potenze relativamente basse richieste dai componenti e la possibilità di realizzazione dei componenti tramite tecniche tradizionali e con materiali già ampiamente utilizzati nell'ambito della microelettronica.

4 CONCLUSIONI

I vantaggi delle interconnessioni ottiche sui chip hanno portato all'evoluzione delle tecnologie ad esse collegate. Con il passare degli anni ci si aspetta di vedere le prime applicazioni reali e commerciali di tali tecnologie. Le soluzioni proposte in questa tesi sono state viste in un ordine logico per comprendere quali sono le difficoltà di questo approccio nuovo, per quando riguarda i chip e la microelettronica, delle interconnessioni ma anche per dare una visione generale di quali sono i vantaggi e i successi degli studi fatti nelle ultime decine di anni. Penso che la ricerca nel ramo delle interconnessioni ottiche su chip e dei Silicon Photonics sia di fondamentale importanza per poter pensare ad una reale evoluzione prestazionale degli attuali processori tradizionali. Infatti, le interconnessioni elettriche attuali che, pur sfruttando sistemi di ottimizzazione e progettazione, iniziano ad essere limitanti per le prestazioni elevate, sono comunque destinate ad essere sostituite e i sistemi opto-elettronici è probabilmente i migliori candidati.

5 REFERENZE

1. D. A. B. Miller, "Rationale and challenges for optical interconnects to electronic chips," in Proceedings of the IEEE, vol. 88, no. 6, pp. 728-749, June 2000, doi: 10.1109/5.867687.
2. K. Ohashi et al., "On-Chip Optical Interconnect," in Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 7, pp. 1186-1198, July 2009, doi: 10.1109/JPROC.2009.2020331.
3. A. X. Widmer and P. A. Franaszek, "A DC-Balanced, Partitioned-Block, 8B/10B Transmission Code," in IBM Journal of Research and Development, vol. 27, no. 5, pp. 440-451, Sept. 1983, doi: 10.1147/rd.275.0440.
4. T. Shimizu, M. Kinoshita, T. Ueno, J. Fujikata, K. Furue, K. Nishi, et al., "On-chip optical interconnect structure using micro plating bumps and its application to optical clock distribution", *Int. Conf. Electron. Packag.*, 2008.
5. R. Soref, "The Past, Present, and Future of Silicon Photonics," in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 12, no. 6, pp. 1678-1687, Nov.-dec. 2006, doi: 10.1109/JSTQE.2006.883151.
6. O. Boyraz and B. Jalali, "Demonstration of a silicon Raman laser", *Opt. Express*, vol. 12, pp. 5269-5273, 2004.
7. Carlos Angulo Barrios and Michal Lipson, "Electrically driven silicon resonant light emitting device based on slot-waveguide," *Opt. Express* 13, 10092-10101 (2005)
8. Joannopoulos, J., Villeneuve, P. & Fan, S. Photonic crystals: putting a new twist on light. *Nature* 386, 143–149 (1997). <https://doi.org/10.1038/386143a0>
9. A. R. Md Zain, N. P. Johnson, M. Sorel and R. M. De La Rue, "High Quality-Factor 1-D-Suspended Photonic Crystal/Photonic Wire Silicon Waveguide Micro-Cavities," in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 21, no. 24, pp. 1789-1791, Dec.15, 2009, doi: 10.1109/LPT.2009.2033712.
10. A. R. Md Zain, N. P. Johnson, M. Sorel and R. M. De La Rue, "Design and Fabrication of High Quality-Factor 1-D Photonic Crystal/Photonic Wire Extended Microcavities," in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 22, no. 9, pp. 610-612, May1, 2010, doi: 10.1109/LPT.2010.2040978.

11. A. Sharma and G. Jospeh, "Add Drop filter for CWDM Systems using photonic crystal ring resonator," 2014 International Conference on Advances in Engineering & Technology Research (ICAETR - 2014), Unnao, India, 2014, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICAETR.2014.7012811.
12. R. G. Beausoleil, P. J. Kuekes, G. S. Snider, S. -Y. Wang and R. S. Williams, "Nanoelectronic and Nanophotonic Interconnect," in Proceedings of the IEEE, vol. 96, no. 2, pp. 230-247, Feb. 2008, doi: 10.1109/JPROC.2007.911057.
13. Q. Xu, B. Schmidt, S. Pradhan, and M. Lipson, "Micrometre-scale silicon electro-optic modulator," Nature 435(7040), 325–327 (2005).
14. Takasumi Tanabe, Katsuhiko Nishiguchi, Eiichi Kuramochi, and Masaya Notomi, "Low power and fast electro-optic silicon modulator with lateral p-i-n embedded photonic crystal nanocavity," Opt. Express 17, 22505-22513 (2009)

Le immagini che riferiscono a pubblicazioni che sono state riferite in questa tesi sono state prese direttamente dalle suddette pubblicazioni e utilizzate solo a scopo informativo.