

**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



**Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria dell'Informazione**

TESI DI LAUREA TRIENNALE

**Silicon Photonics: La tecnologia che integra i circuiti
ottici grazie al silicio**

**Relatore:
Prof. Matteo Meneghini**

**Laureando:
Leonardo Stocco**

Anno Accademico 2021/2022

Data di laurea 22/09/2022

*A Gian Battista e Giordano, i miei nipotini,
per avermi regalato tanti momenti gioiosi
Alla mia famiglia,
per essere sempre vicino nei momenti difficili
Ai miei più cari amici,
per il loro supporto
Al mio relatore,
per la loro disponibilità e gentilezza*

Indice

Introduzione.....	4
Capitolo 1: Il silicio e i circuiti ottici	5
1.1 Origini della silicon photonics	5
1.2 Vantaggi del silicio nella silicon photonics	8
1.2.1 Fabbricazione di transistor MOS, una breve descrizione	8
1.2.2 Breve descrizione del processo fotolitografico	9
1.2.3 Importanza del silicio nei circuiti	10
1.3 Altri materiali utilizzati nella silicon photonics	11
1.4 Nanostrutture utilizzate nella Silicon Photonics	14
1.4.1 Quantum dots e quantum wire.....	14
1.4.2 I cristalli fotonici	16
Capitolo 2: I circuiti ottici integrati.....	17
2.1 Cosa sono i circuiti fotonici integrati?.....	17
2.1.1 Circuiti integrati elettronici e fotonici	17
2.1.2 Caratteristiche dei circuiti integrati fotonici.....	19
2.1.3 Principali vantaggi e svantaggi.....	20
2.2 Componenti fondamentali dei circuiti ottici integrati.....	21
2.2.1 I componenti passivi.....	21
2.2.2 I componenti attivi.....	23
2.3 Integrazione ibrida ed eterogenea	25
2.3.1 Integrazione ibrida ed eterogenea.....	25
2.3.2 Metodi di integrazione.....	27
2.4 Sistemi di comunicazione nella Silicon Photonics	31
Capitolo 3: Obiettivi e applicazioni	35
3.1 Obiettivi e prospettive della Silicon Photonics	35
3.2 Applicazioni nella Silicon Photonics	38
3.2.1 Data center.....	38
3.2.2 LIDAR.....	40
3.2.3 Raggi UV e sanificazione	42
Capitolo 4: Conclusioni	45
Bibliografia.....	47

Lista delle figure

Figura 1: circuiti integrati di diverso tipo e dimensioni.....	6
Figura 2: struttura di un generico CMOS.....	6
Figura 3: modello semplificato di un OEIC.....	7
Figura 4: processo di fabbricazione dei wafers.....	8
Figura 5: processo fotolitografico	9
Figura 6: transizione di un elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione e vic.	15
Figura 7: scheda elettronica con circuiti integrati.....	18
Figure 8: circuito fotonico integrato	18
Figura 9: dimensioni circuito integrato e guida d'onda in SOI.....	22
Figure 10: amplificatori.	23
Figura 11: funzionamento di un modulatore.....	24
Figura 12: schema di integrazione ibrida.....	26
Figura 13: schema di integrazione eterogenea.....	27
Figura 14: esempio di integrazione flip-chip	28
Figura 15: schema del processo Micro-Transfer Printing.....	29
Figura 16: schema del processo die and wafer bonding	30
Figura 17: schema del processo direct growth.....	31
Figura 18: cinque generazioni di interconnessione tra chip.....	32
Figura 19: esempio di computer quantistico	38
Figura 20: esempio di un data center	40
Figura 21: principio di funzionamento di un lidar	41
Figura 22: immagine elaborata da una nuvola di punti.....	42
Figura 23: esempio di lampada a raggi UV di tipo C	44

Introduzione

Due delle più importanti invenzioni del ventesimo secolo sono sicuramente il transistor e il laser. Un fattore importante comune a queste scoperte c'è sicuramente lo studio di un materiale molto utilizzato: il silicio. Questo materiale è fondamentale per l'industria elettronica moderna e la fabbricazione di tutti i circuiti integrati presenti nel mercato. L'invenzione della tecnologia CMOS ha permesso la creazione di molti dispositivi che hanno migliorato la qualità di vita e permesso un'evoluzione esponenziale dei sistemi tecnologici in ogni ambito. D'altra parte, i laser hanno anch'essi avuto un ruolo fondamentale soprattutto per la creazione di fibre ottiche oppure apparecchi sanitari che si basano sulla fotonica. I laser sono stati inoltre fondamentali per la crescita di internet e l'interconnessione mondiale.

La Silicon Photonics è una tecnologia moderna che si pone l'obiettivo di unire i circuiti e le tecnologie dell'elettronica moderna basata sul silicio con la fotonica e soprattutto i laser. Questa cerca di sfruttare i vantaggi della tecnologia CMOS come la scalabilità, il basso costo di produzione e la moderna capacità di fabbricazione e implementarla in nuovi circuiti che sfruttano i fotoni come segnale che trasporta l'informazione. In questo modo si possono ottenere dispositivi che lavorano ad alte prestazioni a basso consumo energetico e la possibilità di fabbricare circuiti in serie con bassi costi di produzione. I ricercatori della Silicon Photonics stanno quindi cercando di integrare i wafer di silicio, tipici dell'elettronica, con componenti base tipici della fotonica. I circuiti fotonici integrati, i principali soggetti di questa tecnica, si sono rivelati fondamentali in molti ambiti perché riescono a soddisfare le difficili richieste che riguardano la velocità di trasmissione e i costi elevati legati all'utilizzo dell'energia elettrica oltre all'elevata dissipazione di potenza.

Questo elaborato rappresenta una descrizione generale delle principali caratteristiche della Silicon Photonics, concentrandosi sugli aspetti più interessanti focalizzandosi sulle due macroaree: utilizzo del silicio e fotonica. Nel primo capitolo verrà presentata una descrizione generale degli eventi che hanno portato all'avvento della Silicon Photonics, l'importanza del silicio e le sue proprietà che hanno fatto sì che questa tecnologia potesse svilupparsi. Nel secondo capitolo saranno esposte le principali caratteristiche dei circuiti fotonici integrati, dei suoi componenti e del perché si cerca di implementare i circuiti fotonici presenti. Nel terzo capitolo si parlerà degli obiettivi che i ricercatori della Silicon Photonics si sono posti per il futuro e tre particolari applicazioni che sfruttano questa tecnologia. Nell'ultimo capitolo, il numero quattro, verranno presentate le conclusioni, in cui si riassumeranno le caratteristiche della Silicon Photonics e cosa porterà l'evoluzione e la ricerca di questa tecnologia.

Capitolo 1: Il silicio e i circuiti ottici

In questo capitolo verrà descritto brevemente il perché si utilizzi il silicio e quali conseguenze porti tale scelta. Nel primo paragrafo si potrà capire dove nasce questa nuova tecnologia. Successivamente verranno descritti i vantaggi nell'utilizzare il silicio e quindi la tecnologia CMOS. Nel terzo paragrafo sono mostrati quali sono gli altri materiali necessari per poter integrare al meglio i circuiti già presenti con quelli fotonici. Infine, verranno esposti quali nanostrutture vengono utilizzate e studiate per ottenere dei circuiti efficienti.

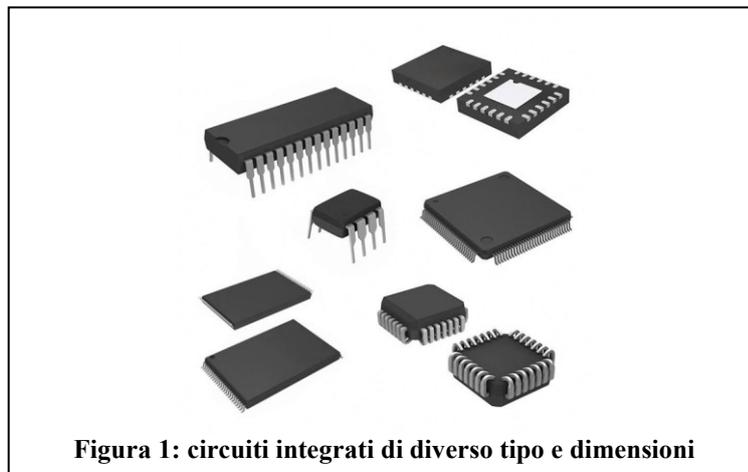
1.1 Origini della silicon photonics

Lo sviluppo della silicon photonics nasce dalla necessità di unire due mondi che hanno rivoluzionato la tecnologia lo scorso secolo. Da una parte la microelettronica basata su circuiti integrati (CI) e la tecnologia CMOS, fondati sulle proprietà particolari del silicio. Dall'altra lo sviluppo di circuiti basati sull'utilizzo della luce e quindi dei fotoni come fonte di informazione per la trasmissione di dati. Quest'ambito ha avuto una forte spinta dalla scoperta delle fibre ottiche, studiate dal premio Nobel per la fisica del 2009 Charles Kao. Grazie a questa invenzione e agli investimenti nella ricerca, in questi ultimi anni si possono raggiungere altissime velocità di trasmissione di dati, fino ai gigabit al secondo, con bassissimi costi per il consumo di energia.

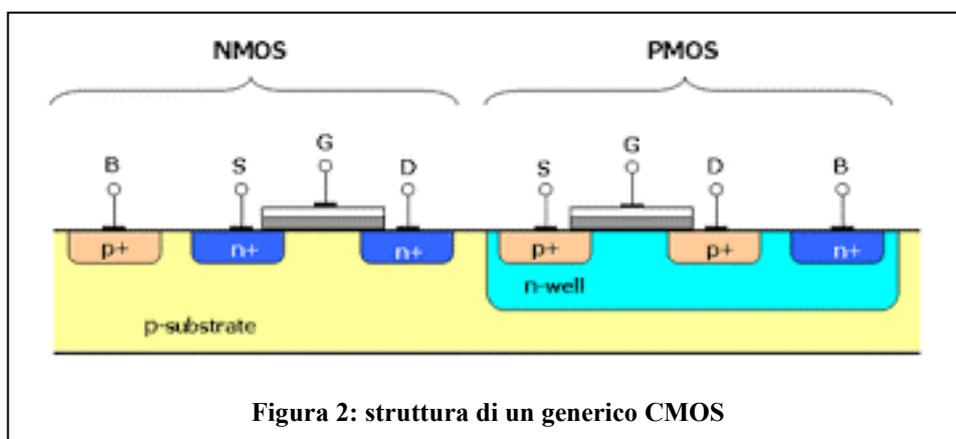
La tecnologia CMOS è uno dei due tasselli principali della silicon photonics. Questa ha avuto uno sviluppo esponenziale negli ultimi anni; un evidente esempio è la legge di Moore. I dispositivi elettronici esistenti in questi anni contengono moltissimi transistor MOS al loro interno. Nel 1950 l'ingegnere Mohamed Atalla, lavorando ai Bell Labs, studiò le proprietà del silicio come semiconduttore. Nel 1957 propose un nuovo metodo per la fabbricazione di componenti elettronici basati sui semiconduttori. Continuò i suoi studi presentando un nuovo processo basato sulla relazione tra metalli, ossidi e semiconduttori, il MOS process. Sviluppò questa tecnologia con il collega Dawon Kahng. I due ingegneri inventarono il primo MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) nel 1959. Questo fu il primo transistor nella storia a poter essere miniaturizzato e prodotto in grandi quantità. Fu poi possibile integrare moltissimi transistor insieme (anche più di diecimila) in un unico chip chiamato circuito integrato (Figura 1). Nel 1963, alla Fairchild Semiconductor, i due ingegneri elettronici: Chih-Tang Sah e Frank Wanlass inventarono il primo CMOS ^[1] (MOS complementare). Un altro importante protagonista di questa tecnologia fu Paul Weimer che, nel 1992, costruì il primo

¹ A. Singh e S. Singh, "«Evolution of CMOS Technology Past, Present and Future»", *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 5, n. 2, 2016.

thin-film transistor (TFT), brevettato da John Wallmark nel 1957, entrambi lavoratori presso la RCA Corporation. Un TFT è un transistor con la peculiarità di essere molto fino. Questi vengono largamente usati per la costruzione di schermi a cristalli liquidi (LCDs).



Jack St. Clair Kilby, quando era ancora un ricercatore dell'esercito US, ebbe l'idea di creare piccoli wafers ceramici che contenessero più componenti. Successivamente, quando andò a lavorare nei Texas Instruments, lavorò su nuove idee che si trasformarono negli antenati dei circuiti integrati che conosciamo oggi. Nel settembre del 1958 dimostrò il funzionamento del primo circuito integrato. Nel febbraio dell'anno dopo la semplice descrizione diventò un circuito elettronico totalmente integrato, da cui il nome. Grazie ai suoi studi e alla progettazione nei circuiti integrati Kilby vinse il premio Nobel nel 2000. Molti studi e ricerche sono stati fatti sui circuiti integrati e sono tutt'ora una delle pietre miliari della IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Tutt'oggi i circuiti integrati sono componenti fondamentali per molti dispositivi elettronici ed è riconosciuta come una tra le invenzioni più importanti del ventesimo secolo [2].



² G. Lifante, "Integrated Photonics: Fundamentals", Wiley, 2003.

Nel 1964 C.W. Miller e P.H. Robinson introdussero per la prima volta il concetto di tecnologia silicon-on-insulator (SOI). Ai Texas Instruments nel 1979 furono costruiti per la prima volta dei SOI MOSFET. Con il passare degli anni questa tecnologia si sviluppò e portò anche alla creazione di SOI CMOS con alte prestazioni. La silicon photonics ebbe molti benefici di questa scoperta perché oltre a ridurre le capacità parassite, sono ideali per sistemi di guida d'onda.

La storia dei photonics integrated circuit (PIC) nasce nel 1993, quando Abstreiter introdusse il concetto di Opto Electronic Integrated Circuits (OEIC) [3]. Il concetto fu esteso negli anni a venire da Soref, che presentò un OEIC superchip utilizzando delle guide d'onda integrate col silicio. Le ricerche fatte sulle guide d'onda passive e strumenti basati su essi sono stati fondamentali per la ricerca e la progettazione di componenti fondamentali dei circuiti ottici integrati. Solo nel 2004 tutti i concetti teorici studiati e scoperti riguardanti il silicio e l'ottica sono stati implementati costruendo dei modulatori e switch. Integrare il mondo dei circuiti integrati elettronici con quello dell'ottica serviva soprattutto per migliorare le funzionalità e le performance dei circuiti mantenendo bassi costi di produzione e utilizzo. Tuttavia, il silicio non ha ottime proprietà ottiche e quindi l'avanzare della ricerca negli OEIC ha avuto una brusca frenata. Nel periodo tra il 1993 e il 2003 ci fu un piccolo progresso nel campo della silicon photonics [4]. Tutt'oggi molte ricerche si basano soprattutto sullo studio del comportamento quantistico del silicio e del suo comportamento quando viene investito dai fotoni. Altri attuali studi si concentrarono su due campi: strumenti basati sul "discrete photonics" e le tecniche di integrazione ibrida. Questi due campi verranno poi sviluppati nei prossimi paragrafi e capitoli.

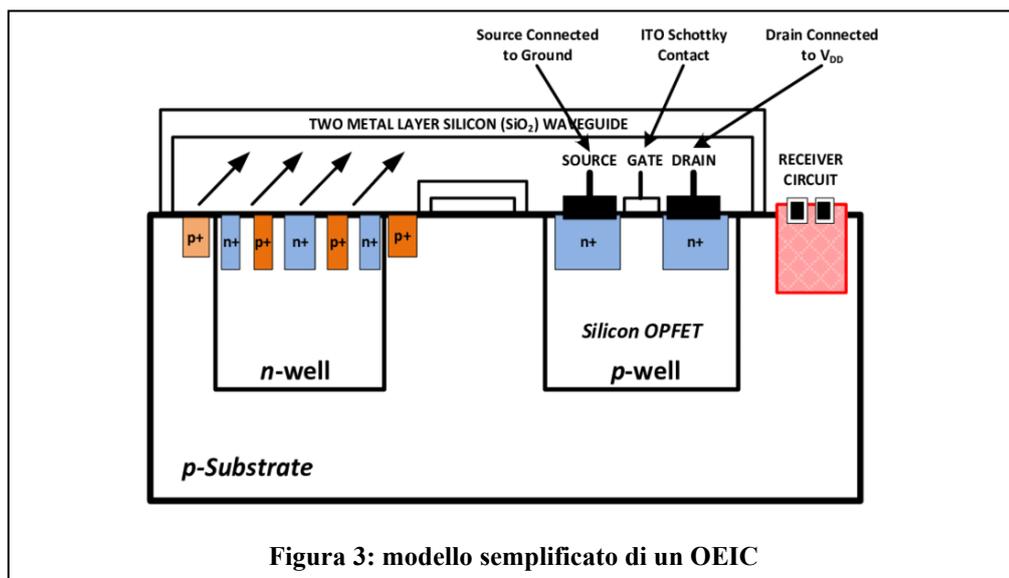


Figura 3: modello semplificato di un OEIC

³ Winnie N. Ye e Yule Xiong, "Review of silicon photonics: history and recent advances", *Journal of Modern Optics*, pp. 1299-1320, 2013.

⁴ R. Nagarajan e. M. Smit, "«Photonic integration»", *IEEE LEOS Newsletter*, pp. 4-10, 2007.

1.2 Vantaggi del silicio nella silicon photonics

Il silicio è uno tra i materiali più abbondanti della terra, esso costituisce circa il 27% della crosta terrestre. Grazie ad un complesso processo si possono creare dei wafers di silicio su cui costruire dei circuiti integrati direttamente dai wafers. In questo modo i costi di produzione diminuiscono grazie all'utilizzo della tecnica di produzione in serie. In questo paragrafo verranno affrontati argomenti che riguardano la fabbricazione di transistor MOS e del processo fotolitografico, oltre all'importanza e le caratteristiche specifiche del silicio per la creazione di circuiti ottici.

1.2.1 Fabbricazione di transistor MOS, una breve descrizione

All'interno di un circuito integrato ci possono essere moltissimi componenti che interagiscono tra loro e che vengono costruiti a partire da un sottile wafer di silicio che viene drogato in determinate parti. Quest'ultimi vengono ottenuti da dei lingotti di silicio lavorati in un lungo processo produttivo. Tutti i passaggi per la costruzione di circuiti integrati sono fatti in un ambiente estremamente sterile, in modo da evitare che le polveri rovinino il processo di fabbricazione. In questo sottoparagrafo viene descritto in modo sintetico il processo di fabbricazione. Nella Figura 4 viene visto in modo sintetico il processo di fabbricazione dei wafers.

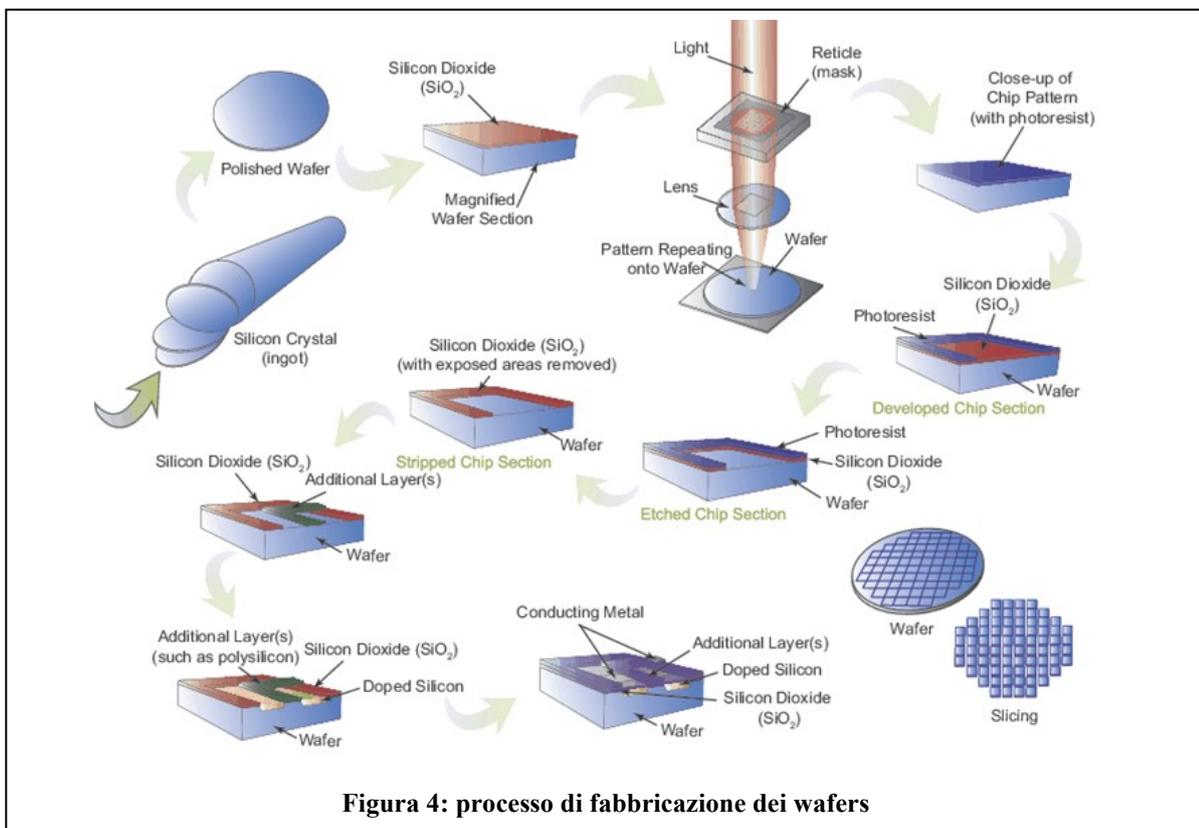


Figura 4: processo di fabbricazione dei wafers

Il silicio amorfo (non cristallino) viene sciolto all'interno di una particolare fornace. Nel silicio liquido viene immerso un germe di silicio cristallino solido. Il germe viene tirato su lentamente in modo tale che si possa creare attorno un reticolo cristallino solidificato. Il silicio amorfo diventa quindi un lingotto di silicio semiconduttore. Una volta estratto, il lingotto viene lavorato togliendo le impurità sui bordi rendendolo liscio. Il lingotto viene poi tagliato in fette (wafers) molto sottili di spessore circa 100-200 μm grazie a una macchina molto precisa che sfrutta dei coltelli con schegge di diamante. Il taglio deve essere molto preciso per non creare imperfezioni nei wafers. Una volta ottenuti i wafers viene fatta una pulitura planare di tipo chimico e meccanico. Sul wafer vergine si possono fabbricare i circuiti integrati, costituiti soprattutto da transistor. Nei processi moderni della fabbricazione di CMOS, i pMOS e gli nMOS sono fatti in well per isolare i substrati dei vari transistor. Oltre alle well sono scavate delle trincee di isolamento che permettono di non creare contatti indesiderati tra i vari transistor. Dopodiché sono drogati i substrati con drogaggio di tipo p e di tipo n. Successivamente bisogna drogare le zone di tipo n⁺ e p⁺ per il drain e il source, lo strato di ossido e di polisilicio per il contatto di gate e le giunzioni in metallo per i contatti [5].

1.2.2 Breve descrizione del processo fotolitografico

Per la costruzione dei circuiti integrati sono necessari centinaia di passi di produzione e tutti sfruttano il processo fotolitografico (Figura 5).

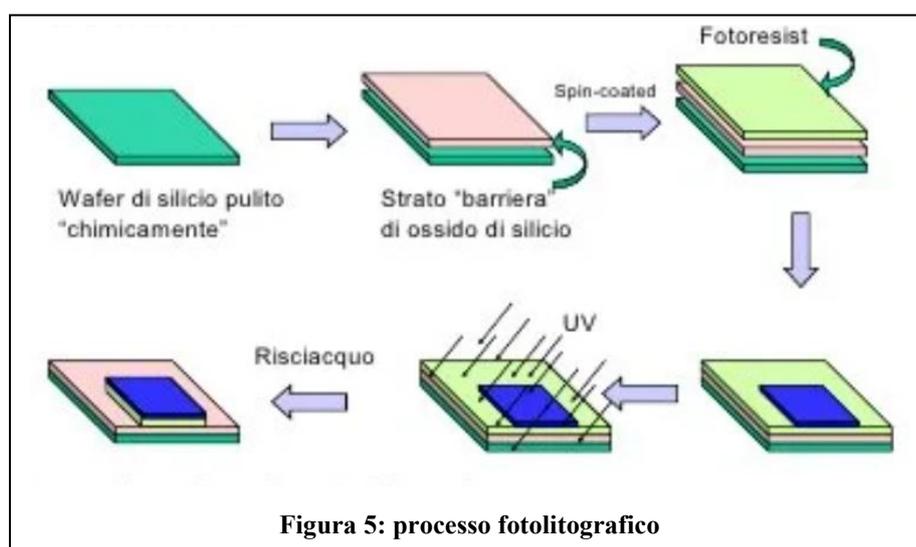


Figura 5: processo fotolitografico

Questo meccanismo si basa sull'utilizzo del fotoresist, materiale liquido con proprietà particolari che, quando investito da raggi ultravioletti (raggi UV) si indurisce. In caso sia necessario drogare un materiale in delle zone specifiche si esegue il seguente procedimento: si

⁵ Jan M. Rabaey, "Circuiti integrati digitali: l'ottica del progettista", edizione italiana a cura di A. Cester e A. Gerosa, 2005.

copre il wafer di fotoresist; successivamente viene posta una maschera ottica sopra il wafer che non permette il passaggio dei raggi ultravioletti nelle zone in cui il fotoresist deve indurirsi; ciò impedisce il lavaggio chimico nelle zone in cui il fotoresist è indurito. Dopo l'esposizione si procede con un attacco chimico (detto anche lavaggio) e al plasma per togliere il fotoresist morbido. Dopodiché si fa un attacco chimico che elimini lo strato di materiale da eliminare non protetto dal fotoresist oppure per effettuare un'iniezione di ioni per modificarne il drogaggio. Infine, viene eliminato anche il fotoresist indurito e si ottiene così il wafer coperto del materiale voluto solo in determinate zone oppure scavato in altre ^[5].

1.2.3 Importanza del silicio nei circuiti

Il silicio è il materiale più utilizzato nei circuiti elettronici moderni. Nei primi anni di ricerca nell'ambito della Silicon Photonics gli scienziati notarono dei problemi legati alle proprietà ottiche del silicio. Uno dei principali ostacoli nella realizzazione di circuiti ottici erano le emissioni stimolate di fotoni da parte del silicio. Altre limitazioni osservate sono la larghezza di banda non adatta e la bassa mobilità. Nonostante ciò, esso presenta altrettante ottime proprietà per formare il substrato di diodi laser. Il silicio è uno dei materiali più abbondanti nella terra e si presenta sia in forma amorfa che cristallina. Inoltre, il silicio può essere usato per costruire wafers molto puri e di diverse dimensioni in base alle esigenze del circuito da fabbricare. Esso presenta anche una grande conducibilità termica, durezza e bassa densità che sono molto utili per la costruzione di dispositivi. Infine, l'altissima qualità e la facile formazione dell'ossido di silicio (SiO_2) lo rendono preferibile ad altri semiconduttori come il germanio per la realizzazione di circuiti integrati ^[6]. Oltre a tutte queste proprietà, è stato osservato che l'ossido di silicio è un ottimo rivestimento per le guide d'onda. Da tutti questi benefici gli scienziati si sono concentrati sulla crescita di semiconduttori del silicio per la formazione di circuiti, chiamate tecniche di crescita epitassiale. Nonostante le numerose ricerche, i problemi legati alle differenze tra la costante reticolare del silicio e la proprietà di espansione termica sono tuttora numerosi e di difficile risoluzione.

Un altro motivo che ha portato i ricercatori a voler sviluppare questa tecnologia con il silicio è la vasta conoscenza nella tecnologia CMOS. Essa, come già scritto, è pervasiva in tutti i sistemi elettronici moderni e sfruttare le conoscenze già presenti è fondamentale nello sviluppo della silicon photonics. Infatti, nello scorso secolo sono stati implementati molti strumenti per il design e la costruzione di circuiti, processi di costruzione di dispositivi, packaging di dispositivi per la miniaturizzazione di componenti e vari test per il controllo di qualità. Tutte queste scoperte hanno permesso sia una produzione in vasta scala che una diminuzione del

⁶ J. Bowers, Di Liang et al., "Hybrid Silicon Lasers", *Laserfest*, 2010.

costo di produzione. Ciò ha permesso di ottenere una buona struttura per la costruzione di emettitori di laser. Un buon esempio dell'utilizzo sono i circuiti a guida d'onda implementati con laser che sfruttano l'effetto Raman. Grazie a questa particolare proprietà, sviluppata nei prossimi paragrafi, possono essere costruiti anche laser a infrarossi, convertitori di lunghezza d'onda e amplificatori. Riuscire ad integrare i componenti passivi avanzati, modulatori e fotorivelatori in silicio che possono operare ad alte velocità con la tecnologia CMOS ha permesso un forte sviluppo nell'ambito della Silicon Photonics [7].

Un altro importante vantaggio è l'alto indice di rifrazione, che permette la costruzione di guide d'onda di dimensioni sotto al micrometro, componenti molto addensati e un packaging per componenti di funzioni ottiche sulla superficie dei chip. Questi vantaggi rendono la Silicon Photonics e l'integrazione tra ottica e silicio una tra le poche vie percorribili per lo sviluppo industriale di circuiti ottici. Tuttavia, all'alto indice di rifrazione è legato un problema: esso impone delle determinate dimensioni nei circuiti ottici, nell'ordine dei nanometri, che diminuisce l'efficienza dei circuiti. Questo implica che le minime differenze di dimensioni delle componenti provoca evidenti diminuzioni di prestazione quando si creano i circuiti integrati. I dispositivi ottici sono quindi limitati e rimangono approssimativamente costanti in funzione della funzione che devono eseguire, ciò è dovuto alle stringenti leggi fisiche legate a parametri dimensionali [8].

1.3 Altri materiali utilizzati nella silicon photonics

Nonostante il silicio presenti moltissimi vantaggi come visto nel paragrafo precedente, esso presenta una bassa efficienza in termini di emissione di fotoni e pochissime qualità per essere usato come materiale principale per la costruzione dei modulatori, uno dei componenti principali. Di conseguenza nell'integrazione tra circuiti ottici e tecnologia MOS vengono adoperati diversi materiali che permettono di limitare gli effetti negativi legati all'utilizzo del silicio. Molti studi si concentrano sulla ricerca di integrazione di materiali che preservano le qualità della tecnologia MOS e che abbiano le qualità richieste per circuiti ottici efficienti. In questo paragrafo vengono trattati i principali materiali utilizzati, caratteristiche associate e le implementazioni.

I circuiti ottici integrati, fondamentali nella Silicon Photonics, sono basati nella tecnologia dei semiconduttori. Questa tecnologia permette di costruire circuiti integrati fino ad

⁷ W. Bogaerts e L. Chrostowski, "Silicon Photonics Circuit Design: Methods, Tools and Challenges", *www.lpr-journal.org*, pp. 2-3, 2018.

⁸ J. C. Goldschmidt et al., "Electrical and Optical properties of polycrystalline silicon", *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka (Giappone), 2003.

una dimensione dei componenti pari ai micrometri o nanometri. Tuttavia, la fotonica necessita di componenti di materiali differenti che interagiscono tra loro. Ciò comporta che la scalabilità diminuisce portando i circuiti ad avere dimensioni maggiori. Inoltre, l'utilizzo di diversi elementi comporta un incremento del numero di processi di produzione diversi per la costruzione dei dispositivi ottici. Come conseguenza si ha la diminuzione della possibilità di standardizzare i prodotti e un aumento dei tempi di produzione ^[9].

Tra i più comuni materiali utilizzati in questo ambito ci sono quelli appartenenti alla classe dei semiconduttori inorganici. Tra i vari vantaggi vi sono le specifiche proprietà chimiche, meccaniche e termiche. Inoltre, la tecnologia CMOS, che è una delle radici della silicon photonics, impone delle regole restrittive sull'utilizzo dei materiali. Possono essere adoperati ad esempio per costruire uno dei principali componenti ottici, le fibre ottiche. Esse possono essere costruite con ossido di silicio oppure dei polimeri. Le prime sono svantaggiose per quanto riguarda la scarsa polarizzabilità dei legami chimici che riducono la possibilità di assorbire fotoni, soprattutto nelle lunghezze d'onda tra 0.8 e 1.6 μm . Le seconde, invece, sono caratterizzate da un ampio assorbimento vicino all'infrarosso e quindi necessiterebbero di una periodica rigenerazione e amplificazione del segnale ^[10]. Molti altri componenti necessitano di materiali con un indice di rifrazione alto. I polimeri sono fondamentali, ad esempio nella costruzione di modulatori oppure come rivestimento delle componenti permette una visibile riduzione del consumo di energia.

Un altro gruppo di materiali importanti nella silicon photonics sono gli elementi III/V. Quando vengono associati ai polimeri e un wafer di silicio aggiungono proprietà ottiche particolari ai circuiti. L'unione di questi materiali è detta ibridazione e verrà discussa nel prossimo capitolo. Questi materiali, tuttavia, non sono spesso compatibili con la tecnologia CMOS. Infine, i materiali organici, che richiedono differenti processi di produzione rispetto a quelli standard e una scarsa resistenza meccanica e termica allo stress ^[11]. Tra le principali proprietà che i materiali devono avere per essere utilizzati nella costruzione di circuiti integrati ci sono: l'indice di rifrazione, le trasparenze per diverse lunghezze d'onda, la banda proibita diretta e indiretta dei semiconduttori, le proprietà ottiche non lineari, il coefficiente elettro-ottico, il coefficiente piezoelettrico, il coefficiente termo-ottico, le proprietà acuto-ottiche e basse perdite dovute alla propagazione ^[12]. Per elementi III/V si intendono quelli dal terzo al quinto gruppo della tavola periodica degli elementi. Questi elementi vengono utilizzati perché il silicio non è un buon emettitore di fotoni. Per questo motivo i dispositivi per la creazione e

⁹ A. Boes et al, "Hybrid and heterogeneous photonic integration", *APL Photon* 6, 2021.

¹⁰ Zhou Fang e Ce Zhou Zhao, "Recent Progress in Silicon Photonics", *International Scholarly Research Network*, 2012.

¹¹ P. Bettotti, "Hybrid Materials for Integrated Photonics (review article)", *Hindawi*, 2014.

L'emissione della luce vengono costruiti utilizzando particolari materiali come l'arseniuro di gallio, la cui formula chimica è GaAs e il fosforo di indio la cui formula chimica è InP. Il coordinamento tra guide d'onda in silicio e questi materiali permette di scalare i dispositivi nell'ordine di alcuni micrometri. Molti di questi materiali presentano diverse proprietà ottiche non lineari, per questo ci deve essere un compromesso tra le proprietà non favorevoli per i circuiti ottici e gli alti costi di produzione legati ad un certo tipo di materiale. Da queste informazioni gli studiosi hanno scoperto che i materiali dei gruppi III/V sono i più compatibili [12].

Un'altra classe importante sono i semiconduttori a quantum dots. Questi sono importanti nella Silicon Photonics perché possiedono particolari proprietà ottiche ed elettriche [13]. Infatti, l'assorbimento e l'emissione di luce dipende dalle dimensioni dei quantum dot, ed essendo un parametro che si può decidere nel processo di produzione, è facilmente gestibile. Inoltre, essendo scalabili, sono spesso utilizzate nelle applicazioni di packaging. Un materiale particolare utile per moltissime applicazioni nella fotonica è il solfuro di piombo con quantum dots. Altri materiali che integrabili con questi quantum dots sono i polimeri. Con processi di produzione molto precisi, essi possono fungere da maglia per contenere i quantum dots [14].

Uno dei protagonisti dello scorso secolo è stato il grafene. Gli studiosi scoprirono molte proprietà interessanti che potrebbero essere integrate col silicio per ottenere importanti novità nella Silicon Photonics. Una tra le più importanti è quella di avere un'altissima mobilità dei portatori di carica, essa permette un'estrazione molto veloce di portatori da parte della luce [15]. Hendry e i suoi collaboratori hanno dimostrato che il grafene presenta molte proprietà non lineari nelle regioni dell'infrarosso, queste, legate alle proprietà ottiche del silicio hanno permesso di creare chip scalabili e con velocità di prestazione molto alte. Un esempio tangibile dell'ibridazione tra grafene e silicio è quello dei photodetector. Molte ricerche hanno dimostrato che è possibile creare dei photodetectors in silicio e grafene che lavorano ad alte velocità. Quindi integrando questi due materiali si possono unire le qualità di entrambi per ottenere grossi benefici.

L'ultima classe di elementi fondamentali nella Silicon Photonics è quella dei materiali organici. La fotonica e soprattutto l'optoelettronica trae molti vantaggi dall'utilizzo dell'ibridazione tra circuiti in silicio e materiali organici. La loro comodità sta nell'essere modificabili a livello molecolare e quindi di poter modificare finemente le loro proprietà

¹² P. Bettotti, "Hybrid Materials for Integrated Photonics (review article)", *Hindawi*, 2014.

¹³ V. I. Klimov, A. Mikhailovsky, S. Xu et al., "Optical gain and stimulated emission in nanocrystal quantum dots", *Science*, vol. 290, no. 5490, pp. 314–317, 2000.

¹⁴ M. Humer et al., "Integration, photostability for [...] Si-based photonics at telecom wavelengths", *Optics Express*, vol. 21, no. 16, 2013.

¹⁵ K. Kim et al., "A role for graphene in silicon-based semiconductor devices", *Nature*, vol. 479, no. 7373, 2011.

optoelettroniche. Tra i materiali organici più interessanti ci sono i polimeri. La loro capacità a non cambiare indice di rifrazione con l'aumentare della temperatura permette ai componenti di non dipendere da variazioni di temperatura e quindi non cambiare proprietà ottiche in caso di surriscaldamento. Nonostante presentino una perdita ottica maggiore rispetto al silicio essi presentano un basso indice di rifrazione che permette una larga modulazione della banda ^[16]. Possono inoltre essere usati come rivestimento per fibre ottiche, essi vengono posti all'esterno di quello in silicio e il suo coefficiente termooptico permette di controbilanciare i difetti di quello del silicio. I materiali organici possono essere inoltre integrati con dispositivi inorganici in modo tale da enfatizzare le proprietà optoelettroniche dei due materiali. Questi dispositivi vengono soprattutto utilizzati nelle tecnologie OLED (Organic Light Emitting Diode) e OLET (Organic Light Emitting Transistor) ^[17].

1.4 Nanostrutture utilizzate nella Silicon Photonics

Gi scienziati che studiano e fanno ricerca nell'ambito della Silicon Photonics stanno concentrando le loro energie soprattutto nella ricerca di tecniche per rendere il silicio un buon emettitore di fotoni. Infatti, come già scritto in precedenza, il silicio nel suo stato naturale è un pessimo emettitore di fotoni e quindi inutilizzabile, allo stato attuale, per tutti i componenti dei circuiti ottici che necessitano tale funzione. Tuttavia, con i recenti studi sull'integrazione tra il silicio e altri materiali e grazie alle nanotecnologie moderne si sono aperti nuovi scenari importanti. In questo paragrafo verranno discusse le principali strutture quantistiche del silicio utilizzate nella Silicon Photonics.

1.4.1 Quantum dots e quantum wire

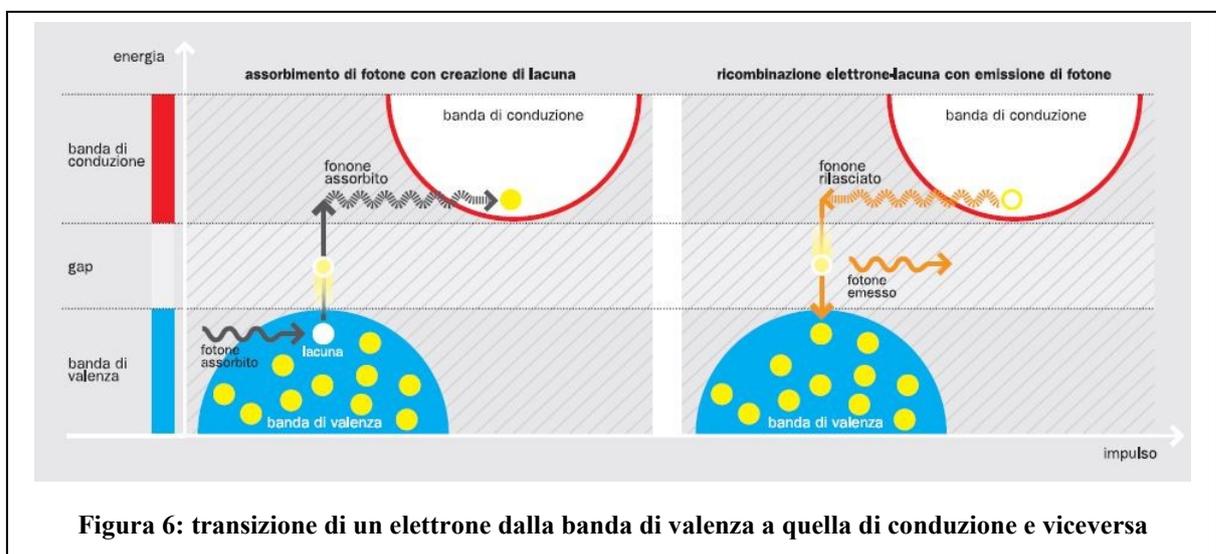
Ad oggi si possono costruire in maniera totalmente artificiale i cosiddetti quantum dots del silicio. Essi sono particelle semiconduttive quantiche di forma sferica le cui dimensioni sono nell'ordine dei nanometri e hanno proprietà sia ottiche che elettroniche molto particolari. Quando un quantum dot viene irradiato da raggi ultravioletti (raggi UV), un elettrone viene eccitato e passa dalla banda di valenza alla banda di conduzione. L'elettrone eccitato può tornare allo stato iniziale emettendo energia sottoforma di luce. La luce che viene emessa può assumere energia diversa e quindi lunghezza d'onda differente ^[18]. Le proprietà ottiche e quelle elettroniche possono cambiare tra i vari quantum dots, essi dipendono principalmente dalla grandezza e dalla loro profondità all'interno del materiale. Nel silicio gli elettroni sono molto

¹⁶ H. Zang, A. Szep et al., "Electro-optic polymer modulators for 1.55 um wavelength [...]", *Applied Physics Letters*, vol.76, no. 24, pp. 3525-3527, 2000.

¹⁷ A. Boes et al, "Hybrid and heterogeneous photonic integration", *APL Photon* 6, 2021.

¹⁸ M. A. Cotta, "Quantum dots and Thwi Applications: What Lies Ahead?", *ACS Applied Nano Materials*, 2020.

vicini tra loro e formano i cosiddetti livelli energetici quantizzati; l'insieme di questa forma le bande di energia. L'ultima banda di energia si chiama banda di valenza e corrisponde allo stato naturale degli elettroni rispetto al silicio. L'ultima banda di energia prende il nome invece di banda di conduzione. Quando un elettrone abbandona la banda di valenza perché eccitato prende il nome di lacuna ^[19]. Il processo dovuto al passaggio di un elettrone dalla banda di conduzione a quella di valenza si chiama ricombinazione elettrone-lacuna (Figura 6). In questo processo devono essere rispettati il principio di conservazione dell'energia e il principio di conservazione dell'impulso. Essendo i fotoni particelle con grande energia ma basso impulso, quindi non può far rispettare il secondo principio citato. Servirebbe una terza particella, il fonone, per far rispettare entrambi i principi. Dato che questo processo richiede il coinvolgimento di ben tre particelle sono poco probabili ^[19].



Possono essere anche costruiti dei quantum wire di silicio, ovvero dei fili di conduzione quantici con lunghezza nell'ordine di molti micrometri e di diametro di pochi micrometri. I quantum wire di silicio sono dei fili semiconduttivi che assumono particolari proprietà quantiche che modificano le proprietà elettroniche del materiale. Sia i quantum dots che i quantum wires sono particolari nanostrutture dove gli elettroni rispettano le regole della meccanica quantistica ^[20]. Il confinamento quantico nelle buche di potenziale produce un'indeterminazione nell'impulso (principio di indeterminazione di Heisenberg). Queste particolari strutture introducono alla possibilità di ottenere emissioni di luce dal silicio. Un altro aspetto favorevole è, come nella tecnologia MOS, la relazione tra l'emissione di luce e le dimensioni dei quantum dots e quantum wire. Infatti, l'energia ottenuta dall'emissione dei fotoni dipende dalle dimensioni fisiche di queste particolari nanostrutture. La ricerca verso

¹⁹ F. Priolo, "Luce dal silicio: Le frontiere della microelettronica", *Asimmetrie*, vol 12, pp. 40-43, 2011.

²⁰ J. Bowers, Di Liang et al., "Hybrid Silicon Lasers", *Laserfest*, 2010.

l'obiettivo di creare laser al silicio si basa sull'accoppiamento tra nanostrutture di silicio attive otticamente (quantum dots e quantum wires) e nanostrutture chiamate cristalli fotonici, ovvero l'equivalente fotonico dei semiconduttori.

1.4.2 I cristalli fotonici

In natura questi particolari cristalli si trovano nelle ali di alcune farfalle o la corazza di alcuni scarabei. Sono chiamati cristalli fotonici perché la loro struttura è periodica e possono interagire sui fotoni. Essi interagiscono perché possono modulare artificialmente l'indice di rifrazione. Questi particolari cristalli sono stati studiati per la prima volta da R. Yablonovitch e J. Joannopoulos negli anni '90. I cristalli fotonici più semplici corrispondono a un wafer di materiale semiconduttore con dei fori nanometrici disposti regolarmente. Questi fori non sono riempiti di alcun materiale, in questo modo l'indice di rifrazione all'interno è pari a uno. In questo modo si ha una modulazione dell'indice di rifrazione tra uno e quello del materiale del semiconduttore. Se all'interno delle cavità si pone un materiale attivo otticamente (che emette dei fotoni) fa sì che i fotoni rimangano all'interno, ottenendo un funzionamento simile a quello del laser^[21]. Questa tecnologia non è stata ancora implementata ma molti ricercatori ci stanno lavorando. I cristalli fotonici possono essere inoltre utilizzati come schermo per un meccanismo di raffreddamento e protezione termica per moltissimi dispositivi. Un altro ambito in cui potrebbero essere utilizzati sono le telecomunicazioni. L'integrazione tra questa tecnologia e quella delle fibre ottiche permette l'utilizzo di più segnali a diverse lunghezze d'onda. I cristalli fotonici possono essere utilizzati come specchi selettivi o sostitutivi come dei veri emettitori, appunto degli emettitori laser^[22].

²¹ R. Mazzaro, "Nanocristalli di silicio: una piattaforma funzionale per la costruzione di nanostrutture ibride per la conversione di energia", *Chimica e fotochimica – Università di Bologna*, no. 2, 2017.

²² F. Massimino, "Cristalli fotonici", Giugno 2008.

Capitolo 2: I circuiti ottici integrati

In questo capitolo verranno approfonditi i circuiti fotonici integrati il cui scopo è quello di utilizzare i circuiti fotonici e integrarli con i circuiti in silicio e tecnologia CMOS già presenti. Nel primo paragrafo verranno descritti in modo approfondito i circuiti fotonici integrati. Successivamente verranno illustrati i principali componenti di questi particolari circuiti. Nel terzo paragrafo verrà approfondita la tecnologia di integrazione. Infine, i principali sistemi di comunicazione che sfruttano i circuiti fotonici integrati.

2.1 Cosa sono i circuiti fotonici integrati?

La tecnologia associata ai circuiti integrati è stata fondamentale nella rivoluzione della comunicazione dell'informazione, abilitando i computer e gli smartphone a connettersi alla rete di comunicazione che collega i dispositivi nel mondo. Fin dalla nascita di questa tecnologia, c'è stata una spinta ad avere sempre più funzionalità integrate in circuiti monolitici con circuiti sempre più complessi utilizzando lo stesso substrato e materiale sfruttando il minor spazio possibile. Tuttavia, le piattaforme tecnologiche tradizionali sono maturate e hanno raggiunto un limite delle dimensioni, esso è principalmente dovuto ai vincoli di larghezza di banda imposti dalle interfacce di input/output dei dispositivi elettronici moderni. La necessità di superare questo limite ha portato all'avvento della fotonica integrata con l'obiettivo di fornire un'interfaccia diretta alla vasta larghezza di banda attualmente disponibile utilizzando la fibra ottica ^[23].

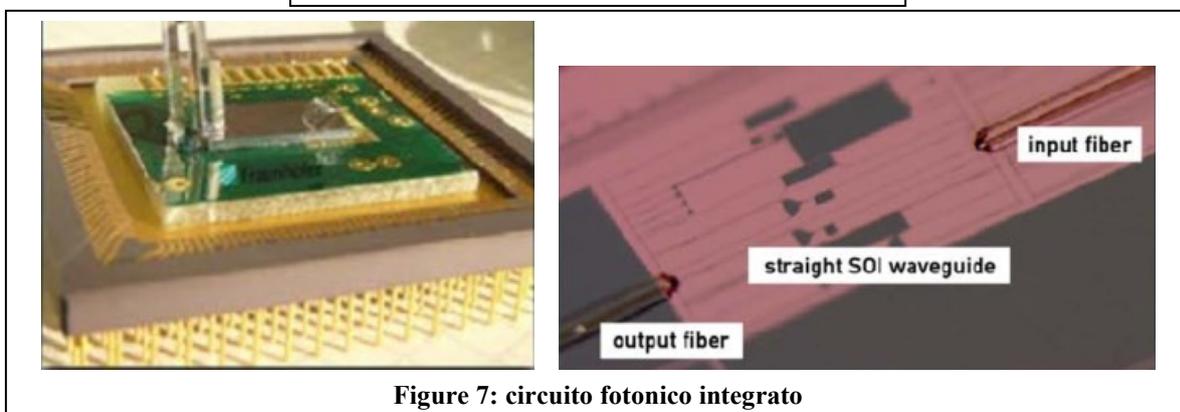
2.1.1 Circuiti integrati elettronici e fotonici

Un generico circuito integrato elettronico consiste in una serie di componenti come resistori, capacità, transistor che trasportano un segnale elettrico sottoforma di elettroni. Un chip fotonico invece, consiste in una serie di guide d'onda, modulatori, laser, polarizzatori e spesso componenti elettroniche in cui il segnale corrisponde a un fascio luminoso. Pertanto, il segnale costituito dagli elettroni è sostituito dai fotoni di un fascio luminoso. I dispositivi moderni che sfruttano dei circuiti elettronici hanno avuto una notevole modernizzazione soprattutto grazie all'invenzione e alla ricerca dei circuiti integrati ^[24]. Quest'ultimi sono una delle più importanti invenzioni dell'ultimo secolo. Un circuito integrato, come scritto sopra è un particolare circuito che presenta un'elevata densità di componenti in dimensioni molto

²³ A. Boes et al, "Hybrid and heterogeneous photonic integration", *APL Photon* 6, 2021.

²⁴ L. Chrostowski, M. Hochberg, "Silicon Photonics Design: From Devices to Systems", *Cambridge University Press*, Cambridge (UK), 2015.

ridotte, dell'ordine dei micrometri o nanometri. Questi circuiti sono realizzati grazie a un processo chimico-fisico molto particolare. I circuiti integrati possono essere di vari tipi: elettrico, ottico o elettro-ottico. Il termine PIC è l'acronimo di Photonics Integrated Circuit, e si intende un circuito integrato che integra proprietà sia ottiche che elettriche. I circuiti integrati in generale possono essere costruiti formando due strutture differenti, chiamandosi monolitici o ibridi. Nel primo caso si intendono quelli fabbricati a partire da un wafer di silicio singolo, che funge da unico supporto e substrato. I circuiti integrati ibridi, invece, sono realizzati in più parti e su vari sostegni e substrati. Come è stato scritto nel primo capitolo, per costruire questi circuiti è necessario seguire un lungo processo di produzione che prevede anche il drogaggio del silicio, in modo tale da ottenere delle caratteristiche elettriche specifiche per il corretto funzionamento del circuito [25].



Per affrontare la discrepanza tra le grandi dimensioni dei circuiti fotonici e l'alta densità di componenti nell'elettronica del silicio, è stata proposta la fotonica del silicio. Essa è basata sull'utilizzo di processi e materiali di produzione di semiconduttori di ossido di metallo in tecnologia CMOS per creare componenti fotonici con densità di integrazione elevate. Tale piattaforma sfrutta le tecniche di elaborazione già sviluppate e altamente ottimizzate e

²⁵ www.treccani.it/enciclopedia/circuito-integrato .

l'economia di scala offerta in modo univoco da decenni di sviluppo della microelettronica al silicio [26].

2.1.2 Caratteristiche dei circuiti integrati fotonici

Una componente fondamentale, più moderna del semplice wafer di silicio, per i Photonics Integrated Circuit è la tecnologia Silicon On Insulator (SOI). Questa consiste nella sostituzione del convenzionale substrato di silicio con un substrato di tipo “silicio-isolante-silicio”. Grazie a questa struttura si possono ridurre in modo significativo le capacità parassite che potrebbero disturbare il segnale. John Bowers, ad esempio, ha creato dei laser tramite ibridazione tra uno strato di cristallo III-V e un substrato SOI [27]. Nei PIC si può anche utilizzare uno strato parziale di III-V come modulatore o photodetector. Tuttavia, i cristalli III-V non sono gli unici materiali utilizzati per la progettazione e fabbricazione di circuiti fotonici integrati. Nei nostri giorni è presente una vasta gamma di piattaforme tecnologiche e materiali per la costruzione di circuiti integrati sia elettronici che fotonici. Tra i più utilizzati si possono citare il niobato di litio (LiNbO_3), nitruro di silicio (Si_3N_4), biossido di silicio drogato (SiO_2), arseniuro di gallio (GaAs), fosfuro di indio (InP), nitruro di alluminio (AlN) e nitruro di gallio (GaN), molti speciali vetri ad alto indice di rifrazione e vari polimeri di diversa natura [28]. Nonostante il silicio sia un ottimo materiale per la fabbricazione di guide d'onda, nel corso degli anni, è diventato sempre più chiaro che questo materiale non può soddisfare le esigenze di tutte le applicazioni che trarrebbero vantaggio dai circuiti integrati fotonici. Ad esempio, è difficile ottenere sorgenti luminose da delle strutture in silicio a causa del suo bandgap indiretto.

Una caratteristica importante per la produzione dei circuiti integrati è la possibilità di sfruttare le conoscenze e le tecniche della fabbricazione CMOS. Tale possibilità apre una strada per una potenziale costruzione di grandi volumi di produzione a basso costo per dispositivi fotonici costruiti su dei circuiti integrati. Nonostante la Silicon Photonics richieda un'elevata complessità per la progettazione di circuiti e di conseguenza elevate dimensioni, i circuiti integrati fotonici costruiti negli ultimi anni sono molto semplici e costituiti da pochi componenti. Un esempio rilevante sono le applicazioni datacom, nome che indica tutte le applicazioni per la comunicazione di dati. In quest'ultime i ricetrasmittitori ottici sono solitamente caratterizzati da un singolo percorso luminoso costituito da 3 a 10 elementi ottici [27]. I circuiti ottici più grandi, abitualmente, consistono in semplici componenti ripetitive come

²⁶ J. C. Norman et al., “Perspective: The future of quantum dot photonic integrated circuits”, *APL Photonics* 3, pp. 3-4, 2018.

²⁷ J. Bowers, Di Liang et al., “Hybrid Silicon Lasers”, *Laserfest*, 2010.

²⁸ W. Bogaerts e L. Chrostowski, “Silicon Photonics Circuit Design: Methods, Tools and Challenges”, *www.lpr-journal.org*, pp. 2-3, 2018.

dei phased array per la guida del fascio luminoso. Nonostante tali circuiti presentino il potenziale per essere dei circuiti fotonici integrati, non sono molto complessi e la loro funzionalità è molto limitata per le esigenze della tecnologia moderna richiesta nella Silicon Photonics [29]. I circuiti integrati fotonici presentano caratteristiche molto simili a quelle dei circuiti integrati elettronici. Entrambi vengono fabbricati attraverso dei processi sequenziali che prevedono l'utilizzo di wafer semiconduttori costituiti principalmente da silicio. La funzionalità è la stessa per entrambi e può essere descritta e modellata attraverso un circuito, che genera dei segnali che si propagano tra gli elementi costitutivi funzionali del circuito integrato stesso. Come per i dispositivi e circuiti integrati elettronici, il funzionamento dei circuiti integrati fotonici non deriva da un singolo elemento, bensì dalla collaborazione e comunicazione tra molti blocchi funzionali e piccoli circuiti a sé stanti. Il design dei chip, come per quelli elettronici, si traduce in una serie di "strati maschera". I primi circuiti integrati fotonici furono definiti come un unico dispositivo, e solitamente simulati utilizzando tecniche di simulazione elettromagnetica diretta, ma approssimata, come i metodi di propagazione del fascio [30] o altre tecniche che non verranno discusse.

Come per la tecnologia CMOS, che prevede moltissime fasi di processo per la fabbricazione dei circuiti, anche nella Silicon Photonics la fabbricazione e la progettazione sta diventando negli anni sempre più complessa. Oltre a questo, anche le dimensioni dei circuiti stanno crescendo e quindi il processo di progettazione dei circuiti fotonici integrati si sta evolvendo lungo le linee dell'automazione della progettazione elettronica (EDA), con gerarchia dei circuiti e blocchi parametrici riutilizzabili come quelli utilizzati nell'elettronica analogica [31]. Nell'elettronica, ciò ha portato alla possibilità di creare dei software di simulazione che permettono ai progettisti di circuiti di creare uno schematico del progetto per circuiti integrati fotonici estremamente complessi con moltissimi componenti che possono interagire.

2.1.3 Principali vantaggi e svantaggi

I sistemi che sfruttano la fibra ottica sono in genere composti da elementi discreti, come laser, modulatori e rivelatori, spesso racchiusi in un unico modulo. I circuiti integrati fotonici sono particolarmente interessanti in quanto possono ridurre questi moduli in un solo chip di dimensioni molto limitate, simile a quelli dell'elettronica integrata con cui si interfacciano. L'integrazione di tali sistemi su un unico chip comporta vantaggi aggiuntivi, come l'efficienza

²⁹ J. Bowers, Di Liang et al., "Hybrid Silicon Lasers", *Laserfest*, 2010.

³⁰ R. Scarmozzino, A. Gopinath, et al., "Numerical techniques for modeling guided-wave photonic devices", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, no. 1, pp. 150-162, 2000.

³¹ L. Chrostowski, M. Hochberg, "Silicon Photonics Design: From Devices to Systems", *Cambridge University Press*, Cambridge (UK), 2015.

energetica, la robustezza, la riduzione del peso e il controllo del feedback ultraveloce ^[32]. Tuttavia, nel corso degli anni, è diventato anche chiaro che il silicio non può soddisfare le esigenze di tutte le applicazioni che trarrebbero vantaggio dai circuiti fotonici integrati. Ad esempio, è difficile ottenere sorgenti luminose fabbricate in silicio a causa del suo bandgap indiretto che limita determinate caratteristiche ottiche ^[33].

Per affrontare la discrepanza tra le grandi dimensioni dei circuiti fotonici e l'alta densità di componenti nell'elettronica del silicio, è stata proposta la Silicon Photonics. Essa è basata sull'utilizzo di processi e materiali di produzione di semiconduttori di ossido di metallo in tecnologia complementare (CMOS) per creare componenti fotonici con densità di integrazione elevate. Tale tecnologia sfrutta le tecniche di elaborazione già sviluppate e altamente ottimizzate e l'economia di scala offerta in modo univoco da decenni di sviluppo della microelettronica al silicio.

L'utilizzo della luce invece degli elettroni permette alla Silicon Photonics di ottenere enormi vantaggi e molte soluzioni alle limitazioni specifiche dell'elettronica del silicio. Tra gli svantaggi superati dall'utilizzo dei fotoni ci sono la possibilità di generare meno calore, l'incremento della capacità e velocità di trasmissione dei dati e la diminuzione dei costi legati all'energia ^[34].

2.2 Componenti fondamentali dei circuiti ottici integrati

I circuiti integrati fotonici descritti nel precedente paragrafo e in generale i circuiti ottici necessitano di determinati componenti di base per un corretto funzionamento. In questo paragrafo verranno descritte le principali caratteristiche di guide d'onda, filtri ottici, laser, amplificatori, modulatori e fotorivelatori. I primi due vengono identificati con il nome componenti passivi, gli altri vengono definiti componenti attivi.

2.2.1 I componenti passivi

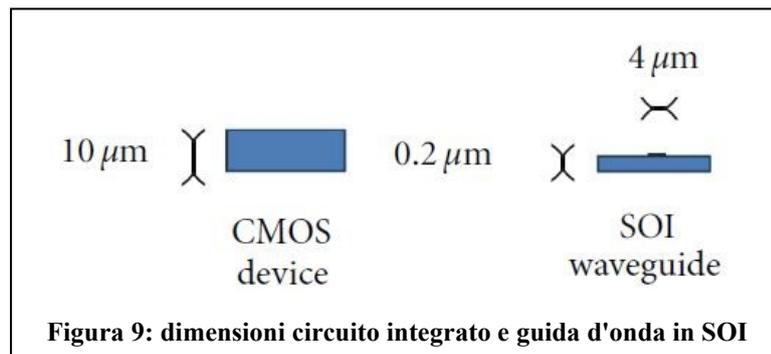
Le guide d'onda sono dei dispositivi che permettono ai segnali ottici, ovvero dei fasci luminosi, di essere trasportati da un punto ad un altro del circuito. Possono essere associati ai wire dei circuiti elettronici classici, dove scorrono gli elettroni. Per determinare le prestazioni di una specifica guida d'onda si usano principalmente due parametri, ovvero la grandezza e l'attenuazione di propagazione. Quest'ultima, a sua volta, può essere suddivisa in due componenti distinte: l'attenuazione intrinseca e l'attenuazione estrinseca. La prima è la

³² A. Boes et al, "Hybrid and heterogeneous photonic integration", *APL Photon* 6, 2021.

³³ W. Bogaerts e L. Chrostowski, "Silicon Photonics Circuit Design: Methods, Tools and Challenges", *www.lpr-journal.org*, pp. 2-3, 2018.

³⁴ www.synopsys.com/glossary/what-is-a-photonic-integrated-circuit.html

principale fonte di attenuazione per le guide d'onda costruite a partire dal drogaggio del silicio, la seconda, invece, risulta significativa nel caso in cui le dimensioni delle guide d'onda siano relativamente piccole ^[35]. Per quanto riguarda la grandezza delle guide d'onda è stato scoperto che il silicon on insulator (SOI) è un'eccellente piattaforma per le guide d'onda in silicio e ossido di silicio. Questa importante proprietà è dovuta al fatto che l'indice di rifrazione del silicio, il cui valore corrisponde a 3.45, è nettamente superiore a quello dell'ossido di silicio, che è pari a 1.45. Ciò comporta un confinamento dei raggi luminosi all'interno delle guide d'onda e permette una riduzione delle dimensioni di quest'ultime fino a circa $0,1 \mu\text{m}^2$. Tali dimensioni sono in perfetto accordo con le esigenze strutturali ed economiche della tecnologia CMOS odierna (Figura 9) ^[36]. Tuttavia, esiste un problema legato all'accoppiamento tra le fibre ottiche e le guide d'onda costruite a partire dal silicio. Infatti, la dimensione delle guide d'onda nella Silicon Photonics è estremamente piccola e la discrepanza con le fibre ottiche è evidente. Gli studiosi, quindi, stanno cercando di trovare delle soluzioni efficienti che possano risolvere tale problema ^[36].



Gli altri componenti passivi dei circuiti fotonici sono i filtri. Un filtro ottico è uno strumento che lascia passare selettivamente la luce con particolari caratteristiche come una o più lunghezze d'onda, una polarizzazione, o ne attenua l'intensità ^[37]. I filtri sono un componente importante nelle reti ottiche moderne, soprattutto per quanto riguarda le applicazioni multiplexing e demultiplexing. Due parametri fondamentali per capire l'efficienza dei filtri sono l'intervallo di spettri liberi (FSR: free spectral range) e il rapporto di estinzione (ER: extinction ratio). Il primo indica la separazione in lunghezza d'onda tra le varie risonanze e la seconda denota la profondità della risonanza. Le applicazioni generali dell'ottica richiedono un largo FSR e un grande ER, che corrisponde a una delle più importanti sfide nella ricerca sulla Silicon Photonics. Altro importante soggetto di ricerca sono i filtri fotonici ad alte prestazioni, utilizzabili in molte applicazioni che richiedono la manipolazione dello spettro

³⁵ Zhou Fang e Ce Zhou Zhao, "Recent Progress in Silicon Photonics", *International Scholarly Research Network*, 2012.

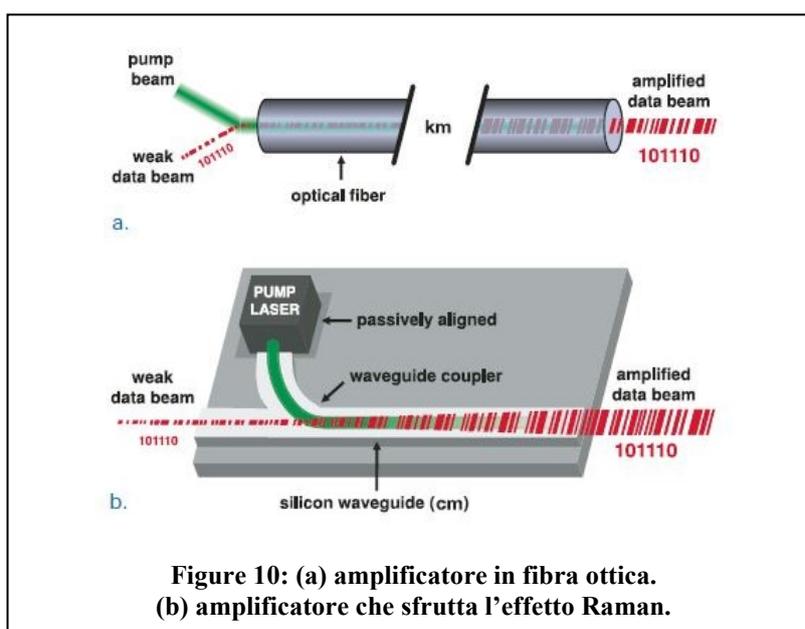
³⁶ B. Jalali, "Can silicon change photonics?", *Physica Status Solidi*, vol. 205, no. 2, pp. 213–224, 2008.

³⁷ www.bianchiottica.it/lenti/filtri-ottici

ottico. Ad oggi i filtri sono largamente utilizzati nei sistemi di multiplexing e nella rilevazione spettroscopica [38].

2.2.2 I componenti attivi

Il primo componente attivo che viene descritto è il laser, acronimo di Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation (Amplificazione della luce attraverso emissione stimolata di radiazioni). L'emissione stimolata è ottenuta modificando lo stato energetico degli elettroni presenti nel materiale di cui è costituito. Quando un elettrone cambia stato di valenza, passando da uno più basso a uno maggiore, rilascia un fotone. A causa di alcune proprietà intrinseche del silicio, questo materiale appartiene a un gruppo di elementi che non sono in grado di emettere fotoni. Tuttavia, esiste un particolare fenomeno chiamato effetto Raman che può aiutare il silicio nell'emissione di fotoni. Esso, infatti, può essere utilizzato per l'amplificazione e la creazione di fasci luminosi anche a partire dal silicio. L'effetto Raman è usato dai ricercatori per creare amplificatori e laser in fibra di vetro. Questi dispositivi sono costruiti dirigendo un fascio di luce in una fibra. Non appena la luce entra, i fotoni collidono e attraverso l'effetto Raman l'energia si trasferisce a fotoni di lunghezza d'onda maggiore. Dopo aver percorso diversi chilometri, il raggio di luce acquisisce abbastanza energia da causare un'amplificazione del segnale. Facendo riflettere la luce avanti e indietro attraverso la fibra, si può produrre un raggio luminoso puro. Sarebbero necessari diversi chilometri di fibra ottica, invece, bastano pochi centimetri di silicio per ottenere un risultato migliore (Figure 10). Utilizzando l'effetto Raman e un fascio di pompa ottica, il silicio può ora essere utilizzato per produrre amplificatori e laser utili [39].



**Figure 10: (a) amplificatore in fibra ottica.
(b) amplificatore che sfrutta l'effetto Raman.**

³⁸ H. Xu e. D. Liu, «Silicon photonic filters», *Wiley*, pp. 2252-2253, 2020.

³⁹ V. Krutul, M. Paniccia, S. Koehl, «Continuous Silicon Laser», *Intel*, 2005.

I modulatori ottici sono dei componenti attivi fondamentali della tecnologia di interconnessione. Un modulatore è un particolare dispositivo in grado di variare le caratteristiche fondamentali di un fascio luminoso in concomitanza di un segnale di informazione, la maggior parte delle volte di tipo elettrico (Figura 11).

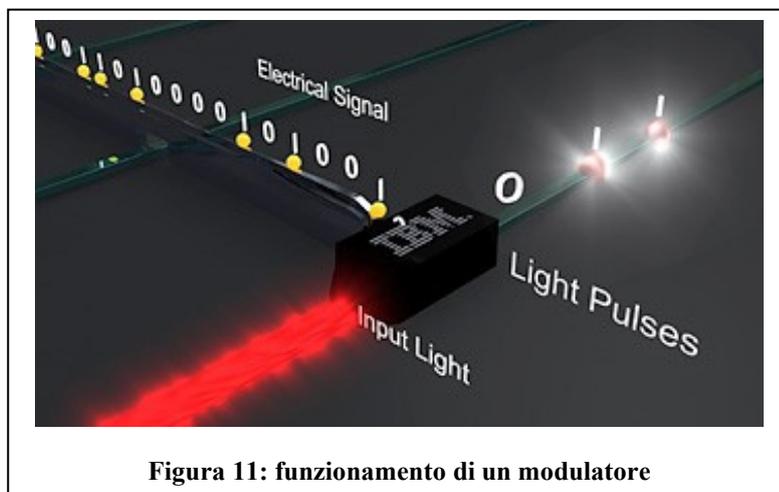


Figura 11: funzionamento di un modulatore

Ci sono diversi fattori che permettono una valutazione delle prestazioni di un modulatore. Tra di essi, uno dei più importanti è la profondità di modulazione (chiamato anche rapporto di estinzione), esso corrisponde al rapporto tra l'intensità luminosa alla massima propagazione e alla minima propagazione. In caso di elevata rapporto di estinzione può insorgere un buon tasso di errore sui bit e un'alta sensibilità al ricevitore, specialmente per distanze di trasmissione lunghe. Dei valori accettabili di questo parametro variano tra i 4 e 5 dB, anche se si preferisce averlo maggiore ai 7 dB, per una modulazione più accurata ^[40]. Un ulteriore parametro fondamentale è la velocità di modulazione, ovvero la capacità del sistema di trasportare i dati ad una certa velocità. Anche la larghezza di banda è importante, essa rappresenta la frequenza a cui corrisponde una diminuzione della modulazione pari al 50% del valore massimo. I modulatori ottici ideali presentano un'elevata velocità di modulazione e un'ampia larghezza di banda; oltre a ciò, esibiscono anche basse perdite, dimensioni ridotte e consumo energetico molto basso. Tuttavia, tali requisiti sono in contraddizione tra loro ed è necessario raggiungere un compromesso per ottenere un modulatore progettabile e fabbricabile nelle industrie. Esistono due rami nella ricerca della progettazione e fabbricazione dei modulatori, uno si basa sull'utilizzo di materiali del gruppo IV mentre l'altro si concentra sull'utilizzo di una combinazione ibrida a partire dal semplice wafer di silicio. Il primo è basato sulla potenziale integrazione tra l'elettronica e i modulatori ottici già presenti. Nonostante siano stati compiuti enormi progressi, il silicio presenta degli effetti non lineari che rendono attualmente

⁴⁰ Zhou Fang e Ce Zhou Zhao, "Recent Progress in Silicon Photonics", *International Scholarly Research Network*, 2012.

faticosamente percorribile tale strada. I modulatori ibridi, invece, si basano sull'integrazione tra materiali organici III-V e i dispositivi fabbricati in silicio, una via che sembra essere più fertile^[41].

I fotorivelatori (detectors in inglese) sono dei componenti di base nei circuiti integrati fotonici. Questi dispositivi convertono i segnali ottici ricevuti in segnali elettrici. Solitamente i fotorivelatori sono formati da un fotodiodo di struttura p-n. I fotodiodi hanno la peculiarità di lavorare sotto una determinata tensione di polarizzazione. Quando i fotoni che investono la giunzione p-n vengono assorbiti, si creano delle coppie lacuna-elettrone e gli elettroni prodotti nell'area p e le lacune dell'altra area si muoveranno alla deriva a causa del campo elettrico formato al di sotto della regione di svuotamento. Valutando la corrente prodotta attraverso tale processo si può ricostruire il relativo segnale ottico. Di solito, per migliorare le funzionalità del campo elettrico, si applica una tensione attraverso la giunzione p-n^[42]. Per valutare le prestazioni dei detectors si usano tre parametri: responsività, dark current e larghezza di banda. La prima corrisponde al rapporto tra il valore della corrente che scorre grazie all'urto della regione p-n con i fotoni e la potenza incidente nei fotorivelatori. Il secondo parametro è la corrente scura; essa corrisponde alla corrente costante presente in caso di assenza di segnale luminoso in ingresso, si tratta quindi della misura del rumore indesiderato. L'ultimo parametro è la larghezza di banda che mostra la velocità di rilevazione del segnale^[41].

2.3 Integrazione ibrida ed eterogenea

Nella Silicon Photonics, come già scritto precedentemente, è di fondamentale importanza l'integrazione tra i circuiti fotonici e circuiti elettronici integrati già ampiamente sviluppati e fabbricati. Nell'ultimo decennio la ricerca nella Silicon Photonics si è concentrata, tra i vari ambiti, nello sviluppo di circuiti integrati fotonici sia ibridi che eterogenei. L'utilizzo di questa nuova tecnologia ha permesso alla ricerca di fare un enorme passo avanti nell'ambito della progettazione di circuiti fotonici integrati efficienti. In questo paragrafo oltre all'integrazione ibrida ed eterogenea verranno descritti dei particolari metodi di fabbricazione di circuiti che sfruttano i due tipi di integrazione.

2.3.1 Integrazione ibrida ed eterogenea

L'integrazione ibrida (Figura 12) è un particolare processo di integrazione che permette la connessione tra due o più dispositivi, spesso si tratta di circuiti integrati fotonici ed elettronici

⁴¹ G. T. Reed, G. Mashanovich, F. Y. Gardes, and D. J. Thomson, "Silicon optical modulators", *Nature Photonics*, vol. 4, no. 8, pp. 518–526, 2010.

⁴² Zhou Fang e Ce Zhou Zhao, "Recent Progress in Silicon Photonics", *International Scholarly Research Network*, 2012.

con dispositivi ottici, in un unico pacchetto. Solitamente l'integrazione viene fatta non appena i dispositivi fotonici o i circuiti integrati sono già stati costruiti, ovvero nella fase di packaging dei congegni. Evidenti esempi di integrazione ibrida sono i dispositivi attivi come chip laser, fotodiodi in silicio, amplificatori montati su dei circuiti fotonici integrati. Inoltre, esistono due modi per montare i dispositivi sul circuito integrato: possono essere messi sia sopra che accanto [43]. L'utilizzo di questo tipo di integrazione esibisce molti vantaggi. Tra i più importanti c'è la possibilità di testare e sistemare il dispositivo fotonico che deve essere integrato al circuito substrato prima del processo di integrazione. Questo permette una scelta meticolosa e quindi di poter selezionare il dispositivo più adatto e performante e di poter scartare tutti gli elementi che non sono funzionali allo scopo del circuito. In questo modo si ottiene il completo controllo delle performance [44]. Un altro vantaggio di questo processo di integrazione è la possibilità di rendere più automatizzato possibile il processo di fabbricazione dei chip. Infatti, la possibilità di decidere i componenti da integrare permette di costruire chip di grandezze tali da soddisfare le esigenze di produzione. L'integrazione ibrida però presenta anche alcuni svantaggi. Tra questi c'è l'allungamento dei tempi di produzione dovuto ad un assemblaggio seriale dei dispositivi e di conseguenza una produzione limitata. Infatti, l'integrazione ibrida non è consigliata e non viene fatta nel caso in cui serva produrre circuiti integrati dello stesso tipo in grandi quantità [43].

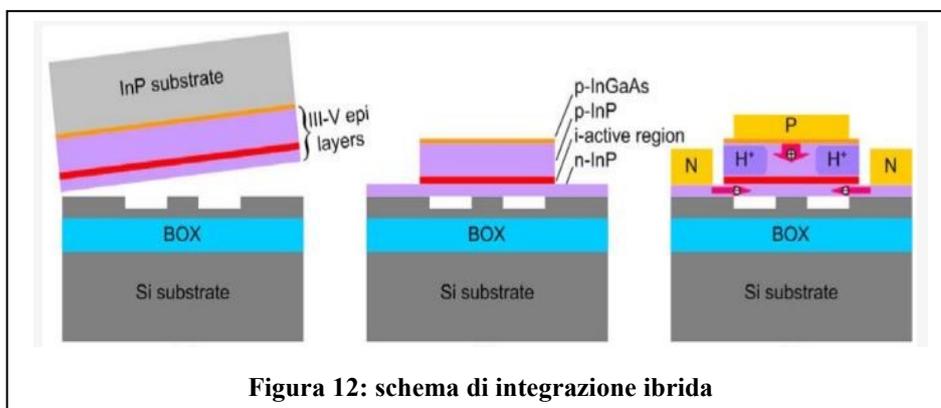


Figura 12: schema di integrazione ibrida

L'integrazione eterogenea (Figura 13) è un altro processo di integrazione molto utilizzato nella Silicon Photonics. È una procedura di integrazione che permette di unire due o più tecnologie di diverso materiale in un unico circuito integrato fotonico. A differenza dell'integrazione ibrida, questo processo è nella maggior parte dei casi eseguito nelle fasi iniziali e intermedie della fabbricazione del circuito integrato. Un esempio di integrazione eterogenea può essere l'adesione di sottili lamine di materiali III-V in wafer di silicio già

⁴³ A. Boes et al, "Hybrid and heterogeneous photonic integration", *APL Photon* 6, 2021.

⁴⁴ L. Carroll et al., «Photonic Packaging: Transforming Silicon Photonic», *applied science*, vol. 6, n. 426, pp. 1-3, 2016.

trasformati in circuiti fotonici ^[45]. Tra i principali vantaggi di quest'integrazione c'è quello di poter sfruttare le funzionalità dell'integrazione monolitica ma con bassissime perdite durante la fase di transizione di diverso materiale delle guide d'onda. Questo processo permette inoltre prestazioni affidabili e bassi costi di produzione ^[46]. Uno svantaggio legato a questa tecnologia è la necessità di lavorare in superfici ultra-pulite e lisce, caratteristica simile a quella per la fabbricazione di wafer in silicio nella tecnologia CMOS.

L'integrazione ibrida ed eterogenea sfruttano diversi materiali con proprietà ottiche differenti e specifiche. Solitamente queste tecnologie necessitano una bassa perdita di energia e dovrebbero funzionare su più lunghezze d'onda.

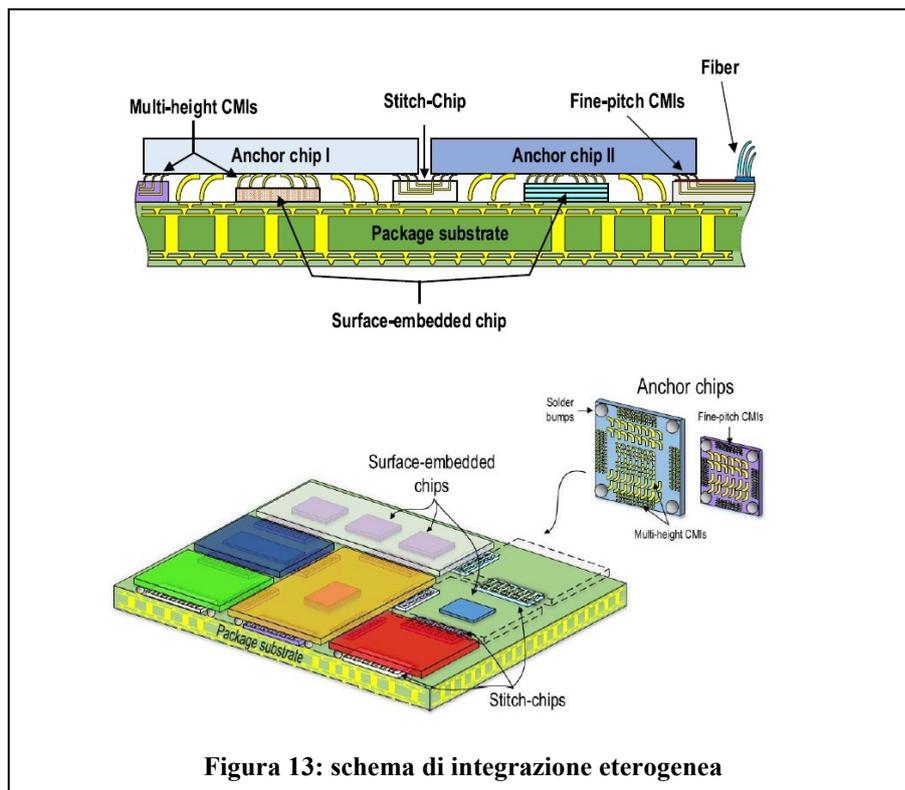


Figura 13: schema di integrazione eterogenea

2.3.2 Metodi di integrazione

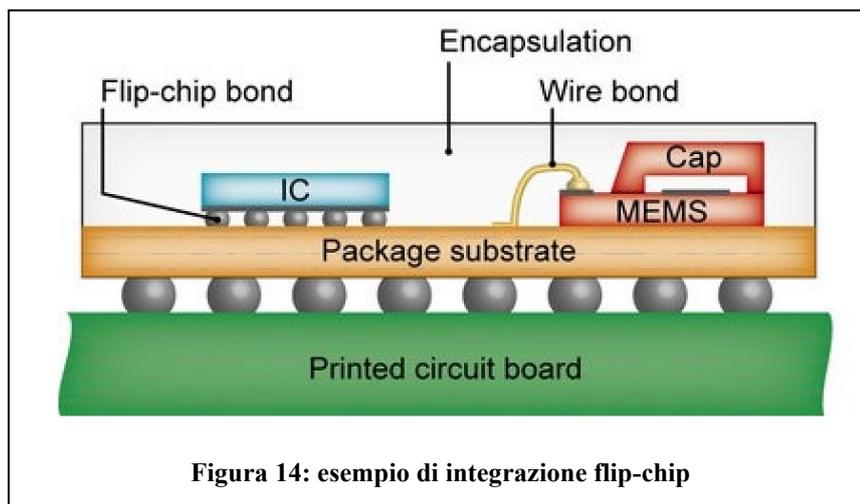
In questo sottoparagrafo verranno descritti alcuni metodi di integrazione che vengono usati insieme all'integrazione ibrida e l'integrazione eterogenea. Molti dei metodi descritti possono anche essere combinati per ottenere circuiti integrati che necessitano diversi materiali e tecnologie per la loro fabbricazione.

La prima tecnica di integrazione è la “flip-chip” (Figura 14), essa consiste in un metodo per l'integrazione e la connessione di dispositivi prefabbricati ad un substrato di silicio (ad esempio un wafer) attraverso la saldatura ad urto di uno speciale materiale conduttivo elettrico.

⁴⁵ A. Boes et al, “Hybrid and heterogeneous photonic integration”, *APL Photon* 6, 2021.

⁴⁶ L. Carroll et al., «Photonic Packaging: Transforming Silicon Photonic,» *Applied science*, vol. 6, n. 426, pp. 1-3, 2016.

Questa particolare tecnica è stata brevettata e sviluppata da IBM molti anni fa ^[47]. Questo tipo di integrazione è nato e si è sviluppato per i circuiti elettronici semplici e integrati ma negli ultimi anni è stato studiato un modo per implementarlo anche nei dispositivi ottici da integrare con i circuiti integrati fotonici. Questa tecnica richiede l'utilizzo di elettrodi metallici sulle superfici del substrato. Il modello degli elettrodi che aderiscono è uguale e a specchio nei due strati che si devono incollare tra loro. Successivamente si utilizza una particolare saldatura con specifici metalli per far aderire gli elettrodi del substrato. Questo metodo di saldatura è chiamato "sotto-urto" ed è molto importante in quanto conferisce una forte adesione a bassa resistenza elettrica e non permette la diffusione del materiale utilizzato nella saldatura nei componenti del chip ^[48]. Il metallo utilizzato nella saldatura deve avere un basso punto di fusione per non rovinare il silicio nel substrato. Nel dispositivo superiore vengono fatte aderire delle "pastiglie" di metallo che verranno usate nell'ultimo passaggio che consiste nel portare il dispositivo superiore a contatto con il substrato e fondere queste pastiglie utilizzando la termocompressione.

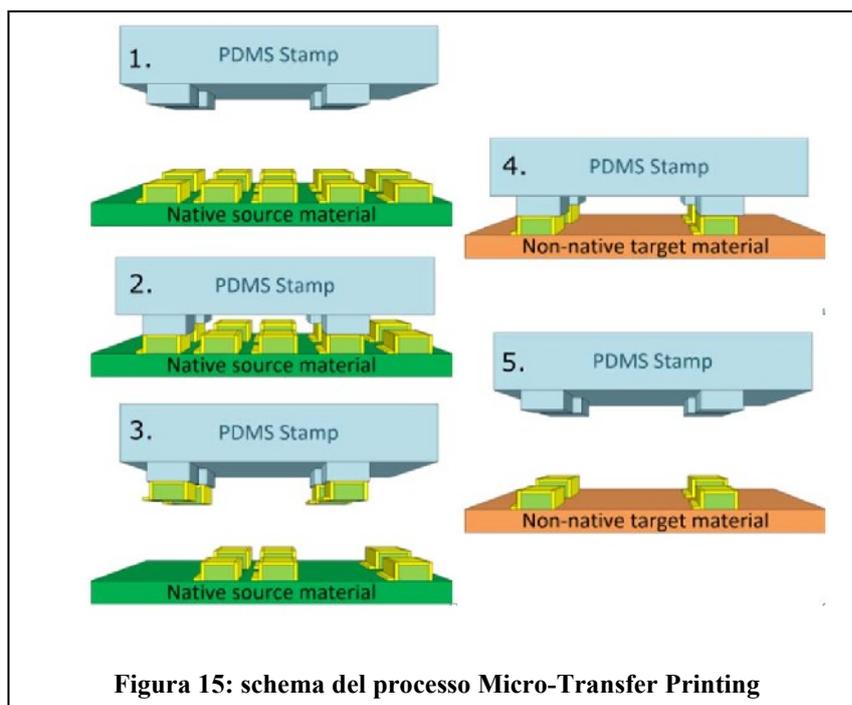


Un altro metodo molto utilizzato è il Micro-Transfer Printing (μ TP) (Figura 15). Questa tecnologia permette di spostare dei componenti da un substrato non nativo a quello desiderato. È una tecnologia che permette un assemblaggio molto veloce e preciso. Questo metodo fu brevettato da J. A. Rogers e i suoi collaboratori tra il 2003 e il 2006 e fu successivamente commercializzato nel 2006 da Semprius e X-Celeprint ^[47]. Il principio di base è quello di una stampa a trasferimento. Nella prima fase, i componenti necessari che sono inizialmente sul substrato nativo vengono sollevati grazie all'adesione di un particolare timbro non appena vengono a contatto tra loro. Per far sì che i dispositivi aderiscano bene è necessario che l'energia

⁴⁷ Z. Zhang e C. P. Wong, "Recent advances in flip-chip underfill: materials, process, and reliability", *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 27, no. 3, pp. 515-517, 2004.

⁴⁸ Boes et al, "Hybrid and heterogeneous photonic integration", *APL Photon* 6, 2021.

tra timbro e componenti sia maggiore di quella tra gli stessi e il substrato. Per fare ciò si compiono dei movimenti molto veloci che quindi possiedono un'energia maggiore di quella tra componente e substrato nativo. Nella seconda fase, quella di stampa, il timbro viene messo in contatto con il substrato non nativo e successivamente viene tolto molto lentamente. In questo modo, l'energia associata al substrato sarà maggiore rispetto a quella del timbro ^[49]. Questo tipo di tecnologia è decisamente utile per integrare dispositivi molto piccoli e presenta caratteristiche sia dell'integrazione ibrida che eterogenea.

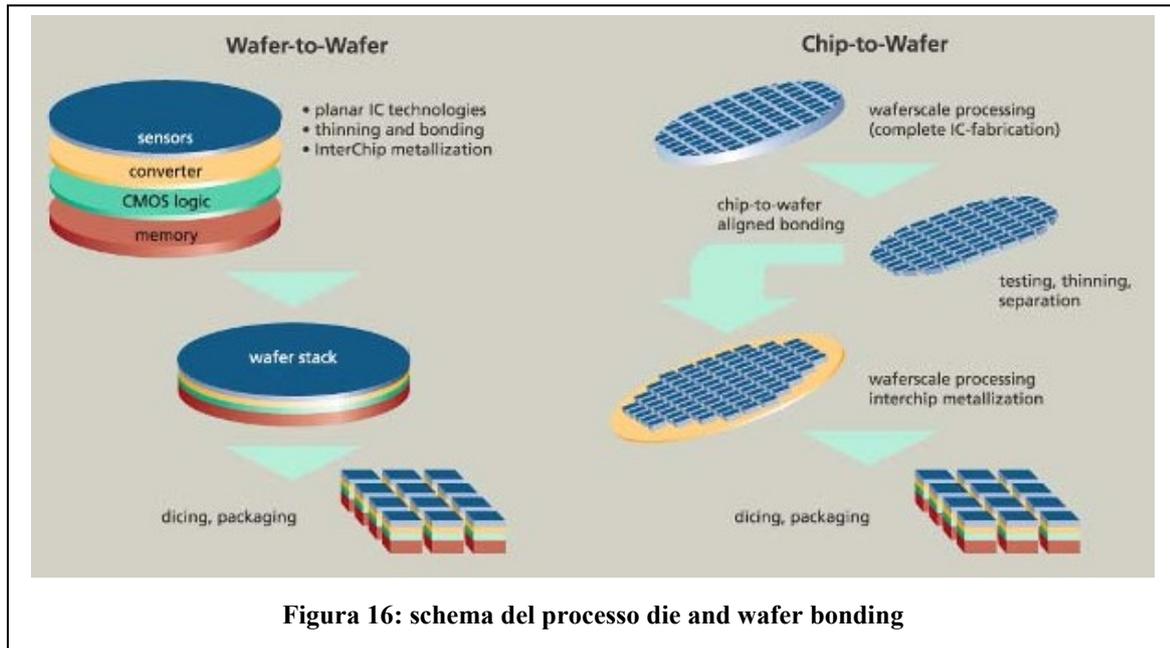


Il terzo metodo descritto è il die and wafer bonding (Figura 16). Questo processo è basato sull'unione tra più wafer in modo tale da formare una pila stabilmente legata. Il processo di incollaggio è stato inizialmente sviluppato per circuiti integrati elettronici e successivamente migliorato per quelli fotonici. Esistono diversi metodi di incollaggio in base alla tipologia degli strati utilizzati. Ad esempio, l'incollaggio diretto senza uno strato intermedio è quello utilizzato nella maggior parte dei circuiti integrati fotonici. La forza di incollaggio di questo metodo può essere molto elevata, ciò consente l'ulteriore lavorazione dei wafer. Inoltre, l'incollaggio diretto fornisce un'eccellente conducibilità termica tra il film incollato e il wafer di destinazione ^[50]. L'incollaggio diretto presenta molti benefici, tuttavia, necessita di requisiti molto rigorosi sulle superfici che devono essere pulite e ultrapiatte. Altro aspetto importante da considerare per questo metodo è il coefficiente di dilatazione termica dei materiali, in quanto una differenza

⁴⁹ D. Gomez et al., «Manufacturing capability of micro-transfer printing», *13th International Conference and Exhibition on Integration Issues of Miniaturized Systems*, Barcellona (Spagna), 2019.

⁵⁰ T. Komljenovic et al., "Photonic Integrated Circuits Using Heterogeneous Integration on Silicon", *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, no. 12, pp. 2246-2257, 2018.

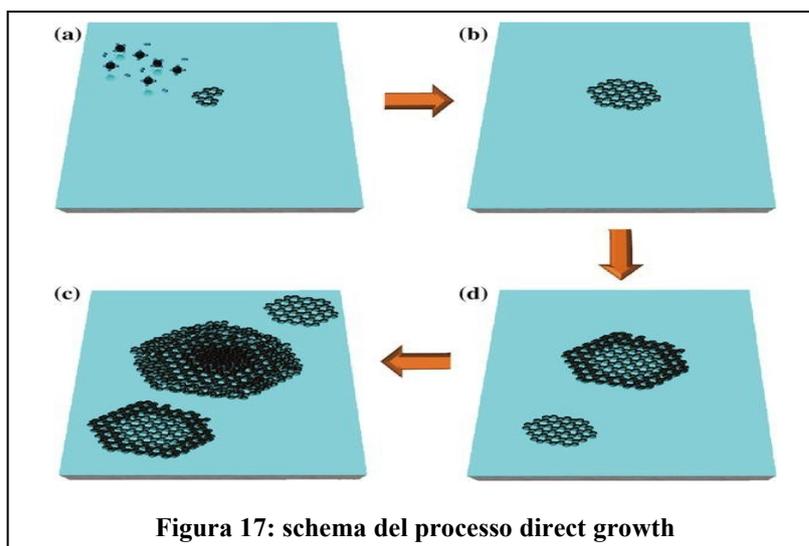
troppo elevata può comportare sollecitazioni e rotture. Tuttavia, questa tecnica ha permesso all'integrazione di componenti con i circuiti fotonici integrati di compiere enormi passi avanti [51].



Il penultimo metodo è la deposizione di strati che consiste in un particolare processo di integrazione di tipo monolitico. Il principio di base si fonda sulla deposizione di sottili film di specifici materiali sul wafer di destinazione. Esistono due principali categorie per i processi di deposizione: la deposizione fisica a vapore (PVD) e la deposizione chimica a vapore (CVD). La prima consiste in una deposizione sottovuoto in cui il materiale che deve essere depositato subisce una transizione dallo stato solido allo stato gassoso per poi essere sparato contro la zona del wafer interessata, non appena i due materiali si toccano il vapore lanciato passa dallo stato gassoso a quello solido e si ha come risultato un film sottile sul wafer. La deposizione chimica, invece, consiste nel porre i wafer substrato a contatto con gas volatili che reagendo con il bersaglio formano un film sottile del materiale desiderato [51].

Un metodo simile è il direct growth (Figura 17), anche questo è un processo monolitico che si basa sulla deposizione di germi cristallini sul substrato. Iniettando atomi dello stesso materiale si formeranno dei reticoli di materiali semiconduttori di dimensioni controllabili durante il processo di integrazione. Questa tecnologia è principalmente utilizzata nei dispositivi elettro-ottici attivi come laser, amplificatori e rilevatori. Tale scelta è fatta soprattutto per l'alta precisione di fabbricazione [49].

⁵¹ A. Boes et al, "Hybrid and heterogeneous photonic integration", *APL Photon* 6, 2021.



2.4 Sistemi di comunicazione nella Silicon Photonics

Nell'industria informatica ed elettronica tra le principali richieste da parte dei consumatori c'è l'evoluzione di tecnologie per le telecomunicazioni e interconnessioni tra chip. Viene richiesto che queste comunicazioni siano sempre più veloci e presentino un'elevata efficienza a livello energetico. Queste esigenze obbligano la ricerca e la tecnologia delle telecomunicazioni ad abbandonare l'utilizzo di strutture di comunicazione in rame e sostituirle con tecnologia che sfruttano l'ottica e la fotonica. In questo modo si possono ridurre i grossi limiti che comporta l'utilizzo del rame. A causa dell'elevata attenuazione dei fili in rame, gli attuali collegamenti dei circuiti elettronici moderni, è molto difficile ad oggi estendere la portata delle interconnessioni a 10 Gb/s oltre i 3 cm di lunghezza di collegamento. Le nuove applicazioni proposte dalla Silicon Photonics sono basate sull'integrazione tra la tecnologia ottica, quella del silicio e l'elevata riproducibilità e fabbricazione della tecnologia CMOS. Queste potrebbero essere fondamentali per consentire la progettazione e costruzione di interconnessioni ad elevata velocità ed efficienza. Oltre ad aumentare notevolmente il bit rate, l'utilizzo della silicon photonics può permettere una riduzione impressionante del consumo di energia ^[52].

Nei circuiti elettronici esiste un unico modo per rappresentare i segnali, ovvero il rapporto tra i valori di tensione o corrente. Nei circuiti fotonici, invece, esistono diversi modi per descrivere i segnali, come il valore del campo elettromagnetico o la presenza di segnale luminoso. L'uso di tensione e corrente non è appropriato nei circuiti fotonici integrati, a meno che non siano utilizzati per rappresentare l'accoppiamento tra onda elettrica e magnetica di un

⁵² J. Bowers, Di Liang et al., "Hybrid Silicon Lasers", *Laserfest*, 2010.

campo elettromagnetico che si propaga nel circuito. La forma d'onda del campo elettrico e magnetico nelle guide d'onda trasporta l'informazione completa nei segnali fotonici ma è difficile da analizzare.

L'avvento della cosiddetta società connessa caratterizzata principalmente dalle reti wireless 5G e l'Internet of Things, ha portato ad una rivoluzione e un'evoluzione delle reti che collegano i vari dispositivi e utenti nella network mondiale. I ricercatori delle future reti wireless aspirano a connettere un numero sempre maggiore di utenti e dispositivi, cercando contemporaneamente di aumentare la capacità di trasferimento di dati mantenendo basso il consumo energetico. A tal proposito, gli scienziati stanno cercando nuove tecnologie come la fotonica a microonde, che potrebbe essere molto importante in quanto offre delle ingegnerie particolari come la Radio-over-Fiber ^[53]. Questa consiste in una tecnica peculiare in cui un fascio luminoso viene modulato da un segnale radio trasmesso attraverso una fibra ottica. D'altra parte, questa tecnologia ha lo svantaggio di basarsi su componenti ingombranti e costose, inoltre, la struttura necessaria per queste particolari fibre è il fosfato di indio (InP) che non presenta basse perdite come nella Silicon Photonics ^[53]. Per eludere questo problema si potrebbe utilizzare l'integrazione ibrida ed eterogenea di diversi materiali e tecniche spiegata negli scorsi paragrafi. L'elaborazione dei segnali ottici è di fondamentale importanza nei sistemi e reti di comunicazione che vogliono operare ad alta velocità. Nei sistemi di comunicazione ottici alcuni componenti sono come quelli di base dei PIC presentati precedentemente come filtri ottici, fibre ottiche, amplificatori, multiplexer e altri; questi hanno permesso la comunicazione di dati ad elevata velocità fino ad arrivare al Gb/s con l'obiettivo di raggiungere i Tb/s ^[54].

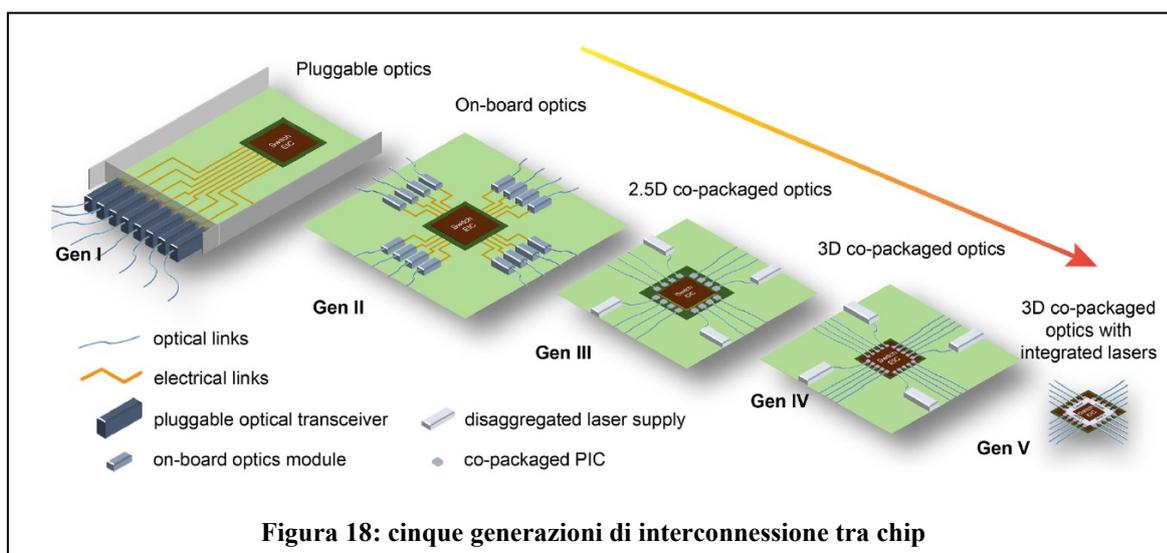


Figura 18: cinque generazioni di interconnessione tra chip

⁵³ Z. Wang, K. Van Gasse, «Heterogeneous Silicon Photonic Devices for Wireless Communication Systems», *2nd URSI AT-RASC*, Gran Canaria, 28 Maggio - 1° giugno 2018.

⁵⁴ H. Fukuda et al., "Large-scale silicon photonics integrated circuits for interconnect and telecom applications," 10th International Conference on Group IV Photonics, 2013, pp. 130-131.

Nella figura della pagina precedente si può vedere l'evoluzione di connessione tra chip in cinque diverse generazioni, passando dal collegamento tra fibre ottiche a fili elettrici in rame fino ad una connessione diretta dei links con i chip. Alcune tecniche ottiche non lineari possono consentire funzionalità di elaborazione più potenti che potrebbero svolgere un ruolo significativo nei sistemi di comunicazione ottica. Un'altra caratteristica importante di quest'ambito è quella RF (Radio Frequency). La costruzione di sistemi che combinano l'ingegneria RF, l'optoelettronica e l'ottica sono fondamentali per migliorare visibilmente le prestazioni di sistemi di comunicazione. Tuttavia, nell'ambito delle industrie per le comunicazioni, la diffusione e la proliferazione di segnali ottici attraverso l'utilizzo di integrazione fotonica è il modo più efficace per affrontare i problemi associati al costo di fabbricazione, al consumo di energia e alle prestazioni. La possibilità di realizzare dei chip che sfruttino i segnali ottici è, secondo molti scienziati, il futuro dell'industria delle comunicazioni. Molte tecnologie optoelettroniche vengono tutt'oggi studiate e realizzate per la costruzione di chip che sfruttino segnali ottici per trasferirsi dati e informazioni. Nonostante ciò, tra i principali problemi si ha soprattutto la lunga ricerca sui materiali adatti a questo tipo di tecnologia molto particolare ^[55].

Le reti di telecomunicazione e Datacom richiedono componenti di piccole dimensione e altamente integrati per collegamenti di comunicazioni ottiche ad alte prestazioni di velocità e bassi costi energetici. I circuiti fotonici integrati al silicio sono dei candidati promettenti sia per la realizzazione di interconnessioni ottiche inter e intra chip che di collegamenti di telecomunicazioni basati sulle tecnologie CMOS. I circuiti integrati fotonici in silicio offrono la possibilità di integrazione fotonica su larga scala, con un'elevata scalabilità che permette un'evidente riduzione delle dimensioni. Un altro quesito da risolvere per la comunicazione a lunga distanza sono i problemi riguardanti la polarizzazione della luce; trascurabili per quanto riguarda la connessione tra i singoli chip. I circuiti fotonici integrati per le interconnessioni (ovvero la comunicazione di dati tra chip) vengono utilizzati per ovviare alle scarse velocità di trasmissione e le perdite dovute all'interferenza per frequenze elevate presenti nelle connessioni in rame. Per ovviare ai problemi scritti in precedenza i ricercatori stanno individuando tecnologie che integrino l'elettronica e la fotonica ^[56]. Questo tipo di tecnologia ha un grande potenziale per risolvere il problema del collo di bottiglia dovuto alla larghezza di banda nell'interconnessione inter-chip. Il silicio e il germanio sono i principali materiali utilizzati per la costruzione di dispositivi dinamici e attivi, che richiedono compattezza e velocità di

⁵⁵ C. Minkenberg et al., «Co-packaged datacenter optics: Opportunities and challenges», IET Optoelectronics, n. 15, pp. 77-91, 2020.

⁵⁶ Z. Wang, K. Van Gasse, «Heterogeneous Silicon Photonic Devices for Wireless Communication Systems», 2nd URSI AT-RASC, Gran Canaria, 28 Maggio - 1° giugno 2018.

funzionamento elevata. Alla fine, si dovrà scegliere con cura quali sono i giusti materiali e il metodo di costruzione per comunicazioni efficienti ^[57].

⁵⁷ H. Fukuda *et al.*, "Large-scale silicon photonics integrated circuits for interconnect and telecom applications," *10th International Conference on Group IV Photonics*, 2013, pp. 130-131.

Capitolo 3: Obiettivi e applicazioni

In questo capitolo verranno descritti brevemente gli obiettivi e le prospettive che gli studiosi della Silicon Photonics si sono impegnati a raggiungere negli anni a venire. Successivamente, verranno approfonditi tre peculiari e interessanti applicazioni di questa tecnologia: cosa sono i data center e come funzionano, la tecnologia dei LIDAR e infine possibili tecniche di sanificazione che sfruttano i raggi UV.

3.1 Obiettivi e prospettive della Silicon Photonics

Grazie alle nuove scoperte scientifiche nell'ambito della Silicon Photonics e le numerose ricerche di questa tecnologia, negli ultimi anni sono stati fatti enormi passi avanti. Tra le scoperte più importanti e cruciali per lo sviluppo di questa tecnica ci sono sicuramente la progettazione e costruzione di fotorivelatori ad altissime prestazioni, modulatori ad alta velocità e la scoperta di nuovi sistemi di costruzione per le sorgenti luminose. Per questo motivo, sono stati progettati e fabbricati molto velocemente nuovi dispositivi a scopo puramente commerciale e molte altre applicazioni sono in via di sviluppo. Uno dei più importanti obiettivi è la costruzione di una network ottica sincrona costruita con dei circuiti integrati fotonici in silicio che comunicano tra loro. Un esempio di ciò è la costruzione di un trasmettitore integrato su un substrato SOI che abbia la capacità di inviare e ricevere dati ad una velocità che si avvicini ai 200 Gb/s. Questo tipo di trasmettitore, però, rappresenta solo l'inizio della progettazione e costruzione di un chip ricetrasmittitore che possa lavorare a velocità fino ai terabit al secondo. Altro esempio fondamentale di ricerca e sviluppo nella Silicon Photonics è Luxtera che si sta impegnando sulla ricerca e sviluppo di una rete Ethernet basata sull'utilizzo di circuiti fotonici integrati basati sulle particolari proprietà della tecnologia CMOS ^[58].

Altro tassello fondamentale per il futuro di questa tecnologia è la possibilità di creare dei collegamenti ottici sia chip-to-chip che on-chip. Nonostante la connessione di tipo elettrico, ovvero attraverso dei wire in rame, sia stata fondamentale nello sviluppo dell'elettronica moderna essa presenta evidenti problemi per quanto riguarda l'attenuazione, la resistenza e la selettività della frequenza del segnale sottoforma di elettroni. Inoltre, l'interconnessione in rame presenta un'elevata dissipazione di potenza e quindi consumo energetico elevato, dovuto alle elevate capacità parassite del collegamento in rame, non presente nelle interconnessioni ottiche. Altro punto a favore delle connessioni ottiche nei circuiti fotonici integrati è la capacità dei segnali costituiti da fasci luminosi di rimanere integri, essere più veloci e di potersi propagare

⁵⁸ Zhou Fang e Ce Zhou Zhao, "Recent Progress in Silicon Photonics", *International Scholarly Research Network*, 2012.

per distanze maggiori con minore distorsione e attenuazione. D'altra parte, le guide d'onda che trasportano i segnali ottici sono di dimensioni maggiori e quindi più voluminosi. In questi anni, visti i vantaggi citati, la possibilità di far comunicare i chip con segnali luminosi invece che attraverso gli elettroni ha fatto sì che moltissime imprese concentrassero le loro ricerche in chip basati su circuiti fotonici integrati e componenti fotonici più efficienti. Un esempio importante che può essere citato è quello di Intel Corporation che ha iniziato a studiare un progetto che si basa sulla connessione ottica per la sostituzione dell'interconnessione elettrica con quella ottica in cui la larghezza di banda si aggira tra i 200 Gb/s a 1 Tb/s ^[59].

I benefici della Silicon Photonics possono essere utilizzati anche per scopi biomedici di rilevazione e si prospetta un utilizzo più diffuso anche nel campo medico. Un esempio importante in questo campo è la rilevazione di molecole di DNA grazie alla modifica del campo elettrico e degli indici di rifrazione. Altri ambiti di interesse della Silicon Photonics possono essere la produzione di celle solari più efficienti o dispositivi di illuminazione a basso costo energetico ^[60]. Tra i principali soggetti di ricerca per il futuro di questa tecnologia ci sono sicuramente i laser. Questi componenti fondamentali nei circuiti fotonici integrati sono i più sensibili ai difetti del materiale di cui sono composti. I ricercatori in questi anni si stanno concentrando soprattutto nello sviluppo di tecniche di progettazione e fabbricazione per ridurre al minimo i problemi legati ai difetti del materiale utilizzato. Altro importante tema legato ai circuiti integrati fotonici è la possibilità di aumentare la densità dei componenti per ridurre le dimensioni dei circuiti fotonici. Per questo è necessario concentrare gli sforzi nello studio di strutture quantistiche come quantum dot e wire per poterli integrare al meglio nei circuiti e sfruttare le loro proprietà intrinseche nel miglior modo possibile ^[61].

Altri dispositivi che verranno studiati e progettati a lungo termine che possono sfruttare le tecnologie della Silicon Photonics sono i chip neuromorfici e l'incremento delle prestazioni di un computer quantistico (Figura 19). I primi sono dei processori sviluppati con una struttura ispirata ai neuroni del cervello umano. Questi possono scambiare dei segnali in un modo simile a quello che fanno i neuroni umani costruendo dei collegamenti simili alle sinapsi. Questi chip stanno alla base di software di apprendimento rapido e naturale nell'ambito del machine learning. Inoltre, possono essere utili anche per la creazione di un'intelligenza artificiale con funzionamento che assomigli a quello del cervello umano. La ricerca si sta concentrando soprattutto sulla creazione di un'intelligenza artificiale che, a differenza di quella attuale, sia in

⁵⁹ D. McGrath et al., "Intel is developing optical chip-to-chip interconnects", *Electronic Engineering Times*, vol. 1556, p. 39, 2009.

⁶⁰ Zhou Fang e Ce Zhou Zhao, "Recent Progress in Silicon Photonics", *International Scholarly Research Network*, 2012.

⁶¹ J. C. Norman et al., "Perspective: The future of quantum dot photonic integrated circuits", *APL Photonics* 3, pp. 3-4, 2018.

grado di adattarsi ai problemi e risolverli velocemente senza l'utilizzo di ulteriori input o output. È una sfida molto difficile perché il cervello è estremamente complesso e per la maggior parte ignoto ed è inoltre complicato ricostruire le sinapsi a livello hardware. Nonostante ciò, i ricercatori stanno concentrando le loro energie in questa particolare tecnologia e possono sfruttare la Silicon Photonics per raggiungere dei progressi significativi nella costruzione di questi particolari chip ^[62].

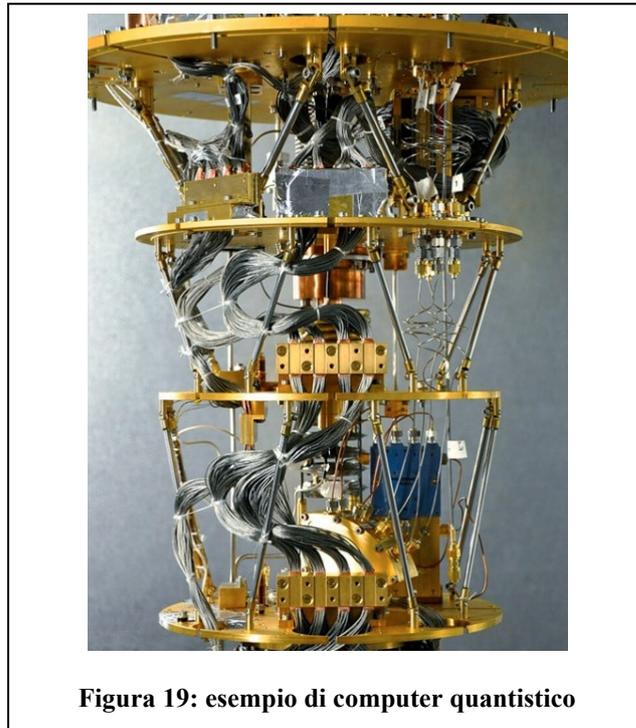
I computer quantistici, invece, sono dei particolari elaboratori che sfruttano le leggi della fisica e della meccanica quantistica per il loro funzionamento ^[63]. I circuiti fotonici integrati possono aiutare nello sviluppo di questi particolari computer migliorando le velocità di interconnessione e sfruttare le nanostrutture utilizzate nella Silicon Photonics viste negli scorsi capitoli. I supercomputer si differenziano da quelli classici perché sfruttano migliaia di CPU e GPU ma spesso non possono risolvere problemi molto complessi di simulazione. Per questo motivo sono stati inventati e costruiti i computer quantistici. Questi computer sono in grado di risolvere problemi ed elaborare grandi moli di dati grazie all'utilizzo di algoritmi quantistici. Quest'ultimi seguono un approccio particolare ai problemi; essi creano degli spazi multidimensionali in cui emergono i modelli che poi vengono elaborati dal computer che collega i punti di dati e ottiene l'informazione voluta. I computer classici e i supercomputer non sono in grado di creare degli spazi computazionali multidimensionali così complicati ^[64]. Col passare del tempo l'hardware dei computer quantistici migliora e di conseguenza anche gli algoritmi potranno risolvere problemi sempre più complessi. I computer quantistici sono delle macchine di piccole dimensioni che richiedono meno energia dei supercomputer. A differenza dei computer classici che sfruttano i bit, i computer quantistici utilizzano i qubit, fondamentali nell'esecuzione degli algoritmi quantistici e utilizzati solo da essi. Tra i principali materiali utilizzati ci sono i superfluidi, particolari fluidi che vengono raffreddati a bassissime temperature per far funzionare correttamente il computer quantistico. Per questo motivo vengono usati i superconduttori, dei conduttori che lavorando a temperature vicino allo zero assoluto presentano elettroni che si muovono senza resistenza. Inoltre, per il controllo del computer vengono utilizzate delle giunzioni Josephson come qubit superconduttori. Per far sì che tutto funzioni vengono sparati dei fotoni a microonde su questi particolari qubit in modo da ottenere una lettura o una modifica delle unità di informazione quantistica efficiente e veloce ^[65].

⁶² D. Ielmini, «Intelligenza artificiale: l'approccio neuromorfico», *Mondo Digitale*, pp. 2-5, 2018.

⁶³ <https://www.altalex.com/documents/news/2022/05/04/crittografia-brevi-riflessioni-compliance-rischi>

⁶⁴ K. Bertels, A. Sarkar et al., "Quantum Computer Architecture Toward Full-Stack Quantum Accelerators", *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, 2020.

⁶⁵ <https://www.ibm.com/it-it/topics/quantum-computing>



3.2 Applicazioni nella Silicon Photonics

In questo secondo paragrafo verranno approfonditi tre particolari applicazioni che sfruttano le tecnologie della Silicon Photonics. Essa sta diventando pervasiva in tutti gli ambiti dell'elettronica e non solo; verranno descritti in particolare l'uso dei circuiti fotonici integrati nei data center, l'utilizzo dei LIDAR e le possibili tecniche di sanificazione che sfruttano i raggi ultravioletti.

3.2.1 Data center

Per data center (Figura 20) si intende l'insieme dei server, data storage e tutte le apparecchiature necessarie per la gestione della comunicazione e dei processi informatici di una qualsiasi azienda. I data center devono funzionare per ventiquattro ore al giorno tutto l'anno per far sì che il sistema informatico e di telecomunicazione dell'azienda che la gestisce funzioni correttamente. Grazie a uno studio fatto dalla Fondazione Politecnico di Milano è stato calcolato che un data center di grandi dimensioni allocato in un edificio specializzato e separato dall'azienda può consumare fino a tremila kilowatt, valore che corrisponde circa al consumo di mille appartamenti in Italia. È stato inoltre calcolato che in Italia l'impiego relativo ai data center corrisponde a circa 1/50 del consumo elettrico nazionale totale. Tuttavia, un'alta percentuale dei consumi di un data center è utilizzata dal sistema di raffreddamento che ha il compito di mantenere la temperatura intorno ai venti gradi centigradi durante tutto l'anno. I cosiddetti costi di raffreddamento diminuiscono per i data center localizzati in territori nordici

dove il clima è più freddo e si sfrutta l'ambiente esterno, soprattutto aria o acqua, per raffreddare le apparecchiature che rischiano di surriscaldarsi velocemente. Nonostante ciò, i costi in generale rimangono comunque alti a causa della gestione e l'applicazione delle comunicazioni tra le apparecchiature interne e con quelle verso l'esterno ^[66].

A causa della continua crescita della domanda di traffico di dati e informazioni, i data center presentano due obiettivi da superare: l'aumento della larghezza di banda e la riduzione del consumo energetico. Altro problema che si è presentato negli ultimi anni è la bassa latenza, dovuta all'aumento del cosiddetto traffico "est-ovest" e alla necessità di consultare più database per una singola ricerca, ad esempio, nel caso di Google. Una prima soluzione a questi problemi è stata quella del ridimensionamento dei componenti e l'aggiunta di hardware a basso costo per la riduzione delle strozzature dei collegamenti tra i dispositivi. Nonostante potesse sembrare una buona soluzione, la crescente domanda di traffico ha dimostrato che sarebbe diventata obsoleta in poco tempo. Perciò, è stato investito molto denaro e tempo nella ricerca di soluzioni che sfruttassero i componenti ottici per la comunicazione e gestione dei data center. Sono state studiate delle architetture tipiche della Silicon Photonics che potessero essere fabbricate in grandi quantità e che presentassero bassi costi di produzione e di utilizzo e che mostrano qualità tipiche che possono soddisfare le esigenze scritte prima ^[67]. Tra le potenzialità più affascinanti dell'utilizzo della silicon photonics ci sono sicuramente i progressi nella stabilizzazione della temperatura dei componenti principali, la possibilità di integrazione ibrida con il silicio e altri materiali particolari, per poter sfruttare al meglio le caratteristiche dei materiali utilizzati e la grande capacità di produzione di componenti tipica della tecnologia CMOS. Altro punto a favore dell'utilizzo della Silicon Photonics nella realizzazione di data center è la riduzione evidente del consumo energetico e la commutazione ad alta velocità. Inoltre, aspetto fondamentale dell'utilizzo di questa tecnologia per la fabbricazione e gestione dei data center è la presenza di simulatori efficienti per le architetture dei componenti che permette ai ricercatori di studiare l'efficienza energetica e di simulare la trasmissione di grandi quantità di dati. Una soluzione ottimale per la costruzione di data center dipende sia dal modello architetturale che dai risultati delle simulazioni del traffico. Un buon data center, inoltre, deve fornire dei buoni compromessi tra risparmio energetico e latenza in tutte le applicazioni che offre ^[68].

⁶⁶ L. Zanotti, «Guida al data center: cos'è, come funziona, classificazione e vantaggi», *ZeroUno*, 2022.

⁶⁷ C. Minkenberg et al., «Co-packaged datacenter optics: Opportunities and challenges», *IET Optoelectronics*, n. 15, pp. 77-91, 2020.

⁶⁸ M. Glick et al., «Silicon photonic interconnection networks for data centers», *IEEE*, 2013.

Per quanto riguarda il traffico dati, Cisco afferma che il 71% del traffico totale è costituito dal traffico interno del data center e un ulteriore 14% costituisce il traffico tra diversi data center. Questo aspetto è un ulteriore motivo per l'investimento di denaro nella progettazione e fabbricazione di collegamenti ottici specializzati nella connessione interna del data center e tra data center e dispositivi esterni. Attualmente, questi collegamenti sono basati su Ethernet e sfruttano interfacce ottiche ed elettriche standardizzate. Con l'aumento delle richieste scritte sopra le attuali connessioni stanno diventando obsolete e stanno lasciando il posto a collegamenti basati su circuiti e collegamenti ottici che sfruttano anche la tecnologia dell'integrazione del silicio. In futuro, l'integrazione dei presenti componenti elettronici con quelli ottici è considerata come il prossimo passo in termini di integrazione, economicità ed efficienza energetica per il miglioramento dei data center ^[69].

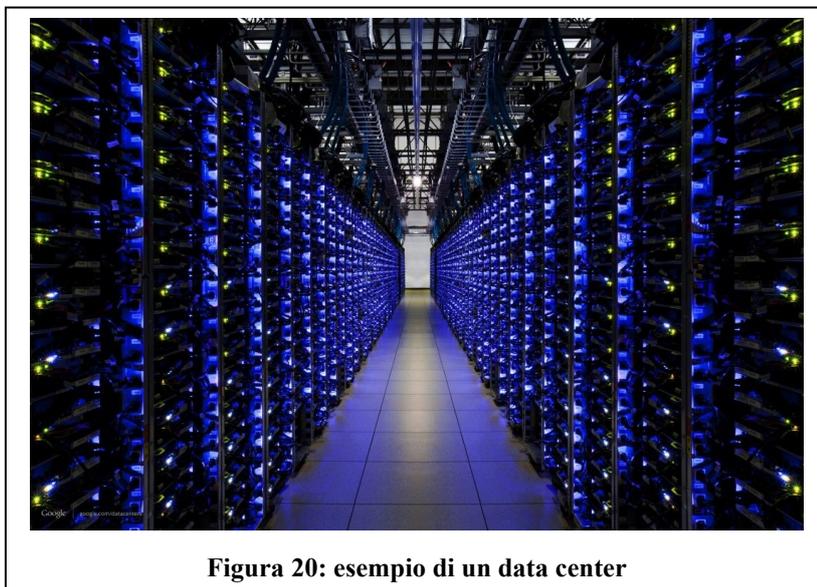


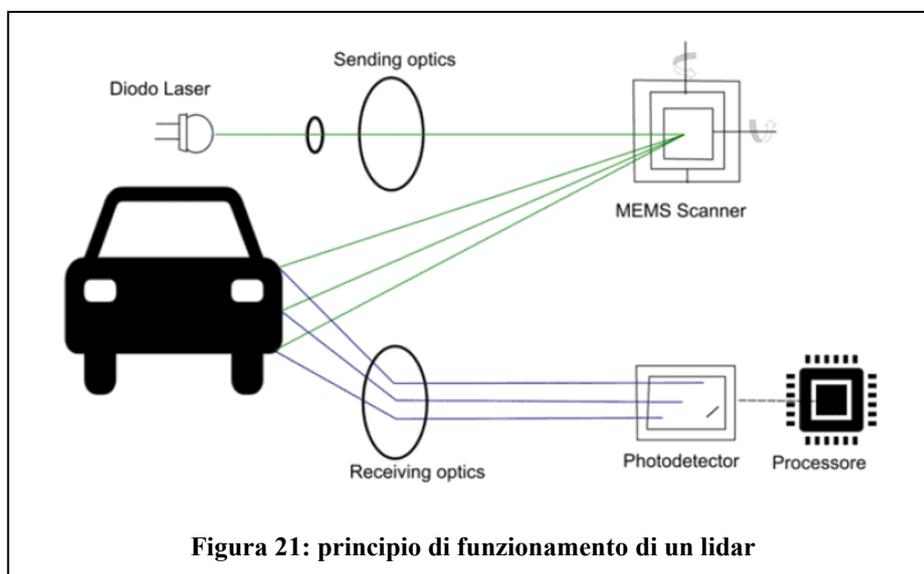
Figura 20: esempio di un data center

3.2.2 LIDAR

Il LIDAR è una tecnologia moderna molto importante nell'ambito del automotive e soprattutto per poter progredire nella guida autonoma. Il termine LIDAR è l'acronimo di Light Detection And Ranging. Essa comprende tutta la tecnologia che sfrutta la luce laser per determinare la distanza degli oggetti attorno a sé e allo stesso tempo restituisce delle informazioni per costruire delle immagini tridimensionali ad alta risoluzione dell'ambiente circostante. Un tipico LIDAR sfrutta molti componenti ottici visti nei capitoli precedenti: laser, fotorilevatori e circuiti ottici integrati particolari che riescono a misurare il tempo di volo analizzando la luce riflessa. Il principio di base (Figura 21) è molto simile a quello dei classici radar che si basano sul principio dell'eco ma sfruttano come segnale degli impulsi luminosi.

⁶⁹ C. Minkenberg et al., «Co-packaged datacenter optics: Opportunities and challenges», *IET Optoelectronics*, n. 15, pp. 77-91, 2020.

Tuttavia, dato che il LIDAR utilizza la luce, che è una radiazione di lunghezza d'onda molto minore rispetto alle microonde utilizzate nei radar, essa consente di mappare con una risoluzione maggiore gli oggetti che devono essere rilevati. Inoltre, questo tipo di tecnologia è molto più sensibile a variazioni della composizione chimica e dei parametri fisici del materiale di cui è costituito il bersaglio ^[70].



Il funzionamento della tecnologia LIDAR è basato su un principio molto semplice. Il LIDAR, conoscendo la velocità di propagazione della luce può calcolare facilmente il tempo impiegato dal raggio luminoso per raggiungere un oggetto e tornare indietro al rilevatore posto vicino alla sorgente di luce. Questo principio è chiamato “calcolo del tempo di volo” ed è fa sì che il LIDAR misuri il tempo necessario ad inviare e ricevere un segnale luminoso impulsivo e tenendo in considerazione la fase e la frequenza del segnale ricevuto e confrontandola con il segnale spedito. Una volta applicato questo principio e utilizzato per calcolare la distanza in più punti si può ottenere la cosiddetta “nuvola di punti”. Elaborando questa nuvola di punti si può ottenere un’immagine tridimensionale digitale elaborata. Inoltre, il LIDAR è in grado di identificare sia gli oggetti fissi che quelli mobili dell’ambiente circostante ^[71].

I sistemi LIDAR sono molto sofisticati e contengono elementi ottici diversi a seconda del tipo di tecnologia e ambito in cui verrà utilizzata. Esistono due tipi principali di funzionamento dei LIDAR: quella a scansione meccanica e quella a immagine fissa. La prima consiste in un sensore che fa ruotare il laser e il ricevitore per poter ottenere una visione più ampia. Oppure possono essere utilizzati dei particolari specchi che riflettono la luce e la indirizzano in diversi punti desiderati. Quella a immagine fissa, invece, non prevede

⁷⁰ www.treccani.it/enciclopedia/lidar

⁷¹ <https://consystem.it/faq/tecnologia-lidar-che-cosa-e-come-funziona/>

componenti di movimento ma funziona come una macchina fotografica che assimila immagini istantanee. Successivamente l'immagine viene elaborata anche grazie al tipo di fascio luminoso che viene ricevuto. Oltre alla lunghezza d'onda del raggio ricevuto, anche la potenza di questo e la sensibilità del rilevatore sono fondamentali per determinare la sensibilità e l'accuratezza di un qualsiasi LIDAR. Nella Figura 22 viene rappresentato un esempio di immagine elaborata da una nuvola di punti ottenuto attraverso la tecnologia di un generico LIDAR.

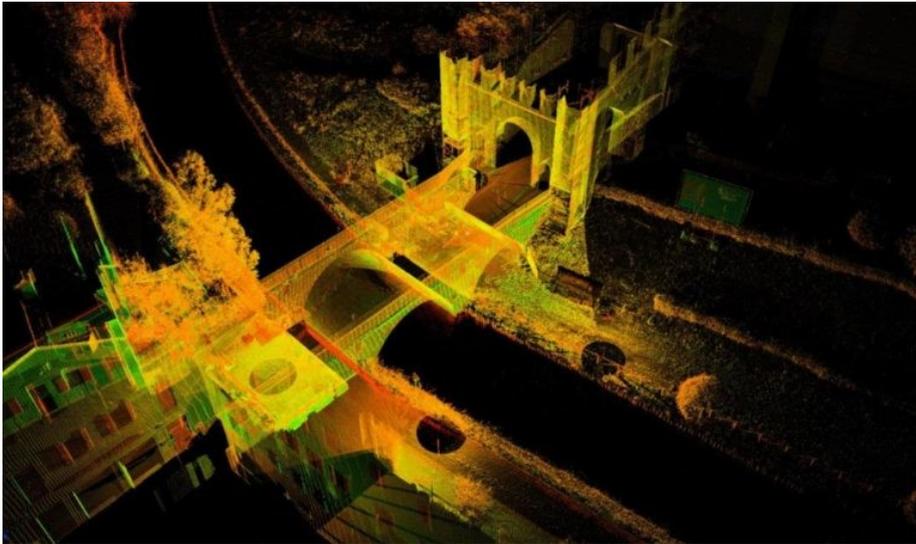


Figura 22: immagine elaborata da una nuvola di punti

Il processo di rilevamento è molto delicato e deve essere fatto accuratamente. Infatti, è necessario che i fotoni rilevati siano solo quelli emessi e non dei fotoni esterni che rappresentano il disturbo. Quindi, bisogna prevenire eventuali interferenze dovute a riflessi generati da altri LIDAR, da emissioni di luce naturale dell'ambiente e di sorgenti luminose artificiali. A seconda della sensibilità necessaria, i rilevatori vengono costruiti utilizzando uno oppure una matrice di elementi fotosensibili che possono comunicare tra loro. La possibilità di utilizzare l'evoluta tecnologia della Silicon Photonics permette ai ricercatori di migliorare sempre di più i LIDAR sia nella sensibilità che nella velocità di elaborazione di dati ^[72].

3.2.3 Raggi UV e sanificazione

Uno dei temi più drammatici degli ultimi anni è quello legato alla pandemia dovuta al Covid-19. Questa malattia ha portato moltissimi scienziati e ricercatori a studiare delle nuove tecnologie che permettessero di eliminare i virus, ridurre la diffusione di Covid-19 o altri patogeni dannosi. Molte soluzioni trovate utilizzano sostanze chimiche sotto forma di liquidi oppure gas che possono contribuire all'eliminazione dei batteri, virus o agenti patogeni ma possono contemporaneamente creare danni irreparabili all'ambiente, risolvendo un problema

⁷² <https://consystem.it/faq/tecnologia-lidar-che-cosa-e-come-funziona/>

attuale ma causando un danno futuro per l'ambiente ⁷³. Per questo, i ricercatori e gli studiosi si sono impegnati sullo sviluppo di tecnologie che permettano di salvaguardare l'ambiente e che siano efficaci per l'eliminazione di molti batteri e virus. In questo tentativo di trovare un buon compromesso agisce la Silicon Photonics; gli scienziati, infatti, hanno dimostrato che le tecnologie che sfruttano i raggi ultravioletti (raggi UV) controllati da speciali apparecchi possono essere fondamentali nell'ambito della sterilizzazione. Nonostante l'improvvisa comparsa del Covid-19 le ampie conoscenze pregresse sia nell'ambito medico che tecnologico hanno permesso di trovare repentinamente molte soluzioni di sanificazione sia di ambienti che oggetti. I ricercatori hanno stabilito l'efficacia dei raggi ultravioletti nell'eliminazione di agenti patogeni in modo efficace senza evidenti danni secondari nocivi per l'ambiente e la fauna. È stato inoltre scoperto che tra i vari tipi di raggi ultravioletti quelli di tipo C hanno una maggiore efficacia e potenza di sterilizzazione di acqua, aria e superfici senza ovviamente danneggiare l'ambiente ^[74]. Molti studi hanno infatti dimostrato che i raggi ultravioletti possono essere importanti in ambiti anche diversi da quello della sanificazione.

Per quanto riguarda la disinfezione dell'acqua, ad esempio, la luce ultravioletta di tipo C ha un ruolo fondamentale. Questi raggi agiscono direttamente sul DNA oppure sul RNA dei microrganismi modificando il patrimonio genetico e impedendogli la possibilità di replicarsi. Nei nostri giorni la disinfezione convenzionale dell'acqua si basa soprattutto sull'utilizzo di lampade a vapori di mercurio ionizzati. Attualmente, la ricerca nella disinfezione si sta concentrando sulla progettazione e fabbricazione di moderni LED UV-C (Figura 23), ovvero dei LED che possono emettere raggi ultravioletti di tipo C, che hanno il compito di sostituire le attuali lampade al mercurio. Questi LED sono realizzati grazie a dei semiconduttori che emettono luce quando vengono alimentati e che presentano anche un risparmio energetico maggiore rispetto alle lampade già presenti nel mercato. La Silicon Photonics può migliorare questa nuova tecnologia perché i ricercatori possono sfruttare le conoscenze sull'integrazione di diversi materiali e la scalabilità dei componenti ottici a loro favore. Inoltre, la possibilità di combinare più LED UV-C per formare un unico sistema è uno degli obiettivi più importanti in quest'ambito e permetterà una maggiore efficienza nella sanificazione dell'acqua. Questi sistemi sono già presenti in commercio ma quelli più efficienti e che siano anche in grado di disinfettare maggiori quantità d'acqua sono ancora in fase di sviluppo ^[75].

⁷³ B. Vairamohan et al, "Innovative UV-C LED Disinfection Systems for Drinking Water Treatment", *IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, 2021.

⁷⁴ L. Alvarado-Miranda et al., "Analysis of UV technologies for disinfection of public areas: a systematic literature review", *IEEE Engineering International Research Conference (EIRCON)*, 2020.

⁷⁵ B. Vairamohan et al, "Innovative UV-C LED Disinfection Systems for Drinking Water Treatment", *IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, 2021.

Sarà inoltre fondamentale costruire delle macchine specializzate nella sanificazione degli ambienti che sfruttino le conoscenze sui raggi ultravioletti di tipo C e della Silicon Photonics. Queste macchine dovranno essere di dimensioni limitate e facilmente trasportabili per poter essere utilizzate anche negli ambienti più stretti e meno accessibili. Altro fattore fondamentale sarà la possibilità di poterle fabbricare in larga scala e che possano essere in grado di sanificare diversi tipi di materiale, soprattutto acqua e aria, e di eliminare molti agenti patogeni come virus, batteri, funghi o parassiti. Inoltre, è necessario che questi presentino un basso livello di consumo energetico e soprattutto che non possano causare di danni di qualunque entità all'ambiente, all'uomo e alla fauna, neanche a lungo termine ^[76].



Figura 23: esempio di lampada a raggi UV di tipo C

⁷⁶ L. Alvarado-Miranda et al., "Analysis of UV technologies for disinfection of public areas: a systematic literature review", *IEEE Engineering International Research Conference (EIRCON)*, 2020.

Capitolo 4: Conclusioni

In questo elaborato sono stati esposti e riassunti gli aspetti più importanti della Silicon Photonics. Questa tecnologia presenta moltissime altre rilevanti caratteristiche e aspetti positivi che non sono state descritte come le modalità di integrazione di altri materiali oppure tutti i software di simulazione per la progettazione di circuiti fotonici integrati. Molte scoperte e studi devono essere ancora fatti ma i ricercatori si trovano a un buon punto nella progettazione e costruzione di circuiti fotonici integrati efficienti, che possano risolvere i problemi legati all'utilizzo dell'elettronica moderna e circuiti basati sul silicio. Tra i vari problemi devono essere sicuramente risolti quelli legati alla ridotta larghezza di banda dei segnali, l'elevato consumo energetico e la grande dimensione dei componenti ottici. I ricercatori, inoltre, si stanno impegnando nella progettazione di dispositivi che riescano a comunicare tra loro sfruttando come segnale degli impulsi luminosi invece che gli elettroni, migliorando così le prestazioni energetiche e non solo. Ciò permetterà un'evoluzione evidente dei sistemi elettronici a livello mondiale e migliorerà le prestazioni di tutte le comunicazioni sia tra dispositivi che tra chip. Lo scopo finale sarà sicuramente quello di poter progettare e fabbricare su larga scala e a basso costo dispositivi fotonici in silicio in diversi ambiti, tra cui le telecomunicazioni, apparecchi per l'elaborazione di immagini e dati ottenuti grazie all'utilizzo dei sensori, convertitori di energia, apparecchiature biomediche ultrasensibili ed efficienti. Il silicio con le sue proprietà sarà fondamentale nella costruzione della prossima generazione di dispositivi fotonici.

Bibliografia

- [1] A. Singh e S. Singh, “«Evolution of CMOS Thecnology Past, Present and Future»”, *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol.5, n.2, 2016.
- [2] G. Lifante, “Integrated Photonics: Fundamentals”, *Wiley*, 2003.
- [3] Winnie N. Ye e Yule Xiong, “Review of silicon photonics: history and recent advances”, *Journal of Modern Optics*, pp. 1299-1320, 2013.
- [4] R. Nagarajan e. M. Smit, “«Photonic integration»”, *IEEE LEOS Newsletter*, pp. 4–10, 2007.
- [5] Jan M. Rabaey, “Circuiti integrati digitali: l’ottica del progettista”, *edizione italiana a cura di A. Cester e A. Gerosa*, 2005.
- [6] J. Bowers, Di Liang et al., “Hybrid Silicon Lasers”, *Laserfest*, 2010.
- [7] W. Bogaerts e L. Chrostowski, “Silicon Photonics Circuit Design: Methods, Tools and Challenges”, *www.lpr-journal.org*, pp. 2-3, 2018.
- [8] J. C. Goldschmidt et al., “Electrical and Optical properties of polycrystalline silicon”, *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Osaka (Giappone), 2003.
- [9] A. Boes et al, “Hybrid and heterogeneous photonic integration”, *APL Photon* 6, 2021.
- [10] Zhou Fang e Ce Zhou Zhao, “Recent Progress in Silicon Photonics”, *International Scholarly Research Network*, 2012.
- [11] P. Bettotti, “Hybrid Materials for Integrated Photonics (review article)”, *Hindawi*, 2014.
- [12] V. I. Klimov, A. Mikhailovsky, S. Xu et al., “Optical gain and stimulated emission in nanocrystal quantum dots”, *Science*, vol. 290, no. 5490, pp. 314–317, 2000.
- [13] M. Humer et al, “Integration, photostability for [...] Si-based photonics at telecom wavelengths”, *Optics Express*, vol. 21, no. 16, 2013.
- [14] K. Kim et al, “A role for graphene in silicon-based semiconductor devices”, *Nature*, vol. 479, no. 7373, 2011.
- [15] H. Zang, A. Szep et al., “ Electro-optic polymer modulators for 1.55 um wavelength [...]”, *Applied Physics Letters*, vol.76, no. 24, pp. 3525-3527, 2000.
- [16] M. A. Cotta, “Quantum dots and Thwi Applications: What Lies Ahead?”, *ACS Applied Nano Materials*, 2020.
- [17] F. Priolo, “Luce dal silicio: Le frontiere della microelettronica”, *Asimmetrie*, vol 12, pp. 40-43, 2011.
- [18] R. Mazzaro, “Nanocristalli di silicio: una piattaforma funzionale per la costruzione di nanostrutture ibride per la conversione di energia”, *Chimica e fotochimica – Università di Bologna*, no. 2, 2017.

- [19] F. Massimino, "Cristalli fotonici", Giugno 2008.
- [20] www.treccani.it/enciclopedia/circuito-integrato [Online].
- [21] J. C. Norman et al., "Perspective: The future of quantum dot photonic integrated circuits", *APL Photonics* 3, pp. 3-4, 2018.
- [22] R. Scarmozzino, A. Gopinath, et al., "Numerical techniques for modeling guided-wave photonic devices", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, no. 1, pp. 150-162, 2000.
- [23] L. Chrostowski, M. Hochberg, "Silicon Photonics Design: From Devices to Systems", *Cambridge University Press*, Cambridge (UK), 2015.
- [24] www.synopsys.com/glossary/what-is-a-photonic-integrated-circuit.html [Online]
- [25] B. Jalali, "Can silicon change photonics?", *Physica Status Solidi*, vol. 205, no. 2, pp. 213–224, 2008.
- [26] www.bianchiottica.it/lenti/filtri-ottici [Online].
- [27] H. Xu e D. Liu, «Silicon photonic filters», *Wiley*, pp. 2252-2253, 2020.
- [28] V. Krutul, M. Paniccia, S. Koehl, «Continuous Silicon Laser», *Intel*, 2005.
- [29] G. T. Reed, G. Mashanovich, F. Y. Gardes, and D. J. Thomson, "Silicon optical modulators", *Nature Photonics*, vol. 4, no. 8, pp. 518–526, 2010.
- [30] L. Carroll et al., «Photonic Packaging: Transforming Silicon Photonic», *applied science*, vol. 6, n. 426, pp. 1-3, 2016.
- [31] Z. Zhang e C. P. Wong, "Recent advances in flip-chip underfill: materials, process, and reliability", *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 27, no. 3, pp. 515-517, 2004.
- [32] D. Gomez et al., «Manufacturing capability of micro-transfer printing», *13th International Conference and Exhibition on Integration Issues of Miniaturized Systems*, Barcellona (Spagna), 2019.
- [33] T. Komljenovic et al., "Photonic Integrated Circuits Using Heterogeneous Integration on Silicon", *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, no. 12, pp. 2246-2257, 2018.
- [34] Z. Wang, K. Van Gasse, «Heterogeneous Silicon Photonic Devices for Wireless Communication Systems», *2nd URSI AT-RASC*, Gran Canaria, 28 Maggio - 1° giugno 2018.
- [35] H. Fukuda et al., "Large-scale silicon photonics integrated circuits for interconnect and telecom applications", *10th International Conference on Group IV Photonics*, 2013, pp. 130-131.
- [36] D. McGrath et al., "Intel is developing optical chip-to-chip interconnects", *Electronic Engineering Times*, vol. 1556, p. 39, 2009.

- [37] D. Ielmini, «Intelligenza artificiale: l'approccio neuromorfico», *Mondo Digitale*, pp. 2-5, 2018.
- [38] <https://www.altalex.com/documents/news/2022/05/04/crittografia-brevi-riflessioni-compliance-rischi>
- [39] K. Bertels, A. Sarkar et al., “Quantum Computer Architecture Toward Full-Stack Quantum Accelerators”, *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, 2020.
- [40] <https://www.ibm.com/it-it/topics/quantum-computing>
- [41] L. Zanotti, «Guida al data center: cos'è, come funziona, classificazione e vantaggi», *ZeroUno*, 2022.
- [42] M. Glick et al, «Silicon photonic interconnection networks for data centers», *IEEE*, 2013.
- [43] C. Minkenberg et al., «Co-packaged datacenter optics: Opportunities and challenges», *IET Optoelectronics*, n. 15, pp. 77-91, 2020.
- [44] www.treccani.it/enciclopedia/lidar [Online].
- [45] <https://consystem.it/faq/tecnologia-lidar-che-cosa-e-come-funziona/> [Online].
- [46] L. Alvarado-Miranda et al., “Analysis of UV technologies for disinfection of public areas: a systematic literature review”, *IEEE Engineering International Research Conference (EIRCON)*, 2020.
- [47] B. Vairamohan et al, “Innovative UV-C LED Disinfection Systems for Drinking Water Treatment”, *IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, 2021.