

Realizzazione di un guida d'onda slot integrabile su silicio per applicazioni di fotonica integrata (progetto ORISHA)

Silicon organic hybrid slot waveguide for photonic integrations (ORISHA project)

Stefano Penna ^{♦□}, Gianpaolo Susanna ^{♦□}, Andrea Reale[□],

Leonardo Mattiello[•], Annamaria Gerardino[○]

- ♦ Direzione generale per le tecnologie delle comunicazioni e la sicurezza informatica - Istituto superiore delle comunicazioni e delle tecnologie dell'informazione (DGTCISI-ISCTI), Ministero dello Sviluppo Economico (MISE)
- Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Università degli studi di Roma Tor Vergata
- Dipartimento di Scienze di Base e Applicate per l'Ingegneria, Sapienza Università di Roma
- Istituto di Fotonica e Nanotecnologie, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IFN)

Sommario

Nel campo della fotonica integrata, il progetto ORISHA (*ORganic Integrated on Silicon Hybrid Amplifier*), coordinato dalla DG TCSI-ISCTI del MISE, si pone lo scopo di sviluppare un dispositivo laser integrato su Silicio per applicazioni sia in ambito ICT (Information and Communications Technology) che extra-ICT. Il progetto si basa sulla tecnologia *Silicon Organic Hybrid*, che sfrutta le proprietà di particolari materiali organici, per la realizzazione di dispositivi ottici integrati direttamente su silicio, consentendo l'implementazione di processi industriali compatibili con la tecnologia CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*), attualmente dominante a livello industriale. Scopo del progetto e del presente lavoro è la possibilità di realizzare una guida d'onda su silicio in cui il mezzo di propagazione ottica di natura organica amorfa ha capacità di generazione di radiazione luminosa, che consente la realizzazione di un amplificatore ottico integrato.

Abstract

Within the integrated photonics field, the ORISHA (*ORganic Integrated on Silicon Hybrid Amplifier*) project aims to develop an infrared emitting laser device directly integrated on Silicon, for both ICT and extra-ICT applications. In particular, the concept of ORISHA bases on characteristics of the SOH (*Silicon Organic Hybrid*) technology, which exploits the unique

properties of specific organic materials on Silicon on Insulator (SOI) substrates to overcome the limitations of traditional inorganic materials. Silicon Photonics technologies lack the possibility of the realization of optical sources integrated directly on silicon, that enables the compatibility to CMOS technology (Complementary Metal Oxide Semiconductor) for industrial implementation. The current contribution reports the results of the design of a SOH slot-waveguide based on an Erbium-doped material as propagation layer, enabling the application for optical amplification in the infrared range of telecommunications.

1 - Introduzione

I circuiti integrati fotonici (PIC, *Photonic Integrated Circuits*) costituiscono un elemento chiave per superare alcuni dei limiti delle attuali tecnologie microelettroniche e tenere il passo della Legge di Moore, secondo la quale la complessità di un microcircuito, che viene misurata con il numero di transistor integrati per singolo chip, raddoppia ogni 18 mesi e quadruplica ogni 3 anni. Sfruttare le tecnologie ed i materiali sviluppati per le comunicazioni ottiche ed integrarli su un substrato condiviso che funga da piattaforma comune, consente di beneficiare della potenziale larghezza di banda delle frequenze fotoniche, nell'ordine dei THz; pertanto, le lunghezze d'onda del vicino infrarosso, raggruppate principalmente nella banda originaria O (1260nm - 1360nm) e nella banda convenzionale C (1530nm-1565nm) sono utilizzate come intervalli di interesse per la trasmissione del segnale all'interno dei PIC. La tecnologia fotonica in silicio [1], meglio nota con la denominazione di *Silicon Photonics*, mira ad implementare tutte le principali funzioni ottiche su di un'unica piattaforma condivisa ed è pertanto interessante dal punto di vista industriale per la compatibilità intrinseca con la tecnologia CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*), che attualmente costituisce la tecnologia dominante nel settore della microelettronica. La tecnologia SOH (*Silicon Organic Hybrid*) è una branca della fotonica integrata su Silicio, meglio nota come *Silicon Photonics*, che sfrutta le proprietà di alcuni materiali organici su substrati SOI (*Silicon on Insulator*) per ottenere funzioni ottiche integrate sul Silicio, come ad esempio la modulazione a frequenze superiori a 100 GHz [2] e l'elettroluminescenza [3]. Le possibilità di lavorazione di questi

materiali direttamente in fase liquida [4] su SOI consente la fabbricazione a basso costo della tecnologia SOH, rendendola più attraente per la produzione su scala industriale, rispetto alla quale la fase di deposizione dei materiali organici rappresenterebbe un processo di back-end, ovvero da realizzarsi a valle della lavorazione del Silicio, consentendo pertanto di utilizzare le linee di produzione e lavorazione CMOS attualmente utilizzate (ed installate) dall'industria dei semiconduttori, senza introdurre costose modifiche o adattamenti.

Tuttavia, la realizzazione di una guida d'onda su silicio è resa intrinsecamente complessa dallo svantaggioso contrasto d'indice di rifrazione che si determina tra i materiali di natura organica, che alle lunghezze d'onda d'interesse per le comunicazioni ottiche hanno valori di indice di rifrazione n tipicamente compresi nell'intervallo tra 1,3 e 1,6, ed il Silicio, che ha valori di n pari a 3,48. Le guide d'onda di tipo slot [5], costituite da due binari (*rail*) di Silicio circondate da materiale dielettrico, rappresentano una soluzione al contrasto d'indice negativo a causa della forte discontinuità di campo elettromagnetico che si determina all'interfaccia Silicio/dielettrico, inducendo all'interno dello slot un miglioramento del campo di un fattore pari a n_{Si} / n_{slot} , in cui n_{Si} è l'indice di rifrazione del silicio ed n_{slot} è l'indice di rifrazione del materiale organico dielettrico. Il miglioramento del campo elettromagnetico comporta il suo confinamento ottico nella porzione di spazio interposta tra i binari di Silicio, che è appunto l'interstizio (*slot*) costituito da materiale dielettrico a minore indice di rifrazione.

Se il materiale dielettrico nella regione dello slot è in grado di emettere radiazione ottica, la guida d'onda ha il potenziale per funzionare come amplificatore ottico, dal momento che la luce è confinata a propagarsi all'interno dello slot ed il mezzo che lo compone è in grado di generare radiazione ottica (mezzo attivo) [6]. L'ottimizzazione della guida d'onda slot richiede quindi come condizione di base il confinamento della luce. Il progetto ORISHA (*ORganic Integrated on Silicon Hybrid Amplifier*), coordinato dalla DGTCSI-ISCTI del MISE con la partecipazione dei partner accademici Sapienza Università di Roma ed Università degli studi di Cagliari e dell'Istituto di Fotonica e Nanotecnologie del CNR (Unità di Roma), è finalizzato alla realizzazione di un dispositivo laser integrato su Silicio, con lo scopo di fungere da componente abilitante per applicazioni sia in ambito tradizionalmente ICT (*Information and*

Communications Technologies) quali 5G, reti di accesso FTTx e computing ad altissima frequenza (THz), sia extra-ICT, come la componentistica per lo spazio. L'ambito d'impiego del dispositivo non è limitato alla sola funzione di sorgente ottica laser, ma alla realizzazione di guide d'onda che fungano da amplificatori integrabili direttamente su Silicio per la compensazione delle perdite di accoppiamento e propagazione dei segnali ottici all'interno di un chip fotonico. Attualmente, infatti, la Silicon Photonics manca di una tecnologia di realizzazione di sorgenti ottiche tali da essere integrate sullo stesso wafer di Silicio con un processo di linea, compatibilmente con gli attuali processi tecnologici di front-end implementati in una linea tradizionale industriale CMOS. Le guide d'onda di tipo slot riportate in questo contributo, basate sulla tecnologia SOH, prevedono l'uso di un materiale di natura organica drogato con Erblio, dalla caratteristica emissione nell'intervallo infrarosso in uso nelle telecomunicazioni. I risultati ottenuti dal progetto ORISHA negli anni passati hanno riguardato la sintesi ed ottimizzazione delle proprietà ottiche dei composti molecolari ad emissione infrarossa [7][8], ad opera dei partner accademici, e la progettazione del reticolo di diffrazione, necessario per la selezione della lunghezza ottica corrispondente alla massima intensità di emissione dei composti molecolari, ad opera della DG TCSI-ISCTI mediante l'uso del software *CAvity Modelling Framework (CAMFR)*, messo gratuitamente a disposizione dall'Università di Ghent [9].

2 – Progettazione e simulazione della guida d'onda slot

Al fine di garantire una possibilità di amplificazione ottica del dispositivo, è necessario assicurare la corretta distribuzione del campo ottico all'interno della zona attiva della guida d'onda, ossia della zona composta di materiale in grado di emettere radiazione ottica, per poi verificarne la propagazione ottica guidata. Le strutture a guida d'onda slot consentono di ottenere un campo ottico distribuito all'interno della zona attiva, costituita dallo slot, che riempita con materiale molecolare ad emissione infrarossa abilita il guadagno ottico sulla radiazione che si propaga all'interno dello slot.

In tal senso, l'ottimizzazione del confinamento del campo ottico nella regione di slot è legata alla massimizzazione del fattore di confinamento ottico (*gamma factor*), espresso dalla seguente Equazione 1.

Equazione 1. Fattore di confinamento ottico.

$$\gamma = \frac{\iint_{D_{int}} |E|^2 dx dy}{\iint_{D_{tot}} |E|^2 dx dy}$$

dove D_{int} è il dominio spaziale della regione di slot, costituita da materiale organico, e D_{tot} è l'intero dominio del modello. Pertanto, l'ottimizzazione del fattore di confinamento ottico dipende dalle caratteristiche geometriche del dispositivo e dall'indice di rifrazione (n) dei materiali coinvolti, come mostrato nel layout in Figura 1.

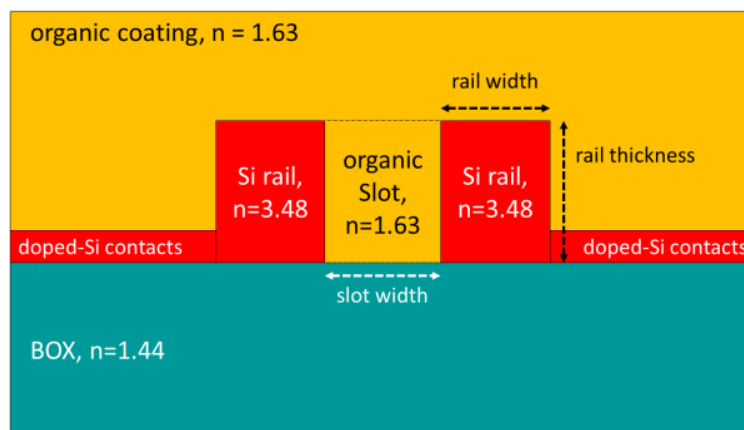


Figura 1 – Parametri geometrici e relativi indici di rifrazione dei materiali utilizzati per il dimensionamento del dispositivo

L'ottimizzazione del confinamento ottico è stata eseguita mediante simulazioni sul tool elettromagnetico Wave Optics di Comsol Multiphysics, derivando i parametri geometrici di larghezza dei binari (*rail*) e dello slot sono stati utilizzati per lo scansione parametrica, considerando spessore del binario imposto dalle caratteristiche dei substrati SOI disponibili sul mercato (220nm, 260nm, 340nm e 400nm), con particolare riferimento allo spessore SOI di 220nm che è il più utilizzato sia nella ricerca che nello sviluppo industriale. Per derivare gli

indici di rifrazione dei materiali, la libreria presente all'interno dell'ambiente Comsol ha fornito i valori di indice di rifrazione del silicio e dell'ossido di silicio sottostante (BOX, Buried OXide), mentre l'indice di rifrazione del materiale organico drogato con Erblio è stato derivato mediante ellissometria nell'intervallo dell'infrarosso (800 nm – 1700 nm), risultando pari a $n=1,63$ in corrispondenza di una lunghezza d'onda pari a 1550nm.

I risultati dello *sweep* parametrico effettuato sulle caratteristiche geometriche sono mostrati in Figura 2 e sono relativi allo spessore SOI di 340 nm.

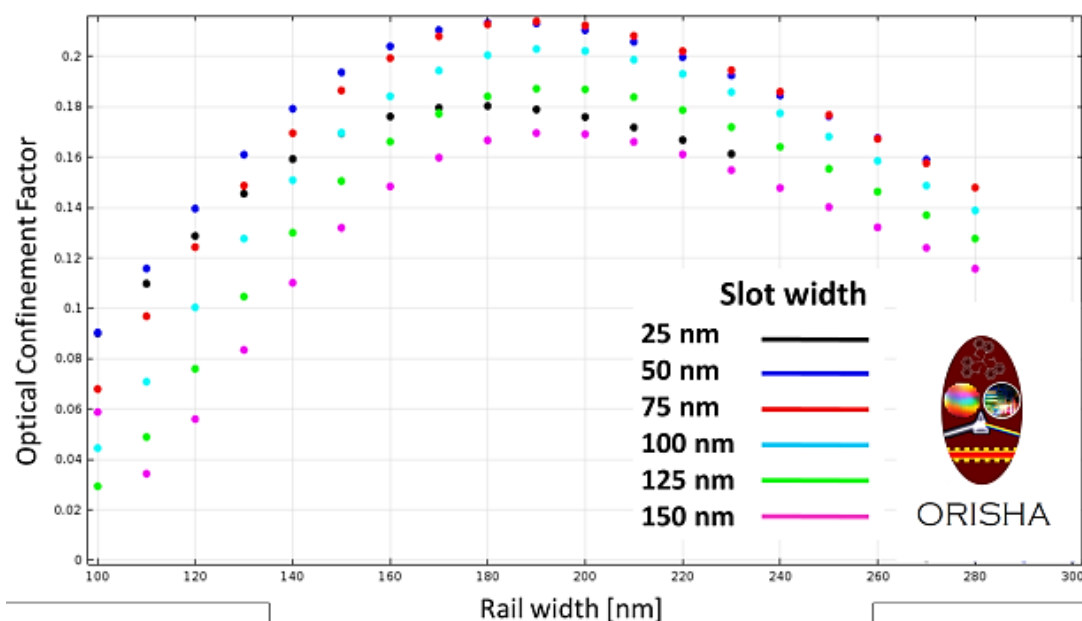


Figura 2 – Ottimizzazione del fattore di confinamento ottico al variare della distanza tra i binari e dimensione slot in combinazione con binari e spessore di slot impostati a 340 nm

Come mostrato in Figura 3, il massimo confinamento del campo ottico nello slot si ottiene con la larghezza di 50nm e una larghezza del binario di 190nm. La distribuzione del campo ottico relativa alla condizione di massimo confinamento è mostrata in Figura 4, nella quale è ben visibile la concentrazione della massima intensità ottica (zona rossa) all'interno dello slot.

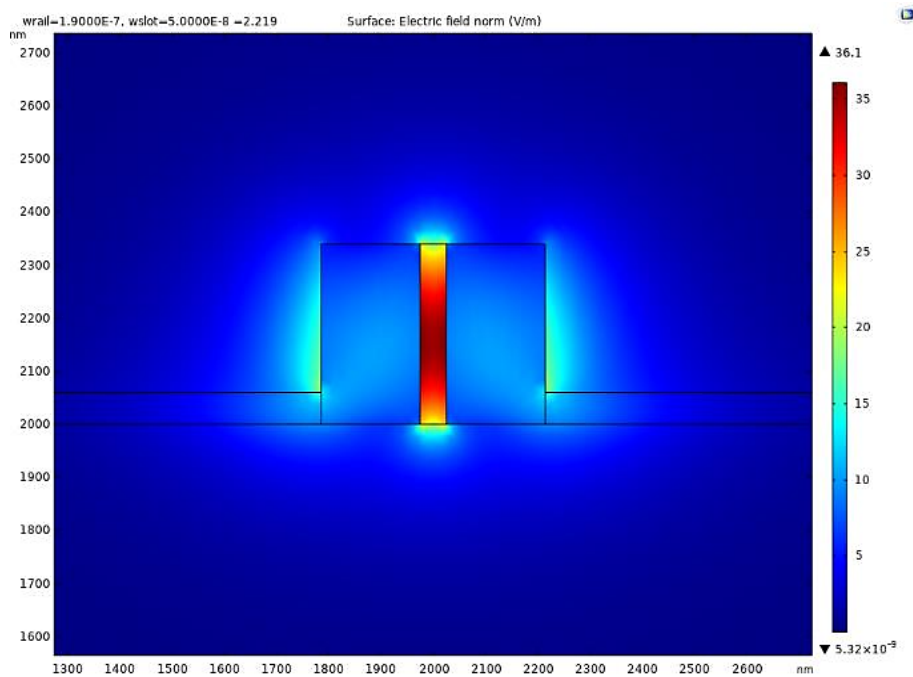


Figura 3 – Distribuzione del campo ottico nella guida d'onda in corrispondenza di massimo confinamento ottico all'interno dello slot

La tabella 1 di seguito riportata riassume i valori di massimo confinamento ottico nello slot per ciascuno dei quattro valori di spessore SOI utilizzati per le simulazioni. È evidente, come prevedibile, che l'aumento dello spessore di SOI porta a uno slot più spesso, determinando una porzione maggiore di campo ottico confinato tra i due binari di Silicio.

Tabella 1. Ottimizzazione del fattore di confinamento ottico rispetto agli spessori di wafer *Silicon on Insulator* (SOI) disponibili sul mercato.

Spessore SOI (nm)	Confinamento ottico massimo (%)	Larghezza slot (nm)	Larghezza binari (nm)
220	13.74	50	210
260	16.70	50	200
340	21.33	50	190
400	24.25	75	180

3 – Sperimentazione e sviluppi futuri

Sulla base dei risultati ottenuti dall'ottimizzazione software, presso i laboratori dell'Istituto di fotonica e nanotecnologie del CNR-IFN sono stati realizzati i primi campioni di guide d'onda slot su substrato SOI, le cui immagini al microscopio a scansione elettronica (SEM) sono mostrate in Figura 4.

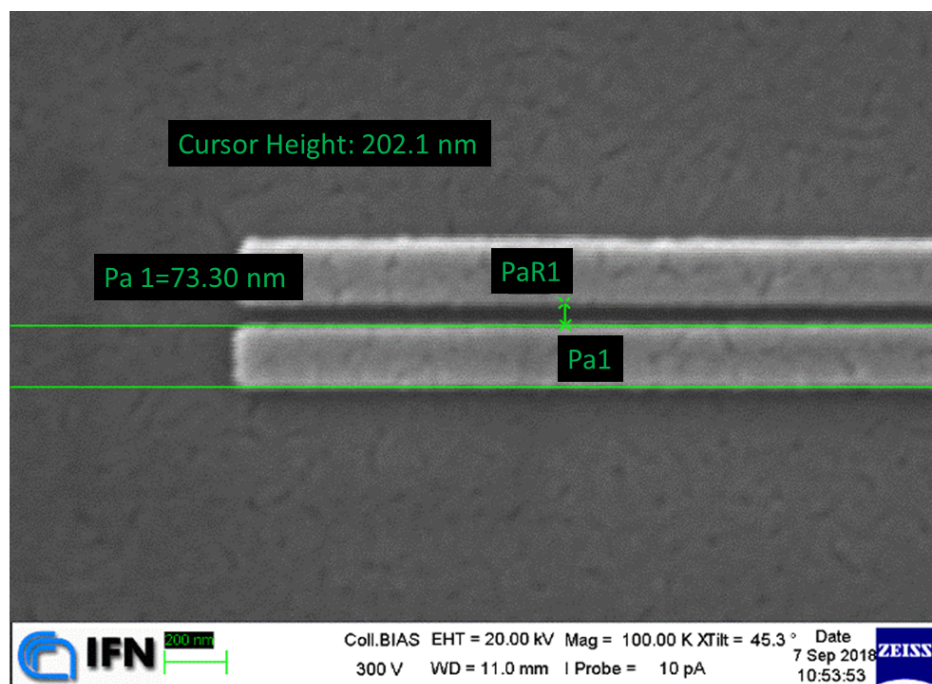


Figura 4 – Immagine al microscopio a scansione elettronica (SEM) di una guida d'onda slot realizzata presso i laboratori del CNR-IFN di Roma basata sulle caratteristiche derivate dall'ottimizzazione tramite software Comsol Multiphysics (larghezza di slot=75nm, larghezza dei rail=200nm, spessore dei rail=260 nm).

Per la valutazione delle prestazioni dei campioni di test, parallelamente al processo di fabbricazione, la DG TCSI-ISCTI del MISE si è dotata della strumentazione necessaria per allestire un set-up di caratterizzazione ottica, mostrato in figura 5.

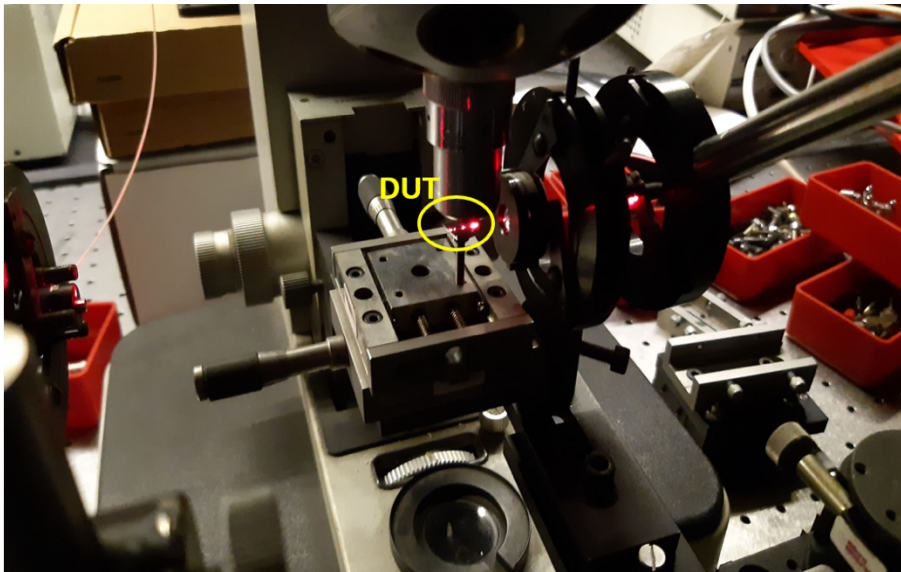


Figura 5 – Foto d'insieme del set-up di caratterizzazione ottica della guida d'onda slot. Nel cerchio in giallo è evidenziata la posizione del campione di test DUT (*Device under testing*).

Il sistema di caratterizzazione prevede un allineamento micrometrico sulla focale del microscopio attraverso il quale è possibile posizionare il campione da misurare; l'allineamento è agevolato dall'uso di un microscopio mediante invio di radiazione visibile di guida. La radiazione ottica emessa dal campione di test viene raccolta e focalizzata in fibra ottica per consentirne la misurazione dello spettro ottico e dell'intensità di emissione tramite un OSA (*Optical Spectrum Analyzer*).

Parallelamente al completamento della caratterizzazione dei dispositivi, gli sviluppi futuri prenderanno in considerazione l'ottimizzazione della propagazione ottica lungo le guide d'onda slot progettate, per poi prevedere la progettazione degli stadi funzionali di accoppiamento ottico da una fibra ottica di lancio al dispositivo, come l'adattatore fibra-strip a punta invertita (*inverted taper*) [10], ed il successivo convertitore ottico modale strip-slot [11][12][13]. Per l'ottimizzazione di questi stadi funzionali sarà utilizzato il metodo di Beam Envelop (BEM) incluso nel modulo software Wave Optics dell'ambiente Comsol Multiphysics.

4 – Bibliografia

- [1] - Pavesi, L., Lockwood, D., "Silicon Photonics III", *Topics in Applied Physics*, 397-417, 2016
- [2] - Leuthold, J., Koos, C., *et al.*, "Silicon-Organic Hybrid Electro- Optical Devices", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Elec.*, Vol. 19, 3401413-1-13, 2013
- [3] - Curry, R.J., Gillin, W.P., "Silicon-based organic light-emitting diode operating at a wavelength of 1.5 μm ", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 77, 2271-2273, 2000
- [4] - Penna, S., Reale, A., *et al.*, "Near-infrared photoluminescence of erbium tris (8-hydroxyquinoline) spin-coated thin films induced by low coherence light sources", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 91, 021106-1-3, 2007
- [5] - Almeida, V.R., Xu, Q., *et al.*, "Guiding and confining light in void nanostructure", *Opt. Lett.*, Vol. 29, 1209-1211, 2004
- [6] - Serna, S., Zhang, W., "Potential for large optical gain improvement of erbium-doped slot waveguide amplifiers in silicon photonics", *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 31, 2021-2028, 2014
- [7] - Artizzu, F. Quochi, F., *et al.*, "Multi-NIR-Emissive Materials based on Heterolanthanide Molecular Assemblies", *MRS Advances*, Vol. 1, 2683-2688, 2016
- [8] - Penna, S., Di Bartolo, S., *et al.*, "Infrared emitting Erbium-doped quinolines for Silicon Organic Hybridtechnology", *2016 18th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2016
- [9] - disponibile gratuitamente al link: <http://camfr.sourceforge.net>
- [10] - Bogaerts, W., Vermeulen, D., "Off-chip coupling", *Handbook of Silicon Photonics*, 97-138, 2013
- [11] - Liu, Y., Baehr-Jones, T., *et al.*, "Efficient strip to strip-loaded slot mode converter in silicon-on-insulator", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 23, 1496-1498, 2011
- [12] - Palmer, R., Alloatti, L., *et al.*, "Low-Loss Silicon Strip-to-Slot Mode Converters", *IEEE Photonics Journal*, Vol. 5, 2200409-2200409, 2013
- [13] - Wang, Z., Zhu, N., *et al.*, "Ultracompact low-loss coupler between strip and slot waveguides" *Optics Letters*, Vol. 34, 1498-1500, 2009