

**Stefano Penna,**  
**Luigi Salamandra,**  
**Gianpaolo Susanna,**  
 - Istituto Superiore delle  
 Comunicazioni e delle  
 Tecnologie  
 dell'Informazione (ISCOM)  
 - Università degli studi di  
 Roma Tor Vergata,  
 Dipartimento di Ingegneria  
 Elettronica

**Emanuele Natri,**  
**Anna Stefania Michelangeli**  
 Istituto Superiore delle  
 Comunicazioni e delle  
 Tecnologie  
 dell'Informazione (ISCOM)

**Flavia Artizzu,**  
**Maria Francesca Casula**  
 Università di Cagliari,  
 Dipartimento di Scienze  
 Chimiche e Geologiche

**Leonardo Mattiello**  
 Dipartimento di Scienze di  
 Base e Applicate per  
 l'Ingegneria - Sapienza  
 Università di Roma

**Annamaria Gerardino**  
 Consiglio Nazionale delle  
 Ricerche - Istituto di  
 Fotonica e Nanotecnologie

## Il progetto ORISHA: un laser organico integrato su Silicio

### *The ORISHA project: a Silicon-organic hybrid laser*

*Sommario: La recente applicazione dei materiali molecolari alla fotonica integrata ha portato alla definizione della tecnologia ibrida Silicio-organica (Silicon Organic Hybrid, SOH). In quest'ambito, i composti molecolari drogati con lantanidi, caratterizzati da emissione infrarossa nell'intervallo di lunghezze ottiche più in uso nelle telecomunicazioni, sono promettenti per la fabbricazione di sorgenti ottiche in banda C che possano essere facilmente integrate su substrato di Silicio, ponendo rimedio all'attuale mancanza di una soluzione tecnologica per l'integrazione della funzione di generazione di luce su chip di Silicio che sia compatibili con il trasferimento su processi industriali di produzione di volume. In quest'ambito, i composti molecolari noti come Erblio-chinoline hanno dimostrato emissione IR efficiente in tutta la banda C quando depositate su substrato di Silicio. Inoltre, i recenti sforzi per rendere tali materiali solubili, con conseguente lavorazione con tecniche affini alla stampa a getto d'inchiostro, lasciano intravedere la possibilità di realizzazione di guide d'onda attive in tecnologia SOH a basso costo. Il presente contributo riporta gli obiettivi e i risultati preliminari alla base del progetto ORISHA (ORganic Integrated on Silicon Hybrid Amplifier), coordinato dall'ISCOM con la collaborazione dei gruppi di ricerca dell'Università di Cagliari, di Roma-Sapienza e dell'Istituto di Fotonica e Nanotecnologie del CNR. Il progetto, che mira alla realizzazione di un laser integrato su Silicio basato sull'emissione nelle bande O, S, C ed L delle comunicazioni ottiche da materiali molecolari drogati con lantanidi, si compone di una serie di sviluppi tecnologici in ambito multidisciplinare che spaziano dalla sintesi chimica di emettitori IR ad alta efficienza, alla progettazione delle nanostrutture in grado di confinare la luce al loro interno fino alla realizzazione dei reticoli di diffrazione nanometrici con tecniche di fabbricazione tipiche della fonderia di semiconduttori.*

*Abstract: The emerging application of organic materials to the integrated photonics led to the definition of the Silicon Organic Hybrid (SOH) technology. Erbium-doped organic IR emitters are promising materials for the processing of C-band optical sources that can be easily integrated in a silicon photonic chip. In particular, erbium quinolines demonstrated efficient IR emission in the full C-band when deposited as thin film on silicon. Moreover, the recent results concerning with the enhancement of the erbium doped organic materials for being solution processable led to the potential processing of low cost SOH active*

*waveguides. The contribution reports the targets and the preliminary results of the ORISHA project (ORganic Integrated-on-Silicon Hybrid Amplifier), led by ISCOM with the collaboration of the research groups of the Universities of Cagliari and Rome-Sapienza and the Institut of Photonics and Nanotechnologies of the Italian National Research Council (CNR). The project aims at the design and processing of a SOH active slot waveguide on SOI based on enhanced erbium doped quinolines as active waveguiding layer. In particular, the authors will present the recent results from the IR luminescence-enhanced erbium-doped quinolines, the design and processing of the active slot waveguide on SOI platform for optimal optical confinement and single mode propagation based on erbium doped quinolines.*

## 1. Introduzione

L'attuale panorama industriale legato alle tecnologie delle comunicazioni e dell'informazione (ICT) è dominato da due fenomeni principali: da un lato la pressante e costante richiesta di velocità di connessione alla rete legata alla diffusione dei servizi a banda ultra-larga e alla loro penetrazione nel mercato, dall'altro le limitazioni sempre più evidenti legate alla banda fornita dalle moderne architetture hardware basate su componenti a semiconduttori dominati dal Silicio, rispetto al quale l'introduzione di qualunque processo di innovazione tecnologica pesa sul mondo industriale per le onerose necessità di investimento, in primis sulle linee di produzione. Per porre rimedio al collo di bottiglia di banda e di prestazioni che sta limitando progressivamente tutti gli aspetti hardware interessati dall'ICT, come nei casi esemplificativi delle reti di accesso, dei dispositivi di comunicazione mobile o dei data center, è necessario adottare nuove tecnologie di circuiti integrati (chip) con un passaggio sempre più stringente dal dominio elettronico al dominio fotonico. Tale dominio è intrinsecamente caratterizzato da una maggiore banda disponibile, che potenzialmente raggiunge le centinaia di Terahertz, un incremento di quattro ordini di grandezza rispetto alla banda degli attuali componenti elettronici che è limitata a valori di punta nell'ordine delle decine di Gigahertz [1-3]. Il passaggio dai chip elettronici ai chip fotonici (anche indicati con l'acronimo PIC, Photonic Integrated Circuit) prevede che i segnali d'informazione che vengono elaborati e trasferiti tra i componenti presenti all'interno dei sistemi di comunicazione, intesi sia come semplici dispositivi terminali di comunicazione che come complessi apparati di rete, siano segnali ottici del tutto affini ai segnali che viaggiano nelle infrastrutture di rete di telecomunicazioni in fibra ottica [1]. Questo passaggio introduce notevoli differenze e problematiche, su tutto il diverso mezzo sul quale si propaga il segnale, che passa da un conduttore elettrico tipicamente metallico, caratterizzato da dimensioni nell'ordine delle decine di nanometri ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ) e da fenomeni di perdite legate principalmente ad effetti capacitivi e resistivi, ad una guida d'onda ottica, caratterizzata da dimensioni forzatamente imposte dalle

lunghezze d'onda della radiazione propagante, nell'ordine di un micrometro ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ ), e da perdite ottiche di attenuazione e di accoppiamento. E' quindi evidente come l'intera tecnologia alla base di questa transizione introduca nuovi fenomeni fisici di base, e che di conseguenza porti all'introduzione di nuovi materiali, caratterizzati da nuovi processi tecnologici di lavorazione. In aggiunta, si pone il problema dell'integrazione su di un'unica piattaforma delle principali funzioni, come generazione, modulazione, selezione spettrale e ricezione, che nel mondo elettronico sono tutte ottenute con tecnologia CMOS, basata su substrati di Silicio, mentre al contrario nel corrispettivo fotonico non si dispone ancora di una tecnologia altrettanto dominante che permetta di realizzare le principali funzioni con un unico materiale [1-4]. Si delinea pertanto un panorama di processi eterogenei dominati da materiali e tecniche di lavorazione diverse. Adottando il punto di vista del produttore di componenti a semiconduttore, è d'obbligo considerare che l'introduzione di nuovi processi tecnologici in una linea di fabbricazione, con capacità di lavorazione nell'ordine di 10.000 wafer di Silicio a settimana, porti costi di investimento nell'ordine delle centinaia di milioni di euro, che costituiscono un'ovvia barriera di entrata per l'adozione di nuove tecnologie e la cui sostenibilità economica è assicurata dagli alti volumi di produzione e di mercato che consentono di ripartire i costi di investimento iniziale sugli impianti e sullo sviluppo dei processi [5]. Per evitare che gli interi oneri di sviluppo di nuove tecnologie fotoniche integrate gravino interamente sul mondo dell'impresa privata, con conseguente procrastinarsi dei tempi di sviluppo ed immissione sul mercato, si è recentemente diffuso un modello di compartecipazione pubblica - privata, nella cui adozione l'Europa ricopre un indiscusso ruolo di leadership e che ha visto la realizzazione di piattaforme tecnologiche costituite dalle principali università e industrie microelettroniche europee e finanziate principalmente con fondi comunitari provenienti dai diversi programmi quadro [6][7]. Le suddette piattaforme si differenziano per la tipologia di materiali impiegati e per le prestazioni dei dispositivi realizzabili [8]

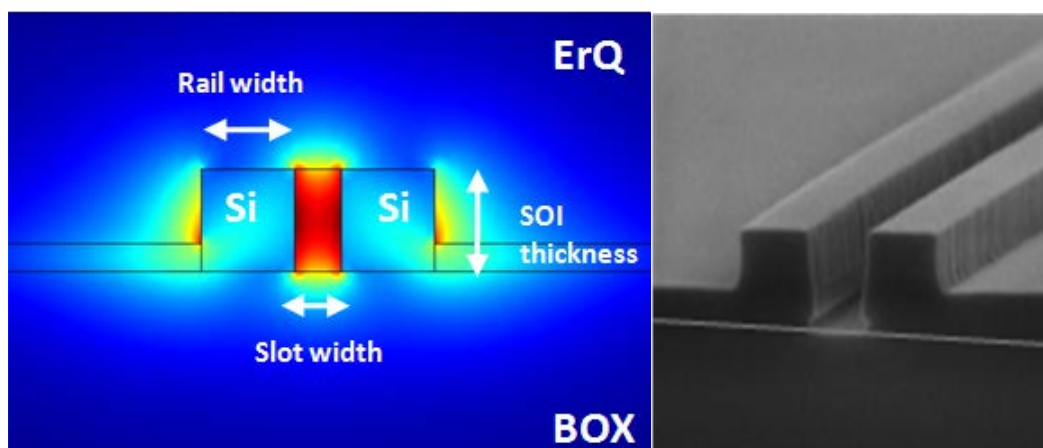
## **2. La tecnologia ibrida Silicio-organica**

Come anticipato, esistono differenti tipologie di piattaforme di integrazione fotonica, ognuna con una sua peculiarità che la associa a specifiche applicazioni. Tale varietà di tecnologie disponibili riflette la principale differenza tra l'elettronica integrata e la fotonica integrata, per l'assenza in quest'ultima di un materiale unico di base come il Silicio che funge da piattaforma tecnologica di base. La fotonica integrata vede infatti un'eterogeneità di materiali impiegati per la realizzazione delle diverse funzionalità ottiche: semiconduttori elementari come il Silicio e il Germanio, semiconduttori composti, come il Fosforo d'Indio (InP) e l'Arseniuro di Gallio (GaAs), materiali

dielettrici come il Diossido di Silicio ( $\text{SiO}_2$ ) o i Nitruri di Silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_x$ ), polimeri e cristalli non lineari come il Niobato di Litio (16). Questa eterogeneità di materiali è la principale barriera allo sviluppo dei PIC, i quali richiedono che le funzioni ottiche implementate con i suddetti materiali siano condensate su un unico substrato, possibilmente minimizzando l'ingombro su aree di pochi centimetri quadrati. Il processo di implementazione di più funzioni su un substrato condiviso è il cuore del concetto di integrazione e rappresenta per molti materiali un ostacolo che ne pregiudica l'impiego. Per questo motivo si sono affermate nel tempo tre tecnologie principali [9-11], che si differenziano per il tipo di piattaforma di materiale che viene adottata [8]. Tra queste la Silicon Photonics si basa sull'impiego del Silicon on Insulator (SOI), ovvero un substrato in cui un sottile strato di Silicio, tipicamente di spessore massimo nell'ordine di qualche micrometro, è posizionato sopra uno strato di Ossido di Silicio detto BOX (Buried Oxide). L'elevato contrasto d'indice di rifrazione tra i due materiali è tipicamente intorno al 40% e consente di realizzare guide d'onda ad alta efficienza e dimensioni ridotte oltre ad ottenere campi ottici estremamente confinati, che permettono di ottenere dispositivi con minore fattore di forma. Consentono inoltre di ridurre le dimensioni caratteristiche delle guide al di sotto di  $1 \mu\text{m}$ , a fronte tuttavia di un incremento delle perdite ottiche. Tra le diverse piattaforme tecnologiche di integrazione fotonica la Silicon Photonics è quella che ha attratto maggiore interesse industriale vista l'intrinseca compatibilità con i processi tecnologici CMOS basati anch'essi su Silicio [1][4-5], che da un lato comporta un minore stravolgimento dei processi e degli impianti già in uso nell'industria dei semiconduttori, dall'altro permette una più facile integrazione con l'elettronica CMOS di controllo, definendo un chip optoelettronico. Il Silicio è tuttavia un materiale a gap indiretto, caratteristica che ne limita la possibilità di generare luce tramite eccitazione diretta e che di conseguenza limita al momento la Silicon Photonics alla realizzazione di dispositivi passivi, ovvero dispositivi in cui mancano le funzioni attive di emissione della radiazione ottica (generazione ed amplificazione). Per sopperire a questa mancanza diverse soluzioni sono attualmente oggetto di ricerca, dal drogaggio diretto del Silicio con ioni lantanidi ad emissione IR [12-13] a soluzioni ibride che considerano materiali di diversa natura [8][11]. In quest'ultimo approccio si può includere l'emergente tecnologia ibrida Silicio-organica (SOH, Silicon Organic Hybrid) [14-15] che si basa su materiali di origine organica come monomeri o polimeri, la cui natura amorfa non pone limiti di crescita su Silicio legati alla condizione di lattice matching. La tecnologia SOH ha diverse peculiarità vantaggiose che ne suggeriscono l'impiego, soprattutto in ambiti dove

soluzioni alternative si rivelano essere ancora poco percorribili dal punto di vista della fattibilità economica. In primo luogo, la tecnologia SOH si basa su materiali risultanti da sintesi chimica e quindi con proprietà modificabili attraverso processi di sintesi mirati (*molecular tailoring*). Al riguardo l'esempio più noto di dispositivo SOH è rappresentato dai modulatori ottici polimerici [14], nei quali l'ottimizzazione dei polimeri elettro-ottici ha consentito di raggiungere prestazioni di molto superiori agli analoghi di natura cristallina [16], con frequenze di modulazione superiori a 100 GHz [17] e tensioni di inversione inferiori a 1 V [18], dimostrando trasmissione con bitrate a valori record da singolo dispositivo di 160 Gb/s [19]. Un ulteriore vantaggio della tecnologia SOH è la sua completa compatibilità con il processo di fabbricazione CMOS. Configurandosi infatti come un processo di back-end che si pone al termine del tipico flusso di processo CMOS, il processo di deposizione degli organici può essere integrato nella linea di processo senza indurre variazioni significative negli impianti di produzione attualmente presenti [14]. In aggiunta, i materiali organici si prestano alla lavorazione con tecniche in fase liquida [20] affini alla stampa a getto d'inchiostro, che ha costi caratteristici trascurabili rispetto agli altri processi inseriti in una tipica linea di produzione di fonderia. Si è già accennato alla natura amorfa dei materiali organici, che è alla base della possibilità di integrazione con i substrati SOI dal momento che non sussistono problematiche di uguaglianza della costante reticolare dei cristalli, a fronte però di una minore mobilità elettronica delle cariche che si muovono all'interno degli strati sottili di materiali organici. Se nei dispositivi fotonici in Silicio più tradizionali il confinamento ottico della luce è reso possibile dal citato contrasto d'indice di rifrazione tra il Silicio, che funge da mezzo guidante, ed il Diossido di Silicio, nella tecnologia SOH la funzione di mezzo guidante può essere svolta dai materiali organici, il cui contrasto d'indice di rifrazione con il Silicio ( $n=3.48$ ) è però penalizzante, dal momento che la maggior parte dei materiali molecolari ha indice di rifrazione con valori compresi tra 1.5 e 2, caratteristica che rende impossibile realizzare una guida d'onda di canale con core organico adottando le strutture di guida d'onda più tradizionali (*rib, strip, buried*). Per questo motivo la tecnologia SOH è legata a doppio filo ad una struttura di guida d'onda introdotta nel 2004 [21], detta *slot*, costituita da due "binari" di Silicio circondati da uno o più mezzi dielettrici, nella quale la forte discontinuità di campo elettrico presente intorno all'interstizio (slot) dielettrico tra i due "binari" porta ad una forte concentrazione del campo ottico proprio all'interno dello slot. Se si considera una struttura come quella mostrata in figura 1, nella quale il mezzo dielettrico è costituito da un

film di materiale organico che ricopre i due binari in Silicio, includendo lo slot, la concentrazione del campo ottico all'interno dello stesso slot riproduce di fatto le condizioni di una guida d'onda di canale con nucleo organico, consentendo di accoppiare la radiazione ottica propagante alle proprietà specifiche del materiale organico che viene attraversato. Le guide d'onda slot hanno dimensioni trasversali inferiori al micrometro, inclusi i binari, permettendo quindi la realizzazione di dispositivi con basso fattore di forma. In termini numerici, la struttura a slot induce un miglioramento del campo nello slot di un fattore pari al rapporto delle rispettive costanti dielettriche dei materiali, ovvero al quadrato degli indici di rifrazione,  $n_{Si}^2/n_{slot}^2$ , con valori risultanti inclusi tipicamente tra 4 e 6, come si può osservare nel profilo di campo ottico mostrato in figura 1, che portano a fattori di confinamento della radiazione ottica che superano il 30%.



*Figura 1. Distribuzione del campo ottico (sinistra) in una struttura di guida d'onda slot su substrato SOI (a destra nella foto SEM) con strato superiore costituito dal composto molecolare Erbiodrossichinolina (ErQ). Si osserva la forte concentrazione del campo all'interno dello slot dielettrico.*

### 3. Il progetto ORISHA

Le caratteristiche peculiari della tecnologia SOH, dalle quali emerge la potenzialità di utilizzare materiali molecolari foto-attivi per la realizzazione di amplificatori in guida integrati su Silicio, costituiscono le motivazioni per il progetto ORISHA (ORganic Integrated on Silicon Hybrid Amplifier), il cui obiettivo è la realizzazione di una sorgente ottica laser integrata su Silicio basata su materiali molecolari ad emissione IR. Un tale dispositivo sarebbe abilitante per applicazioni tanto in ambito ICT, come i futuri apparati 5G, i data centers, i dispositivi di comunicazione mobile e le reti di accesso, quanto in settori extra-ICT come la componentistica per lo Spazio. L'ambito di impiego non è limitato alla sola sorgente ottica integrata, ma alla realizzazione di guide d'onda attive che fungano da amplificatori in guida, riprendendo un concetto affine agli amplificatori in guida drogati con Erblio (EDWA, Erbium doped Waveguide Amplifiers) [22]. In particolare, il dispositivo è pensato per la compensazione delle perdite di accoppiamento e propagazione che si sperimentano all'interno di un chip fotonico. Un chip fotonico si compone infatti di più blocchi funzionali che condividono uno stesso substrato e che sono collegati tra loro da guide d'onda. Per correttezza, si deve in realtà evidenziare come qualunque dispositivo ottico è in prima battuta una guida d'onda, alla quale si aggiungono altre funzionalità caratterizzanti come ad esempio l'amplificazione di luce per emissione stimolata (laser), il disaccoppiamento e l'accoppiamento in fase o controfase con controllo esterno (modulatori interferometrici) o la selezione spettrale (filtri). L'integrazione tra questi blocchi, realizzata con materiali spesso eterogenei o con dimensioni differenti, porta a salti d'indice di rifrazione nella direzione di propagazione ottica che è causa di riflessione parziale della radiazione, con conseguente riduzione dell'ampiezza del segnale propagante e che pertanto richiede l'impiego di ulteriori blocchi funzionali di accoppiamento, con conseguente aumento dell'ingombro su chip. Il raggiungimento dell'obiettivo finale di ORISHA implica il coinvolgimento di attività con competenze che spaziano dalla sintesi chimica dei materiali molecolari [23], al design delle nano-strutture guidanti [24] fino alla fabbricazione dei dispositivi a passo nanometrico con processi da fonderia [25], dalle quali si evince la necessità di un approccio multidisciplinare che coinvolge la chimica di sintesi, l'ingegneria elettronica e le scienze dei materiali. Per questo motivo il progetto ORISHA vede la partecipazione di una compagine eterogenea costituita dal Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche dell'Università degli studi di Cagliari, dal Dipartimento di Scienze di Base Applicate all'Ingegneria di Sapienza Università di Roma,

dall'Unità di Roma dell'Istituto di Fotonica e Nanotecnologie del CNR e da ultimo dell'Istituto Superiore delle Comunicazioni, in qualità di ente coordinatore del progetto. Il raggiungimento dell'obiettivo finale del progetto passa per una serie di sotto-obiettivi mirati ad incrementarne l'impatto e a colmare un vuoto tecnologico e di know-how nell'attuale panorama dell'optoelettronica. In particolare, ORISHA esplorerà l'applicazione di composti organo-lantanidi ad emissione IR nelle bande in uso nelle comunicazioni ottiche, con particolare riferimento alle bande O (1260 nm-1360nm), S (1460-1530 nm), C (1530-1565 nm) ed L (1565-1625 nm), mirando alla realizzazione di strutture a guida d'onda slot a pompaggio ottico fabbricate con processi di litografia a fasci elettronici per la lavorazione del Silicio e di deposizione in fase liquida (spin-coating) per i materiali molecolari. Come sotto-obiettivi più ambiziosi, si punterà inoltre ad esplorare l'applicazione dei composti organo-lantanidi sviluppati alla realizzazione di OLED (LED organici) con elettroluminescenza IR e all'integrazione nella guida d'onda slot di reticoli di Bragg, condizione necessaria per la realizzazione di una cavità laser a feedback distribuito (DFB) [26-28]. Il programma di lavoro è mirato a fornire la validazione concettuale tramite la realizzazione di dimostratori per i singoli sotto-obiettivi. Il raggiungimento dei sotto-obiettivi concorrerà all'integrazione nel dispositivo finale, ovvero un laser DFB organico ad emissione integrato su struttura slot di Silicio (SOI).



## Bibliografia

- 2011[1] M. Ashgari, A. V. Krishnamoorthy, Energy-efficient communication, *Nature*, Vol. 5, pp. 268-270,
- [2] L. Vivien, L. Pavesi, *Handbook of silicon photonics*, Taylor & Francis, 2016
- [3] B. Jalali *et al.*, *Silicon photonics*, *J. Lightwave Technol.*, Vol. 24, n. 12, pp. 4600-4615, 2006
- [4] T.W. Baehr-Jones *et al.*, Myths and rumours of silicon photonics, *Nature Photonics*, Vol. 6, pp. 206-208, 2012
- [5] M. Hochberg *et al.*, Towards fabless silicon photonics, *Nature Photonics*, Vol. 4, pp. 492-494, 2010
- [6] M. Smit *et al.*, An introduction to InP-based generic integration technology, *Semiconductor Science and Technology*, Vol. 29, pp. 1-41, 2014
- [7] A. Eu-Jin Li *et al.*, Review of Silicon Photonics Foundry Efforts, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electr.*, Vol. 4, n. 20, 2014
- [8] S. Penna *et al.*, Tecnologie di fotonica integrata: dispositivi e applicazioni, *La Comunicazione – Note, Recensioni, Notizie*, Volume LIX, pp. 101-116, 2015
- [9] G. Gilardi *et al.*, Generic InP-Based Integration Technology: Present and Prospects, *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 147, pp. 23–35, 2014
- [10] K. Wörhoff *et al.*, TriPleX: a versatile dielectric photonic platform, *Advanced Optical Technologies*, Vol. 4, n. 2, pp. 189–207, 2015
- [11] L. Pavesi, Silicon-Based Light Sources for Silicon Integrated Circuits, *Advances in Optical Technologies*, Vol. 2008
- [12] F. Priolo *et al.*, Silicon nanostructures for photonics and photovoltaics, *Nature Nanotechnologies*, Vol. 9, pp.19-32, 2014
- [13] D. Liang *et al.*, Hybrid Integrated Platforms for Silicon Photonics, *Materials*, Vol. 3, pp. 1789-1802, 2010
- [14] J. Leuthold *et al.*, Silicon Organic Hybrid Technology - A Platform for Practical Nonlinear Optics, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 97, n. 7, pp. 1304-1316, 2009
- [15] T.W. Baehr Jones *et al.*, Polymer Silicon Hybrid Systems: A Platform for Practical Nonlinear Optics, *J. Phys. Chem. C*, Vol. 112, pp. 8085–8090, 2008
- [16] A. Rao *et al.*, High-performance and linear thin-film lithium niobate Mach-Zehnder modulators on silicon up to 50 GHz, *Optics Letters*, Vol. 41, n. 24, pp. 5700-5703, 2016
- [17] L. Alloatti *et al.*, 100 GHz silicon-organic hybrid modulator, *Light: Science & Applications* Vol. 3, n. 5, 2014
- [18] T. Baehr-Jones *et al.*, Nonlinear polymer-clad silicon slot waveguide modulator with a half wave voltage of 0.25 V, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 92, 2008
- [19] M. Lauer mann *et al.*, 40 GBd 16QAM signaling at 160 Gb/s in a silicon-organic hybrid modulator, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, n. 6, pp. 1210-1216, 2015

- [20] S. Penna *et al.*, Near-infrared photoluminescence of erbium tris (8-hydroxyquinoline) spin-coated thin films induced by low coherence light sources, *Applied Physics Letters*, Vol. 91, n. 2, 2007
- [21] V. Almeida *et al.*, Guiding and confining light in void nanostructure, *Optics Letters*, Vol. 29, n. 11, pp. 1209-1211, 2004
- [22] K. Ennser *et al.*, Erbium-doped waveguide amplifier for reconfigurable WDM metro networks, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 17, n. 7, pp. 1468-1470, 2005
- [23] F. Artizzu *et al.*, New Insights on Near-Infrared Emitters Based on Er-quinolinolate Complexes: Synthesis, Characterization, Structural, and Photophysical Properties, *Advanced Functional Materials*, Vol. 17, n. 14, pp. 2365-2376, 2007
- [24] S. Penna *et al.*, Opportunities for Low Cost Processing of Erbium 8-Quinolinolates for Active Integrated Photonic Applications, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 16, n. 4, pp. 3360-3363, 2016
- [25] O. Limon *et al.*, All-optical nano modulator on a silicon chip, *Optics express*, Vol. 15, n. 14, pp. 9029-9039, 2007
- [26] S. Prezioso *et al.*, Infrared photoluminescence of erbium-tris (8-hydroxyquinoline) in a distributed feedback cavity, *Journal of Luminescence*, Vol. 131, n. 4, pp. 682-685, 2011
- [27] S. Penna *et al.*, Towards the implementation of an organic inorganic laser for next generation optical applications, *Proc. of Conference on Laser and Electro-Optics*, 2010
- [28] D. Korn *et al.*, Lasing in silicon-organic hybrid waveguides, *Nature communications*, Vol. 7, 2016