

Določanje dejanskega efektivnega lomnega količnika svetlovoda v silicijevem optičnem čipu

Andrej Lavrič, Janez Krč, Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko
Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: andrej.lavric@fe.uni-lj.si

Determination of actual effective refractive index of waveguide in silicon photonic chip

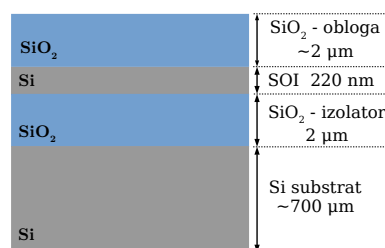
Integrated silicon photonics has gained significant attraction in various technology fields such as optical communications, sensing, data processing and transfer. In this contribution we present a simple optical chip which was designed to perform different tests. In particular we show the results of determination of an actual effective refractive index of an integrated waveguide by using Mach-Zehnder interferometer.

1 Uvod

Silicijeva fotonika predstavlja mlado in obetavno tehnološko področje, ki je svoj zagon dobilo v začetku tisočletja. Z zahtevo po vse večji procesorski moči se je pojavila tudi vse večja potreba po zmogljivosti prenosa podatkov, ki jih omejujejo izgube električnih povezav v klasičnih električnih čipih [1]. Drugi izziv predstavljajo zahteve po večji hitrosti obdelave podatkov in računanja, kjer postaja elektronika omejena. V tej luči se odpira široko področje uporabe optičnih čipov. Kljub ugodnejšim elektrooptičnim lastnostim nekaterih drugih materialov, silicijeva tehnologija omogoča združljivost z zrelo tehnologijo komplementarne kovina-oksida-polprevodnik (angl. Complementary metal-oxide-semiconductor – CMOS). Prav slednja se pojavlja kot glavni motiv za raziskovanje in razvoj optičnih čipov (angl. Photonic Integrated Circuit – PIC) na siliciju [2, 3, 4].

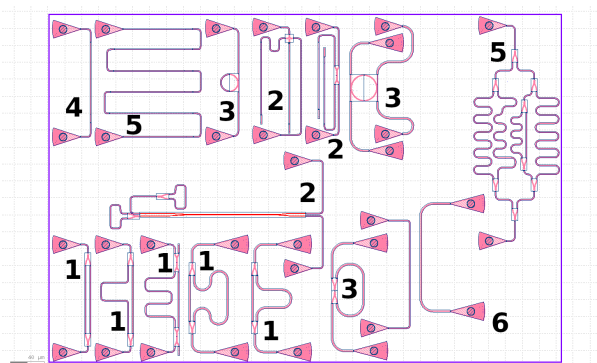
V tem prispevku je najprej na kratko predstavljen preprost testni optičen čip velikosti $600 \times 400 \mu\text{m}^2$, ki smo ga načrtovali v tehnologiji silicij-na-izolatorju (angl. Silicon-on-insulator – SOI). V osrednjem delu prispevka se bomo osredotočili na določanje dejanskega efektivnega lomnega količnika svetlovoda na čipu. Svetlovodi nastopajo kot osnovni gradniki vseh ostalih komponent.

Silicijeva rezina tehnologije SOI sestoji iz $\sim 700 \mu\text{m}$ substrata silicija (Si), na njem je $2 \mu\text{m}$ debela plast silicijevega dioksida (SiO_2) – izolatorja, na vrhu pa je 220 nm plast silicija, iz katere se jedka optično vezje. Po končnem jedkanju se na čip napari zgornjo zaščitno plast silicijevega oksida. Presek takšne silicijeve rezine je prikazan na sliki 1. Na našem izdelanem čipu so preproste testne strukture, med njimi uklonske mrežice za sklopitanje svetlobe v čip [5, 6, 7, 8], ravni in zaviti trakasti svetlovodi, Y-spoji [9], smerni sklopniki, obročasti rezonatorji,



Slika 1: Presek rezine tipa SOI, na kateri je izdelan predstavljen optičen čip.

Braggove rešetke. Na osnovi teh je na čipu zgrajenih več Mach-Zehnderjevih interferometrov (MZI), Michelsonovih interferometrov in različnih vrst filtrov. Postavitev čipa z označenimi pasivnimi strukturami je prikazana na sliki 2. Pri vseh komponentah svetlobo pripeljemo in jo zajamemo preko vhodno/izhodnih uklonskih mrežic. Nanos maske na silicijevo rezino je izveden z litogra-



Slika 2: Postavitev (angl. layout) optičnega čipa. Posnetek zaslona iz programa Klayout. 1: Mach-Zehnderjevi interferometri, 2: Michelsonovi interferometri, 3: obročasti rezonatorji, 4: Braggova rešetka, 5: optični filtri, 6: uklonska mrežica. Na samem čipu ni optičnih virov in detektorjev, tako da imajo vse strukture na vhodu/izhodu uklonske mrežice za sklopitanje svetlobe iz/v optično vlakno. Postavitev je bila narisana z odprtokodnim programom Klayout in uporabo SiEPIC PDK [10].

fijo z elektronskim snopom ločljivosti 6 nm [11]. Celoten postopek izdelave čipa je bil narejen pri Washington Nanofabrication, ki je del University of Washington. Za litografijo z elektronskim snopom so predpostavljene

tolerance -30...+10 nm vzete iz standardnega postopka CMOS. Pri izdelavi so bile uporabljene rezine SOI proizvajalca Soitec (Grenoble, Francija), ki imajo povprečno debelino Si plasti 219,3 nm s standardno deviacijo 3,9 nm. Opisane geometrijske tolerance izdelave optičnega čipa narekujejo odstopanje optičnih lastnosti čipa od načrtovanih vrednosti. To zahteva analizo meritev, ki pokaže ali se lastnosti izdelanega čipa nahajajo znotraj pričakovanega intervala vrednosti. Preprosta ocena intervala pričakovanih vrednosti je kotna analiza (angl. corner analysis) [12], pri kateri izračunamo vrednosti efektivnega in skupinskega lomnega količnika za skrajna odstopanja geometrije.

V tem prispevku niso opisane funkcionalnosti vseh gradnikov na čipu. Osredotočili se bomo le na gradnike MZI in pokazali, kako z njihovo pomočjo določimo dejanski efektivni lomni količnik svetlovoda.

2 Delovanje MZI in pomen efektivnega lomnega količnika

Mach-Zehnderjev interferometer je razmeroma preprosta struktura, ki vhodni optični signal razdeli v dve veji, običajno različnih dolžin. Na izhodu se optična signala spet združita. Ker v splošnem veji interferometra nista enaki, signala prepotujeta različne poti in si na poti pridobita različna fazna zasuka. Ob ponovni združitvi signalov nazaj na izhodu MZI, zaradi razlik v fazi valov pride bodisi do ojačitev ali oslabitev jakosti združenega optičnega signala. V svetlovodih lahko izgube zanemarimo. Če predpostavimo, da izgub ni, lahko opišemo električno poljsko jakost signalov pred združitvijo

$$E_{o1} = \frac{E_i}{\sqrt{2}} e^{-i\beta_1 L_1} \quad (1)$$

$$E_{o2} = \frac{E_i}{\sqrt{2}} e^{-i\beta_2 L_2}, \quad (2)$$

kjer sta L_1 in L_2 dolžini posameznih poti, β_1 in β_2 pa pripadajoči fazni konstanti. Fazna konstanta pa je odvisna od valovne dolžine

$$\beta(\lambda) = \frac{2\pi n_{eff}(\lambda)}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda_{eff}}, \quad (3)$$

kjer je λ valovna dolžina v vakuumu, λ_{eff} je efektivna valovna dolžina v svetlovodu in n_{eff} je efektivni lomni količnik svetlovoda, ki je odvisen tako od lomnih količnikov snovi kot od geometrije in je v istem svetlovodu različen za različne rodove. Predpostavimo, da so lokalno svetlovodi enaki, kljub tolerancam izdelave, tako da velja $\beta_1 = \beta_2 = \beta$. Ob teh predpostavkah se poti razlikujeta zgolj v dolžini. Prenosna funkcija interferometra je

$$T_{MZI}(\lambda) = \frac{1}{4} \left| 1 + e^{-i\beta(\lambda)\Delta L} \right|^2, \quad (4)$$

kjer je ΔL razlika v dolžini obeh vej interferometra. Ko je ta enaka lihim večkratnikom $\lambda_{eff}/2$, ima prenosna funkcija ničle. Torej gre za periodično filtrsko karakteristiko MZI-ja, ki se odraža tudi na karakteristikah prikazanih na slikah 4, 5 in 6. Razdaljo med sosednjimi ničlami (minimumi v prenosni funkciji) imenujemo prosto

spektralno področje (angl. free spectral range – FSR), ki je podano kot

$$FSR = \frac{\lambda^2}{n_g \Delta L}, \quad (5)$$

kjer je n_g skupinski lomni količnik. V tem prispevku smo osredotočeni na efektivni lomni količnik, vendar so podane tudi relacije do skupinskega, saj se ta pojavlja kot pomemben parameter pri načrtovanju resonatorjev [13], ki so osnova za sestavljanje kompleksih operacij obdelave optičnega signala. Položaj ničel v prenosni funkciji MZI v enačbi (4) je poleg ΔL odvisen tudi od faze konstante β , ki pa je odvisna od efektivnega lomnega količnika svetlovoda. Iz prikazanih relacij je razvidno, da lahko preko odziva MZI določimo dejansko vrednost efektivnega lomnega količnika svetlovoda.

3 Načrtovanje efektivnega lomnega količnika

Vrednost efektivnega lomnega količnika svetlovoda lahko predvidimo (načrtamo) z metodo simulacije različnih rodov v strukturi [12, 14]. Takšna simulacija daje vrednosti pri eni sami valovni dolžini in zahteva reševanje valovne diferencialne enačbe, kar je lahko zamudno. Za lažje načrtovanje in kasnejšo analizo meritev si želimo preproste analitične enačbe. Slednjo sestavimo kot polinom nizke stopnje, ki aproksimira rešitve poljskih simulacij v nekaj diskretnih točkah. Efektivni lomni količnik lahko zapišemo kot

$$n_{eff}(\lambda) = n_1 + (\lambda - \lambda_0)n_2 + (\lambda - \lambda_0)^2 n_3. \quad (6)$$

kjer je n_1 efektivni lomni količnik pri λ_0 , n_2 in n_3 pa sta koeficienta efektivnega lomnega količnika v polinomski enačbi, ki vsebujeta tudi odvisnost od valovne dolžine. Skupinski lomni količnik n_g je v tesni zvezi z efektivnim

$$\begin{aligned} n_g(\lambda) &= n_{eff}(\lambda) - \lambda \frac{dn_{eff}}{d\lambda} \\ &= n_{eff}(\lambda) - \lambda(n_2 + 2(\lambda - \lambda_0)n_3). \end{aligned} \quad (7)$$

Pri $\lambda = \lambda_0 = 1,55 \mu\text{m}$ velja kar

$$n_{eff} = n_1 \quad \text{in} \quad n_g = n_1 - 1,55n_2. \quad (8)$$

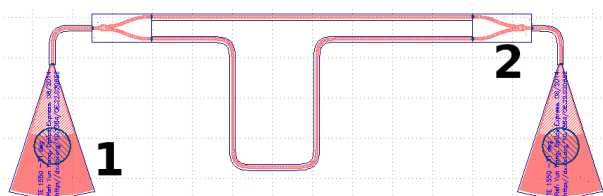
V tabeli 1 so koeficienti prvih dveh rodov valovoda s presekom $500 \times 220 \text{ nm}$. Slednje določimo tako, da najprej v nekaj diskretnih vrednostih napravimo simulacijo rodov, nato pa z metodo najmanjših kvadratov rešitve simulacij aproksimiramo s polinomom nizke stopnje. Koeficienti tega polinoma so koeficienti za naše določanje lomnega količnika v enačbi (6). V nadaljevanju bo predpostavljen postopek določanja dejanskega n_{eff} le za transverzalno električni (TE) rod valovanja. To je rod, ki ima večino električnega polja usmerjenega v horizontalni smeri glede na substrat. Postopek načrtovanja in analize je popolnoma identičen za transverzalno magnetni (TM) rod – rod z večino električnega polja vertikalno glede na substrat. Razlika je le v izbiri koeficientov v enačbi (6) in vseh sledečih izrazih.

Rod	n_1	n_2	n_3	n_g
TE	2,4453	-1,1295	-0,0421	4,1960
TM	1,7727	-1,2795	1,8131	3,7559

Tabela 1: Iz predhodnih simulacij izračunani koeficienti prvih dveh rodov v valovodu s presekom 500×220 nm. Pri analizi bomo osredotočeni zgolj na TE rod.

Kot smo omenili, je n_{eff} odvisen tudi od geometrije svetloвода. Torej, na njega vplivajo geometrijska tolerančna območja, ki jih dosežemo pri dejanski izdelavi svetlovodov na čipu. V praksi so zato fotonska vezja preprejena z lokalnimi grelnimi elementi [15, 16], kjer s kontroliranimi spremembami v temperaturi vplivamo na snovni lomni količnik in s tem posredno kompenziramo odstopanja n_{eff} zaradi toleranc geometrije.

V našem primeru bomo določevali dejanski n_{eff} (pri sobni temperaturi) na osnovi izbranega MZI. Povečava izbranega MZI iz slike 2 je prikazana na sliki 3 (rotirano).

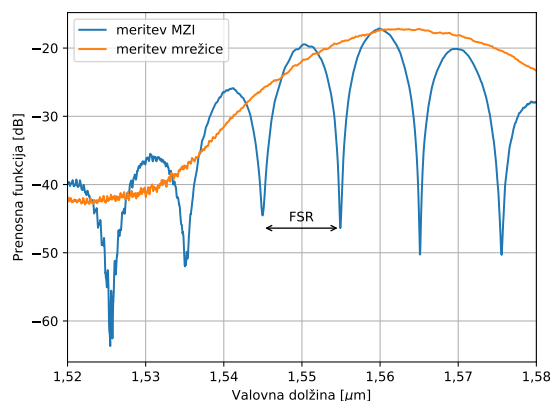


Slika 3: MZI z $\Delta L = 57,48 \mu\text{m}$ za TE rod (na sliki 2 stoji vertikalno). 1: uklonska mrežica [5, 6, 7, 8], 2: Y-spoj [9].

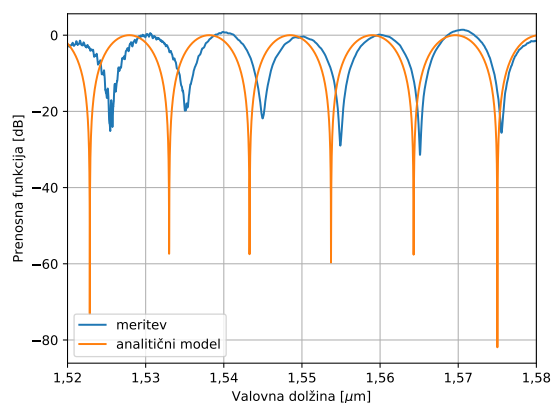
4 Rezultati meritev in analiza

Za meritev čipa je bila uporabljena namenska avtomatizirana merilna postavitve [12] in je bila izvedena v sklopu tečaja UBCx Phot1x na University of British Columbia. Kot svetlobni vir je bil uporabljen nastavljen laser Agilent 81600B, na detektorski strani pa merilniki optične moči Agilent 81635A. Prelet valovne dolžine laserja je od 1500 nm do 1600 nm s korakom 10 pm.

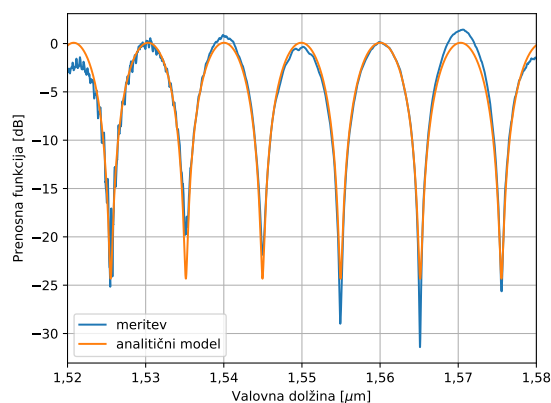
Prvi korak pri analizi meritev je odstranitev frekvenčne odvisnosti uklonskih mrežic pri meritvi MZI. Na sliki 4 je prikazana prikazana meritev prenosne karakteristike izbranega MZI skupaj z vhodno/izhodnimi uklonskimi mrežicami in prenosna karakteristika zgolj vhodno/izhodnih uklonskih mrežic povezanih z enostavnim svetloводом. V naslednjem koraku meritev MZI normaliziramo, tj. odstranimo odziv uklonskih mrežic, in normalizirano meritev primerjamo z načrtovanim analitskim odzivom MZI. Na sliki 5 so prikazane normalizirane meritve in prenosna funkcija za načrtovani MZI, izračunana po enačbi (4), kjer so za n_{eff} uporabljeni koeficienti za TE rod iz tabele 1. Premik ničel prenosne funkcije potrjuje odmik dejanskega efektivnega lomnega količnika valovoda od načrtovane vrednosti. V zadnjem koraku iz meritev izluščimo dejanski lomni količnik valovoda z uporabno metode najmanjših kvadratov. Koeficiente v enačbi (6) spreminjamo, tako da je odstopanje rezultata enačbe (4) od normaliziranih meritev (glej sliko 5) najmanjše. Na sliki 6 je prikazan končni rezultat analize. Izluščen efektivni



Slika 4: Meritev prenosne funkcije MZI vključno z uklonskimi mrežicami (modra) in meritev odziva uklonskih mrežic brez MZI strukture (oranžna).



Slika 5: Normalizirana meritev prenosne funkcije MZI (modra) in analitska prenosna funkcija za načrtovani MZI (oranžna).



Slika 6: Končni rezultat analize. Normalizirano meritev MZI (modra) in nanjo priležena analitska prenosna funkcija MZI (oranžna), kjer v izračunu uporabimo vrednosti n_{eff} , tako da se analitični rezultat najbolj prilega meritvam.

lomni količnik n_{eff} in skupinski lomni količnik n_g sta skupaj z načrtovanimi oziroma analitskimi vrednostmi in

pripadajočimi odstopanji zapisana v tabeli 2. Obe vrednosti se nahajata znotraj intervala kotne analize. Kljub

lomni količnik	načrtovan	dejanski	Δ	%
n_{eff}	2,4453	2,4537	0,0084	0,34
n_g	4,2044	4,1819	-0,0225	-0,54

Tabela 2: Tabela z učinkovitim in skupinskim lomnim količnikom svetlovoda za TE rod. Poleg načrtovane (analitske) vrednosti je v tabeli še vrednost pridobljena z meritvami, nujna razlika in odstopanje v odstotkih.

zelo majhnim odstopanjem dejanskih vrednosti n_{eff} od načrtovanih, se karakteristika MZI premakne za ~ 1 nm. To v območju okrog 1550 nm pomeni premik za ~ 125 GHz, kar je za optično obdelavo mikrovalovnih signalov nedopustno odstopanje. Pomembna tehnična ovira optičnih čipov je torej fino nastavljanje, kjer se poleg rešitve z grelci odpira dodatno področje raziskovanja.

5 Zaključek

Na primeru Mach-Zehnderjevega interferometra na izdelanem fotonem čipu smo določili dejanska lomna količnika svetlovoda n_{eff} in n_g . Zaradi toleranc pri izdelavi je dejanska lomna količnika odstopata za 0,34% (n_{eff}) in -0,54% (n_g), kar je znotraj intervala kotne analize, a vseeno predaleč za nekatere aplikacije. Rezultati kažejo na potrebo po nastavljanju lastnosti takega čipa.

Zahvala

Andrej Lavrič acknowledges the edX UBCx Phot1x Silicon Photonics Design, Fabrication and Data Analysis course, which is supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) Silicon Electronic-Photonic Integrated Circuits (SiEPIC) Program. The devices were fabricated by Richard Bojko at the University of Washington Washington Nanofabrication Facility, part of the National Science Foundation's National Nanotechnology Infrastructure Network (NNIN), and Cameron Horvath at Applied Nanotools, Inc. Enxiao Luan performed the measurements at The University of British Columbia. Andrej Lavrič acknowledges Lumerical Solutions, Inc., Mathworks, Mentor Graphics, Python, and KLayout for the design software.

Avtorji se zahvaljujejo tudi Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije za financiranje raziskav v okviru programa št. P2-0246.

Literatura

- [1] B. Batagelj, V. Janyani, and S. Tomažič, "Research challenges in optical communications towards 2020 and beyond = raziskovalni izzivi optičnih komunikacij do in preko leta 2020," *Informacije MIDEM : časopis za mikroelektroniko, elektronske sestavne dele in materiale*, vol. letn. 44, no. št. 3, pp. str. 177–184, 2014.
- [2] B. Jalali and S. Fathpour, "Silicon Photonics," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 12, pp. 4600–4615, Dec. 2006.
- [3] Z. Fang and C. Z. Zhao, "Recent Progress in Silicon Photonics: A Review," *ISRN Optics*, Mar. 2012.

- [4] W. Zhang and J. Yao, "Silicon-Based Integrated Microwave Photonics," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 52, no. 1, pp. 1–12, Jan. 2016.
- [5] Y. Wang, X. Wang, J. Flueckiger, H. Yun, W. Shi, R. Bojko, N. A. F. Jaeger, and L. Chrostowski, "Focusing sub-wavelength grating couplers with low back reflections for rapid prototyping of silicon photonic circuits," *Opt. Express*, vol. 22, no. 17, pp. 20 652–20 662, Aug 2014.
- [6] Y. Wang, H. Yun, Z. Lu, R. Bojko, W. Shi, X. Wang, J. Flueckiger, F. Zhang, M. Caverley, N. A. F. Jaeger, and L. Chrostowski, "Apodized focusing fully etched subwavelength grating couplers," *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 1–10, June 2015.
- [7] Y. Wang, W. Shi, X. Wang, Z. Lu, M. Caverley, R. Bojko, L. Chrostowski, and N. A. F. Jaeger, "Design of broadband subwavelength grating couplers with low back reflection," *Opt. Lett.*, vol. 40, no. 20, pp. 4647–4650, Oct 2015.
- [8] Y. Wang, L. Xu, A. Kumar, Y. D'Mello, D. Patel, Z. Xing, R. Li, M. G. Saber, E. El-Fiky, and D. V. Plant, "Compact single-etched sub-wavelength grating couplers for o-band application," *Opt. Express*, vol. 25, no. 24, pp. 30 582–30 590, Nov 2017.
- [9] Y. Zhang, S. Yang, A. E.-J. Lim, G.-Q. Lo, C. Galland, T. Baehr-Jones, and M. Hochberg, "A compact and low loss y-junction for submicron silicon waveguide," *Opt. Express*, vol. 21, no. 1, pp. 1310–1316, Jan 2013.
- [10] L. Chrostowski, Z. Lu, J. Flueckiger, X. Wang, J. Klein, A. Liu, J. Jhoja, and J. Pond, "Design and simulation of silicon photonic schematics and layouts," in *Silicon Photonics and Photonic Integrated Circuits V*, L. Vivien, L. Pavesi, and S. Pelli, Eds., vol. 9891, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2016, pp. 185 – 195.
- [11] R. J. Bojko, J. Li, L. He, T. Baehr-Jones, M. Hochberg, and Y. Aida, "Electron beam lithography writing strategies for low loss, high confinement silicon optical waveguides," *Journal of Vacuum Science & Technology B*, vol. 29, no. 6, p. 06F309, 2011.
- [12] L. Chrostowski and M. Hochberg, *Silicon Photonics Design: From Devices to Systems*. Cambridge University Press, 2015.
- [13] W. Bogaerts, P. D. Heyn, T. V. Vaerenbergh, K. D. Vos, S. K. Selvaraja, T. Claes, P. Dumon, P. Bienstman, D. V. Thourhout, and R. Baets, "Silicon microring resonators," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 6, no. 1, pp. 47–73, 2012.
- [14] A. Debevc, J. Krč, and M. Topič, "Simulation of optical waveguides in silicon photonic integrated circuits," in *Conference proceedings 2018*. Ljubljana: MIDEM - Society for Microelectronics, Electronic Components and Materials, 2018, pp. str. 87–92.
- [15] A. H. Atabaki, E. S. Hosseini, A. A. Eftekhari, S. Yegnanarayanan, and A. Adibi, "Optimization of metallic microheaters for high-speed reconfigurable silicon photonics," *Opt. Express*, vol. 18, no. 17, pp. 18 312–18 323, Aug 2010.
- [16] F. Gan, T. Barwicz, M. A. Popovic, M. S. Dahlem, C. W. Holzwarth, P. T. Rakich, H. I. Smith, E. P. Ippen, and F. X. Kartner, "Maximizing the thermo-optic tuning range of silicon photonic structures," in *2007 Photonics in Switching*, 2007, pp. 67–68.