

Silicijumski optički modulatori za novu generaciju računara i optičkih telekomunikacija

Goran Z. Mashanovich, Frederic Y. Gardes, David Thomson, Youfang Hu, Renzo Loiacono, Nathan Owens, Milan M. Milošević, Miloš Nedeljković, Arifa Nazir Ahmed, Paul Thomas, Robert Topley, Graham T. Reed

Silicon Photonics Group, Advanced Technology Institute, Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey, Guildford, Surrey, GU2 7XH, United Kingdom

SADRŽAJ

Svedoci smo ogromne ekspanzije Interneta i protoka informacija uopšte. Stoga postoji potreba da se što više podataka prenese što većim brzinama. Međutim, nekoliko faktora ograničavaju takav napredak. Na primer, brzine procesora u računarima prilično sporo rastu zbog sve složenijih bakarnih veza, veze između ploča i servera takođe ne podržavaju velike brzine, a uz to se dostiže i granica efikasnog odvođenja toplote sa računarskih i serverskih ploča. U ovakvoj ekonomskoj i energetskej situaciji, jedan od najvažnijih parametara svakako postaje i efikasna potrošnja električne energije za generisanje i prenos podataka. Sve veći broj kompanija, instituta i istraživačkih timova širom sveta vidi silicijumsku fotoniku kao jedno od najozbiljnijih rešenja za prethodno pomenute probleme. U ovom preglednom radu biće predstavljene osnovne prednosti ove tehnologije za buduću generaciju super brzih računara i optičkih telekomunikacija. Takođe će biti opisani naši skorašnji rezultati iz oblasti optičke modulacije.

1. ZAŠTO SILICIJUMSKA FOTONIKA?

Silicijum je jedan od najbolje proučenih materijala i njegova upotreba u elektronskim komponentama je apsolutno dominantna. Milijarde dolara su investirane u postrojenja koja proizvode elektronske čipove i kola bez kojih se savremeni život jednostavno ne bi mogao zamisliti. Silicijum je jeftin material koji ima zanimljive optičke osobine: veliku apsorpciju za talasne dužine manje od 1,1 μm , pa je jedan od najboljih materijala za fotodetektore na nižim talasnim dužinama; transparentnost za najvažnije telekomunikacione talasne dužine od 1,3 μm i 1,55 μm , te se od njega mogu napraviti talasovodi sa malim gubicima prostiranja (<0.1 dB/cm); veliki indeks prelamanja, oko 3,5, pa talasovodi sa jezgrom od silicijuma (Si) i omotačem od, na primer, silicijum dioksida (SiO_2) čiji indeks prelamanja je oko 1,5, mogu imati jako male dimenzije (npr. 200×500 nm ili 300×300 nm), što omogućava proizvodnju fotonih kola sa malom površinom, čime se dodatno smanjuje cena čipova [1].

Ono što silicijum čini jako zanimljivim materijalom za buduća fotonika kola je mogućnost integracije sa CMOS elektronikom na istom čipu. To bi otvorilo mogućnost proizvodnje kompaktnih i jeftinih integrisanih kola sa daleko boljim osobinama od trenutnih hibridnih kola koja imaju velike dimenzije i cene. To bi takođe otvorilo mogućnost potpunog novih primena te tehnologije, kao što se desilo sa mikroelektronikom.

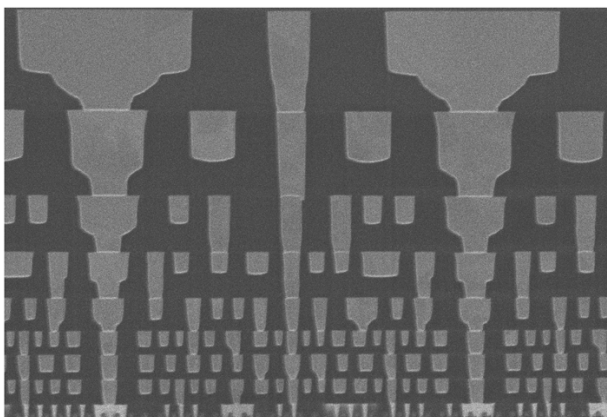
Moguće primene silicijumske fotonike pokrivaju veliki spektar, kako oblasti tako i talasnih dužina. U bliskoj infracrvenoj oblasti (talasne dužine manje od 2-3 μm) to su veze između servera, ploča, i jezgara u mikroprocesoru (*interconnects*), optika do kuće (*Fibre-to-the-Home* - FTTH) i senzori, a u srednjoj infracrvenoj oblasti (talasne dužine od 2-3 do 20-30 μm) moguće primene su u medicini, gasnim i biohemijskim senzorima, telekomunikacijama, astronomiji i vojnoj industriji. Zato nije čudno što su milioni dolara investirani u ovu tehnologiju poslednjih godina, što bukvalno svaki vodeći univerzitet u svetu ima grupu za silicijumsku fotoniku i što su najveće svetske kompanije (IBM, Intel, Sun Microsystems, HP, itd.) osnovala istraživačke grupe i najozbiljnije računaju na ovu tehnologiju u budućnosti [2].

2. NAJVAŽNIJI PROBLEM

Količina proizvedenih digitalnih podataka se svakih 5 godina udesetostruči, tako da će 2020. premašiti 35,000 eksa bita (3.5×10^{22} bita). Preko dve milijarde ljudi koristi Internet koji će 2014. biti četiri puta veći nego što je bio 2009. godine [3]. Veliki broj oblasti, kao što su, na primer, proizvodnja, finansijski sektor, zdravstvo i transport, zavisi od ogromne količine generisanih podataka. Potrošači takođe pomažu ovu „informatičku eksploziju”, naročito učešćem na društvenim mrežama (npr. Facebook) i postavljanjem video materijala. Danas video sadržaji učestvuju sa jednom trećinom u ukupnom protoku informacija, a do 2014. će učestvovati sa čak 90%. Optičke veze su dominantne na velikim razdaljinama, gde su optička vlakna donela čitavu revoluciju. Na kraćim rastojanjima bakarne veze su još uvek neprikosnovene. Da bi ovakav porast protoka informacija mogao da se podrži, optičke veze će biti neophodne i na kraćim rastojanjima, i to je upravo razlog zbog koga su se vodeće svetske kompanije zainteresovale za silicijumsku tehnologiju.

Ako se pogleda kako izgleda poprečni presek jednog mikroelektronskog čipa (Slika 1.) može se uočiti nekoliko slojeva bakarnih veza iznad tranzistorskog nivoa. Ove komplikovane veze su odgovorne za kašnjenje signala, jer se više od 80% vremena potrebnog da se izvrši neka operacija u računaru utroši na putovanje signala kroz ove veze. Uz to se i količina utrošene energije povećava i dostiže se limit za efikasno odvođenje toplote sa čipa, na kome temperatura može da

dostigne i 100°C. Preko 80% snage utrošene na mikroprocesorima se disipira na bakarnim vezama [5], a snaga utrošena na vezama u serverima je veća od ukupne snage koju generišu sve solarne ćelije u svetu [6]. Kako se povećava zahtev za što većim protokom informacija, tako nastaje potreba da bakarne veze budu što bliže memoriji, procesorima i ulazu/izlazu, što ograničava broj memorijskih kanala, kao i broj memorijskih modula po jednom kanalu. Optičke veze bi mogle da ponude rešenje za sve prethodno navedene probleme.



Slika 1. Poprečni presek višeslojnih bakarnih veza u mikroelektronskim čipovima [4]

Silicijum je dugo godina smatran materijalom koji je dobar za pasivne fotonske uređaje kao što su talasovodi, multiplekseri/demultiplekseri, sprežnici (*couplers*) i interferometri, na primer. Dva glavna nedostatka silicijuma zbog kojih on dugo nije smatran konkurentom III-V tehnologijama (GaAs ili InP) su indirektni energetski procep, što praktično znači da silicijumski laser nije moguće napraviti, i centralno simetrična atomska struktura zbog koje ne postoji elektrooptički efekat, pa time ni efikasna optička modulacija. Što se tiče lasera, trenutno je najpopularniji hibridni pristup, gde se III-V laser “zalepi” na silicijumski čip u završnoj fazi proizvodnje, mada se radi i na SiGe laserima i nanokristalima [7]. Iako silicijum ne poseduje elektrooptički efekat, postoje načini da se postigne relativno dobra optička modulacija. Ovaj rad će biti posvećen analizi silicijumskog optičkog modulatora kao jedne od najvažnijih komponenata za optičke veze u budućoj generaciji računara i servera.

3. SILICIJUMSKI OPTIČKI MODULATORI

Integrirani optoelektronski čipovi će imati CMOS elektroniku integrisanu sa fotonskim uređajima, od kojih su najvažniji sledeći:

- ulazni i izlazni sprežnici koji omogućavaju efikasno ubacivanje svetlosti iz optičkog vlakna u čip i obratno;
- optički modulator sa integrisanim drajverom koji prebacuje električne nule i jedinice u optičke nule i jedinice;
- multiplekser koji kombinuje signale na različitim talasnim dužinama i smešta ih u jedan talasovod;
- demultiplekser koji razdvaja signale na različitim talasnim dužinama u posebne talasovode;
- fotodetektor sa integrisanim transimpedansnim pojačavačem koji prebacuje signal iz optičkog u električni domen.

Optički modulator je uređaj koji se koristi za modulisanje svetlosnog snopa koji se prostire kroz vazduh ili kroz optički talasovod. On može da menja različite parametre snopa, pa stoga postoje amplitudski, fazni i polarizacioni optički modulatori. To je verovatno najvažniji uređaj na optoelektronskom silicijumskom čipu, ne samo zbog važnosti konverzije električnog u optički signal, već i zbog toga što ga je teško realizovati u silicijumskoj tehnologiji. Optički izvor može biti direktno ili eksterno modulisan. U poređenju sa direktnom modulacijom, eksterna modulacija nudi nekoliko prednosti: optički izvor može biti relativno jeftin, njegove karakteristike neće biti kompromitovane usled direktne modulacije, brzina modulacije može biti veća, a moguća je i fazna modulacija [8]. Uz to, samo jedan svetlosni izvor može biti povezan sa više optičkih modulatora, smanjujući tako ukupnu potrošnju snage na čipu.

Primena električnog polja na neki materijal može da dovede do promene realnog i imaginarnog dela indeksa prelamanja. Promena realnog dela indeksa prelamanja sa promenom primenjenog električnog polja, poznata je kao elektrorefrakcija, Δn , a promena imaginarnog dela indeksa prelamanja sa promenom primenjenog električnog polja se zove elektroapsorpcija, $\Delta \alpha$. Glavni elektroapsorpcioni i elektrorefrakcionni efekti koje se obično primenjuju za optičku modulaciju u poluprovodničkim materijalima su Pokelsov efekat (*Pockels effect*), Kerov efekat (*Kerr effect*) i Franc-Keldišov efekat (*Franz-Keldysh effect*). Međutim, dokazano je da su ovi efekti slabi u čistom silicijumu na glavnim telekomunikacionim talasnim dužinama od 1,3 μm i 1,55 μm [9,1], te se stoga za silicijum moraju koristiti alternativne modulacione tehnike. Jedna od mogućnosti je termička modulacija, s obzirom da silicijum poseduje veliki termooptički koeficijent. Međutim, ovaj efekat je suviše spor za visoke frekvencije koje se zahtevaju u modernim telekomunikacionim primenama [10]. Najčešći metod korišćen za silicijum je plazma disperzioni efekat (*plasma dispersion effect*) u kome promena koncentracije slobodnih nosilaca menja indeks prelamanja silicijuma. Soref i Bennett su 1987. objavili sledeće jednačine, koje se od tada skoro isključivo koriste pri modelovanju silicijumskih optičkih modulatora [9]:

$\lambda_0=1,55\mu\text{m}$:

$$\Delta n = \Delta n_e + \Delta n_h = -[8,8 \times 10^{-22} \cdot \Delta N_e + 8,5 \times 10^{-18} \cdot (\Delta N_h)^{0,8}] \quad (1)$$

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_e + \Delta \alpha_h = 8,5 \times 10^{-18} \cdot \Delta N_e + 6,0 \times 10^{-18} \cdot \Delta N_h \quad (2)$$

gde je:

Δn_e = promena indeksa prelamanja kao rezultat promene koncentracije slobodnih elektrona ΔN_e

Δn_h = promena indeksa prelamanja kao rezultat promene koncentracije slobodnih šupljina ΔN_h

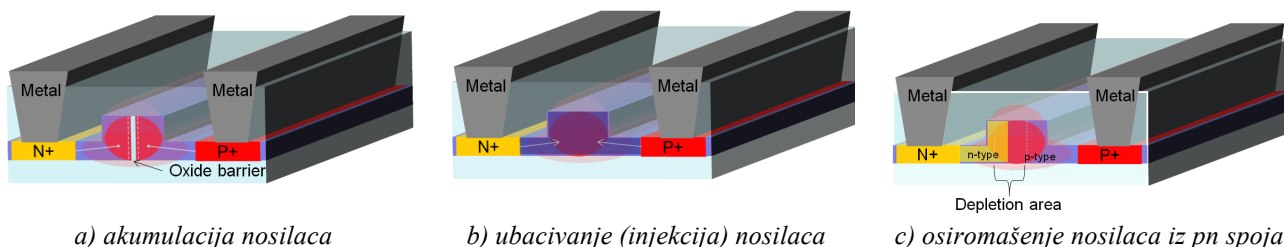
$\Delta \alpha_e$ = promena koeficijenta apsorpcije kao rezultat promene koncentracije slobodnih elektrona ΔN_e

$\Delta \alpha_h$ = promena koeficijenta apsorpcije kao rezultat promene koncentracije slobodnih šupljina ΔN_h

Korišćenjem prethodnih jednačina lako se može izračunati da promena koncentracije nosilaca od $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ daje promenu indeksa prelamanja od $\Delta n = -1,66 \times 10^{-3}$ na talasnoj dužini od $1,55 \mu\text{m}$. Međutim, promena indeksa prelamanja je povezana sa obično nepoželjnom promenom intenziteta optičkog signala zbog porasta apsorpcije na slobodnim nosiocima [11].

Električna manipulacija slobodnih nosilaca koji intereaguju sa svetlošću koja se prostire kroz talasovod može da se postigne pomoću nekog od sledeća tri mehanizma: akumulaciju nosilaca (*carrier accumulation*, Slika 2.a), injeksiju (ubacivanje) nosilaca (*carrier injection*, Slika 2.b) ili osiromašenje nosilaca (*carrier depletion*, Slika 2.c). Ovi mehanizmi su šematski predstavljeni na poprečnom preseku talasovoda na Slici 2. Ovde treba pomenuti i sve veći interes za modulatore bazirane na SiGe kvantnim jamama ili za talasovode bazirane na "sporoj svetlosti" (*slow light*) koji imaju veliki potencijal, mada po brzini trenutno dosta zaostaju za "standardnim" silicijumskim modulatorima. Takođe postoji i hibridni pristup gde se III-V apsorpciona struktura postavlja na silicijumski talasovod [12].

Standardni silicijumski optički modulatori imaju *pn* spoj koji je pozicioniran oko rebrastog (*rib*) talasovoda, tako da se akumulacija, injeksija ili osiromašenje nosilaca menjaju sa dovođenjem napona, a time se menja i faza svetlosti koja izlazi iz talasovoda, što je rezultat promene indeksa prelamanja. Zbog toga se ove strukture često zovu i fazni pomerači. Potencijalno najbrži i energetski najefikasniji mehanizam je akumulacija, međutim proizvodnja *pn* spojeva sa oksidnom barijerom nije ni malo lak zadatak, te su stoga injeksija i osiromašenje nosilaca jednostavniji. Naša grupa je ovaj poslednji mehanizam prvi put predložila 2005. godine, i on je od tada najpopularniji mehanizam u silicijumskim optičkim modulatorima. Razlog je što kod njega brzina modulacije ne zavisi od rekombinacije manjinskih nosilaca, za razliku od mehanizma injeksije [13].

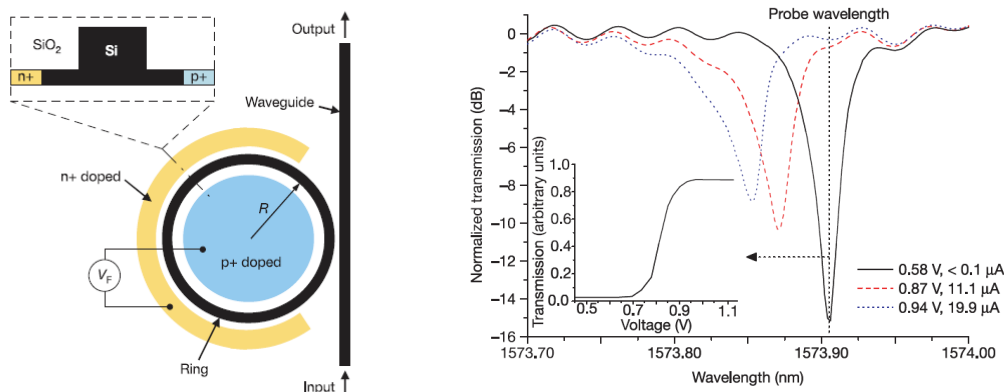


Slika 2. Tri osnovna načina promene indeksa prelamanja u silicijumu na bazi plazma disperzionog efekta

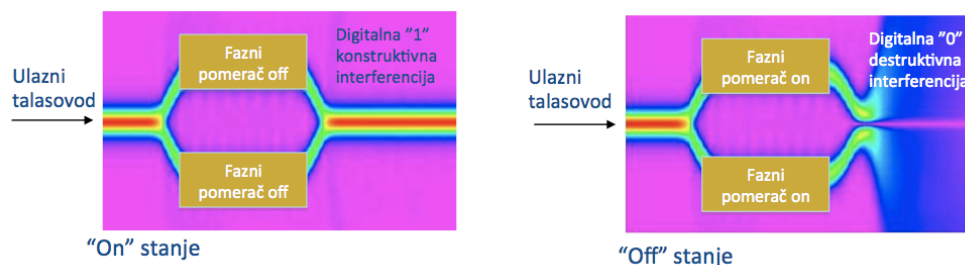
Fazni pomerači sa Slike 2. se najčešće primenjuju u dve konfiguracije: kružni rezonator (*ring resonator*, Slika 3.) i Mah-Zenderov interferometar (Slika 4.). Kružni rezonator je struktura kod koje je prav talasovod postavljen u blizini kružnog talasovoda koji je rezonantan za određene talasne dužine. To zapravo znači da će neke talasne dužine biti "zarobljene" u krugu, te će nedostajati na izlazu iz pravog talasovoda (biće filtrirane). Ako se odabere radna talasna dužina koja je jednaka rezonantnoj, i napravi *pn* spoj na kružnoj strukturi (Slika 3. levo), tada će pri dovođenju napona doći do promene indeksa prelamanja i radna talasna dužina više neće biti jednaka rezonantnoj talasnoj dužini, odnosno na izlazu pravog talasovoda će se registrovati visok nivo signala (Slika 3. desno). Ako se napon smanji na nulu, ponovo će se na izlazu dobiti nizak nivo signala. Na ovaj način je moguće dobiti optički modulator malih dimenzija (nekoliko desetina mikrometara) sa malom potrošnjom energije. U literaturi postoji više uspešnih realizacija ovakvih optičkih modulatora sa brzinama koje premašuju 10 GHz [12]. Međutim, problem sa ovakvim strukturama je činjenica da su prilično zavisne od proizvodjačkih tolerancija, a optički radni spektar je jako sužen (~100 pm). Pošto silicijum ima veliki termooptički koeficijent, svaka promena temperature će promeniti rezonantne uslove, pa je zato potrebna temperaturna kompenzacija, koja povećava ukupnu energetska potrošnju, kao i složenost celog uređaja.

Struktura koja je mnogo manje zavisna od promena temperature i koja ima daleko veći optički radni spektar (oko 20 nm) je Mah-Zenderov interferometar (MZI, Slika 4.). Ako se radi o simetričnom MZI tada će promena temperature u jednoj grani biti kompenzovana identičnom promenom u drugoj grani. Kada na faznim pomeračima (*pn* spojevima) nema napona, tj. kada su oni u „off” modu, nema nikakve fazne razlike između dve grane u MZI i na izlazu će se usled konstruktivne interferencije dobiti visok optički signal, odnosno digitalna jedinica. Ako se na fazne pomerače dovede

napon suprotnog polariteta, javiće se fazni pomak između dve grane i slabljenje intenziteta signala na izlazu MZI. Ukoliko je fazna razlika 180 stepeni, dobiće se digitalna nula na izlazu zbog destruktivne interferencije (Slika 4.). Problem sa ovakvim strukturama je što su one mnogo većih dimenzija, jer je za postizanje dovoljne fazne razlike potrebna dužina optičkog puta reda 1 mm.



Slika 3. levo: pogled odozgo na kružni modulator i poprečni presek P-i-N diode; desno: spektralni odziv modulatora [14]



Slika 4. MZI optički modulator

Ovo su bile neke opšte podele modulatora koje se tiču geometrije i načina rada. Karakteristike svakog modulatora se određuju merenjem nekoliko važnih parametara. Na prvom mestu je, naravno, brzina modulacije, a zatim slede modulaciona dubina, optički propusni opseg, gubici, dimenzije, i potrošnja snage/energije. Što se brzine modulacije tiče ona je sve do 2004. bila samo 20 MHz. Grupa iz Intela je te godine prijavila prvi modulator od 1 GHz koji je bio baziran na akumulaciji nosilaca [15]. Brzine modulatora u silicijumu su u poslednjih 7 godina još više rasle i danas je standard 10 Gb/s. Postoji samo jedan modulator u literaturi koji radi na brzini od 40 Gb/s, ali sa jako malom modulacionom dubinom od svega 1 dB što je nedovoljno za bilo kakvu ozbiljniju primenu [16].

Posle brzine, sledeći važan parametar je modulaciona dubina. Ona se definiše kao odnos dva intenziteta: I_{\max} – intenzitet kada je modulator podešen za maksimalnu transmisiju i I_{\min} – intenzitet kada je modulator podešen za minimalnu transmisiju. Modulaciona dubina se izražava u decibelima i izračunava se na sledeći način: $10\log(I_{\max}/I_{\min})$. Velike modulacione dubine omogućavaju veće dužine prostiranja, dobar odnos bit/greška (*bit error rate*) i smanjenu potrebnu osetljivost prijemnika. Najbolji modulatori sa brzinama od 10 Gb/s imaju tipične modulacione dubine od 6-10 dB.

Vrlo je važno da modulatori imaju što manje gubitke. Gubici uključuju optičku snagu izgubljenu usled refleksije, apsorpcije i sprezanja kada se modulator doda u fotonosko kolo. Takođe, manje dimenzije modulatora su poželjne jer se time smanjuju ukupne dimenzije fotonoskog kola, što znači i smanjenje cene čipa.

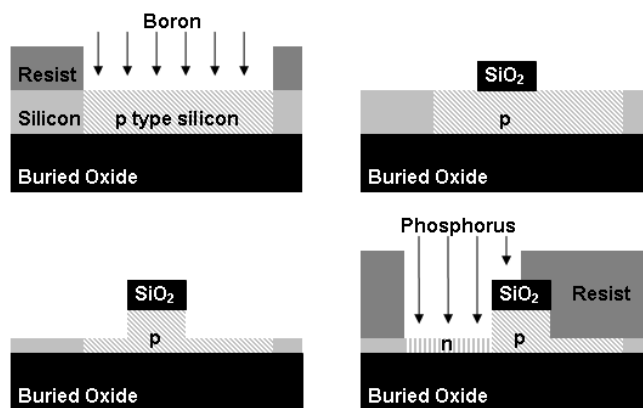
Potrošnja električne energije je postala jako značajan parametar pri razmatranju primene optičkih veza, pa se u većini novijih radova za optičke modulatore i linkove navodi energija utrošena po bitu. Neki autori tvrde da je, da bi optičke veze bile konkurentne električnim, potrebno da energija utrošena po bitu bude značajno manja od potrošnje u bakarnim vezama, koja trenutno iznosi 2-3 pJ/bit. To znači da energija utrošena u optičkim vezama treba da bude nekoliko stotina fJ/bit, što je svakako vrlo zahtevan cilj. Međutim, tipična energetska potrošnja u serverima je 10-30 pJ/bit [17], a kod komercijalnih VCSEL optičkih linkova 10 pJ/bit [18], tako da optičke veze ne moraju da imaju potrošnju reda ~100 fJ/bit da bi se opravdala njihova primena, a ona ne bi donela samo smanjenje energetske potrošnje već i druge prednosti, kao što su povećanje brzine i poboljšana arhitektura računara i telekomunikacionih sistema.

Kao što može da se vidi, postoje brojni protivrečni zahtevi pri realizaciji silicijumskog optičkog modulatora, te je stoga razumljivo zašto je ovo jedna od najvažnijih oblasti u silicijumskoj fotonici. Osim dobrih vrednosti različitih parametara koji su pomenuti u prethodnim pasusima, važno je da se postignu i dobre proizvođačke tolerancije. U pokušaju da se smanji zavisnost modulatora od položaja spoja između p - i n -oblasti, mi smo 2010. predložili nov način proizvodnje [19], koji će biti opisan u daljem tekstu.

Uređaj je baziran na osiromašenju nosilaca pri negativnom naponu na pn spoju. Rebrasti talasovodi su proizvedeni korišćenjem CMOS kompatibilnih procesa na sledeći način: prvo je, korišćenjem fotorezista, fotolitografije, ecovanja (nagrivanja) i implantacije, silicijum dopiran borom kako bi se dobio p -tip poluprovodnika (Slika 5.), zato što je modulacija pomoću slobodnih šupljina efikasnija od modulacije pomoću slobodnih elektrona. Zatim se deponuje i nagriza oksid, kako bi se dobila maska (*hard mask*) za nagrivanje rebrastih talasovoda. Planarna sekcija na drugom kraju rebrastog talasovoda je dopirana fosforom da bi se dobio n -tip poluprovodnika. SiO₂ maska se ne uklanja tokom n -dopiranja kako bi pn spoj uvek bio na istom mestu (Slika 5.). Ova dva područja su okružena p^+ i n^+ kontaktima. Koncentracije p i n nosilaca i pozicije kontakata su pažljivo modelovane pre proizvodnje kako bi se obezbedio optimalan rad modulatora.

Idealno je da pn spoj bude u sredini rib talasovoda jer bi tako interakcija sa optičkim modom koji se prostire kroz rebrasti talasovod bila maksimalna. Međutim, tolerancija pozicije spoja tokom proizvodnje može biti ± 100 nm, što izaziva značajne varijacije u radu optičkih modulatora. Sa ovim novim načinom proizvodnje spoj je uvek na istom mestu. Iako se u odnosu na idealnu situaciju kada je spoj tačno na sredini rebrastog talasovoda gubi oko 25% brzine i efikasnosti modulatora, dobija se konzistentna proizvodnja i smanjuje varijacija parametara modulatora.

Modulatorska dioda se kontroliše pomoću koplanarnih talasnih elektroda koje treba da omoguće prostiranje električnog signala brzinom koja je slična brzini kojom se svetlost prostire kroz talasovod. Debljina elektroda je izabrana tako da se smanje površinski (*skin*) efekti.



Slika 5. Proizvodnja optičkog modulatora sa tačno definisanom pozicijom pn spoja [19]

Prva serija optičkih modulatora napravljenih ovakvom metodom je radila brzinom od 10 Gb/s sa modulacionom dubinom od preko 6 dB [19], što ih je svrstavalo u red najboljih silicijumskih optičkih modulatora do tada predstavljenih u literaturi. Pažljivim karakterisanjem modulatora, uočavanjem mogućih poboljšanja proizvođačkih parametara i poboljšanjem dizajna, modulator druge serije je dao još bolje rezultate: 40 Gb/s sa modulacionom dubinom do čak 10 dB i energetskom potrošnjom od svega 1 pJ/bit [20], što ga trenutno čini ubedljivo najboljim silicijumskim optičkim modulatorom i nagoveštava mogućnost njegove komercijalne primene.

4. ŠTA DALJE?

Silicijumska fotonika je već neko vreme u žiži istraživačke javnosti, kako zbog velikog potencijala, tako i zbog ogromnog napretka ostvarenog u proteklih nekoliko godina. Prethodni odeljci ovog rada su predstavili najnovije trendove u realizaciji optičkih modulatora, ali je vredno napomenuti da je značajan napredak ostvaren i u drugim oblastima: hibridni laseri su postali standardni uređaji na silicijumskim čipovima, germanijumski detektori sa brzinama od 100 GHz su takođe integrisani, a multiplekseri, spreznici i interferometri veoma dobrih karakteristika predstavljeni su u literaturi [7, 21, 22]. Izuzetno zanimljiva oblast je i nelinearna silicijumska fotonika iz koje je u poslednje vreme objavljeno nekoliko značajnih rezultata [23]. Javlja se i sve veći interes za srednju infracrvenu oblast [24, 25]. Kako su pojedinačni uređaji prilično dobro razvijeni, sledeći logičan korak je integracija fotonskih i elektronskih uređaja i kola na istom čipu. Veliki industrijski i akademski konzorcijumi se intenzivno bave ovim problemom, predlažu rešenja i realizuju prve silicijumske optičke linkove. Intel je, na primer, nedavno predstavio prvi silicijumski optički link od 50 Gb/s koji u sebi sadrži hibridne lasere, 4×12,5 Gb/s Si modulare, Ge detektore, multipleksere, spreznike, drajvere, transimpedansne pojačavače, itd. [2]. Ovo je sigurno izuzetno važan rezultat i nagoveštaj onoga što može da nas očekuje u budućnosti, a to je realizacija optičkih veza u računarima sa brzinama koje premašuju 1 Tb/s (10^{12} bita u sekundi). Ipak, i pored

impresivnih rezultata postoje brojni tehnološki izazovi koje treba rešiti pre nego što silicijumska fotonika postane komercijalno primenljiva u nekoliko značajnih oblasti. Ova tehnologija verovatno najviše obećava kad je reč o fotoniko-elektronskoj integraciji na čipu, a dinamika kojom se razvija, kao i rezultati koji se postižu, svakako garantuju da ćemo u bliskoj budućnosti videti superbrze računare i optičke veze bazirane na silicijumskoj fotonici.

5. Literatura

- [1] G. T. Reed and A. P. Knights: *Silicon Photonics: An Introduction*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2004.
- [2] R. Won, "Integrating silicon photonics," *Nature Photonics*, vol. 4, 2010, pp 498-499.
- [3] S. Koehl, A. Liu and M. Paniccia, "Integrated Silicon Photonics: Harnessing the Data Explosion," *Optics and Photonics News*, 17 March 2011, available at: <http://www.osa-opn.org/OpenContent/Features/Integrated-Silicon-Photonics-1.aspx>.
- [4] P. Moon et al., "Process and Electrical Results for the On-die Interconnect Stack for Intel's 45nm Process Generation," *Intel Technology Journal*, vol. 12, 2008, pp. 87-92.
- [5] ITRS, " www.itrs.net/links/2007itrs/execsum2007.pdf," 2007.
- [6] D. Miller, "Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, 2009, pp. 1166-1185.
- [7] D. Liang and J. E. Bowers, "Recent progress in lasers on silicon," *Nature Photonics*, vol. 4, 2010, pp 511-517.
- [8] C. Pollock and M. Lipson: *Integrated Photonics*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003.
- [9] R. A. Soref and B. R. Bennett, "Electrooptical Effects in Silicon," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. QE-23, 1987, pp. 123-129.
- [10] G. Cocorullo and I. Rendina, "Thermo-optical modulation at 1.5 microns in silicon etalon," *Electronics Letters*, vol. 28, 1992, pp. 83-85.
- [11] G. T. Reed: *Silicon Photonics: The State of the Art*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2008.
- [12] G. T. Reed, G. Z. Mashanovich, F. Y. Gardes, and D. J. Thomson, "Silicon optical modulators," *Nature Photonics*, vol. 4, 2010, pp. 518-526.
- [13] F. Y. Gardes, G. T. Reed, N. G. Emerson, and C. E. Png, "A sub-micron depletion-type photonic modulator in silicon on insulator," *Optics Express*, vol.13, 2005, pp. 8845-8854.
- [14] Q. Xu, B. Schmidt, S. Pradhan, and M. Lipson, "Micrometre-scale silicon electro-optic modulator," *Nature*, vol. 435, 2005, pp. 325-327.
- [15] A. Liu, R. Jones, L. Liao, D. Samara-Rubio, D. Rubin, O. Cohen, R. Nicolaescu, and M. Paniccia, "A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor," *Nature*, vol. 427, 2004, pp. 615-618.
- [16] L. Liao, A. Liu, J. Basak, H. Nguyen, M. Paniccia, D. Rubin, Y. Chetrit, R. Cohen, and N. Izhaky, "40 Gbit/s silicon optical modulator for highspeed applications," *Electronics Letters*, vol. 43, 2007, pp. 1196-1197.
- [17] P. K. Pepeljugoski *et al.*: "Low power and high density optical interconnects for future supercomputers," presented at Optical Fiber Communication Conference, San Diego, CA, 21-25 March, 2010, paper OThX2.
- [18] A. Alduino and M. Paniccia, "Wiring electronics with light," *Nature Photonics*, vol. 1, 2007, pp. 153-155.
- [19] D. J. Thomson, F. Y. Gardes, G. T. Reed, F. Milesi, and J.-M. Fedeli, "High speed silicon optical modulator with self aligned fabrication process," *Optics Express*, vol. 18, 2010, pp. 19064-19069.
- [20] D. J. Thomson, F. Y. Gardes, G. Z. Mashanovich, M. Fournier, P. Grosse, J.-M. Fedeli and G. T. Reed, "High contrast 40 Gbit/s optical modulation in silicon," 2011 (submitted).
- [21] Jurgen Michel, Jifeng Liu, and Lionel C. Kimerling, "High-performance Ge-on-Si photodetectors," *Nature Photonics*, vol. 4, 2010, pp. 527-534.
- [22] G. Roelkens, D. Van Thourhout, and R. Baets, "High efficiency grating couplers between silicon-on-insulator waveguides and perfectly vertical optical fibers," *Optics Letters*, vol. 32, 2007, pp.1495-1497.
- [23] J. Leuthold, C. Koos and W. Freude, "Nonlinear silicon photonics," *Nature Photonics*, vol. 4, 2010, pp. 535-544.
- [24] R. Soref, "Mid-infrared photonics in silicon and germanium," *Nature Photonics*, vol. 4, 2010, pp. 495-496.
- [25] G. Z. Mashanovich, M. M. Milošević, M. Nedeljkovic, N. Owens, B. Xiong, E. – J. Teo, and Y. Hu, "Low loss silicon waveguides for the mid-infrared," *Optics Express*, vol. 19, 2011, pp. 7112-7119.

Napomena

Autori se zahvaljuju Royal Society i EPSRC UK na finansiranju.

Prvi autor:

Dr Goran Mashanovich je diplomirao 1995. i magistrirao 1999. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, gde je do 2000. godine radio kao asistent na Smeru za fizičku elektroniku. Doktorirao je 2005. godine iz oblasti silicijumske fotonike na University of Surrey, UK, gde je trenutno zaposlen u zvanju vanrednog profesora. Na istom univerzitetu je i magistrirao 2009. godine, iz oblasti unapređenja nastave u visokoškolskim ustanovama. Menadžer je Grupe za silicijumsku fotoniku koja trenutno ima 15 članova. Autor je više od 100 radova iz oblasti silicijumske fotonike, uključujući 1 Nature rad, 20 radova po pozivu i 7 poglavlja u knjigama. Dr Mashanovich je dobio prestižni Royal Society Research Fellowship 2008. godine. Dobitnik je nekoliko nagrada za istraživanje i inovativno držanje nastave na University of Surrey. Član je OSA (Optical Society of America) i IEEE, a 2010. godine je izabran za Fellow of Higher Education Academy u Velikoj Britaniji.