

**Univerza v Ljubljani**  
**Fakulteta za računalništvo in informatiko**  
*Tržaška 25*  
*Ljubljana*

*Seminarska naloga*

**Silicon optics aims to combine the best of  
both worlds**

**Silicijeva optika namerava združiti najboljše iz obeh  
svetov**

**[41]**

ZMOGLJIVOST IN VREDNOTENJE RAČUNALNIŠKIH SISTEMOV

Ljubljana, 5. 1. 2007

Avtor: Tine Lesjak  
Vpisna številka: 63030315

# 1. Uvod

Razvoj elektronike je silovit. To je moč prebrati prav povsod.

Zgodovinski razvoj elektronike je na grobo mogoče razdeliti na tri dele. "Stari vek", v katerem so prve elektronske računalnike (npr. ENIAC), poganjale elektronke (vacuum tube), je leta 1939 zamenjal "srednji vek". Tega leta je gospod Shottky obelodanil diodo (diode), enega izmed osnovnih elektronskih elementov. Leta 1947 v Bellovih laboratorijih odkrijejo še tranzistor (transistor).

Čeprav smo ta hip še vedno v obdobju "srednjega veka", je na obzorju že "novi vek", ki sicer ne bo odnesel polprevodnikov, bo pa drastično spremenil prenosni element: namesto elektrike bomo govorili o svetlobi oz. optiki.

## Silicij

Silicij (silicon, Si) je kemijski element, s katerim je enostavno delati, je zelo dobro poznan v industriji polprevodnikov in je poceni, saj ga je v naravi na pretek [16]. Je namreč drugi najpogostejši element na Zemlji, za kisikom [27].

## Polprevodnik

Polprevodnik (semiconductor) je snov, ki ne prevaja električnega toka, pravimo, da je izolator, vse dokler mu ne dovedemo dovolj energije. Potem začne električni tok prevajati. Lastnost, da ima lahko polprevodnik dve stanji, je temelj zgradbe vseh današnjih računalniških sistemov, saj temeljijo na dvojiškem številskem sistemu.

## 1.1. Električna

Električna (electricity) je pojem, ki opisuje pojav toka električnega naboja. Električni tok (electric current) povzroča usmerjen tok **elektronov** po električni liniji. Elektron (electron) nosi energijo (električno), ki jo lahko na drugi strani linije sprejmemo. Tako lahko z ustreznim spreminjanjem električnega toka sprejemniku pošiljamo neko informacijo oz. podatek.

Dandanes je razvoj elektronike prišel tako daleč, da smo naleteli na določene fizikalne omejitve, ki nadaljnji razvoj zelo zavirajo ali pa ga celo onemogočajo. Eden od problemov je velikost samega atoma silicija, ki postaja vse prevelik za nadaljnje višanje stopnje integracije v čipih. Na to temo so se razvila številna nova področja, kot je na primer kvantno računalništvo.

Drug velik problem je višanje hitrosti prenosa podatkov, saj električne linije (ponavadi iz bakra) enostavno ne zdržijo več. Že pri frekvenci nekaj MHz lahko pri sicer slabše načrtovanem vezju zaradi karakteristične impedance linije pride do odboja (reflection) signala, na katerega moramo počakati, da izgine. Če imamo vzporedno položenih več žic, smo lahko priča presluhu (crosstalk), ki je posledica elektromagnetnega valovanja na sosednje linije. Pri precej višjih frekvencah, ki se danes uporabljajo, nekaj GHz, je stanje še bolj zapleteno. Moteča postanejo tudi različna popačenja signala, kot sta slabljenje (attenuation) in disperzija (dispersion). Povezave dolžine nekaj centimetrov že znajo predstavljati resen problem.

Te probleme se da učinkovito rešiti z optičnimi povezavami.

## 1.2. Svetloba

Optika (optics) je veja fizike, ki razlaga obnašanje svetlobe. Svetlobo (light) lahko, podobno kot elektriko, izrabimo za prenos informacij oz. podatkov od oddajnika do sprejemnika. Le da tokrat ne govorimo o električnem naboju in elektronih, marveč o **fotonih** (photon), prenašalcih energije (svetlobne).

Medtem ko lahko svetlobo prenašamo tudi brez kakršnegakoli prenosnega medija, je v natančno definiranih strojih, kot so računalniški sistemi, nujno, da zagotovimo pravilen in čimbolj nemoteč prenos podatkov, zato moramo svetlobo umeriti (določiti barvo in usmerjati). Danes se za prenosni medij svetlobe uporabljajo optična vlakna (optical fiber), ki so večinoma zgrajena iz zelo čistega stekla - silike (silica, SiO<sub>2</sub>). Sama svetloba in predvsem lastnosti silike povzročajo popoln odboj (total internal reflection) [5], zato energija ne uhaja iz vlakna, posledice pa so drastično pozitivne. Svetlobo je po optičnih vlaknih mogoče prenašati na ogromne razdalje z visoko hitrostjo in z majhnimi popačenji.

Poleg tega je možno hkrati prenašati več podatkovnih signalov po enem samem optičnem vlaknu tako, da vsakemu signalu priredimo drugo barvo (valovno dolžino) svetlobe. Na takšni osnovi deluje radijski oddajnik, ki hkrati oddaja več radijskih postaj. Ker je valovna dolžina svetlobe milijonkrat manjša od valovne dolžine radijskega signala, lahko optično vlakno hkrati prenaša milijonkrat več podatkov [17].

Posledica tega je, da je teoretična meja najvišje hitrosti prenosa podatkov po enem optičnem vlaknu kar 150 Tb/s [19]. To je toliko, da lahko prenese vse telefonske klice na Zemlji hkrati [15]. Danes komercialna telekomunikacijska podjetja dosegajo hitrosti do 1,28 Tb/s [34].

V praksi je uporaba optičnih vodnikov precej dražja od električnih, saj je stikanje dveh optičnih vlaken nerodno, priključki, sprejemniki in oddajniki pa so dragi.

Zanimivo pa je, da so optični kabli le malenkost dražji od električnih UTP kablov, ki se največ uporabljajo v lokalnih omrežjih [34].

## 1.3. Prednosti in slabosti

Bakrene linije se uporabljajo na kratkih razdaljah zaradi:

- nizke cene izdelave in materiala,
- nizke cene oddajnikov in sprejemnikov,
- lahkega spajanja in
- možnosti prenašanja tako signalov kot same električne energije.

Optični vodniki se uporabljajo na daljših razdaljah zaradi:

- izvzetosti presluha,
- visoke električne upornosti (ne moti jih okolica),
- ne oddajajo ter ne sprejemajo elektromagnetnih motenj,
- manjše teže in velikosti,
- manjše zakasnitve in porabe energije,
- večjega dosega (do 100 km),
- večje pasovne širine (prek 10 THz) in
- ne prožijo isker.

Če na kratko povzamemo: Optične povezave so tako rekoč na vseh področjih boljše od električnih, le pri ekonomskih enačbah se tehtnica prevesi na stran elektrike.

## 1.4. Kako združiti dobre lastnosti obeh svetov?

Čimveč dobrih in čimmanj slabih lastnosti obeh svetov naj bi združila tako imenovana silicijeva optika (silicon optics) oz. v inženirskem svetu bolj poznana kot **silicijeva fotonika**. Silicijeva fotonika (silicon photonics) je tehnologija, ki želi postreči z optičnimi komponentami, narejenimi iz silicija s standardnimi postopki izdelave [31].

A je razvoj silicijeve fotonike na takšni stopnji, kot je bil razvoj integriranih vezij v petdesetih letih.

### Fotonika

Fotonika (photonics) je znanost in tehnologija ustvarjanja, krmiljenja in odkrivanja svetlobe (fotonov), ki je pogosto v vidnem ali infrardečem spektru [6]. Fotonika je znana tudi kot optika na osnovi vlaken (fiber optics) in kot optoelektronika (optoelectronics) [31].

Številna večja podjetja imajo svoje laboratorije in raziskovalne skupine, ki se resno spogledujejo s fotoniko, še številčnejši pa so prav gotovo inštituti in inženirski oddelki univerz. Fotonika je tako popularna, da tudi v Sloveniji od marca 2006 obstaja Strateški raziskovalni načrt za fotoniko, Slovenske tehnološke platforme Fotonika 21, ki ga je vzpostavila Evropska zveza [29].

Ideja se zdi preprosta: **zamenjajmo bakrene žice z optičnimi vlakni** in elektrone s fotoni! Tako bi lahko s pomočjo že danes povsem uveljavljenih in izredno poceni sistemih za izdelovanje električnih integriranih vezij (CMOS postopkih), izdelali vezja z optičnimi komponentami. Radi bi, da bi s snovjo, kot je silicij lahko izdelali optične sprejemnike in oddajnike in to po možnosti z veliko stopnjo integracije ter poceni izdelavo, da bi izdelki bili na voljo tudi za manjše računalnike in lokalna omrežja.

Bakrene žice v čipih in okoli njih bi zamenjali z optičnimi vlakni, s tem pa bi se izognili že omenjenim težavam električnih linij ter zagotovili za več razredov višje hitrosti prenosa podatkov.

## 2. Začetki

Veliko raziskovalnih skupin je že poskusilo idejo uresničiti. Vendar se je kmalu zapletlo.

Nekatere snovi so dobri oddajniki svetlobe. Ko jim dovedemo dovolj električnega toka, njihovi elektroni zbežijo v višja energijska stanja in kasneje pri padcu nazaj v prvotno energijsko stanje oddajo foton. Fiziki znajo ugotoviti, da elektroni v siliciju ne morejo neposredno pasti nazaj v nižje stanje. Zato elektroni ponavadi ne oddajo energije v obliki svetlobe, ampak v obliki toplote [19]. **Silicij je zato slab oddajnik svetlobe.**

Raziskovalne skupine so se razdelile na dva dela. Eni so našli poti, kako pripraviti silicij do tega, da bi izseval svetlobo.

Drugi so se lotili razvijanja optičnih komponent tako, da poskušajo siliciju vcepiti druge polprevodniške primesi. Danes se za komercialne optične komponente namreč uporabljajo **eksotične snovi**. Med najbolj uporabljanimi so polprevodniki galijev arzenid (gallium arsenide, GaAs), indijev fosfid (indium phosphide, InP) in litijev niobat (lithium niobate, LiNbO<sub>3</sub>) [19]. Ti polprevodniki **morajo biti zaradi neskladne strukture ločeni od silicija**.

To naredi izdelavo precej bolj zapleteno in drago, ker morajo biti deli skrbno poravnani, da svetloba pravilno potuje po njih.

Pionir na področju silicijeve fotonike je gospod Soref, ki je že sredi osemdesetih let raziskoval v pravo smer v Ameriškem vojaškem letalskem razvojnem laboratoriju (Air Force Research Laboratory). Od takrat dalje se je zgodilo obilo prelomnih trenutkov na Tehnološkem inštitutu Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology, MIT), na Kalifornijski univerzi v Los Angelesu (University of California at Los Angeles, UCLA), na Catanijski univerzi (University of Catania) na Siciliji, na britanski Univerzi Surrey (University of Surrey, UniS), pri IBM-u, Intelu, Motoroli, STMicroelectronicsu in drugod.

Leta 1996 so raziskovalci z Univerze Rochester (University of Rochester) iz New Yorka, ZDA, in laboratorija pri Britanski obrambni agenciji DERA objavili svetlobno diodo (light emitting diode, LED) iz poroznega silicija, ki deluje tako, da električni tok pretvori v svetlobo. Njena hiba je učinkovitost. Izraba moči je le 0,1 odstotna [7, 21].

#### **LED dioda**

LED diode so narejene iz eksotičnih polprevodnikov. Večinoma je uporabljan galij (Ga). Silicij, iz katerega so narejene navadne diode, nerad oddaja svetlobo.

Raziskovalcem z Univerze Novega južnega Walesa (University of New South Wales), Avstralija, je uspelo podobno LED diodo narediti na podlagi SOI (Silicon on Insulator) tehnologije, vendar je njena učinkovitost prav tako zelo slaba [20].

Leta 1998 je ekipi iz Tokia, Japonska, uspelo povečati njeno učinkovitost na približno 1 %, a je to še vedno premalo za resno uporabo [21].

Novembra 2000 so v Univerzi Trento (University of Trento), Italija, odkrili, da lahko silicijevi delci ojačijo svetlobo [7]. Z ojačenjem svetlobe namreč lahko pridemo do laserjev. Ampak nanodelce se ne da vzbuditi z električnim tokom, temveč z zunanjim laserjem. Učinkovitost je slaba, praktična uporaba pa nezanemljiva.

Marca 2001 so na UniS iznašli silicijevo svetlobno diodo, ki je le za faktor dva ali tri slabša od standardnih [7]. V večjo količino silicija so izstreljevali atome bora (boron, B) [21].

V začetku leta 2004 je raziskovalna skupina v STMicroelectronics, Švica, ubrala drugo pot. Iznašli so čip, ki združuje optiko in elektroniko. Izdelan je iz mešanice delov silicija in eksotičnih snovi. Ta mešanica je zmožna oddati svetlobo stokrat bolj učinkovito od vseh dosedanjih [10].

## 3. Razvoj

### 3.1. Intelov prodor

Intel ne bi bil Intel, če ne bi pozorno spremljal, kaj se dogaja po svetu, znal odlično manipulirati na trgu in, očitno, imel tudi žilico za razvoj. V njihovem Tehnološkem laboratoriju za fotoniko (Photonics Technology Lab) skupaj s sodelovanjem z univerzami vsak dan postavljajo nove mejnike pri izdelavi optičnih komponent na siliciju.

Photonics Technology Lab Intel Corporation <a href="http://www.intel.com">http://www.intel.com</a> Santa Clara, Kalifornija, ZDA Direktor dr. Mario Paniccia
--

Da bi razumeli, kako bo svetloba potovala po siliciju, si pogledajmo, kako potuje danes po optičnih vodnikih. Najprej računalnik pošlje električni signal do optičnega oddajnika, ki signal zakodira v svetlobne impulze. Oddajnik je zgrajen iz laserja in modulatorja, ki ustrezno prestreza žarek in tako ustvarja ničle in enice. Takšen signal potuje po optičnem vlaknu skozi več usmerjevalnikov in spojev, ki ga usmerijo proti cilju. Če signal potuje več kot 100 km, ga okrepi ojačevalnik. Na cilju fotodetektor podatke sprejme in jih dekodira nazaj v električne signale [19].

Torej, za celovito optično povezavo moramo znati ustvariti svetlobo, jo selektivno usmerjati ter voditi, zakodirati in prepoznati.

Intelu in sodelujočim je bolj ali manj dobro uspelo izdelati potrebne optične komponente, vse na osnovi silicija in v skladu s cilji silicijeve fotonike.

### 3.2. Kanal

Najenostavnejši polprevodniški laserji svetijo z žarkom, ki vsebuje več (razpon) valovnih dolžin. Pri optični komunikaciji je nujno, da potujoča svetloba zajema čimmanj valovnih dolžin, saj le-te lahko predstavljajo različne podatkovne kanale. Zato je potrebno te žarke filtrirati. Za filtriranje se uporabljajo tako imenovane mrežice (grating) in ogledalca (mirror). Oboje je vgrajeno v tako imenovani kanal (waveguide), s katerim lahko vsako valovno dolžino posebej izsejemo, hkrati pa služi za usmerjanje svetlobe. Tipično so ti deli **premikajoči, kar pomeni, da se obrabljajo in so počasni**. Te probleme se da rešiti z dražjimi polprevodniški laserji, ki imajo razpon valovne dolžine veliko manjši in potreba po takšnih kanalih odpade.

Februarja 2002 je Intel predstavil poceni nastavljiv kanal brez premikajočih se delov [11]. Kanal ima vgrajene silicijeve mrežice, skozi katere potuje svetloba. Katero valovno dolžino bodo mrežice prepuščale, se nastavlja z njihovim segrevanjem.

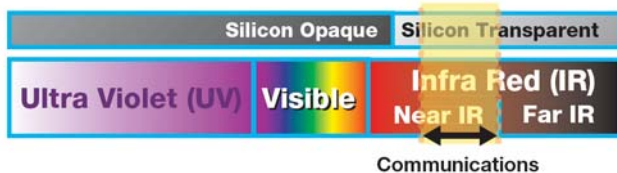
### 3.3. Poravnava

Optične komponente je potrebno ustrezno poravnati, tako da svetloba pravilno potuje skozi njih. Največji problem pri tem predstavlja priklop optičnega vlakna na optično komponento [19]. To pomeni, da je potrebno laserje **prižgati, opazovati delovanje in nepravilnosti poravnati**. To zahteva veliko dela in stroškov pri sami izdelavi.

Razvijalci pri Intelu skušajo komponente poravnati pasivno, se pravi tako, da jih ni potrebno prižgati in opazovati. To jim uspeva tako, da v silicij izjedkajo posebne utore, ki samodejno postavijo vlakno na pravo mesto [11].

### 3.4. Fotodetektor

Svetlobo na sprejemni strani prepoznavamo s fotodetektorjem. Fotodetektor ima nalogo, da svetlobo pretvori v električni tok. Narediti fotodetektor s silicijem je precejšen izziv. Današnje



Slika 1: Optične komunikacije uporabljajo infrardeč spekter, ki ga silicij prepušča (vir: Intel).

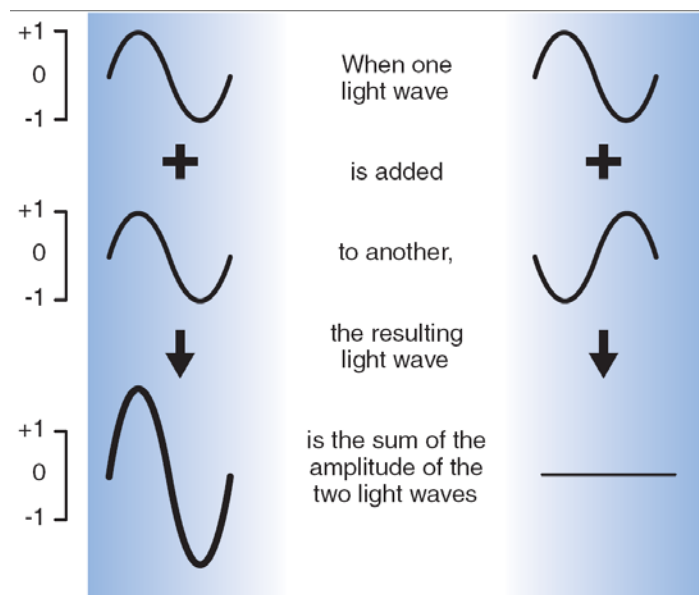
optične komunikacije namreč uporabljajo svetlobo v **infrardečem spektru, ki ga silicij prepušča** (je transparenten). Zato te svetlobe ne more zaznati. Zanimivo pa je, da silicij zazna vidni spekter svetlobe, zato se na široko uporablja v fotocelicah (fotoaparati, kamere).

Poleg tega je dobro omeniti tudi dejstvo, da ravno zaradi prepuščanja infrardeče svetlobe, jo silicij zna voditi [15].

Pri Intelu so leta 2006 predstavili fotodetektor, kateremu so v silicij vmešali germanij (germanium, Ge). Vmešan germanij razširi občutljivost silicija tudi na infrardeč spekter [11].

### 3.5. Modulator

Pri pošiljanju podatkov do sprejemnika moramo svetlobo na nek način zakodirati, tako da nezmotno predstavlja določen bit. To delo opravijo modulatorji. Ti svetlobo na poti iz laserja proti sprejemniku ugasnejo, kar predstavlja logično ničlo, in prižgejo, kar predstavlja logično enico. Prva rešitev, ki nam pade na pamet je, da bi laserje ustrezno prižigali in ugašali. To ima za rezultat negativne posledice, saj se razpon valovne dolžine pri prižiganju in ugašanju spreminja, laser pa se segreva. Pri velikih frekvencah delovanja je svetloba motna, nepravilne valovne dolžine in zaradi pregrevanja tudi zakasnjena. Teh posledic se enostavno izognemo tako, da laser pustimo svetiti konstanto, za njim pa dodamo zaslonko, ki svetlobo prekinja. Uporabiti mehansko zaslonko je zaradi gibljivih delov nesmiselno.

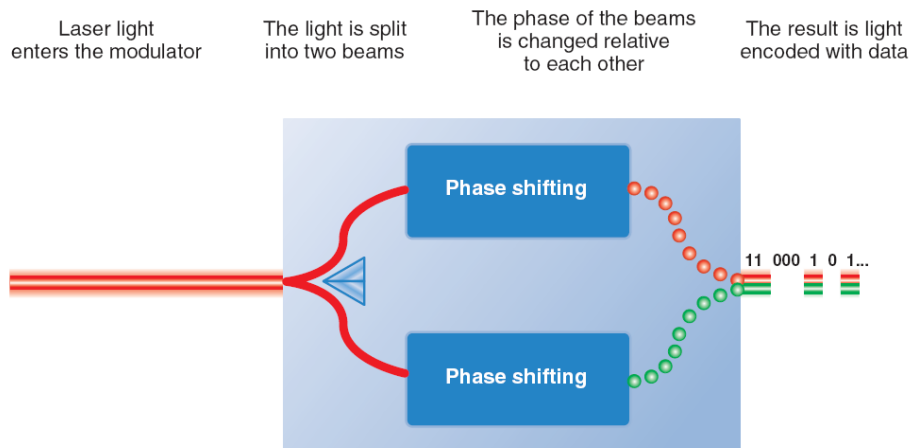


Slika 2: Seštevek usklajenih in zamaknjenih signalov (vir: Intel).

Svetloba je elektromagnetno valovanje, ki niha sinusno - signal ima obliko sinusne funkcije. Če dva takšna signala uskladimo (fazno poravnamo) in seštejemo, dobimo povečan signal za

dva, če pred seštevanjem drug signal fazno obrnemo (pomaknemo za 180 stopinj), se signala med sabo odštejeta in dobimo temo.

Zaradi tega pojava, ki mu pravimo tudi amplitudna modulacija (amplitude modulation), je modulator zgrajen tako, da svetlobni signal razdeli na dva dela, vsakega posebej ustrezno fazno zamakne (phase shift) glede na podatkovni bit in amplitudi sešteje. Takšen pristop je poznan iz Mach-Zehnderjevega interferometra [31].



Slika 3: Optični modulator po principu Mach-Zehnderjevega interferometra (vir: Intel).

Fotodetektor takšen signal zlahka prepozna.

Vprašanje, ki se tukaj poraja, je, kako zamakniti (upočasniti) svetlobo?

Prvi silicijev modulatorji so delovali tako, da so v silicijev kanal vbrizgali elektrone, ki so prečkali pot svetlobi. Ti so jo upočasnili. S temi poskusi so inženirji dosegli **največjo hitrost 20 MHz**, kar je občutno premalo za današnje razmere.

Najhitrejši modulatorji so danes zgrajeni iz litijevega niobata, ki z dodanim električnim poljem spremeni svetlobi hitrost, ko potuje skozenj [19].

Intel je leta 2004 razvil modulator, ki zmora hitrost prek 1 GHz [11, 12, 13, 16]. Trik je v tem, da modulator veliko hitreje vbrizga elektrone v kanale in kar se je izkazalo za še bolj pomembno, jih tudi odstranjuje. Namesto diod, so vgradili tranzistorsko vezje, ki elektrone, namesto da jih čaka, da ugasnejo, potegne ven [19]. V Intelovem laboratoriju so raziskovalci leta 2005 prikazali delujoč silicijev modulator s hitrostjo prenosa 10 Gb/s [16].

### 3.6. Laser

Največji trn v peti predstavlja vir svetlobe, laser.



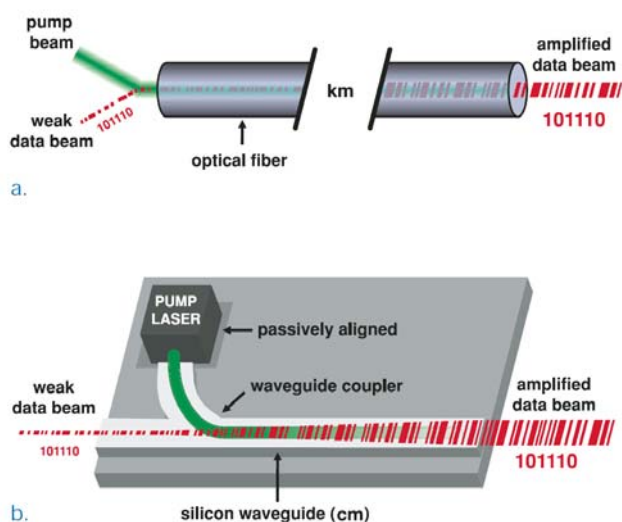
## Laser

Laser je v bistvu kratica za Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation. Je naprava, ki oddaja koherenten žarek svetlobe. Koherenten žarek je takšen, v katerem imajo vsi fotoni enako valovno dolžino, enako fazo in enako smer. To dosežemo tako, da zunanjo energijo (bodisi električno bodisi svetlobno) dovedemo (pump) v lasersko votlino (laser cavity), ki je obdana z ogledalci. V tej votlini se svetloba odbija in zaradi Ramanovega efekta tudi ojači.

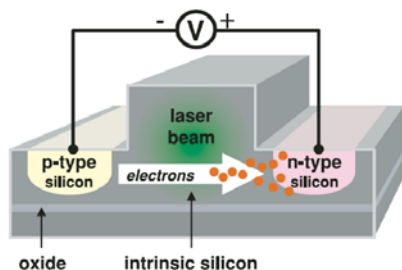
Laser je prvi zgradil Ted Maiman leta 1960 [14, 15].

### 3.6.1. Ojačevalnik

Leta 2004 je skupina iz UCLA prikazala prvi silicijev ojačevalnik, ki izkorišča Ramanov efekt [18].



Slika 4: Ramanov efekt z zunanjim virom energije ojači podatke v dolgem optičnem vlaknu (a). To je mogoče narediti tudi s silicijem na precej manjšem prostoru (b) (vir: Intel).



Slika 5: PIN dioda odvaja odvečne elektrone, ki ojačenje zmanjšujejo (vir: Intel).

Ramanov efekt (Raman effect) se skupaj z zunanjim virom energije pogosto uporablja za ojačenje svetlobe. Ko svetloba potuje nekaj kilometrov po optičnem vlaknu, žarek zaradi Ramanovega efekta pridobi dovolj energije, da precej okrepi signal. Če ta žarek omejimo, da se nekajkrat odbije sem ter tja po vlaknu, lahko dobimo čisti laserski žarek.

Zaradi silicijeve kristalne strukture je Ramanov efekt v siliciju deset tisočkrat večji. To pomeni, da lahko s silicijem naredimo ojačevalnik velikosti le nekaj centimetrov [14, 15, 19].

Intel se je leta 2005 lotil narediti Ramanov ojačevalnik s kanali v siliciju.

Izkazalo se je, da je pri določeni moči dovajanja energije, efekt bil prav nasproten. Ojačenje se je zmanjševalo. Pri razvoju so zato kanal spremenili tako, da so ga naredili v obliki PIN diode (p-tip, čisti silicij, n-tip). PIN dioda je narejena po standardnih CMOS postopkih in je iz silicija. Težava PIN diode zna biti precejšnja poraba energije.

Junija 2006 je ekipa iz UCLA pokazala, da imajo silicijevi ojačevalniki na Ramanov efekt nelinearne fotovoltaične lastnosti [18]. Fotovoltaični efekt (photovoltaic effect) je pojav v sončnih celicah, ko se svetlobna energija pretvarja v električno [36]. Z

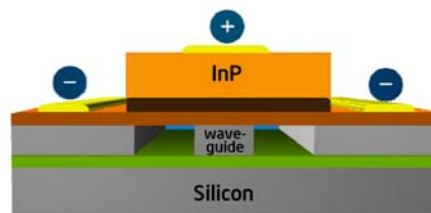
uporabo tega efekta bi bilo možno zelo zmanjšati porabo ojačevalnika.

### 3.6.2. Žarek

Septembra 2006 so Intelovi strokovnjaki s pomočjo kolegov iz Kalifornijske univerze v Santa Barbari (University of California at Santa Barbara), ZDA, naredili še hibridni silicijev laser, ki je zgrajen iz silicija in indijevega fosfida. Obe snovi so na enostaven in standarden način združili z električno nabitim kisikom (plazmo) debeline 25 atomov, ki deluje kot lepilo.

Indijev fosfid je eden izmed polprevodnikov, ki pri vzburjanju z električnim tokom oddaja fotone. Ti fotoni neposredno preidejo v silicijev kanal. Ker svetlobo znamo umerjati s kanali, potreba po kakršnemkoli nadzoru indijevega fosfida in poravnavanja odpade.

Prej so laserski žarek dobili v silicijev čip na enega izmed dveh načinov. Ali so vgradili in poravnali posamezen laser neposredno v kanal, ali pa usmerili žarek iz zunanjega nevgrajenega laserja prek optičnega vlakna v čip. Obe metodi sta dragi in nepraktični za masovno izdelavo [16].



Slika 6: Shematski prerez hibridnega silicijevega laserja (vir: Intel).

Hibridni silicijev laser meri 1 mikron v širino in 800 mikronov ( $\mu\text{m}$ ) v dolžino. Za primerjavo, povprečen človeški las je debel 100 mikronov [17].

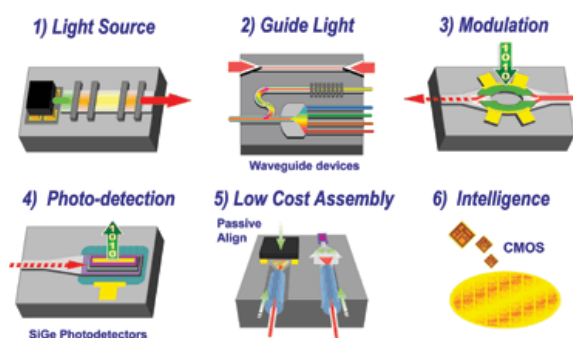
## 4. Povzetek

Če vse skupaj povzamemo in strnemo, ugotovimo, da nam ne manjka veliko do masovne in poceni izdelave optičnih komponent na osnovi silicija in s CMOS postopkom. Glavno težavo v bistvu predstavlja sam silicij, ki **nerad oddaja svetlobo**. Razlog, da pa sploh govorimo o silicijevi fotoniki, je v nezdržljivosti polprevodnikov, ki radi oddajajo svetlobo, in silicija, saj zaradi tega **ne morejo biti enostavno sklopljeni med seboj**.

Optične komponente, ki jih potrebujemo so:

- oddajnik
  - laser za vir svetlobe ter kanali za izbiro valovne dolžine,
  - ojačevalnik za ojačenje svetlobe,
  - modulator za kodiranje vhodnih podatkov v žarke,
- optično vlakno za prenos svetlobe
- sprejemnik
  - fotodetektor za dekodiranje žarkov v izhodne podatke.

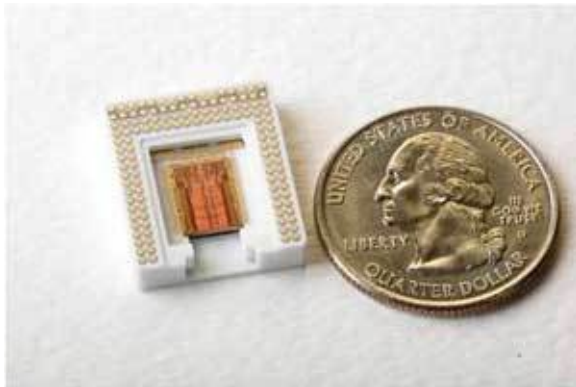
Poleg tega bo pasivna poravnava doprinesla k natančnosti in enostavnosti. Ne smemo pa pozabiti še na primerno krmiljenje (logiko) vseh teh komponent.



Slika 7: Šest glavnih področij pri obravnavanju celovitega prehoda na silicijev optične komponente (vir: Intel).

## 4.1. Prvi rezultati

Zelo optimistični rezultati prihajajo iz Kalifornijske univerze v Santa Barbari, kjer je skupini razvijalcev v zadnjih letih uspelo uspešno združiti več silicijevih optičnih komponent, ki so skupaj zdržale hitrost prenosa tudi do 160 Gb/s [16].



Slika 8: Prvi optični oddajni in sprejemni čip iz silicija (vir: Luxtera).

Podjetje Luxtera je 17. oktobra 2006 prvo na svetu predstavilo SOI CMOS čip s sprejemnikom in oddajnikom, ki naj bi bil sposoben prenosa podatkov štirih valovnih dolžin po 10 Gb/s, skupaj torej 40 Gb/s [22].

Laser je zgrajen iz indijevega fosfida, za kodiranje so vzeli Mach-Zehnderjev modulator [24]. Čip naj bi ugledal masovno izdelavo že leta 2007.

Pri Luxteri so tehnologijo razvili delno s podjetjem Sun Microsystems, tehnologijo pa so poimenovali CMOS Photonics.

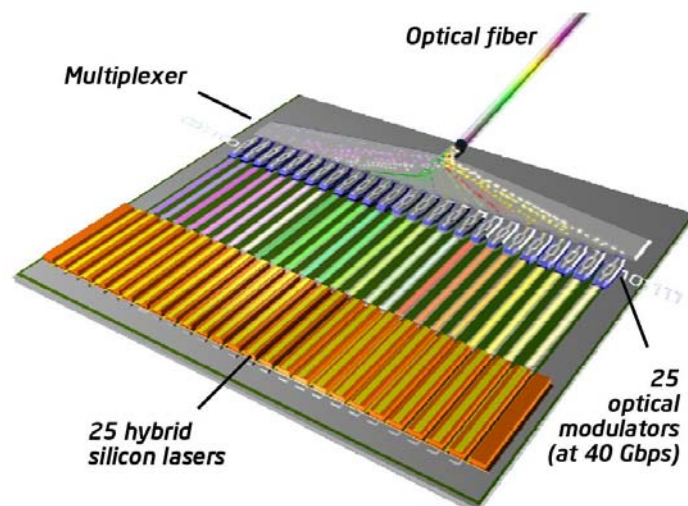
## 4.2. Pridobitve

Optične komponente, tako oddajniki kot sprejemniki, bodo vgrajeni v en sam čip, ki bo imel električne nožice in optične priključke. S pomočjo visoke stopnje integracije bo možno na ta isti čip dodati tudi precej električne logike. Vse komponente bodo izdelane na osnovi silicija in bodo med sabo združljive v smislu pakiranja, tako da jih bo mogoče izdelati s standardnimi CMOS postopki. To pa pomeni **zelo nizko ceno, majhno velikost in izredno zmogljivost**.

Že danes se pri daljših in bolj obremenjenih povezavah za komunikacijo uporabljajo optični vodniki. Praktično vsi telekomunikacijski ponudniki imajo komunikacijsko hrbtenico zgrajeno z optičnimi vodniki. Večje strežniške farme so znotraj prav tako povezane z optiko. Zatakne se pri posameznem uporabniku ali manjšem podjetju. Ti večinoma imajo bakrene linije, uporablja se parica. Prepletena parica (twisted pair) je z najnovejšimi tehnologijami (xDSL) sposobna prenašati največ nekaj Mb/s na razdalji do 5 km. Na manjših razdaljah (do 100 m) je največ, kar lahko trenutno dosežemo, 1 Gb/s (1000BASE-T Ethernet) [25].

Ko bo trg z optičnimi CMOS čipi kolikor toliko konkurenčen, se lahko brez problema nadejamo hitrosti večje kot 100 Gb/s v lokalnem omrežju in do internetnega ponudnika. Silicijeve optične komponente bodo začele nadomeščati današnje visoko zmogljive nesilicijeve, izplačale se bodo tudi mešane (hibridne) naprave [19].

Kasneje lahko optični vodniki preidejo tudi v notranjost samega računalnika, kjer bodo zamenjali danes standardna bakrena tiskana vezja in vodila z optičnimi vlakni med posameznimi čipi. Še kasneje bodo optična vlakna nadomestila povezave celo znotraj procesorja, ki bodo takrat verjetno prepleteni že s stotinami jeder.



Slika 9: Primer terabitnega optičnega oddajnika na enem čipu (vir: Intel).

## 5. Viri

- [1] Wikipedia (19:00, 1. december 2006) Polprevodnik. Wikipedia, Wikimedia Foundation, Inc. <http://sl.wikipedia.org/wiki/Polprevodnik>
- [2] Wikipedia (03:40, 18. december 2006) Silicon. Wikipedia, Wikimedia Foundation, Inc. <http://en.wikipedia.org/wiki/Silicon>
- [3] Wikipedia (19:57, 18. december 2006) Optics. Wikipedia, Wikimedia Foundation, Inc. <http://en.wikipedia.org/wiki/Optics>
- [4] Wikipedia (20:03, 18. december 2006) Optical fiber. Wikipedia, Wikimedia Foundation, Inc. [http://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_fiber](http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber)
- [5] Wikipedia (13:45, 12. december 2006) Total internal reflection. Wikipedia, Wikimedia Foundation, Inc. [http://en.wikipedia.org/wiki/Total\\_internal\\_reflection](http://en.wikipedia.org/wiki/Total_internal_reflection)
- [6] Wikipedia (06:36, 16. december 2006) Photonics. Wikipedia, Wikimedia Foundation, Inc. <http://en.wikipedia.org/wiki/Photonics>
- [7] Voss D. (junij 2001) Silicon Lasers: Faster chips require built-in optics. Technologyreview.com, Technology Review Inc. <http://www.technologyreview.com/InfoTech/12453/>
- [8] Service R. (julij 2005) Intel's Breakthrough: Its new silicon laser could add decades to Moore's Law. Technologyreview.com, Technology Review, Inc. <http://www.technologyreview.com/InfoTech/14582/>
- [9] Wikipedia (01:36, 20. december 2006) Light-emitting diode. Wikipedia, Wikimedia Foundation, Inc. [http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting\\_diode](http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode)
- [10] Technology Review (februar 2004) Glowing Silicon: A chip that combines optics and electronics generates light 100 times more efficiently than previous devices. Technologyreview.com, Technology Review, Inc. <http://www.technologyreview.com/InfoTech/13458/>
- [11] Paniccia M., Krutul V., Koehl S. (februar 2004) Intel's Research in Silicon Photonics Could Bring High-Speed Optical Communication to Silicon. White Paper. Research and Development at Intel, Intel Corp. <ftp://download.intel.com/technology/silicon/sp/download/sipwp2.pdf>
- [12] Paniccia M., Krutul V., Koehl S. (februar 2004) Introducing Intel's Advances in Silicon Photonics. White Paper. Research and Development at Intel, Intel Corp.

- [ftp://download.intel.com/technology/silicon/sp/download/Intel\\_Advances\\_Silicon\\_Photonics.pdf](ftp://download.intel.com/technology/silicon/sp/download/Intel_Advances_Silicon_Photonics.pdf)
- [13] Paniccia M., Krutul V., Koehl S. (februar/marec 2004) Intel Unveils Silicon Photonics Breakthrough: High-Speed Silicon Modulation. Magazine. Technology@Intel, Intel Corp. <http://www.intel.com/technology/magazine/silicon/si02041.pdf>
- [14] Paniccia M., Krutul V., Koehl S. (2005) Continuous Silicon Laser: Intel researchers create the first continuous silicon laser based on the Raman effect using standard CMOS technology. White Paper. Intel Corp. [http://download.intel.com/technology/silicon/sp/download/Silicon-Laser\\_WhitePaper.pdf](http://download.intel.com/technology/silicon/sp/download/Silicon-Laser_WhitePaper.pdf)
- [15] Intel (2005) Continuous Silicon Laser: Interesting Facts. Intel Corp. [ftp://download.intel.com/technology/silicon/sp/download/Silicon\\_Laser\\_Facts.pdf](ftp://download.intel.com/technology/silicon/sp/download/Silicon_Laser_Facts.pdf)
- [16] Paniccia M., Krutul V., Jones R., Cohen O., Bowers J., Fang A., Park H. (2006) A Hybrid Silicon Laser: Silicon photonics technology for future tera-scale computing. White Paper. Research at Intel, Intel Corp. [ftp://download.intel.com/research/platform/sp/hl\\_wp1.pdf](ftp://download.intel.com/research/platform/sp/hl_wp1.pdf)
- [17] University of California Santa Barbara, Intel (2006) Hybrid Silicon Laser: Interesting Facts. [ftp://download.intel.com/research/platform/sp/hl\\_factsheet.pdf](ftp://download.intel.com/research/platform/sp/hl_factsheet.pdf)
- [18] Abraham M. (december 2006) Researchers at UCLA Engineering Announce Breakthrough in Silicon Photonics Devices. Henry Samueli School of Engineering and Applied Science, UCLA Engineering. <http://www.engineer.ucla.edu/news/2006/silicon%20amplifiers.html>
- [19] Paniccia M., Koehl S. (oktober 2005) The Silicon Solution. IEEE Spectrum. <http://www.spectrum.ieee.org/oct05/1915>
- [20] UNSW (december 2006) Silicon Photonics. School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering, The University of New South Wales. [http://www.pv.unsw.edu.au/research/siliconphotonics\\_LED.asp](http://www.pv.unsw.edu.au/research/siliconphotonics_LED.asp)
- [21] Canham L. (1. junij 2001) Silicon photonics: a light at the end of the tunnel?. Optics.org, IOP Publishing Ltd. <http://optics.org/articles/ole/6/6/5/1>
- [22] Luxtera (17. oktober 2006) Luxtera is First to Demonstrate Single Chip CMOS Photonics 40Gbps WDM Solution. Press Release. Luxtera, Inc. [http://www.luxtera.com/news\\_press\\_2006\\_1017.htm](http://www.luxtera.com/news_press_2006_1017.htm)
- [23] Luxtera (december 2006) Silicon Photonics - Luxtera is the world leader in CMOS photonics. Luxtera, Inc. <http://www.luxtera.com>
- [24] Tlalka M. (december 2006) CMOS photonics is here. Lightwave, PennWell Corporation. [http://lw.pennnet.com/articles/article\\_display.cfm?Section=ARTCL&C=Techn&ARTICLE\\_ID=279720&KEYWORDS=luxtera&p=13](http://lw.pennnet.com/articles/article_display.cfm?Section=ARTCL&C=Techn&ARTICLE_ID=279720&KEYWORDS=luxtera&p=13)
- [25] Wikipedia (18:33, 16. december 2006) Gigabit Ethernet. Wikipedia, Wikimedia Foundation, Inc. <http://en.wikipedia.org/wiki/1000BASE-T>
- [26] Wikipedia (18:09, 22. december 2006) Fiber-optic communication. Wikipedia, Wikimedia Foundation, Inc. [http://en.wikipedia.org/wiki/Fiber-optic\\_communication](http://en.wikipedia.org/wiki/Fiber-optic_communication)
- [27] Chemistry Operations (15/12/2003) Silicon. University of California. <http://periodic.lanl.gov/elements/14.html>
- [28] Geer D. (junij 2006) Silicon Optics Aims to Combine the Best of Both Worlds. Technology News, IEEE Computer Society Press. <http://www.geercom.com/r6016.pdf>
- [29] Slovenska tehnološka platforma Fotnika 21 (september 2006) Proti svetli prihodnosti Slovenije: Slovenski Strateški raziskovalni načrt v fotoniki. Fotonika 21, Slovenska Tehnološka Platforma. [http://www.fotonika21.si/dokumenti/SRA\\_Fotonika21\\_%20september\\_2006.pdf](http://www.fotonika21.si/dokumenti/SRA_Fotonika21_%20september_2006.pdf)

- [30] Solijacic M. (14. november 2006) New Hope for Optical Signal Processing: Photonic crystals may finally make all-optical signal processing a reality. Technologyreview.com, Technology Review, Inc. <http://www.technologyreview.com/NanoTech/17711/>
- [31] Intel (december 2006) Silicon Photonics Glossary: Glossary of Terms Relating to Silicon Photonics. Technology & Research at Intel, Intel Corp. <http://www.intel.com/technology/silicon/sp/glossary.htm>
- [32] Intel (december 2006) Silicon Photonics Research. Intel Platform Research, Intel Corp. <http://www.intel.com/research/platform/sp/>
- [33] UCSB (december 2006). Optoelectronics Research Group, UCSB. <http://www.ece.ucsb.edu/uoeg/>
- [34] Luxtera (november 2005) Fiber will displace copper sooner than you think. Luxtera, Inc. [http://www.luxtera.com/assets/Luxtera\\_WPFiberReplacesCopper.pdf](http://www.luxtera.com/assets/Luxtera_WPFiberReplacesCopper.pdf)
- [35] Kodek D. (1993) Mikroprocesorski sistemi. Bi-Tim d.o.o., Ljubljana. Vodila in linije, Lastnosti linij, str. 156-172.
- [36] Wikipedia (21:31, 29. december 2006) Solar cell. Wikipedia, Wikimedia Foundation, Inc. [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell)