

Lappeenrannan teknillinen yliopisto,
Sähkötekniikan osasto

DIPLOMITYÖ
16.5.2005

**SÄHKÖISEN JA OPTISEN SIGNAALIN KÄYTTÖ
SAMALLA PIIRILEVYLLÄ**

Diplomityön aihe on hyväksytty Sähkötekniikan osaston osastoneuvostossa
11.5.2005.

Työn tarkastavat Prof. Pertti Silventoinen ja Tkt. Mikko Kuisma.

Jukka Tanskanen
Ikävalonkuja 2A42
55100 Imatra
050-3551335

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Sähkötekniikan osasto

Jukka Tanskanen

Sähköisen ja optisen signaalin käyttö samalla piirilevyllä

Diplomityö

2005

46 sivua, 26 kuvaa

Tarkastajat: Prof Pertti Silventoinen

Tkt Mikko Kuisma

Hakusanat: Valokanava, valokuitu, optoelektronikka, modulointi.

Työssä tutkittiin sähköisen ja optisen signaalin siirtoa samalla piirilevyllä. Optisen siirtotien komponentit ja niiden toiminta esiteltiin teoriakappaleessa. Valosignaalin vaimentumisilmiö selitettiin pääasiassa johtuvan absorption ja sironnan vaikutuksesta. Sironnan ja absorption vaikutusta valokuidussa käytettävään aallonpituusalueeseen tutkittiin ja esiteltiin valon yleisin modulaatiomenetelmä WDM. Työssä esiteltiin myös dispersion aiheuttama aikahajonta.

Optisen signaalin siirrossa piirilevyllä keskityttiin valokanava- ja free-space-siirtoon. Valokanavamateriaalin vaikutusta heijastuksiin optisessa tiedonsiirrossa piirilevyllä tutkittiin.

Nykyisten piirilevyjen tuotantomenetelmien käytön mahdollisuutta valokanavapiirilevyn valmistuksessa tutkittiin eri materiaaleille. Moduulien sisäisten tiedonsiirtoteiden integroinnin yleistymistä tulevaisuudessa perusteltiin.

Lopuksi työssä esiteltiin kolme uutta keksintöä liittyen optiseen tiedonsiirtoon. Tarkoituksena oli esittää alan moninaisuutta ja uusien sovellusten mahdollisuuksia.

ABSTRACT

Lappeenranta University Of Technology

Department of Electrical Engineering

Jukka Tanskanen

Transferring of electrical and optical signal on the same printed circuit board

Master's Thesis

2005

46 pages, 26 figures

Examiners: Prof Pertti Silventoinen

Tkt Mikko Kuisma

Keywords: Waveguide, optical fiber, optoelectronics, modulation.

In this thesis, transferring of electrical and optical signal on the same printed circuit board was introduced. Components needed in optical signal transferring were presented in the theory section. Optical signal losses were told to be resulted of signal absorption and scattering. The affect of absorption and scattering to usable wavelengths of light were investigated. Most used modulation technology in optical signal transferring, WDM, was also presented. Effect of dispersion to the signal was researched.

Waveguide and free-space optical signal transferring were centred on printed circuit board transferring methods. The scattering of waveguide materials were examined.

Applicability of printed circuit board production machinery in making waveguide board was investigated in this thesis. Possible integration of optical modules in the future was explained.

Three new inventions in the field of optical signal transferring was introduced at last chapter. The reason for this was to show reader the wideness of the field of optoelectronics and to present the probability of new inventions in the near future.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	7
2. TEORIAA	12
2.1 Valonlähteet	12
2.1.1 LED (Light-Emitting Diode)	13
2.1.2 Laser (Light Amplification by Stimulated Emission).....	15
2.1.3 VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser).....	18
2.2 Vastaanottimet	19
2.3 Vaimennus	21
2.4 Aallonpituusalueet	23
2.5 Aallonpituuskanavointi	24
2.6 Dispersio	24
3. OPTINEN TIEDONSIIRTO.....	26
3.1 Valokanavat	28
3.2 Optisen signaalin siirto valokanavasta optoelektroniseen laitteeseen	30
4. VALOKANAVAMATERIAALIT	32
5. TUOTANTO.....	34
5.1 Uudet kehitysaskeleet	37
5.1.1 Mikropallolinssit	37
5.1.2 Valokanavaristeys	39
5.1.3 Puolijohteen valmistus	41
6. YHTEENVETO	42

Symboli- ja lyhenneluettelo

α	Valon suurin tulokulma kuituun
α_R	Kokonaisheijastuksen rajakulma
β	Absorptiokerroin
λ	Aallonpituus
η	Kytkenätehokkuus
η_D	Valodiodin hyötysuhde
σ_λ	Spektrinen leveys
ν	Taajuus
a	Optisen kuidun ytimen säde
a_s	LED:n emittoiman valon säde
c	Valon nopeus tyhjiössä
D	Puolijohteen paksuus
E_g	Kielletyn energiavälin suuruus elektronivolteina
h	Planckin vakio
L	Laserin peilien etäisyys
m	Positiivinen kokonaisluku
n	Taitekerroin
NA	Numeerinen aperttuuri
P_0	Laserin lähtöteho
P_{abs}	Valodiodin absorboima optinen teho
P_{in}	Valodiodille saapuva optinen teho

DFB	Distributed feedback
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing, aallonpituuskanavointi; mona aallonpituutta
LAN	Local Area Network, lähiverkko
LED	Light emitting diode
OEIC	Optoelectronic integrated circuit, optoelektroninen integroitu piiri
PMMA	Polymetyylimetakrylaatti
QWI	Quantum well intermixing
SOI	Silicon on insulator
VCSEL	Vertical cavity surface emitting laser
WAN	Wide Area Network, kaukoverkko
WDM	Wavelength Division Multiplexing, aallonpituuskanavointi; kaksi aallonpituutta

1. JOHDANTO

Optista tiedonsiirtoa on tiedettävästi käytetty ensimmäisen kerran Kreikassa 800-luvulla sodankäynnin apuvälineenä. Myöhemmin erilaisia merkkivaloja on käytetty koodattujen viestien välitykseen mm. purjehduksessa. Ensimmäinen kehittyneempi optinen tiedonsiirtojärjestelmä oli Alexander Graham Bellin suunnittelema. Hän käytti vuonna 1880 peilijärjestelmää auringonvalon synnyttämän signaalin moduloimiseen ääniaalloilla. Signaali muutettiin takaisin sähköiseksi seleenivalokennojen avulla. /1/, /2/

Optisen kuidun kehityksen alkuna voidaan pitää 1870-luvulla englantilaisen tiedemiehen John Tyndallin koetta, jossa hän osoitti että valoa voidaan johtaa ohuen vesisuihkun avulla. Koe perustui nykyisin kokonaisheijastuksen nimellä kulkevaan ilmiöön. /3/

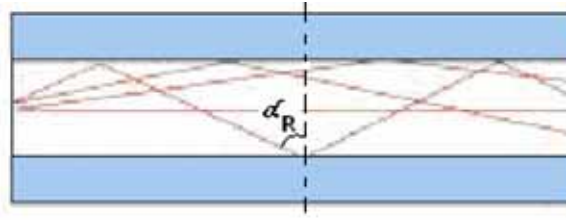
Kokonaisheijastus johtuu valon taitumisesta pinnan normaalista poispäin tullessaan optisesti tiheämmästä aineesta harvempaan. Tulokulman ollessa riittävän suuri säde heijastuu pitkin rajapintaa ja tulokulman ollessa tätä suurempi kaikki rajapintaan tuleva valo heijastuu, eikä valoa mene lainkaan läpi. Tätä valon tulokulmaa kutsutaan kokonaisheijastuksen rajakulmaksi α_R ja sille pätee seuraavasti:

$$\alpha_R = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1)$$

missä n_1 on valon tulosuunnassa ensimmäisen aineen taitekerroin

n_2 on valon tulosuunnassa toisen aineen taitekerroin.

Valonsäteiden eteneminen valokuidussa ja kokonaisheijastuksen rajakulma on esitetty kuvassa 1.

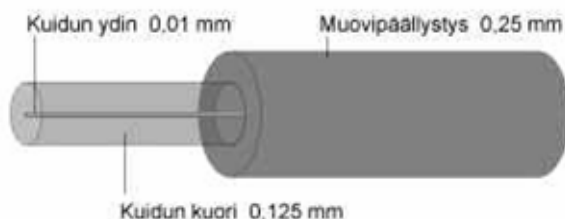


Kuva 1. Valon eteneminen valokuidussa sekä kokonaisheijastuksen rajakulma α_R .

Alkuvaiheessa vaimennus oli normaalin ikkunalasin luokkaa, n. 1000 dB/km. Valokuidut olivat kuitenkin tuolloin vain päällystämättömiä lasiputkia ja niiden optiset ominaisuudet vaihtelivat hyvinkin paljon olosuhteiden kuten kosteuden ja epäpuhtauksien myötä. 1950-luvun puolen välin tienoilla tanskalainen Abraham van Heel keksi päällystää lasiputken toisella lasiaineella, jolla oli pienempi taitekerroin. Tällä tavalla kuitu saatiin suojattua epäpuhtauksilta ja kosteudelta. /3/

Toinen läpimurto tapahtui vuonna 1970, kun Corning Glass Works pystyi valmistamaan lasia jossa vaimennus oli vain 20 dB/km. Nykyisissä kuiduissa vaimennus on jopa alle 0,2 dB/km. /5/

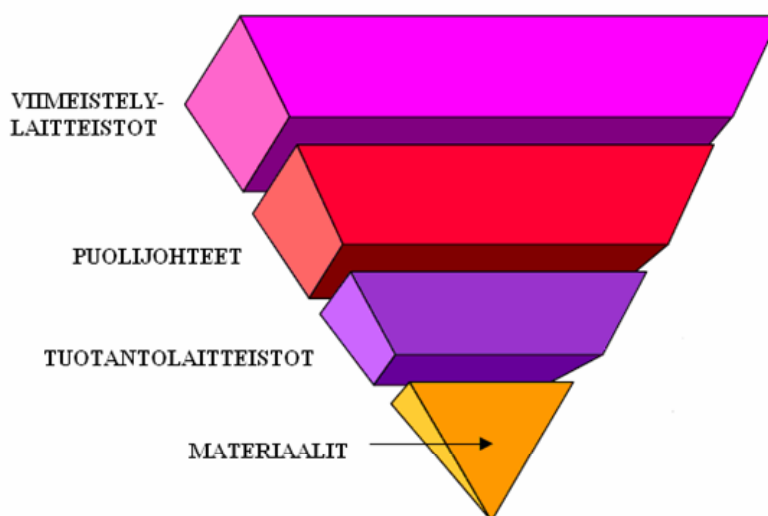
Nykyään valokuidut valmistetaan joko kokonaan lasista, polymeeristä tai näiden yhdistelmästä. Tavallisin valokuidun rakenne on kolmiosainen kuten kuvassa 2. Suuren taitekertoimen omaavaa ydintä ympäröi pienempi taitekertoiminen kuori ja uloinna sijaitsee näitä suojaava muovikerros. Lasista valmistettujen valokuitujen ytimen halkaisija vaihtelee välillä 10-600 μm , kuoren halkaisija välillä 125-630 μm ja muovipäällyste 750-2000 μm . Polymeeristä valmistettujen valokuitujen kaikki edellä mainitut mitat ovat välillä 750-2000 μm , mikä tekee niistä suurempikokoisina helpommin käsiteltäviä kuin lasiset. Kuvassa 2 on esitetty lasisen valokuidun yleisin rakenne. /6/



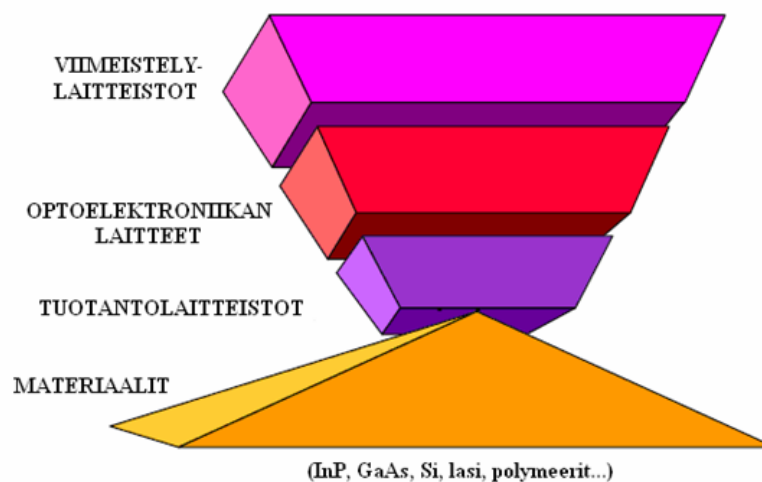
Kuva 2. Lasisen valokuidun yleisin rakenne. /6/

Sähköisten systeemien yhä tiheämmän pakkauksen ja datansiirtokäsittelynopeuden kasvaessa tavalliset sähköiset yhteydet kohtaavat suuria haasteita piirilevy-, moduuli- ja komponenttitasoilla. Uusien arkkitehtuurirakenteiden kehittäminen ja innovatiivisen suunnittelu ovat tuottaneet monia etuja systeemien suorituskykyyn tähän päivään asti. Fysiikan lait tulevat kuitenkin esteeksi tulevaisuudessa mikäli laitteistojen suorituskyky nousee nykyisellä tavalla.

Kuvassa 3 on esitetty nykyisen puolijohdeteknologian toimialojen määrä rahallisesti mitattuna. Kuvan 4 tapauksessa sama asia on esitetty optoelektroniikan laitteistojen toimialojen määrän osalta. Kuvistakin voidaan todeta, että tällä hetkellä optoelektroniikassa panostetaan suuria määriä rahaa oikeiden materiaalien löytämiseen. Yleensä materiaali valitaan sovelluksen mukaan eikä mitään yleisesti kaikkeen kelpaavaa materiaalia ole vielä löydetty.



Kuva 3. Tämän päivän puolijohdeteknologian toimialojen määrä rahallisesti mitattuna.

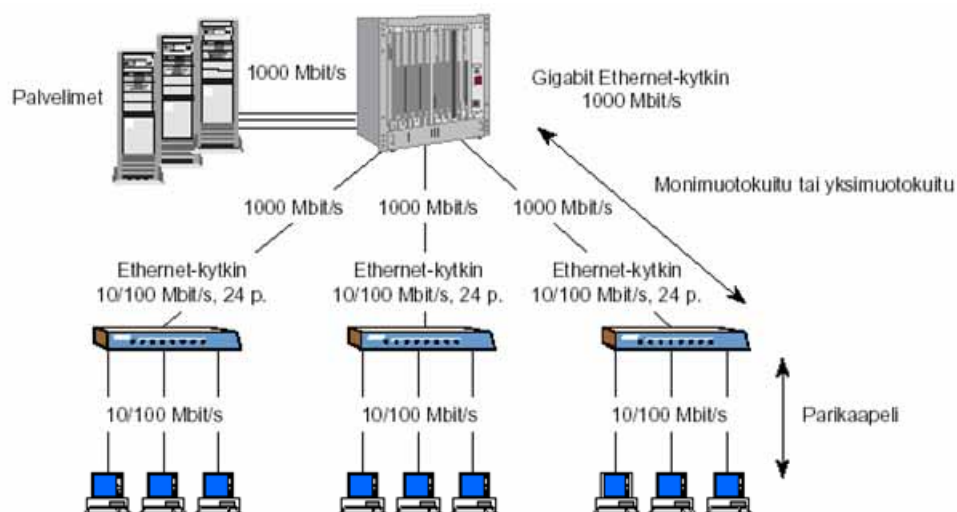


Kuva 4. Tämän päivän optoelektronikan toimialojen määrä rahallisesti mitattuna. /7/

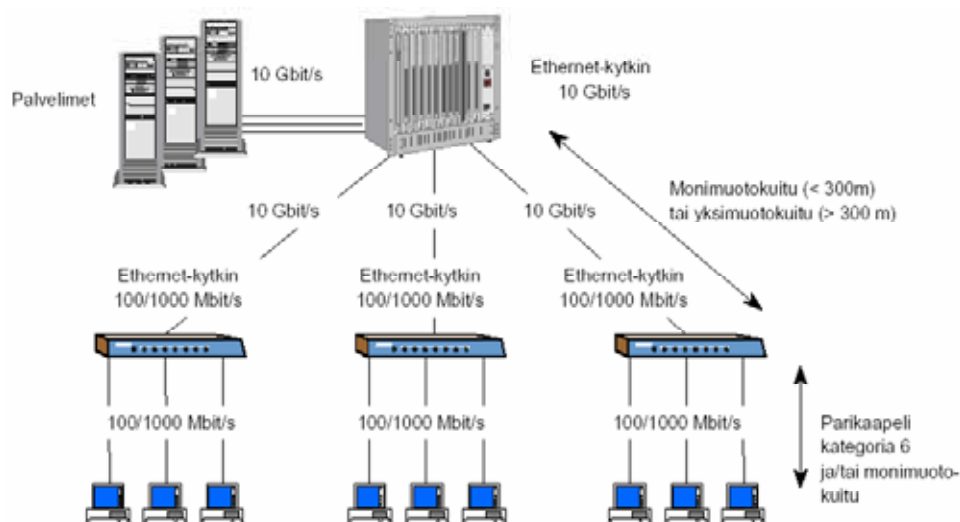
Nykyisin valokuitukaapelia käytetään esimerkiksi meren pohjassa tietoliikenneyhteysväylänä Euroopan ja Yhdysvaltojen välillä. Meren pohjassa ovat toki vielä jo toista sataa vuotta sitten asennetut kuparikaapelitkin, joita aikanaan käytettiin lennättimen tiedon välityksessä, mutta etuna valokuidulla perinteiseen kuparikaapeliin nähden on sen nopeus, keveys ja pieni koko. Valokuidun signaalia pitää kuitenkin vahvistaa sähköän avulla muutamien kilometrien välein. Euroopasta Yhdysvaltoihin kulkevien TransAtlantic-kaapeleiden TAT-9 ja TAT-10 siirtonopeus on 560 megabittiä sekunnissa. Siirtonopeuden hitaus johtuu yksinomaan kaapelin pituudesta, joka tässä tapauksessa on noin 8000 kilometriä. Meren pohjassa kaapelien vaarana ovat kalastajien verkot, jotka silloin tällöin repivät kaapeleita rikki sekä haikalat, jotka vahvistimien aiheuttamien sähkömagneettisten kenttien houkuttelemina jyrivät kaapeleita poikki. /4/

Optisen signaalin siirtoteknologian kehityksen vauhdittajana on ollut datasiirron kasvava tarve. Terabittien siirtoa tarvitaan tietoliikenteen ja tietokonetekniikan yhdistyessä entistä laajemmin eri sovelluksissa. Teknologian kehitystä vauhdittamassa ovat olleet muun muassa LAN(Local Area Network), WAN(Wide Area Network), kaapelitelevisioverkko, vuorovaikuttiset videosovellutukset, teollisuuden langattomat siirtoyhteydet ja erilaiset ajanvietesovellukset.

Prosessoreiden kellotaajuuden ennustetaan saavuttavan 10GHz rajan jo tämän vuosikymmenen lopussa. Nykyisien Ethernet-verkkojen nopeudet tulevat kymmenkertaistumaan lähitulevaisuudessa. Ethernet-verkkojen muutos tulee siis olemaan kuvien 5 ja 6 mukainen.



Kuva 5. Nykyaikainen Ethernet-verkko.



Kuva 6. Tulevaisuuden Ethernet-verkko. /8/

Toisaalta optisten verkkojen toimintaa voidaan tehostaa asentamalla verkkoon optisia kytkimiä, joilla voidaan muuttaa verkon resursseja tarvittavan kapasiteetin mukaan. Verkon resursseja voidaan vaihdella esimerkiksi kellonajan mukaan,

jolloin päivällä kapasiteettia lisätään yritysten tiedonsiirron tarpeisiin ja illalla kotoa käytettävän ajanvietteen tarpeisiin.

Kuparista valmistetut piirilevyjen johdotukset hidastavat tiedonsiirtoa kun mikroprosessorien kellotaajuus saavuttaa usean GHz:n taajuuden. Optiset johdotukset voivat kuitenkin tarjota ratkaisun tähän ongelmaan. Tämän lisäksi optisten liitäntöjen myötä tehohäviöt vähenevät ja kolmiulotteinen johdotus tarjoaa mahdollisuuden entistä tiiviimpään elektroniikkapakkaukseen. Optisten signaalien myötä päästään eroon myös ylikuulumis- ja impedanssiepäjatkuvuusongelmista. Täysin optinen tiedonsiirto piirilevyllä muodostuu helposti liian kalliiksi ja epävarmaksi ratkaisuksi. Tähän on ratkaisuna yhdistelmäpiirilevy, jossa käytetään sekä sähköistä että optista tiedonsiirtoa. /9/

2. TEORIAA

Optisen tiedonsiirto koostuu karkeasti jaotellen valonlähteestä, siirtotiestä ja ilmaisimesta. Riippuen siirtotien vaimennuksesta signaalia saatetaan joutua myös vahvistamaan. Tämän teoriakappaleen tarkoitus on selvittää erilaiset valonlähteet, valon ilmaisimien periaate sekä siirtotiellä aiheutuva vaimennus sekä sirontailmiöt. Kappaleen yhteydessä tarkastellaan myös nykyään käytettäviä optisen tiedonsiirron aallonpituusalueita ja modulointitekniikkaa.

2.1 Valonlähteet

Ensimmäiset kaupalliset optisen tiedonsiirron sovelluksiin soveltuvat valonlähteet tulivat markkinoille 1980-luvulla. Yleisesti valonlähde mielletään "mustaksi laatikoksi", joka valitaan tehotarpeen, aallonpituuden, tiedonkäsittelynopeuden, kaistan yms. mukaan. Lähetintekniikoita on monia, mutta ne voidaan karkeasti jaotella valonlähdekomponentin ja modulaatiomenetelmän mukaan.

Sopivan valonlähteen säteen täytyy olla yhteensopiva käytettävän kuidun kanssa, muuten valon johtaminen kuituun on mahdotonta. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että käytetyn valonlähteen säteen halkaisija on 8-100 μm valon tullessa kuituun. Toisaalta valonlähteen on täytettävä sille asetettu tehontarve. Valo on

saatava myös liitettyä kuituun ilman suurta tehohäviötä. Signaalissa ei saa myöskään esiintyä harmonista tai ristimodulaatiosäröä. Valonlähteen pitää olla helposti moduloitavissa sähköisen signaalin avulla ja sen täytyy kyetä suurinopeuksiseen modulaatioon. Yleensä valonlähteelle asetetaan vaatimukset myös fyysisen koon, painon, hinnan ja toimintavarmuuden osalta. Ympäristökijät, luotettavuus ja lämpöongelmat tulee ottaa myös huomioon valonlähdeä valittaessa. /6/

2.1.1 LED (Light-Emitting Diode)

LED on hyvin halpa valonlähde ja sen avulla kyetään siirtämään kymmeniä tai jopa satoja megabittejä sekunnissa. LED-valonlähteen spektrijakauma on laajuudeltaan 30-100 nm ja yleisimmin käytetyt taajuudet ovat 780, 850 ja 1300 nm. Kokonaisteholtaan LED on muutamia watteja ja sen tuottama valo on vain hiukan tai ei ollenkaan polarisoitua.

LED:n kytkentä kuituun on vaikeaa numeerisen apertuurin arvonsa johdosta. Lasereille on tyypillistä pieni numeerisen apertuurin arvo ja siten ollen ne on helpompi liittää valokuituun.

Numeerinen aperttuuri määritellään seuraavasti:

$$NA = n \cdot \sin \alpha , \quad (2)$$

missä n on valokuidun ytimen taitekerroin ja α valon suurin sallittu tulokulma kuituun.

Kuvissa 7, 8 ja 9 on esitetty LED:n lähettämän valon säteen suuruutta verrattuna laseriin ja VCSEL-laseriin.

/10/



Kuva 7. LED-lähteen valon säde.



Kuva 8. Laserlähteen valon säde.



Kuva 9. VCSEL-lähteen valon säde.

LED:n kytkentätehokkuus (coupling efficiency) η voidaan laskea askeltaitekertoimiselle kuidulle seuraavasti

$$\eta = (NA)^2 \quad (3)$$

Esimerkkinä lasketaan yhtälön (1) mukaisesti esimerkiksi:

$$NA = 0,51 \Rightarrow \eta \approx 0,26$$

Tämä tarkoittaa, että kuituun kytkeytyy 26% LED:n tehosta. Tästä seuraa, että 10mW teholtaan LED:n signaalista menee kuituun 2,6mW.

/11/

Monimuotosovelluksen ollessa kyseessä on laskettava seuraavasti

$$\eta = \left(\frac{a}{a_s} \right)^2 \cdot (NA)^2 \quad (4)$$

missä a on optisen kuidun ytimen säde

a_s on LED:n lähettämän valon säde.

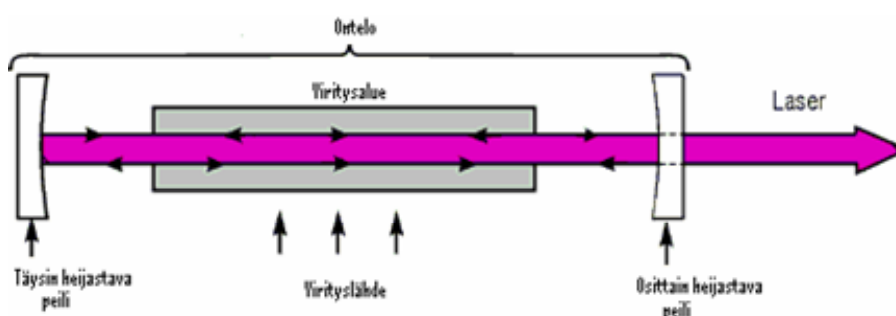
Laskemalla LED:n emittoiman valon säteen arvolla $a_s = 35mm$ ja tyypillisillä lasista valmistetun monimuotokuidun arvoilla $a \approx 25mm$ ja $NA \approx 0,2$ saadaan kytkentätehoksi vain 2% alkuperäisestä LED:n tehosta. /k8/

2.1.2 Laser (Light Amplification by Stimulated Emission)

Laserit vahvistavat valon intensiteettiä aikaansaaden pienelle alalle suuritehoisen säteen. Laserin valolle on ominaista monokromaattisuus ja koherenttisuus. Laserin valo voi olla lineaarisesti polarisoitua. Laserin tuottama teho voi vaihdella $10^{-9} - 10^{21} \text{W}$ ja laser voi tuottaa aallonpituuksia aina mikroaaltoalueelta röntgensäteeseen asti.

Laserilla on nykyään monia sovellusalueita. Lasereita käytetään muun muassa erilaiseen leikkaamiseen, puhdistamiseen ja materiaalien poistoon teollisuuden ja lääketeollisuuden aloilla. Laseria käytetään aina supermarketien varkaudenestolaitteista sotateollisuuden pommien maalinmerkkaukseen asti.

Laservalo saadaan aikaan stimuloitun emission avulla. Stimuloitu emissio tapahtuu, kun valo läpäisee erityisen viritetyn alueen stimuloiden tämän alueen atomeja lähettämään samansuuntaista ja saman aallonpituuden omaavaa valoa kuin alkuperäinen säde. Viritys voidaan saada aikaiseksi joko optisesti tai sähköisesti. Sädettä vahvistetaan heijastamalla sitä edestakaisin viritetyn tilan välillä kahden peilin avulla, joista toinen on täysin heijastava ja toinen osittain heijastava. Kuvassa 10 on esitetty esimerkkikuva laserin perusrakenteesta.



Kuva 10. Laserin perusrakenne. /11/

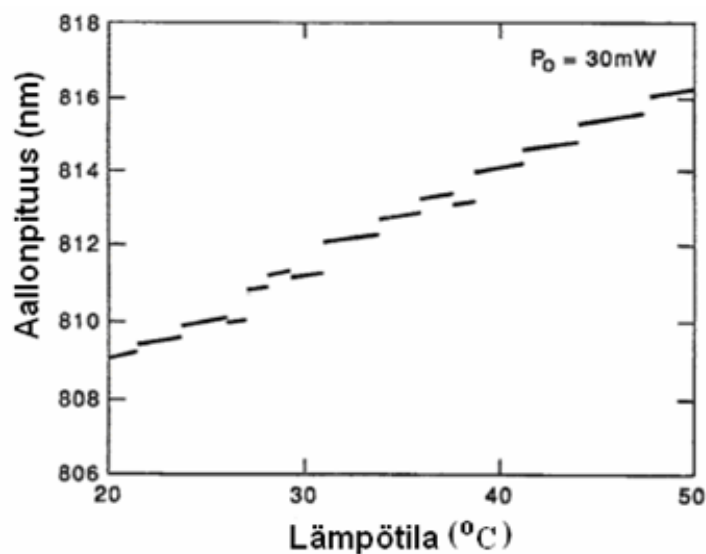
Laserin toimintataajuudet eli moodit määräytyvät resonanssikaviteetin pituuden eli peilien etäisyyden L mukaan kaavalla

$$L = \frac{m\lambda}{2}, \quad (5)$$

missä m on positiivinen kokonaisluku
 λ on aallonpituus.

Laserdiodin rakenne voi olla joko Fabry-Perot- tai DFB(Distributed Feedback)-tyyppiä. Fabry-Perot on näistä edullisempi, mutta samalla hitaampi. DFB-laserin säde on kapeampi spektriltään ja omaa paremman suorituskyvyn. DFB-laserin säde on lähes monokromaattista, kun taas Fabry-Perot emittoi useita aallonpituuden moninkertoja. DFB-laseria käytetäänkin suuritaajuisimmassa digitaalisen viestin sovelluksissa ja suurimmassa osassa analogisen signaalin sovelluksista. /12/

Laserdiodin aallonpituus riippuu lämpötilasta, joka aiheutuu laserin ontelon optisen pituuden muuttumisesta (n. 0,06 nm/K) ja vahvistuskäyrän lämpötilariippuvuudesta (n. 0,25 nm/K). Tyypillisen laserdiodin teho laskee lämpötilan noustessa. Tehon laskun voi kompensoida kasvattamalla injektiovirtaa. Kuvassa 11 on esitetty laserdiodin aallonpituuden riippuvuutta lämpötilasta. Edellä mainittujen riippuvuuksien erilaisuus aiheuttaa sen, että spektri lämpötilan funktiona ei ole jatkuva. Askelmien kaltevuus johtuu kaviteetin pituuden muutoksesta, ja epäjatkuvuuksien kohdalla moodi vaihtuu vahvistuskäyrän siirtymisen vuoksi. Diodin lämpötilakäyttäytymiseen vaikuttavat monet seikat, varsinkin optinen takaisinkytkentä, eikä se ole kovin helposti hallittavissa.

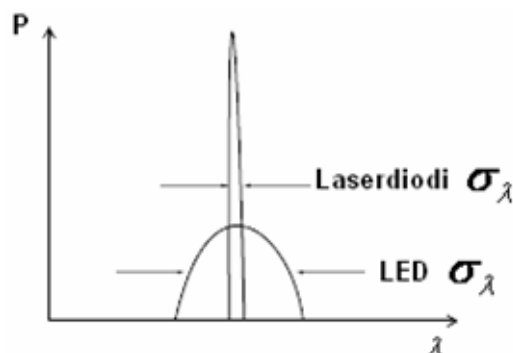


Kuva 11. Laserdiodin aallonpituuden riippuvuus lämpötilasta. P_O on laserin lähtöteho.

Laserin aallonpituus riippuu myös injektiovirrasta. Virran muuttaminen vaikuttaa puolijohteen lämpötilaan ja varauksenkuljettajatiheyteen. Matalilla taajuuksilla, joissa muutokset kestävät yli 1 μ s, aallonpituuden vaihtelu johtuu pääasiassa lämpötilasta; varauksenkuljettajatiheyden vaikutus aallonpituuteen on melko pieni. Jos virtaa moduloidaan suuremmalla taajuudella, lämpötila ei enää ehdi muuttua ja aallonpituuteen vaikuttaa lähinnä varauksenkuljettajatiheyden vaihtelu.

Laserdiodi on LED:in verrattuna helpompi liittää valokuituun. Laserdiodit tuottavat suuritehoisen säteen ja ne kykenevät suurinopeuksiseen modulointiin. LED:t ovat kuitenkin luotettavampia ja halvempia kuin laserdiodit. Laserdiodin tuottaman säteilyn spektrinen leveys (spectral width) σ_λ eroaa LED:n vastaavasta. Spektrinen leveys tarkoittaa valonlähteen läpäisyiikin leveyttä maksimin puoliarvon kohdalla ja se riippuu diodin rakenteesta sekä käytetyistä puolijohteista. LED:n suurempi σ_λ -arvo tarkoittaa valonlähteen tarvitsevan suuremman osan valokuidun kaistaa. LED:n ja laserdiodin spektrinen leveys on esitetty kuvassa 12. LED:n tyypilliset σ_λ -arvo on noin 40 nm käytettäessä 850 nm aallonpituutta ja 80 nm, kun käytetään 1310 nm valonlähdettä. Laserdiodille

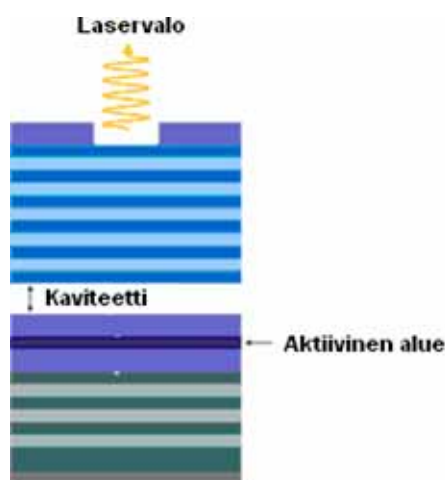
vastaavat arvot ovat 1 nm käytettäessä 850 nm lähettä ja 3 nm, kun käytössä on 1310 nm valonlähde.



Kuva 12. Led:n ja laserin spektrinen leveys /6/

2.1.3 VCSEL(Vertikal Cavity Surface Emitting Laser)

Perinteiset laserit ovat kalliita, suuria ja vaativat jäähdytyksen. Gigabit Ethernet vaatii kuitenkin toimiakseen laserlähettimen, sillä LED:n nopeus ei enää riitä. Pintaemittioiva VCSEL edustaa uusinta laserteknologiaa ja tarjoaa edullisen vaihtoehdon optisen signaalin lähteeksi suuritaajuisiin sovelluksiin. Ne voidaan helposti valmistaa monoliittisinä riveinä tai matriiseina, jotka soveltuvat tiheään rinnakkaisväylän toteutukseen. VCSEL tarvitsee kuitenkin toimiakseen hyvän jäähdytyksen. Tällä hetkellä käytetyin VCSEL toimii 850nm:n aaltopituudella. Olemassa on myös 1300nm ja 1500 nm VCSEL:ejä, joita tarvitaan WAN-verkkoyhteyksissä. /10/



Kuva 13. VCSEL-laserin perusrakenne.

/12/

VCSEL-laser rakennetaan Braggin peilien avulla. Braggin puolijohdepeilit koostuvat päällekkäisistä puolijohdekerrospareista. VCSEL:ssä kerrosparit ovat $\lambda/4$ paksuisia ja niitä on 40-60 kappaletta. Kuvassa 13 on esitetty tällaisen VCSEL-laserin perusrakenne. /10/

Tyypillisessä laserdiodissa aktiivinen alue on sijoitettu puolijohdepinnan suuntaisesti. Se vaikeuttaa esimerkiksi laserin testausta puolijohdekiekolla. VCSEL-laserissa laserointi tapahtuu puolijohteen pinnan suhteen kohtisuorassa suunnassa, mikä yksinkertaistaa niiden valmistusprosessia ja tekee ne edullisiksi. Tavallisista lasereista poiketen VCSEL-laserin valonsäteen muoto on pyöreä, mikä parantaa tehon kuituun johtamista. VCSEL-laser on usein myös viritettävissä eli sen aallonpituutta voidaan muuttaa mm. säätämällä sen kaviteetin pituutta.

VCSEL on korvannut perinteiset laserit lähes kokonaan lyhyissä, alle 300 m, optisissa yhteyksissä. Keskimatkanyhteydet muutamiin kymmeneen kilometriin asti kuitenkin vaatii 1300 nm VCSEL:ien kehittelyä. Kuitenkin VCSEL pienen ulostulotehonsa takia tuskin tulee syrjäyttämään suuritehoisia perinteisiä lasereita pitkän matkan tiedonsiirrossa.

2.2 Vastaanottimet

Vastaanotinpuolella ilmaisindiodi muuttaa valon intensiteetistä riippuvan virtasignaalin, joka muunnetaan jännitteeksi transimpedanssivahvistimessa. Nämä jännitevaihtelut vahvistetaan lopuksi logiikkastandardiin sopiviksi.

Yksinkertaisimmillaan optisena ilmaisimena toimii estosuuntainen valodiodi. Valodiodin puolijohteen elektronit absorboivat fotoneja, jolloin ne siirtyvät johtavuusvyöhön jättäen jälkeensä aukon valenssivyöhön. Sähkökentän liikutteleman elektroni-aukkoparin liike synnyttää virtaa. Elektroni voi absorboida ainoastaan yhden fotonin siirtyäkseen energiatasolta toiselle, joten valovirtaa

muodostaakseen fotonin energian pitää olla vähintään kielletyn energiavälin suuruinen:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E_g, \quad (6)$$

missä h on Planckin vakio
 ν on valon taajuus
 c on valon nopeus tyhjiössä
 λ on valon aallonpituus
 E_g on kielletyn energiavälin suuruus elektronivoltteina.

Yhtälö määrää pisimmän aallonpituuden, jolla valodiodi toimii. Piillä(Si) ja gallium arsenidilla(GaAs) kielletty energiaväli on niin suuri, ettei niitä voi käyttää 1,3 μm ja 1,55 μm aallonpituusalueilla. Indiumgallium-arsenidi (InGaAs) ja indium-gallium-arsenidi-fosfidi (InGaAsP) toimivat myös näillä aallonpituuksilla

Valodiodin hyötysuhde tarkoittaa diodin absorboiman P_{abs} ja sille saapuvan optisen tehon P_{in} suhdetta. Optisissa verkoissa tehotasot ovat usein erittäin pieniä ja hyötysuhde pyritään saamaan mahdollisimman suureksi. Lasisessa kuidussa siirrettävän tehon maksimiarvona voidaan pitää 100mW, jonka jälkeen epäelastiset Raman ja Brillouin sironta aiheuttavat jyrkästi tason mukana kasvavaa vaimennusta. Sirontailmiöitä on tarkasteltu seuraavassa kappaleessa.

Valodiodin hyötysuhteen arvoon vaikuttaa puolijohteen paksuus D

$$\eta_D = \frac{P_{abs}}{P_{in}} = 1 - e^{-\beta D} \quad (7)$$

missä β on absorptiokerroin.

Pn-rakenteen sijasta valodiodeissa voidaan käyttää myös pin-rakennetta. Pin-rakenteisessa valodiodissa p- ja n-alueiden välissä on seostamaton tai hyvin vähän seostettu alue. Tämä lisää diodin tyhjennysaluetta ja suuri osa valosta absorboituu tälle alueelle. Näin ollen valodiodin hyötysuhde ja herkkyys paranevat.

Valodiodin nopeuteen vaikuttaa tyhjennysalueen siirtymäaika ja kapasitanssi. Siirtymäajalla tarkoitetaan aikaa, joka varauksenkuljettajilta kuluu tyhjennysalueen läpäisemiseen. Tähän vaikuttaa varauksenkuljettajatiheys ja tyhjennysalueen leveys. Jälkimmäinen on parhaiten kontrolloitavissa, minkä vuoksi nopeiden valodiodien tyhjennysalue pyritään tekemään mahdollisimman ohueksi.

Valodiodin kapasitanssi hidastaa sen toimintaa. Kapasitanssi on suoraan verrannollinen aktiivisen alueen pinta-alaan ja kääntäen verrannollinen tyhjennysalueen paksuuteen. Pieni aktiivialue aiheuttaa kuitenkin helposti ongelmia optiseen järjestelmään, sillä kuidusta tuleva säde joudutaan tarkentamaan pienelle alueelle. Ohut tyhjennysalue taas pienentää kaavan (7) mukaan absorboitujen fotonien määrää ja siten heikentää hyötysuhdetta. Tämän vuoksi liian nopea komponentti ei ole välttämättä paras vaihtoehto.

2.3 Vaimennus

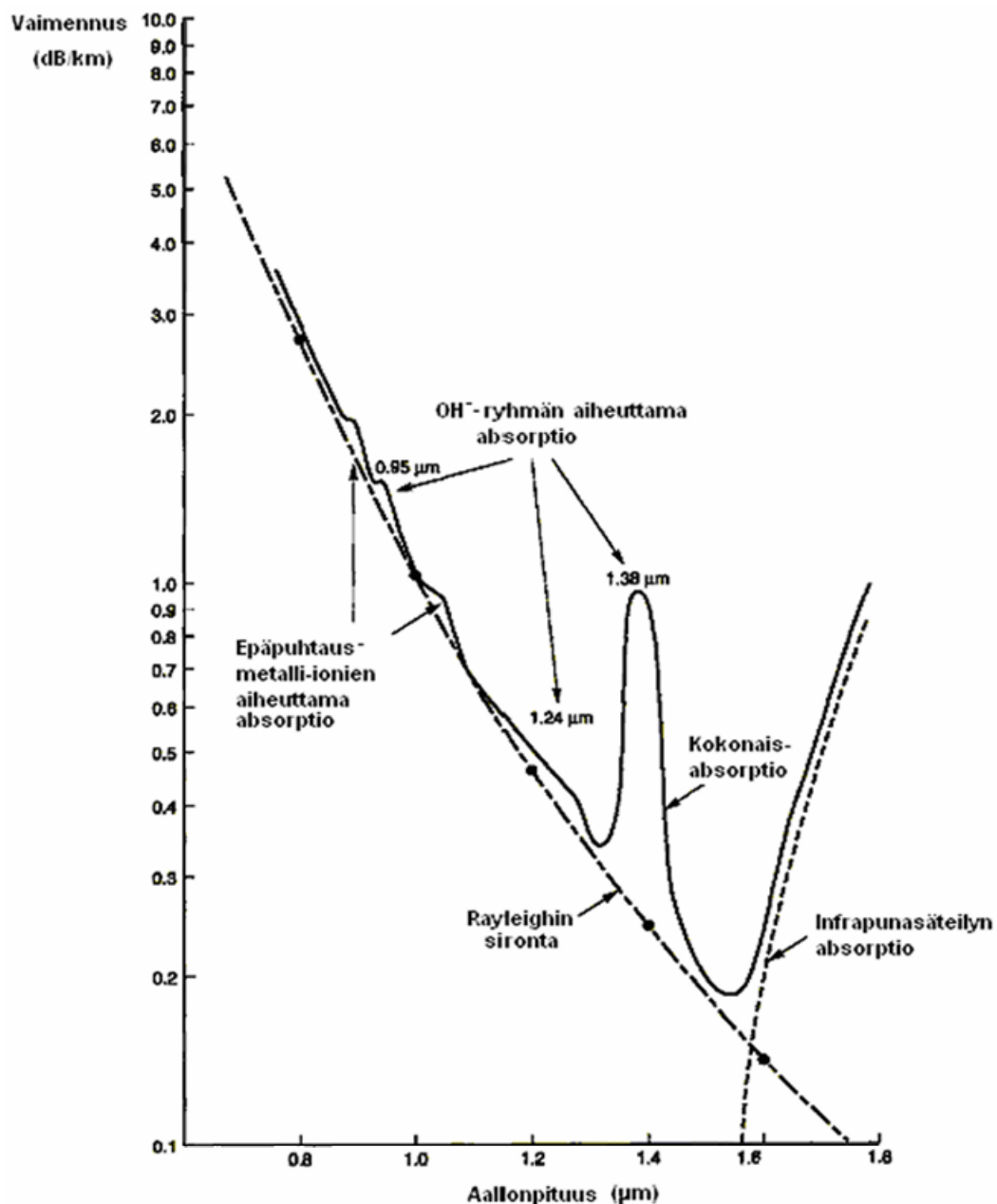
Kuidussa tapahtuu signaalin vaimennusta pääasiassa absorptioon ja sironnan vaikutuksesta. Vaimennus tarkoittaa kuidussa etenevän valotehon pienenemistä ja sen yksikkönä käytetään dB/km.

Kuidussa esiintyy kaksi sirontamekanismia, jotka rajoittavat kuituun kytkettävää tehoa. Stimuloitu Brillouin sironta aiheuttaa kuituun takaisinpäin siroavan valoallon, jonka taajuus on hieman alkuperäistä vastakkaissuuntaista valoaltoa pienempi. Tietyn kynnystehon yläpuolella suurin osa ylimääräisestä tehosta siirtyy sironneeseen valoaltoon. Brillouin sironnan kynnystehoa voidaan kasvattaa leventämällä optisen lähttimen viivanleveyyttä. Stimuloitu Ramanin sironta esiintyy suuremmalla optisella teholla kuin Brillouin sironta. Ramanin sironta tapahtuu samaan suuntaan kuin aalto etenee, jolloin se siirtää tehoa kanavien välillä aiheuttaen ylikuulumista. /13/

Kuitulasin valmistusmenetelmässä ja lasiaineen jäähtymisen aikana syntyneet aallonpituutta pienemmällä alueella olevat tiheysvaihtelut aiheuttavat niin kutsuttua Rayleighin sirontaa. Mitä pienempirakeista ja homogeenisempaa lasiaines on sitä vähemmän sirontaa esiintyy. Sironta on aallonpituusriippuvaista ja alle 800nm vaimennus on huomattavan suurta.

Ytimen materiaalissa tapahtuva valon fotonien absorptio aiheuttaa myös vaimenemista. Yli 1700nm aallonpituuksilla lasimateriaalin epäpuhtaudet, rakennevirheet ja kidevirheet aiheuttavat runsaasti absorptiota. Kuvassa 13 on esitetty lasikuidun vaimennuksen ja sironnan yhteisvaikutuksen riippuvuus aallonpituudesta.

Lasimateriaaliin haitallisimmin vaikuttaa epäpuhtauksista vesi ja orgaaniset yhdisteet, joiden OH⁻-ionin absorptio on voimakkain 1383 nm kohdalla ja sen lähiympäristössä. Lucent on patentoinut ultrapuhtaan lasin valmistusprosessin vuonna 1998 ja melkein kaikki vesimolekyylit saadaan poistettua lasiaineesta. Ikääntymistesteissä on erikoispuhtailla kuiduilla todettu kuitenkin ns. vesipiikin kasvavan. Lisäksi pienikin määrä epäpuhtausmetalli-ioneja lisää kuidun vaimennusta merkittävästi. /5/



Kuva 13. Lasisen valokuidun sironnan ja absorptio kokonaisvaimennus kuidussa aallonpituuden funktiona. /14/

2.4 Aallonpituusalueet

Kuituoptiikassa käytettävää aallonpituusalueetta rajoittavat Rayleigh sironta pienillä alle 800 nm:n aallonpituuksilla ja infrapunasäteilyn absorptio suurilla yli 1700 nm:n aallonpituuksilla. Suosituin yksimuotosovelluksissa on nykyään C-kaista (Conventional), joka käyttää aallonpituuksia välillä 1530-1565 nm. Optisten vahvistimien kehityksen myötä saatavilla on myös kaksi uutta

aallonpituusalueita: S-kaista (Short) 1460-1530 nm ja L-kaista (Long) 1562-1625 nm.

Uusimmassa ITU-standardin luokitteluehdotuksessa ovat lisäksi mukana seuraavat kaistat: O-kaista (Original) 1260-1360 nm, E-kaista (Extended) 1360-1460 nm ja U-kaista (Ultralong) 1625-1675 nm. Aallonpituuskanavien määrä voidaan kasvattaa moninkertaiseksi aikaisemmasta uusien aallonpituusalueiden myötä. /14/

2.5 Aallonpituuskanavointi

WDM (Wavelength Division Multiplexing) tai DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) tekniikoiden avulla on nykyään lähetettävä yhdessä kuidussa useita signaaleja samanaikaisesti. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kuidussa kulkevat signaalit lähetetään eri aallonpituuksilla. Valonsäteet eivät vaikuta toisiinsa interferenssin tai muiden fyysikaalisten ilmiöiden kautta, koska joka signaalilla on oma toisista riippumaton aallonpituuskaista jolla se lähetetään.

Lyhennettä WDM käytetään kun on kaksi eri aallonpituutta ja DWDM vastaa tilannetta, jossa on yli kaksi aallonpituuskanavaa samanaikaisesti käytössä. Varsinkin DWDM:n ollessa kyseessä eri kanavien aallonpituudet ovat niin lähellä toisiaan, että laserin aallonpituuden tulee olla tarkasti hallinnassa. Suurilla tehoilla epälineaariset häiriöilmiöt voivat aiheuttaa kanavien välistä haitallista vuorovaikutusta.

2.6 Dispersio

Dispersiolla tarkoitetaan tapahtumaa, jossa eri aallonpituuden omaavat valonsäteet saman valopulssin sisällä etenevät kuituytimessä eri nopeuksilla ja saavuttavat kuidun pään eri aikoina. Dispersio aiheuttaa siis aikahajontaa. Dispersio rajoittaa aina kuidun kaistanleveyttä kuidun pituuden funktiona ja kompensatiomenetelmien käyttö lisää kuidun vaimennusta.

Jokainen valolähde lähettää aina tietyn aallonpituusjakauman, mutta kuituun tultessaan valosignaaliin syntyy dispersiota johtuen valon aallonpituuksien eri nopeuksista kuidussa. Tätä ilmiötä kutsutaan kromaattiseksi dispersioksi, ja siihen vaikuttaa käytetty materiaali. Kromaattinen dispersio on lineaarista ja se voidaan kompensoida erilaisilla menetelmillä.

Muotodispersio taas johtuu signaalin eri komponenttien eripituisista etenemismatkoista. Yksimuotokuidussa ei etene kuin yksi muoto ja sen takia ns. muotodispersiota ei esiinny.

Kaikissa kuiduissa esiintyy myös pientä polarisaatiomuotodispersiota, joka on haitallista suurilla tiedonsiirtonopeuksilla. Polarisaatiomuotodispersio johtuu yksimuotokuidun kohtisuorassa toisiaan olevien polarisaatiosuuntien eri etenemisnopeudesta. Tämä aiheuttaa kuidun etenevän aallon polarisaatiotilan jatkuvaa muuttumista ja valopulssi venyy. Polarisaatiomuotodispersio riippuu lämpötilasta, aallonpituudesta ja kuidun mekaanisista jännityksistä. Polarisaatiomuotodispersiota on hankala kompensoida sen epälineaarisuuden johdosta. Alle 40 Gbit/s nopeuksilla polarisaatiomuotodispersio vaikuttaa alkuaan haitallinen vasta noin 400 km:n kuidun pituuksien yläpuolella.

Optisen kuidun taitekerroin muuttuu suuren signaalitehon mukana, jolloin optisen kentän vaihe ja samalla taajuus alkavat vaihdella. Tämä itseisvaihemodulaatio leventää signaalin spektriä, jolloin kuidun dispersio levittää pulsseja. WDM-sovelluksissa lähellä toisiaan olevilla kanavilla etenevät pulssit vaikuttavat toisiinsa ristikkäisvaihemodulaation kautta huonontamalla yksittäisen kanavan signaalikohinasuhdetta sekä aiheuttaen ylikuulumista. Neljän aallonpituuden sekoituksessa tapahtuu lähekkäin olevien kanavien aallonpituuksien sekoittumista. Tämä aiheuttaa optiseen spektriin särökomponentteja, jotka ovat näiden kanavien summa- ja erotajuuksilla. /13/, /14/

Tulevaisuuden erittäin nopeiden tietoliikenneyhteyksien on kaavailtu toimivan solitonien avulla. Solitonipulssien muotoa ylläpitävät kuidun dispersio ja

itseisvaihemodulaatio, jotka kumoavat toistensa vaikutuksen. Solitonit voivat edetä hyvin pitkiä matkoja ilman pulssin säröytymistä. /13/

3. OPTINEN TIEDONSIIRTO

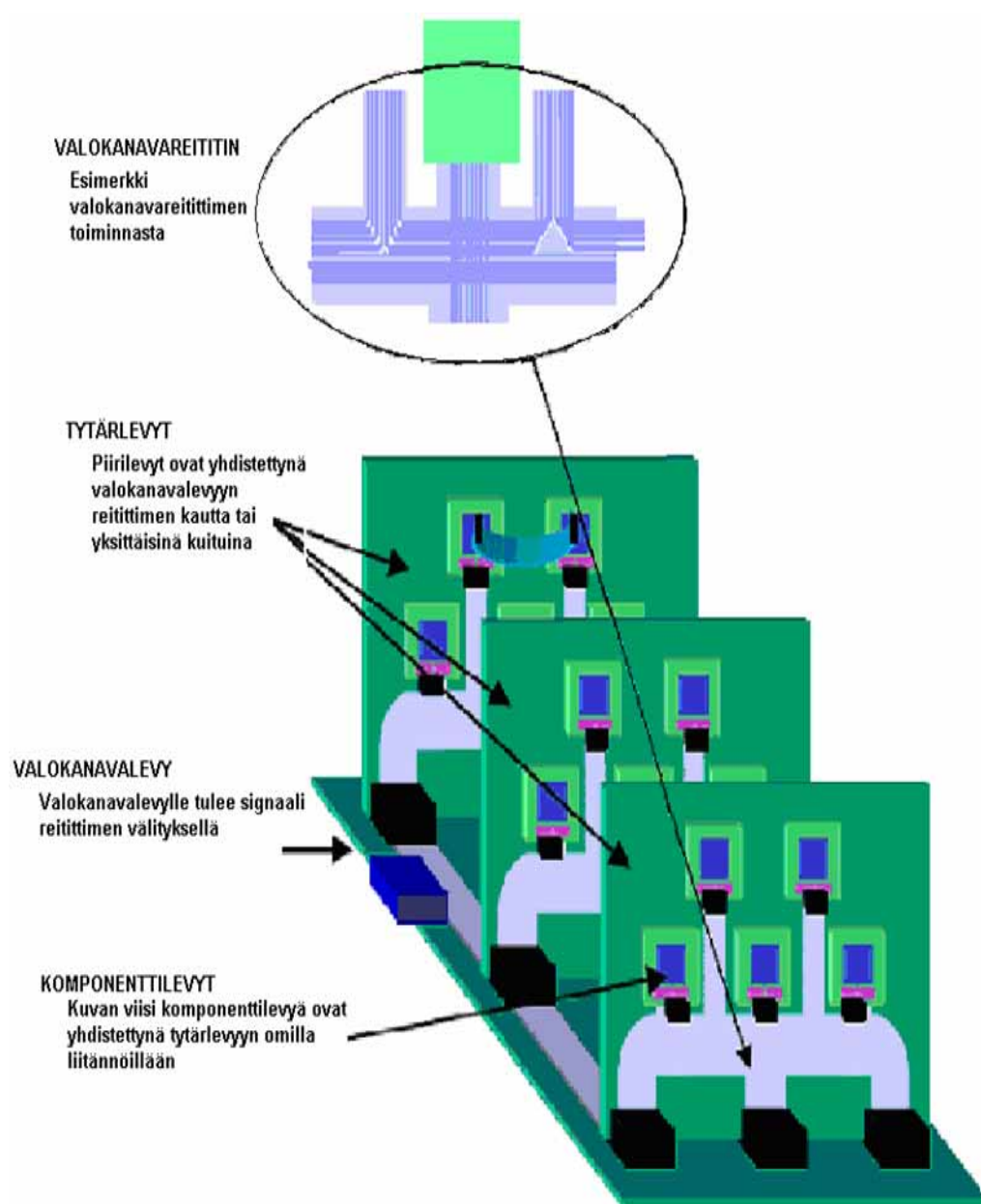
Datansiirron nopeuden ylittäessä gigabittien siirtonopeuden sekunnissa signaalissa alkaa esiintyä haitallisia ilmiöitä. Metalliset johtimet alkavat toimia antennina lähettäen suuritaajuista sähkömagneettista säteilyä. Viereiset johtimet ottavat tämän häiriösäteilyn vastaan lisäten sen omiin signaaleihinsa ja interferoituvat aallot aiheuttavat vääristyneen signaalin. Ilmiö tunnetaan nimellä ylikuuluminen.

Ylikuulumisilmiö aiheuttaa lopputuloksena aivan hyödyttömän signaalin. Valo on täysin riippumaton sähkömagneettisesta kytkeytymisestä. Kytkeytymistä valokanavaan ei tapahdu vaikka kuinka suuritehoista ja nopeaa sähköistä signaalia lähetetään. Tämän takia on tarpeellista valmistaa piirilevyjä, joissa siirretään sekä sähköistä että optista signaaleita. Valokanavat voivat jopa useissa tapauksissa risteytyä toisten kanssa ilman virheitä välittämiinsä signaaleihin.

Optisessa tiedonsiirrossa suorituskyky määräytyy lähettimen optisesta tehosta, vastaanottimen herkkyydestä sekä siirtotien kaistanleveydestä, kohinasta ja vaimennuksesta. Aallonpituuskanavien lähentyessä toisiaan ylikuulumisen mahdollisuus lisääntyy. Kahden vierekkäisen kanavan ylikuulumisrajana valmistajat pyrkivät yli 20 dB:n eristykseen, jolloin alle yksi prosentti tehosta kytkeytyy väärään kanavaan.

Optinen tiedonsiirto piirilevyllä voidaan toteuttaa kolmella eri tavalla: valokuitukaapelilla, kuitunauhoilla, free-space-siirron tai valokanavan kautta. Kuitunauhoissa siirretään dataa useassa kuidussa samanaikaisesti käyttämällä vain yhtä lähetintä ja vastaanotinta. Valokuitukaapelien ja kuitunauhan käyttöä piirilevyllä rajoittaa kuitenkin kaapeleiden käsiteltävyys sekä kuitujen ja liittimien tilantarve. Suurimmassa osassa yhdistelmäpiirilevyjä optinen tiedonsiirto tapahtuu polymeeristä valmistetun valokanavan avulla. /9/

Korttien välinen optinen tiedonsiirto voidaan toteuttaa joko back-plane-väyläkortin tai free-space-siirron avulla. Back-plane-siirrossa signaali siirretään taustalevyn kautta, joka voi olla kokonainen valojohdetaso tai kortti, jonka pinnalle tai haudatuksi rakenteiksi on prosessoitu valokanavat. Kuvassa 14 on esitetty back-plane-siirron tekniikkaa.



Kuva 14. Back-plane siirron tekniikka piirilevyiltä toiselle valokanavien kautta.

/15/

Optisen tietoliikennetekniikan lisäksi integroituun optiikkaan perustuvilla ratkaisuilla on käyttöä myös erilaisissa antureissa (esim. bio- ja lääketieteessä) sekä optisessa signaalinkäsittelyssä. Eri sovelluksissa painotetaan eri tavalla vaatimuksia komponentin nopeuden, luotettavuuden, optisten häviöiden, signaalikanavien välisen ylikuulumisen, tehonkulutuksen ja hinnan välillä.

Free-space-siirrolla tarkoitetaan suoraa optista lähettimen ja vastaanottimen yhteyttä ilman erityistä valojohdetta. Siirtoetäisyydet voivat olla senttimetri- tai desimetriluokkaa laitteen sisällä. Free-space-siirtoa voidaan käyttää lyhyillä etäisyyksillä ja suljetussa tilassa, kuten mikropiirien välillä moduulin sisällä.

Etuna free-space-siirrossa on ettei signaalia tarvitse kuljettaa reunaliittimien kautta. Tämä helpottaa johdotusta sekä suuritaajuista RF-suunnittelua. Piirikorttisovellusten yhteyksien ongelmakohtina free-space-siirrossa ovat kohdistustarkkuudet ja ympäristötekijät.

3.1 Valokanavat

Valon eteneminen valokanavassa perustuu valokuidun tapaan kokonaisuheijastukseen ytimen ja sitä ympäröivän taitekertoimeltaan matalamman eristekerroksen rajapinnassa. Heijastuva optinen teho tunkeutuu osittain ytimen ulkopuolella olevaan eristemateriaaliin. Valokanavan materiaalien on läpäistävä valoa hyvin eli niillä on oltava alhainen optinen vaimennus. Niiden valmistus tapahtuu valokuitujen tapaan ja kuvioimalla optista materiaalia saadaan aikaiseksi valon kokonaisuheijastus ja näin ollen signaali pysyy siirtotiellä. Valokanavia voidaan valmistaa suoraan piirilevyille ja näin yhdistää sähköiset ja optiset siirtotiet.

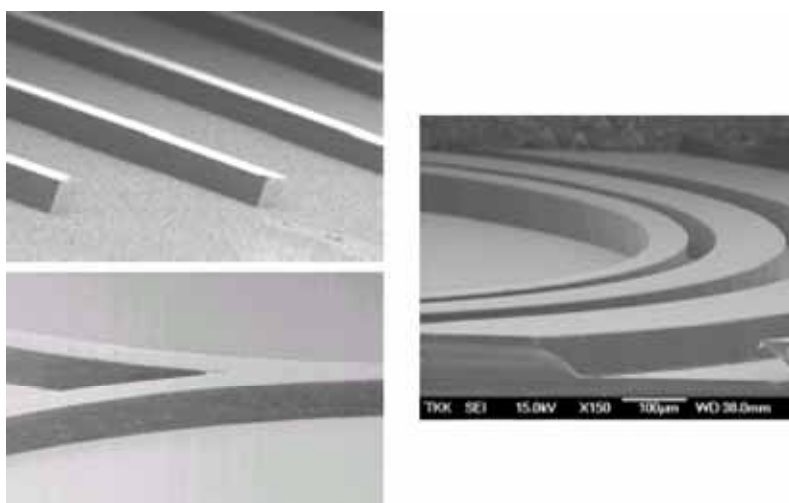
Valokanavan poikkileikkauksen muotoon ja kokoon vaikuttavat ydinmateriaalin ja sitä ympäröivien materiaalien väliset taitekerroinerot. Mahdollisimman suuri

taitekerroinero takaa valon pysymisen valokanavassa, jolloin kanava voidaan taivuttaa pienemmälle kaarelle ja kanavien pakkaustiheys kasvaa. Valokanavamateriaalit ovat usein erittäin halpoja, jopa alle 50 €/kg. Tasomaisille alustoille ohutkalvotekniikoilla valmistetuilla valokanavilla taitekerroinero voi olla erilainen pysty- ja vaakasuunnassa. Suorakulmaisen ytimen lisäksi voidaan käyttää esimerkiksi harjannemaisia poikkileikkausmuotoja.

Valokanavat voidaan rakentaa siten, että ne haarautuvat eri suuntiin. Valokanavat kykenevät myös siirtämään monia signaaleja samanaikaisesti. Aallonpituuskanavoinnin (WDM) avulla nämä signaalit voidaan erotella ja siten estetään signaalien sekoittuminen.

Optisen tehon jakautuminen varsinaisen ytimen ulkopuolelle mahdollistaa valon kytkeytymisen kahden rinnakkaisen valokanavan välillä. Tämä rajoittaa valokanavien pakkaustiheyttä, mutta myös tarjoaa mahdollisuuksia optisten kytkinten ja haaroittimien valmistukseen.

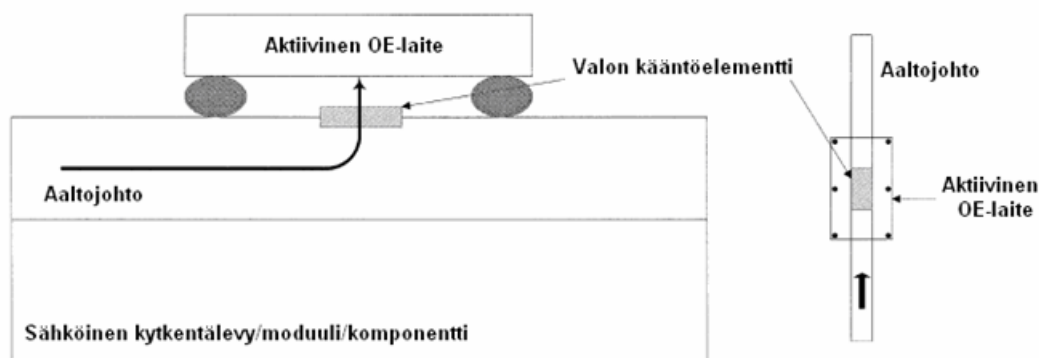
Optisissa kuiduissa on pieni taitekerroinero ja pyöreä tehojakauma. Kuitujen ja valokanavien kytkennässä niiden taitekerroin- ja tehojakaumien tulisi olla mahdollisimman lähellä toisiaan. Tällöin liitoskohdassa häviää ja heijastuu takaisin mahdollisimman vähän tehoa. /9/



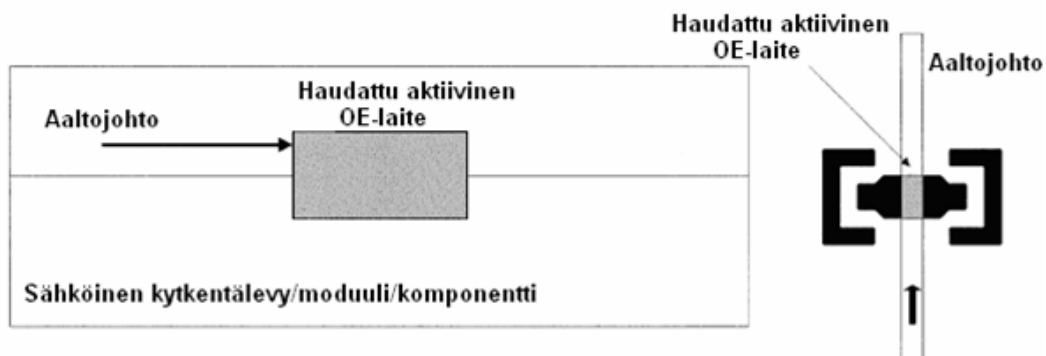
Kuva 15. Valokanava mikroskoopissa.

3.2 Optisen signaalin siirto valokanavasta optoelektroniseen laitteeseen

On olemassa monia tapoja siirtää optinen signaali optoelektroniseen komponenttiin tai moduuliin. Kuvissa 16 ja 17 on esitetty kaksi perustapaa. Kuvassa 16 optinen signaali käännetään 90 astetta aaltojohdosta optoelektroniseen laitteeseen. Kuvassa 17 valoa ei käännetä aaltojohdosta vaan ilmaisinelementti on haudattu piirilevysubstraatin sisään.



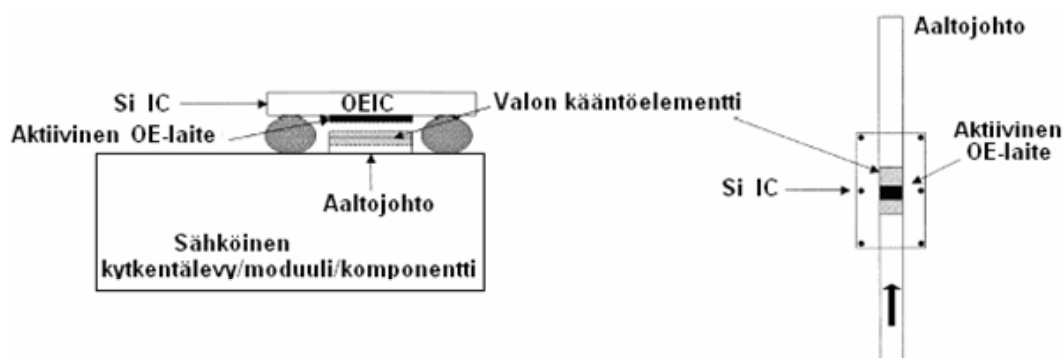
Kuva 16. Valosignaalia käännetään 90 astetta valokanavasta aktiiviseen optoelektroniseen laitteeseen.



Kuva 17. Valosignaali vietään suoraan haudattuun aktiiviseen optoelektroniseen laitteeseen.

Valo voidaan kääntää joko peilien tai hilan avulla optiseen tai optoelektroniseen laitteeseen tai optoelektroniseen integroituun piiriin (optoelectronic integrated circuit, OEIC). Käyttämällä diffraktiivisia elementtejä valon ohjaukseen saadaan hyvä kytkentätehokkuus ja heijastettua vain haluttu valon spektri. Jos optista signaalia käännetään 90 astetta, täytyy optoelektronisen komponentin tai piirin

olla asetettu ylösalaisin, niin että optiivisesti aktiivinen alue on piirilevyä kohti. Tällaista komponentin tai piirin liittämistä kutsutaan nimellä flip-chip-bondaus. Flip-chip-bondauksessa komponentin liitetään liitännät piirilevyllä tapahtuvat suoraan komponentin nystyröiden avulla eikä komponentille näin ollen tarvitse varata tilaa johdotuksia varten komponentin sivuilta. Nystyröiden ja piirilevyn välille yhteys voidaan muodostaa esimerkiksi sähköisesti johtavan materiaalin avulla. Flip-chip-bondauksen haittana on komponentin tarkat kohdistusvaatimukset ja kytkentätehokkuuden väheneminen suurilla taajuuksilla, sillä valonilmaisimien koko pienenee suurempien tiedonsiirtonopeuksien myötä. Flip-chip-bondauksen liitännöiden toimivuuden testaus on myös hankalaa. Kuvassa 18 on esitetty flip-chip bondaamalla liitetty OEIC.



Kuva 18. Valokanavaan liitetty OEIC flip-chip bondaamalla. Bondaustyypin huomaa siitä, että aktiivinen OE-laite on piirilevyä kohti.

Optisen signaalin lähde tai ilmaisimien (tai molemmat) voidaan myös haudata aaltojohdon sisään. Elementti voidaan haudata joko aaltojohdon ytimeen tai kuoreen. Kuvassa 19 optoelementti on asennettu ytimeen ja kuvan 20 tapauksessa valonilmaisimien on haudattu kuoreen.



Kuva 19. Aaltojohdon sisälle haudattu valonilmaisimien on tässä tapauksessa sijoitettu aaltojohdon ytimeen.



Kuva 20. Aaltojohdon sisälle haudattu valonilmaisain on sijoitettu valokanavan kuorirakenteeseen.

Haudatulla rakenteella on saavutettu hyvä kytkentätehokkuus seostettuja puolijohhteita käytettäessä, kuten InP(Indium Phosphide)-pohjaisia seoksia. Pii- ja GaAs-substraateille on valmistettu polymeerisia aaltojohtoja, joihin on haudattu valoilmäisimia.

Tutkimukset osoittavat, että kuoreen haudatun fotodiodin kytkentätehokkuus on parempi kuin suoraan ytimeen haudatun. Lisäksi kuoreen haudattu fotodiodi aiheuttaa vähemmän heijastuksia kuituun. Suurilla tiedonsiirtonopeuksilla suoraan ytimeen kytketyn fotodiodien etuna on niiden tuottama nopeampi kantaalto ja suurempi optinen teho. /16/

4. VALOKANAVAMATERIAALIT

Aaltokanavamateriaalilta vaadittavia ominaisuuksia ovat muun muassa:

- vähäinen optinen vaimennus
- hyvä taitekertoimen kontrolloitavuus ja muuteltavuus. Mikäli valokanavan ydinmateriaalin taitekerrointa ei voida säätää riittävästi, täytyy kuorikerros valmistaa eri materiaalista.
- optisten ominaisuuksien säilyminen ympäristö- ja lämpötilarasituksessa
- korkea lasisiirtymäalue ja lämmönkestävyys
- helppo prosessoitavuus alhaisissa lämpötiloissa
- lämpölaajenemiskerroin yhteensopiva muiden rakennemateriaalien kanssa
- hyvä mekaaninen lujuus
- alhainen veden ja kosteuden absorptio
- hyvä tasomaisuus
- hyvä ympäristöolosuhteiden kestävyys

- ympäristöystävällisyys
- alhainen hinta.

/9/

Lasi olisi valon läpäisevyydeltään paras valokanavan ydinmateriaali. Kuitenkin nykyään polymeerejäkin käytetään valokanavamateriaalina, sillä etuna lasiin verrattuna polymeerit ovat mekaanisesti kestävämpiä, edullisempia ja keveämpiä. Polymeereillä on myös valmistusmenetelmiä enemmän. Polymeerien heikkouksina ovat heikko lämmönkesto ja ominaisabsorption aiheuttama korkea optinen vaimennus.

Lasi, piidioksidi ja piinitridi läpäisevät hyvin valoa sekä näkyvillä että infrapuna-alueen aallonpituuksilla. Pii absorboi voimakkaasti näkyvällä 400-800 nm aallonpituusalueella, mutta soveltuu hyvin tietoliikenteen sovelluksiin, jotka käyttävät mm. 1300nm ja 1550 nm signaaleita. SOI -teknologiaa (Silicon On Insulator) avulla ohut piikerros saadaan infrapunavaloa ohjaavaksi ja sähköisesti alustana olevasta piikiekosta eristetyksi. SOI-teknikassa eristeenä käytetään ohutta piidioksidikerrosta.

Polymeerit ja epoksi ovat herättäneet suurta mielenkiintoa halvan hintansa johdosta aaltojohtoina ja substraattina. Epoksi ja polymeerirakenteisille substraateille on käytettävä ohutkalvorakenteisia (thin-film) komponentteja. Ohutkalvorakenteiset optoelektriset laitteet voidaan liittää jokaiseen substraattiin kuten esimerkiksi FR4-levyyn.

Polymeereistä tunnetuin on polymetyylimetakrylaatti (PMMA). Se on läpinäkyvä polymeeri ja myös paljon käytetty optisissa sovelluksissa. PMMA ei kuitenkaan kestä kokoonpanossa käytettäviä juotoslämpötiloja. Polyimidit (PI) ovat lämmönkestoltaan hyviä, mutta edellyttävät korkean lasisiirtymäalueen omaavia substraatteja. Epoksimateriaalit (EP) kestävät hyvin lämpöä ja kemikaaleja, absorboivat hyvin vähän vettä, eivät juurikaan kutistu ja niillä on erinomainen adheesio useisiin materiaaleihin. Valokanavissa käytetään myös syklisiä

olefiinikopolymeerejä (COC), joiden erityispiirteitä ovat muun muassa matala kahtaistaitteisuus ja alhainen veden absorptio, minkä ansiosta ne soveltuvat hyvin valokanavan materiaaliksi.

Epäorgaanisella osalla modifioituja sol-gel-tyyppisiä hybridimateriaaleja tutkitaan. Hyvien optisten ominaisuuksien lisäksi ne omaavat hyvät sähkön eristysominaisuudet. Demonstroituissa hybridilevyissä on saavutettu suuri pakkaustiheys prosessoimalla samaan kerroksen sekä optiset että sähköiset väylät.

Uusimpiin valokanavamateriaalikeksintöihin kuuluu silikoni (polydimetyylisiloxane), aine jota on tähän mennessä käytetty lähinnä kylpyhuoneiden tiivisteinä. Dortmund University's Faculty of Electrical Engineeringin toimesta on valmistettu yhdistelmäpiirilevy, jossa silikonilevy on kahden epoksipohjaisen levyn välissä. Andreas Neyer, yliopiston mikrostruktuuriteknologian johtaja ja silikoniyhdistelmälevyn keksijä, uskoo silikonin mahdollisuuksiin Internetin tehokkuuden ja nopeuden lisäämiseksi. "Silikoni johtaa valoa erittäin hyvin ja sillä on hyvä terminen stabilisuus, se kestää jopa 220 asteen lämpötilat", Neyer toteaa K2004-tapahtumassa.

Silikonista tehtyjen valokanavien täytyy olla kaksiosaisia. Valokanavan ydin kuljettaa signaalia ja toisesta aineesta koostuva kuori ympäröi sitä. Silikonivalokanavan prototyyppi on kehittelyvaiheessa. Silikonista valmistettujen yhdistelmäpiirilevyjen etuna tuotannon kannalta on, että ne voidaan useimmissa tapauksissa valmistaa jo olemassa olevien laitteistojen avulla. Ongelmat ovat tällä hetkellä valokanavamuotin valmistuksessa, sillä valokanavan reunan karkeus ei saa ylittää 30-40 nm. /20/

5. TUOTANTO

Nykytekniikoilla optisen väylän signaalikäsittelyn komponenttien tehotarve on luokkaa 0,5-2,0W. Komponentit ovat fyysisiltä mitoiltaan hyvin pieniä, koko optinen väylä voidaan rakentaa esimerkiksi mikropiirin pakkausjalustalle. Laser ja vastaanotin voidaan liittää esimerkiksi flip-chip-bondaamalla. /9/

Optisten siirtolinjojen koko piirilevyllä on poikkileikkaukseltaan sadan mikrometrin luokkaa. Tämä aiheuttaa kovat vaatimukset, jotta optinen komponentti saadaan kohdistetuksi valokanavaan.

Valokanavan valmistuksessa voidaan käyttää paksukalvo- ja mikrotyöstötekniikoita. Paksukalvotekniikan etuina ovat hyvin tunnetut prosessit ja olemassa oleva tuotantokalusto, mutta valokuvioitavien paksukalvopolymeerien saatavuus on heikko. Valokanava voidaan valmistaa myös perinteisten mikro-optiikan replikointitekniikoiden, kuten kuumakohokuvioinnin ja ruiskuvalamisen, avulla. Tällöin lämpötilan tarkka hallinta saattaa muodostua ongelmaksi, koska materiaalin optiset ominaisuudet eivät saa muuttua.

Jotta valo kilpailisi myös kustannuksiltaan sähköisen siirron kanssa, teknologialta edellytetään massatuotantokelpoisuutta. Sekä maskilitografiaan pohjautuva monivaiheinen valokuviointitekniikka että skannaustyyppinen laserkirjoitus ovat prosesseja, joissa läpimenoajat ovat pitkiä. Niinpä onkin käynnistetty tutkimuksia korkean volyymin painotekniikkaan perustuvien rullalta-rullalle-tyyppisten tekniikoiden soveltuvuudesta optiikan valmistukseen. /9/

Optiikan valmistus poikkeaa elektroniikan valmistuksesta puhtaus- ja tarkkuusvaatimusten suhteen. Optisen signaalin vaimentumiseen vaikuttavat aineen ominaisabsorption lisäksi sirontailmiöt, jotka aiheutuvat rakenteen epäideaalisuuksista. Epäideaalisuudet voivat johtua materiaaliin absorboituneista epäpuhtauksista ja kosteudesta, kanavan reunojen karheudesta, huokosista ja lämpötilan synnyttämien jännitysten aiheuttamista vaurioista. Valokanavan pinnankarheusvaatimus on kymmenen nanometrinen luokkaa.

Tavallisen piirilevyn valmistuksessa se altistetaan suurelle paineelle 40 kg/cm^2 ja korkeille lämpötiloille $170\text{-}180^\circ\text{C}$ jopa yli tunnin ajaksi. Monet polymeerit eivät kestä tätä rasitusta ja käyttökelpoisten polymeerien määrä valokanavan

valmistuksessa onkin hyvin rajallinen. Riippumatta siitä valmistetaanko valokanava kuumakohokuviointilla vai laserkirjoituksen avulla, sirontahäviöt ovat luokkaa 0,2 - 0,5 dB/cm. /17/

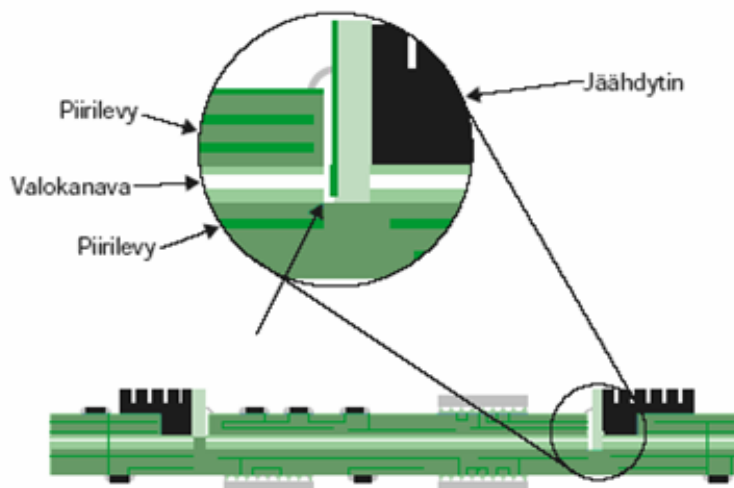
Optisten piirilevyjen valmistuksessa haasteeksi muodostuu lähettimen ja vastaanottimen kytkeminen siten, että signaali vaimenee mahdollisimman vähän. Kytkehäviöt eivät saa kasvaa kokoonpanossa syntyvien paikoitusvirheiden seurauksena. Nykytekniikalle tarkkuusvaatimukset voivat aiheuttaa suuriakin ongelmia sillä ne voivat olla jopa 50 mikronin luokkaa. Välitäytämateriaalia käytettäessä sen täytyy olla läpinäkyvä käytetyllä aallonpituudella. Jos välitäytämateriaalia ei käytetä, saattaa esiintyä luotettavuusongelmia pölyn yms. seurauksena.

Tavallisen piirilevytekniikan maksiminopeutena voidaan pitää 10 Gbit/s. Tämä saavutettiin siirtämällä FR-4-piirilevyllä signaalia 0,6m differentiaalista siirtojohtoa pitkin. Heijastuksista aiheutuvat epäjatkuvuudet oli minimoitu ja taajuusriippuvaiset häviöt kompensoitu.

Tämän päivän komponentit ja pakkaukset ovat liian kalliita ja suuria. Teollisuus tarvitsee lisää flip-chip-komponentteja perinteisen johdotuksen sijaan ja integroituja moduuleita jotta pakkauskoot pienenevät. Optisia tiedonsiirtoteitä tullaan rakentamaan moduulien sisään ja piilastuille kuparijohdotusten sijaan tehokkuutta parantamaan. Materiaaleissa täytyy myös tapahtua muutoksia. Erittäin suuritaajuiseen tiedonsiirtoon FR-4-alusta on liian häviöllinen ja sen eristevakio sekä etenemisviive on liian suuri. Pii saattaa korvata tulevaisuudessa GaAs:n monissa sovelluksissa halvemmän hintansa takia. Uusia työkaluja ja konsepteja automaatiopakkaukseen täytyy kehittää, jotta käsin pakkauksesta päästään eroon. /18/

Valokanavan valmistuksessa on mietittävä myös kanavan sijoittelu. Kanava voidaan sijoittaa joko piirilevyn alle, päälle tai haudata sen sisään. Piirilevyn sisään haudattuna saavutetaan muita vaihtoehtoja parempi mekaaninen ja

terminen suojaus. Kuvassa 21 on esitetty tällainen piirilevy, jossa valokanavat on haudattu piirilevyn sisään.



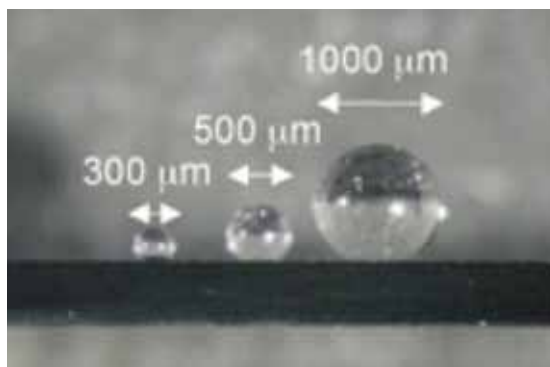
Kuva 21. Opto-sähköinen piirilevy, jossa polymeerivalokanavat on haudattu piirilevyn sisään.

5.1 Uudet kehitysaskeleet

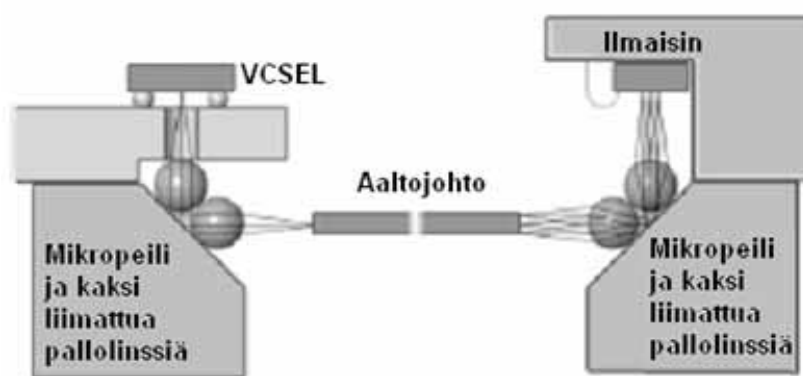
Tässä kappaleessa tarkastellaan hieman uusimpia askeleita optisen tiedonsiirron alalta. Esitellyt kolme uutta innovaatiota ja keksintöä ovat vuosilta 2004-2005. Kappaleen tarkoituksena on antaa käsitys optisen tiedonsiirron moninaisuudesta ja uusien keksintöjen mahdollisuuksista.

5.1.1 Mikropallolinssit

Optisista mikropalloista muodostetut linssit (microball lense) on suunniteltu yhdistämään valo laserdiodista kuituun (tai valokanavaan) ja kuidusta fotodiodille. Hyvä hyötysuhde ja halpa hinta tekevät mikropalloista suosittuja optisiin datalinkkeihin, optiseen Ethernettiin ja kaapelitelevisiosovelluksiin. Marraskuussa 2004 mikropalloista valmistettujen linssirivien avulla onnistuttiin siirtämään 73% tehosta kuituun. Tällöin käytettiin 633 nm laseria ja liitospituus oli 8 μm . Kuvassa 22 on esitetty kolme mikropallolinssiä piisubstraatille asennettuna ja kuvassa 23 esitetään mikropallolinssien toimintaa valoa kokoavana elementtinä optisessa kanavassa. /21/



Kuva 22. Kolme erikokoista mikropallolinssiä piisubstraatille asennettuna.



Kuva 23. Optinen kanava mikropallolinssineen.

Kuidun lataus, paikoitus ja korjaus ovat vielä suuria haasteita joka optoelektronikan kokoonpanossa. Optimaalisen tiedonsiirron saavuttamiseksi komponenttien sijoittelu täytyy hoitaa erittäin tarkasti ja kiinnitysaineen täytyy kestää paikallaan myös ajan kuluessa. Yleensä optisen kaapelin oikea paikoitus puolijohdelaseriin vie yli 4 minuuttia. Konenäön ja mallinnuksen avulla tämä saadaan karsittua alle 1,5 minuuttiin. /21/

Liimojen käyttö on lisääntynyt osaksi uusien erityisesti optoelektronikan tarpeisiin suunniteltujen liimojen kehittelyn ja toisaalta optoelektronikan tuotannon paremman ymmärtämyksen myötä. Liimoja voidaan käyttää monien materiaalien kanssa ja monissa eri optisissa valmistustehtävissä. Valmistuksessa liimojen käytön etuna johdotuksissa on matala liitoslämpötila ja halvat välineet. Tänä päivänä on tarjolla suuri valikoima erilaisia liimoja ja tämä tekee liimajohdotuksista erittäin monipuolisen liitostekniikan. Liimakytkennän etuna on

myös helppo automatisointi. Haasteena on ollut kuitenkin liiman oikea annostelu, joka yleensä tarkoittaa alle yhden nanolitran määrää. /19/

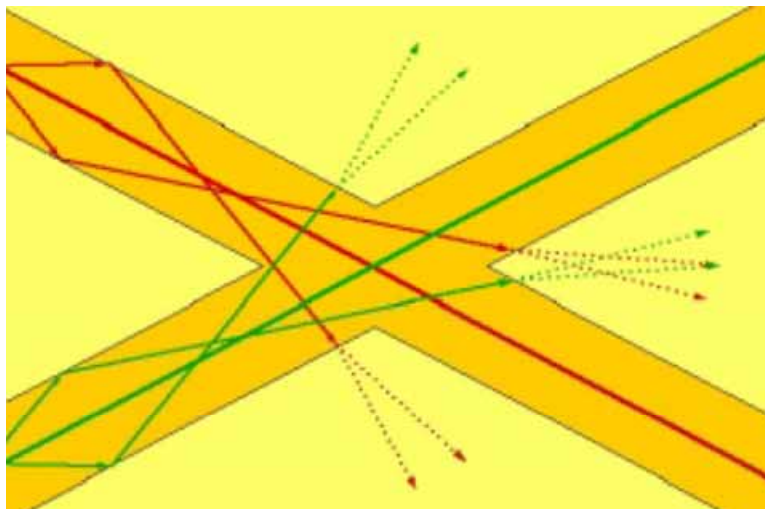
Mikropallolinssien sijoitteluun ja kiinnittämiseen substraatille on suunniteltu prototyyppikone. Tämä prototyyppikone kykenee sijoittelemaan 300-1000 μm linssijä substraatille konenäön avulla. Lämpimitaltaan 125 μm linssien käsittelyyn ja liimaukseen tarvitaan erikoislaitteistoa, koska linssit ovat mitoiltaan pieniä ja liimaa täytyy annostella alle yhden nanolitran. Tämän kuvassa 24 olevan prototyypin valmisti CSEM Microdelta marraskuussa 2004.



Kuva 24. Microdeltan valmistama prototyyppi mikropallolinssien asettelua ja liimausta varten.

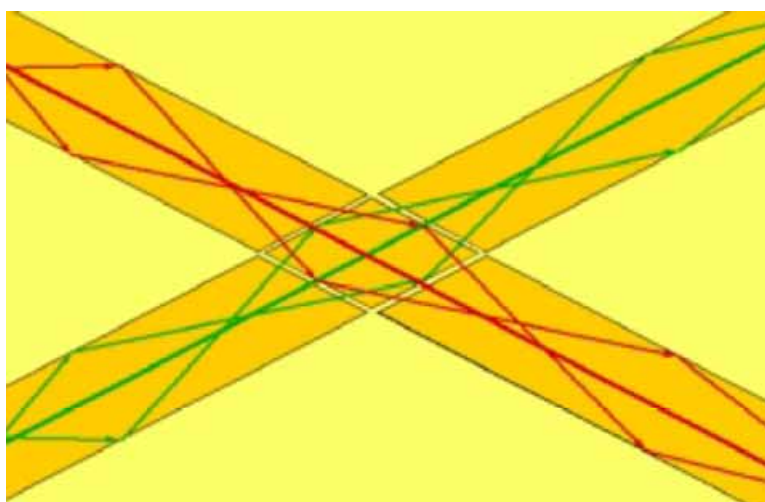
5.1.2 Valokanavaristeys

Ristikkäin menevät valokuidut aiheuttavat joskus signaaliin kytkeytymis- ja sirontahäviötä kuvassa 25 esitetyllä tavalla. Siksi tiiviisti pakatussa piirilevyissä voi esiintyä suuriakin optisia häviöitä sekä ylikuulumis-ilmiötä monien signaalien kesken useissa eri kuiduissa.



Kuva 25. Kahden valokuidun risteys ja niiden signaalien kytkeytymis- ja sirontailmiöt.

Optical Crosslinks – yhtiö on kehittänyt uuden valon ohjaustavan valokuitujen risteykseen. Muuttamalla muutaman mikrometrin matkalle valokuidun taitekertoimen arvoa valokanavien risteykseen kuvan 26 osoittamalla tavalla voidaan valo ohjata omaan kuituunsa. Tällöin sirontaa toiseen kuituun ei tapahdu. Kuvan 26 tapauksessa taitekertoimen arvoa pudotettiin $4\mu\text{m}$ matkalle. Taitekertoimen muutos aiheuttaa periaatteessa valokanavaan pienen häviön, mutta Optical Crosslinks – yhtiön mukaan optinen häviö on -30dB luokkaa.



Kuva 26. Kahden valokuidun risteys, jossa taitekertoimen arvoa on pudotettu $4\mu\text{m}$ matkalta. Kytkeytymistä ja sirontaa ei esiinny. /22/

5.1.3 Puolijohteen valmistus

Skotlantilainen yritys nimeltään Intense uskoo kehittäneensä uuden puolijohteen valmistustavan, joka voi mahdollisesti pudottaa optisten järjestelmämikropiirien valmistuksen hintaa puoleen nykyisestä tai jopa enemmän. Menetelmän avulla optiset komponentit voisivat haastaa perinteisen piin kokonsa ja hintansa puolesta suuren suorituskyvyn vaativissa sovelluksissa. Yritys kertoo "Quantum well intermixing"(QWI) - nimeä kantavalla menetelmällään valmistaneensa noin 100 kappaletta monitoimisia komponentteja sisältävän yhtenäisen optisen järjestelmämikropiirin, jonka suorituskyky päihittää jokaisen tämänhetkisen laitteen. Yhtiön mukaan prosessi voisi tarjota halvan ja luotettavan optisten järjestelmämikropiirien valmistustavan, jolla voidaan valmistaa entistä pienempiä optisia järjestelmämikropiirejä.

Kvanttikaivot ovat monen optoelektronisen puolijohdelaitteen aktiivinen elementti. QWI-prosessin idea perustuu puolijohdeiden kvanttiominaisuuksien, erityisesti sen energiavyön ja kvanttikaivojen, muuttamiseen siten, että puolijohdetta voidaan kontrolloidusti hallita joko läpinäkyväksi tai läpinäkymättömäksi valolle. QWI-menetelmässä näitä kvanttikaivoja täytetään pienemmällä energialla ja niin ollen ne muuttavat elektroni-aukkoparien toimintaa. Intense on jo onnistuneesti valmistanut 980nm lasersirun, joka kvanttikaivorakennetta hyväksi käyttäen tuottaa 220mW valotehon. Intense uskoo keksinnöllään olevan vielä kehittelemättömiä sovellusalueita muun muassa valon modulaattoreiden ja suodattimien parissa. /23/

6. YHTEENVETO

Diplomityön tarkoituksena oli tutkia sähköisen- ja optisen signaalin käyttöä samalla piirilevyllä. Työn teoriakappaleessa on esitetty keskeiset optiseen tiedonsiirtoon vaikuttavat tekijät. Työssä on teoriaosuuden lisäksi uusimpia kehitysaskeleita kuvastamaan alan nopeaa kasvua ja alan eri sovellusten moninaisuutta.

Valonlähteiden osalta työssä tutkittiin kolmea eri tyyppiä: LED:ä, laseria ja VCSEL:ä. Näistä LED on liian hidaskäyttöön suurilla nopeuksilla. Toisaalta LED:n heikkous on myös sen lähettämän valon täplän suuri poikkipinta-ala ja näin ollen aiheutuena vaikea liitännä valokuituun. Laser on tehotasoltaan ylivoimainen muihin verrattuna ja laserin käyttö tulee luultavasti jatkumaan tulevaisuudessa pitkien matkojen yhteyksissä. Uusimmalle valonlähdekeksinnöllä VCSEL:llä on suuria odotuksia tulevaisuuden optisessa tiedonsiirrossa. Sen etuina LED:in nähden ovat nopeus ja sen lähettämän valon täplän poikkipinnan pienenä. Laseriin verrattuna VCSEL:n etuina on hinta, koko ja valonsäteen pyöreys. Toisaalta VCSEL:n tehotasojen pienenä aiheuttaa sen olevan käyttökelpoinen vain lähi- ja keskimatkan yhteyksissä.

Valokuidussa ilmenee vaimennusta pääasiassa absorptio- ja sirontayhteisvaikutuksesta. Kuituun kytkettävää tehoa rajoittavat Brillouin- ja Ramanin sironta. Näistä Brillouin-sironta aiheuttaa kuituun takaisinpäin siroavan valoallon ja Ramanin sironta aiheuttaa ylikuulumista kanavien välillä. Rayleighin sironta aiheutuu lasin valmistusprosessissa. Mitä homogeenisempaa lasi on sitä vähemmän tätä sirontaa esiintyy. Alle 800nm aallonpituuksilla Rayleighin sironta kuitenkin kasvaa huomattavasti. Valokuidussa käytettävää aallonpituusalueita rajoittaa Rayleighin sironta ja infrapunasäteilyn absorptio. Käyttökelpoinen alue on 800nm-1700nm ja se on tällä hetkellä jaettu kolmeen optisen tiedonsiirron kaistaan, joista käytetyin C-kaista käyttää aallonpituuksia 1530-1565nm.

Valon sähkömagneettisesta kytketymisestä riippumattomuus on optisen tiedonsiirron suurena etuna suurilla taajuuksilla, koska metalliset johtimet alkavat

toimia tällöin antennien tavoin vastaanottaen viereisten johtimien signaaleita ja aiheuttaen interferoituvia aaltoja. Optinen tiedonsiirto piirilevyllä voidaan toteuttaa neljällä eri tavalla: valokuiduilla, kuitunauhoilla, free-space-siirrolla tai valokanavan avulla. Piirikorttien välinen tiedonsiirto voidaan toteuttaa back-plane-väyläkortin avulla tai free-space-siirrolla.

Free-space-siirto tapahtuu suoraan valonlähteeltä ilmaisimelle ilman välissä olevaa johdetta. Tämä rajoittaa siirron etäisyydet korkeintaan muutamiin desimetreihin. Siirtotapaa voidaan käyttää lyhyillä etäisyyksillä ja suljetussa tilassa, kuten esimerkiksi mikropiirien välillä moduulien sisällä. Free-space-siirron hyötyjä ei mielestäni vielä täysin osata käyttää hyödyksi, sillä moduulien sisään rakennettuja optisia siirtoteitä ei ole vielä juurikaan kehitetty. Uskon myös tulevaisuudessa integroinnin lisääntyessä koteloiden sisällä oleva kolmiulotteisen suunnittelun tuovan uusia mahdollisuuksia free-space-siirtoon. Valitettavasti komponentteja integroitaessa heikkenee kokonaisuuden soveltuvuus toiseen käyttöön ja tämä lisää eri moduulisovellusten määrää.

Valokanavat rakennetaan valokuidun tavoin kokonaisuheijastusilmioon perustuen. Valokanavamateriaalin optisen vaimennuksen tulee olla pieni ja taitekertoimen arvo sitä ympäröiviin materiaaleihin tulee olla mahdollisimman suuri, jotta valo pysyy kanavassa. Valokanavat voidaan rakentaa suoraan piirilevyille ja näin ollen saadaan yhdistettyä sähköinen ja optinen siirtotie. Valokanavan muotoon ja kokoon vaikuttaa käytettävät materiaalit. Etuna sähköisiin johdotuksiin nähden voidaan pitää myös mahdollisuutta rakentaa valokanavat haarautuvasti. Valokuidun ja valokanavan liitoksessa niiden taitekerroin- ja tehojakaumien tulisi olla mahdollisimman lähellä toisiaan, jotta signaalista heijastuu mahdollisimman vähän takaisinpäin.

Valokanavamateriaalilta vaaditaan monia ominaisuuksia. Lasi olisi valon läpäisevyydeltään paras valokanavan ydinmateriaali, mutta polymeerit ovat myös suosittuja johtuen siitä, että ne ovat mekaanisesti kestävämpiä edullisempia ja

keveämpiä. Heikkouksina polymeereillä ovat heikko lämmönkesto ja ominaisabsorption aiheuttama korkea optinen vaimennus.

Optisen laitteen liittäminen valokanavaan voidaan toteuttaa joko heijastamalla signaali 90 astetta komponentille tai hautaamalla komponentti valokanavan sisään. Valon heijastus voidaan toteuttaa peilien ja hilojen avulla ja käyttämällä diffraktiivisia elementtejä voidaan heijastaa vain tietyt aallonpituudet.

Valokanavat voidaan valmistaa suoraan piirilevylle paksukalvotekniikkaa tai replikointitekniikoita hyväksi käyttäen. Valmistusprosessin puhtausvaatimukset ovat kovat, koska epäpuhtaudet aiheuttavat signaaliin vaimennusta. Valmistuksessa tarkkuusvaatimukset aiheutuvat optisten siirtolinjojen pienestä koosta. Valokanavat voidaan valmistaa suoraan piirilevyn päälle, alle tai haudata sen sisään. Haudatulla rakenteella saavutetaan muita parempi mekaaninen ja terminen kestävyys.

Mielestäni optinen tiedonsiirto voi tulevaisuudessa saavuttaa hyvinkin suurta suosiota. Valokanavamateriaalin tutkimus on mielestäni tärkeää, jotta löydetään sopiva valokanavamateriaali, joka käyttäytyy hyvin lasisen valokuidun ja valokanavan liitoksessa. Uskon valokanavien yleistyvän piirilevyrakenteeseen tämän jälkeen hyvinkin nopeaa vauhtia. Mikropallolinssit auttavat osaltaan kyllä tässä liitoksessa, mutta valokanavamateriaalin monien ominaisuuksien tulisi täsmätä lasin ominaisuuksien kanssa, jotta häviöt olisivat mahdollisimman pienet. Optisten siirtolinjojen valmistuksen koneistusta tulisi mielestäni kehittää jotta siirtoteiden valmistus olisi sujuvaa eikä kohdistusvirheitä esiintyisi.

Optisten komponenttien osalta ongelmana on mielestäni komponenttien matala integrointiaste ja monimutkaisten komponenttien puute. Integrointi tulee varmasti lisääntymään tulevaisuudessa ja tämä tulee lisäämään free-space-siirron mahdollisuuksia moduulien sisällä.

Lähteet:

Kirjallisuus:

- /1/** Alexander Graham Bell ja Charles Sumner Tainter. Photophonetransmitter. U.S. Patent No. 235,496, 1880.
- /2/** Alexander Graham Bell ja Charles Sumner Tainter. Selenium-cell. U.S. Patent No. 235,497, 1880.
- /3/** City of Light: The Story of Fiber Optics, Oxford University Press, New York, 1999, ISBN 0-19-510818-3 A
- /4/** Mikrobitti, numero 10/2004. 60-63.

Internet:

- /5/** Kari Vierinen. Optiset tietoverkot ja niiden komponentit. 2004.
<http://users.evtek.fi/~karisv/optiv2004/optverk3.htm> (sivuilla vierailtu 13.5.2005)
- /6/** Dr. Kenneth S. Fiber Optic Communications for the Premises Environment.
<http://www.telebyteusa.com/foprimer/foch2.htm> (sivuilla vierailtu 13.5.2005)
- /7/** J. Snowdon, G. Russell, P. Lukowicz, R. Baets, R. Bockstaele, R. Burgess and H. Rajbenbach. The Vivid Colours of European Photons. 2003.
<http://www.phy.hw.ac.uk/~phygar1/OIC/Projects/HOLMS/index.html> (sivuilla vierailtu 13.5.2005)
- /8/** Teletekno. Gigabit Ethernet. 2001.
http://www.teletekno.fi/pdf/yleiskaapelointi/GigabitEthernet12_01.pdf (sivuilla vierailtu 13.5.2005)
- /9/** Mikko Karppinen, Antti Tanskanen, Jorma Kivilahti, Marika Immonen, Riia Lankinen. Vauhtia siirtolinjoihin.
<http://www.proessori.fi/es02/arkisto/OPTISET.HTM> (sivuilla vierailtu 13.5.2005)
- /10/** Agilent Technologies. Passive Components. 1999.
http://www.educatorscorner.com/media/LW_basics2.pdf (sivuilla vierailtu 13.5.2005)
- /11/** CORD. Fundamentals of Photonics.
http://cord.org/step_online/st1-7/st17exii.htm (sivuilla vierailtu 13.5.2005)
- /12/** Force, Incorporated. 2005.
<http://www.fiber-optics.info/articles/laser-diode.htm> (sivuilla vierailtu 13.5.2005)
- /13/** Agilent Technologies. Tiedonsiirto värikkäässä WDM-laajakaistaverkossa.
<http://www.proessori.fi/es98/wdm.htm> (sivuilla vierailtu 13.5.2005)
- /14/** Jeff Hecht. Understanding Fiber Optics, Prentice Hall PTR. 2002.
<http://zone.ni.com/devzone/conceptd.nsf/webmain/2825CBA5F830FDB286256C22004F164A> (sivuilla vierailtu 13.5.2005)

/15/ Optical CrossLinks Chip and Board Level Optical Interconnections.

Technical Note I-4.

<http://www.opticalcrosslinks.com/pdf/bd%20&%20bkpl%20conn.pdf> (sivuilla vierailtu 13.5.2005)

/16/ Sang-Yeon Cho, Martin A. Brooke, Nan Marie Jokerst. Optical Interconnections on Electrical Boards Using Embedded Active Optoelectronic Components. 2003.

<http://www.ee.duke.edu/~mbrooke/papers/2003/01239014.pdf> (sivuilla vierailtu 13.5.2005)

/17/ Optical Engineering. Fabrication of Fiber-Embedded Boards Using Grooving Technique for Optical Interconnection Applications. 2004

http://vega.icu.ac.kr/~ois/publications/down/paper_6.pdf (sivuilla vierailtu 13.5.2005)

/18/ John, Stafford. Optoelectronic Components Place New Demands on Packaging and Assembly. 2001.

<http://www.circuitree.com/CDA/ArticleInformation/coverstory/BNPCoverStoryItem/0,2135,23304,00.html> (sivuilla vierailtu 13.5.2005)

/19/ Ch. Bosshard, A.C. Pliska, J. Kunde, and A. Codourey. 2004.

http://www.onboard-technology.com/pdf_ottobre2004/100408.pdf (sivuilla vierailtu 13.5.2005)

/20/ Public relations office at the University of Dortmund. Silicon optical waveguides: bathroom sealant for bits and bytes. 2005.

http://www9.k-online.de/cipp/md_k/custom/pub/content,lang,2/oid,4279/ticket,g_u_e_s_t (sivuilla vierailtu 13.5.2005)