

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tietotekniikan koulutusohjelma
Tietoliikennetekniikan suuntautumisvaihtoehto

Sami Hautamäki

OPTISEN TIEDOSIIRRON KOMPONENTIT

Tutkintotyö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi insinöörin tutkintoa varten
Tampereella 15.12.2006

Työn valvoja: Yliopettaja Jorma Punju

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SYMBOLILUETTELO

1. JOHDANTO	3
2. OPTISEN TIEDOSIIRRON HISTORIAA	6
3. OPTISET KUIDUT	7
3.1 Optisen kuidun toiminnan perusteet	7
3.2 Optisten kuitujen perustyytit	9
3.3 Kuitu materiaalit	11
3.4 Kuitujen optiset ominaisuudet	13
3.4.1 Vaimennus	13
3.4.2 Yksimuotokuidun dispersiot	16
3.4.3 Epälineaariset ilmiöt	17
3.4.4 Raja-aallonpituus	18
3.4.5 Kaistanleveys	18
3.4.6 Numeerinen aukko	19
4. KAAPELIRAKENTEET	19
5. OPTISET LÄHETTIMET	25
6. OPTISET VASTAANOTTIMET	30
7. OPTINEN VAHVISTIN	31
8. WDM JA PASSIIVISET HAAROITTIMET	36
8.1 Coarse Wavelength Division Multiplexing	38
8.2 Dense Wavelength Division Multiplexing	39
8.3 Haaroittimet	44
9. MEMS JA OPTISET KYTKIMET	46
9.1 Täysin optiset kytkimet	47
9.2 Älykkäät optiselektro-optiset-kytkimet	50
10. YHTEENVETO	55
11. LÄHTEET	57
11. LIITTEET	59
Liite 1 DWDM kanava taulukko	59

Tekijä: Sami Hautamäki
Työn nimi: Optisen tiedonsiirron komponentit

Päivämäärä: 03.12.2006
Sivumäärä: 59 sivua ja 1 liitesivu
Hakusanat: kuitu, laserdiodi, optinen, WDM
Koulutusohjelma: Tietotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto: Tietoliikennetekniikka

Työn valvoja: Yliopettaja Jorma Punju

Työssä tutkittiin optisen tiedonsiirron nykyisiä sovelluksia, sekä tutkailtiin tulevaisuuden näkymiä ja kehityssuuntia. Tarkastelukohteina olivat erilaiset optisen tiedonsiirron komponentit sekä siirtomenetelmät. Työssä tutkittiin muun muassa optisia kuituja, kaapelirakenteita, lähettimiä, vastaanottimia, vahvistimia, WDM-tekniikkaa sekä haaroittimia. Tarkoituksena on ollut luoda riittävän kattava selonteko tämän päivän optisesta tiedonsiirrosta ja vastata keskeisimpiin optiseen tiedonsiirtoon liittyviin kysymyksiin.

Optista tiedonsiirtoa käsittelevää aineistoa on saatavana suomenkielisenä, mutta se on hyvin hajautettua. Tavoitteena on ollut tarjota lukijalla optisia komponentteja kokonaisvaltaisesti käsittelevä teos. Lähteenä on käytetty alan kirjallisuutta sekä erinäisiä verkko-osoitteita.

Lukija voi hyödyntää teosta halutessaan perehtyä syvällisemmin optiseen tiedonsiirtoon ja saada peruskuvan optiseen tiedonsiirtoon liittyvistä tekijöistä. Teos auttaa lukijan etsimään tietoa, optisen tiedonsiirron kysymyksiin.

Aika kuluu ja tekniikka kehittyy, joten tietoon vaaditaan jatkuvaa päivitystä. Tämä teos palvelee vuoden 2007 aikaista tekniikkaa ja sen tulevaisuuden näkymiä. Osiltaan siinä esitettyjen tekniikoiden oletetaan vanhenevan vuosien kuluessa. Teoria valon toiminnasta kuidussa tulee kuitenkin pysymään samana.

Author: Sami Hautamäki
Name of the thesis: Components of optical telecommunication systems
Date: 03.12.2006
Pages: 59 pages and 1 appendix
Keywords: fibre, laser diode, optical, WDM
Degree programme: Computer systems engineering
Specialisation: Telecommunication engineering
Supervisor: Principal lecturer Jorma Punju

To days optical fibres are highly used form of telecommunication. Basically all data which is transported in back bone network uses fibres as transmission path. In this study, main goal has been to find out operating principle of the basic components of optical telecommunication-systems. Work is basically outlined to contain information only about systems using fibres. The method was based on studying different information resources, then all gained information was filtered and important information was picked up. This study can be used for obtaining information about optical telecommunication-systems. Study provides up to date information for the needs on year 2007.

1. JOHDANTO

Tiedonsiirron nykypäivään kuuluvat oleellisesti optisen tiedonsiirron valokaapelit ja niiden lukuisat sovellukset. Optinen tiedonsiirto tarjoaa mahdollisuuden nopeaan ja häiriöttömään tiedonsiirtoon. Lähetinlaitteiden, vastaanottimien ja kaapeleiden hinnat ovat laskeneet tuotantomenetelmien ja kilpailun kasvun myötä. Lisäksi tällä hetkellä kuparin ennätysellisen korkea hinta parantaa valokaapeleiden kilpailukykyä. Nämä seikat ovatkin mahdollistaneet valokaapeleiden kysynnän räjähdysmäisen kasvun. Valokaapeli onkin tärkein runkoverkon siirtotie. Tässä tehtävässä nopeusvaatimuksetkin ovat kasvaneet jo niin suuriksi, ettei sähköisillä siirtoteillä pystyittäisi niiden kysyntään edes vastaamaan nykytekniikalla. Samalla valokaapeli on lähestynyt itse käyttäjää. Tässä työssä tutustutaankin optiseen tiedonsiirtoon lähinnä valokaapeliverkkojen osalta. Optinen tiedonsiirto on mahdollista toteuttaa myös FSO (Free Space Optics) eli vapaan siirtotien kautta, mutta nämä sovellukset ovat erittäin harvinaisia. Toteutus on myös suuremmilta osin samankaltainen valokaapelin lähettimien ja vastaanottimien kanssa. Tämän vuoksi ei käsitellä FSO:n toimintaa sen tarkemmin tässä yhteydessä. Valokaapeli mahdollistavat myös suuren määrän erilaisia sovelluksia, mm. anturitekniikan alalta näitä menetelmiä ei kuitenkaan tässä yhteydessä käsitellä.

2. OPTISEN TIEDOSIIRRON HISTORIAA

Työssä keskitytään suurimmalta osalta laserin ja ledien käyttöön optisessa tiedonsiirrossa. Tällöin nykyaikaisen optisen tiedonsiirron historian voidaan katsoa alkaneen vuonna 1970, kun Corning Glass Works kehitti optisen kuidun, jonka vaimennus oli 17 dB/km. Tyypiltään kuitu oli askeltaitekertoiminen monimuotokuitu, jota käytettiin 633 nm aallonpituudella. Tämä mahdollisti valokuidun aseman kilpailukykyisenä vaihtoehtona koaksiaalikaapeleihin perustuville järjestelmille. Valokaapeleiden kehitys lähti huimaan nousuun ja vuonna 1973 saavutettiin jo 4 dB/km vaimennus asteittaistekertoimisella monimuotokuidulla. Ensimmäiset siirtojärjestelmät käyttivät 800 – 900 nm aallonpituutta. Aallonpituuden määrittivät käytettävissä olevat lähetinkomponentit ja kuidun suhteellisen alhainen vaimennuksen alue. Havaittiin, että pidemmillä aallonpituuksilla voidaan saavuttaa huomattavasti alhaisempi vaimennus. Yksimuotokuidun kaupallinen valmistus aloitettiin Yhdysvalloissa vuonna 1983 ja dispersiosirretty kuitu tuli markkinoille kaksi vuotta myöhemmin. Nykyisillä yksimuotokuiduilla voidaan saavuttaa alle 0,2 dB/km vaimennus 1550 nm aallonpituudella.[1]

Ensimmäinen valokuitu otettiin Yhdysvalloissa militaarikäyttöön vuonna 1973. Puhelinverkossa valokaapeli otettiin ensimmäistä kertaa käyttöön vuonna 1976 niin ikään Yhdysvalloissa. Suomeen ensimmäiset valokaapelit otettiin käyttöön vuonna 1979. Valokaapeleiden käyttö on kasvanut jatkuvasti ja sen sovelluksista on tullut arkipäivää tiedonsiirron alalla.[1]

3. OPTISET KUIDUT

3.1 Optisen kuidun toiminnan perusteet

Valokuitu on optisen tiedonsiirron pääasiallinen siirtotie. Lasikuituun heijastetaan laserledillä valopulseja jotka tulkitaan kuidun toisessa päässä. Kuidun ydinrakenne kvartsi(SiO_2) on sähköisesti eriste, joten optinen tiedonsiirto on hyvin suojattu ulkopuolisilta häiriöiltä. Ongelmia tämä tuo kuitenkin käsittelyherkkyyden muodossa sillä kvartsi ei ole yhtä elastista kuin metalli. Kuidun toiminta perustuu valon taittumis- ja heijastuslakeihin kahden aineen rajapinnassa. [1] Valonsäteen osuessa kahden taitekertoimeltaan erisuuruisen aineen rajapintaan, valo taittuu rajapinnasta kuvan 3.1 mukaisesti.

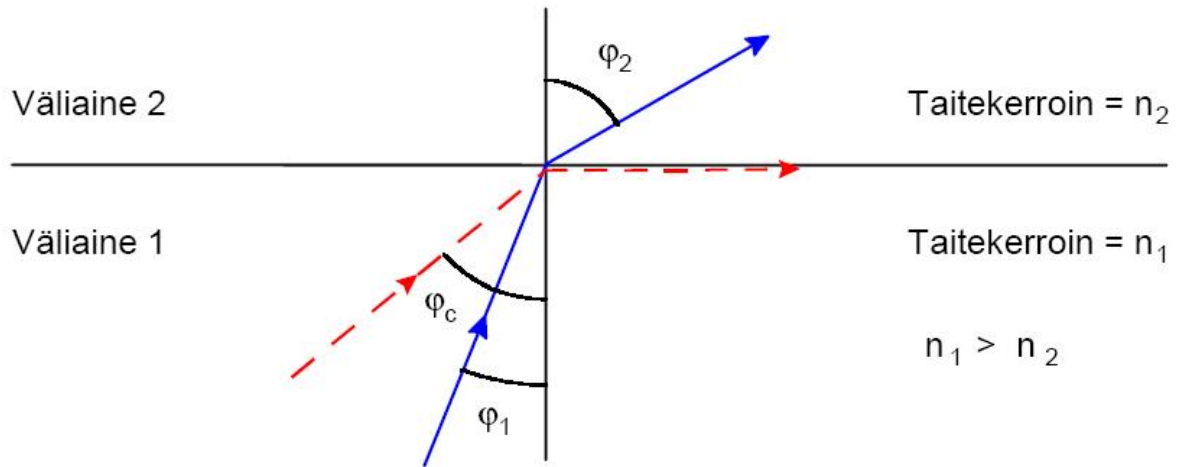
Taittuminen noudattaa Snellin lakia:

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2$$

Valonsäteen tulokulman kasvaessa riittävän suureksi, taittuu valonsäde rajapinnassa pinnan suuntaisesti. Jos tulokulma on tätä suurempi, heijastuu valonsäde takaisin ensimmäiseen väliaineeseen samansuuruudessa kulmassa. Ilmiötä kutsutaan kokonaisheijastukseksi. Kulma φ_{\max} jolla kokonaisheijastus ilmenee, ilmaisee kriittisen kulman.

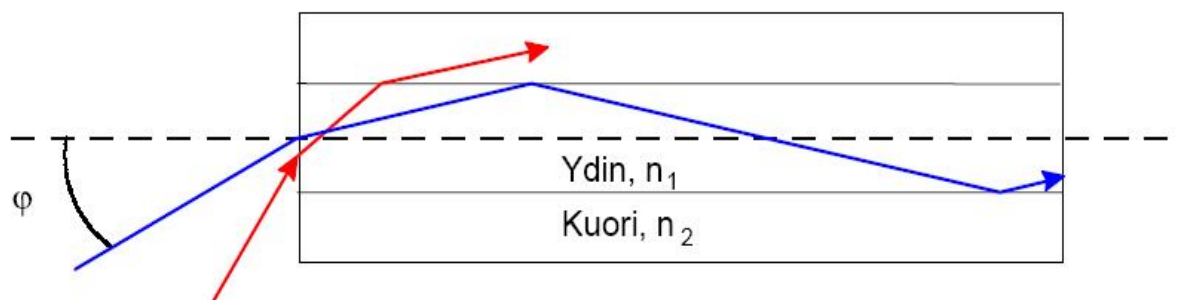
Kriittisen kulman laki on:

$$\varphi_{\max} = \arcsin(n_2 / n_1)$$



KUVA 3.1 Kuvasta ilmenee Snellin lain toiminta sekä kriittinen kulma.[1]

Kuvassa 3.2 on optisen kuidun pitkittäisleikkaus. Kuvassa on näkyvissä kaksi komponenttia: ydin ja kuori. Ytimen taitekerroin n_1 on suurempi kuin kuoren taitekerroin n_2 , mikä aiheuttaa valon säteen heijastumisen takaisin ytimeen. Tällöin valonsäde lähtee etenemään kuidussa. Mikäli valonsäteen tulokulma akseliin nähden kasvaa liian suureksi, etenee rajapinnan läpäissyt valonsäde kuoreen.



KUVA 3.2 Optisen kuidun toiminta periaatteellisesti.[1]

Suurimman sallitun tulokulman φ_{\max} sinifunktiota kuvan 3.2 merkinnöissä kutsutaan numeeriseksi aukoksi, NA:

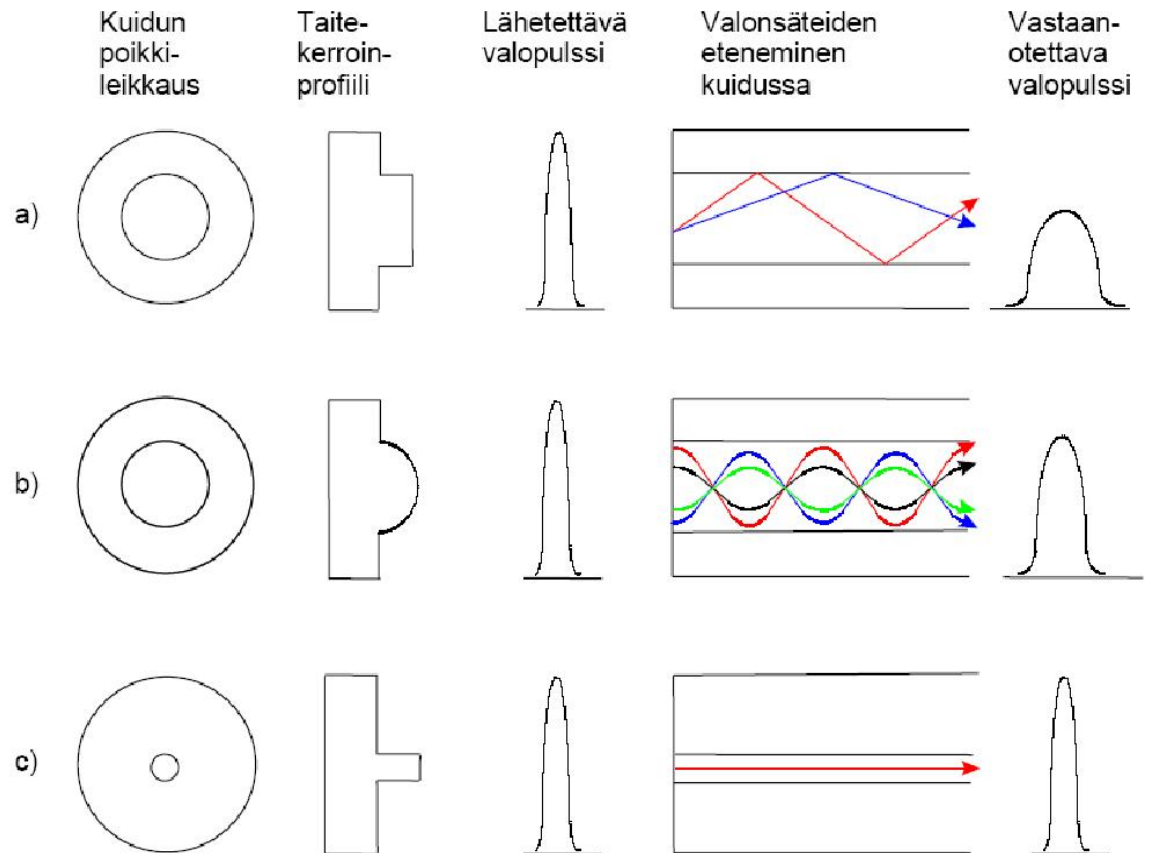
$$NA = \sin \varphi_{\max}$$

3.2 Optisten kuitujen perustyyppit

Kuituja jaotellaan eri tyypeihin taitekerroinprofiiliensa ja sen mukaan miten valo tämän perusteella kuidussa etenee. Karkeasti kuidut jaotellaan monimuotokuituihin ja yksimuotokuituihin. Lisäksi molempia kuituja on useita eri tyyppisiä. Havainnollisinta valon etenemisen kannalta on esitellä lyhyesti kolme eri kuitutyyppiä:

- Askeltaitekertoiminen monimuotokuitu eli askelkuitu
(Step index multimode fibre)
- Asteittaistaitekertoiminen monimuotokuitu eli asteittaiskuitu
(Graded index multimode fibre)
- Yksimuotokuitu (Single mode fibre)

Vaikka askelkuitua ei enää tänä päivänä juurikaan käytetä, on sen esittäminen havainnollistamisen kannalta tärkeää.[1] Yllä mainittujen kuitujen periaatteet on esitetty kuvassa 3.3.



KUVA 3.3 Yleisimpien kuitujen toiminnan pääperiaatteet. askelkuidun (a), asteittaiskuidun (b), yksimuotokuidun (c).[1]

Askelkuidussa valo taivutuu ytimen ja kuoren rajapinnassa johtuen näiden erilaisista taitekertoimista. Kuidun ytimen halkaisija on paljon suurempi kuin käytetty aallonpituus. Kuidussa etenee säteen useita eri muotoja, lisäksi pulssi levenee kuidussa edetessään, johtuen muotodispersiosta. Tämä johtuu siitä, että pulssin eri etenemiskomponentit etenevät eripituisen matkan. Kuidussa esiintyy myös vaimennusta osan valotehosta hävitessä matkalle. Tämä havaitaan signaalitason laskuna. [1]

Asteittaiskuidussa taitekerroin muuttuu asteittain ytimen keskustasta kuorta kohti. Tällöin valonsäteet taivutuvat vähitellen ytimessä edetessään, eivätkä jyrkästi kuoren ja ytimen rajapinnasta. Myös asteittaiskuidussa pulssilla on useita eri muotoja. Muotodispersio ei ole kuitenkaan yhtä voimakas kuin askelkuidussa koska pitemmän

matkan kulkevat nopeus on suurempi. Pulssin levenemä on siis pienempi kuin askelkuidussa. Myös vaimennusta esiintyy vähemmän kuin askelkuidussa.[1]

Yksimuotokuidun taitekerroinero ja ytimen halkaisija on niin pieni, että kuidussa etenee käytetyllä aallonpituudella vain lähetettävän pulssin yksi muoto. Muotodispersiota ei siis esiinny lainkaan. Yksimuotokuidussakin kuitenkin esiintyy toisenlaista, kromaattista dispersiota. Vaimennus on myös huomattavasti pienempi kuin monimuotokuiduissa. Mikäli valon etenemistä kuvattaisiin sähkömagneettisen säteilyn etenemisenä, havaitaan optisen tehon kulkevan osittain kuoren puolella. Johtuen pienestä ytimestä on tällä yksimuotokuidun kohdalla merkitystä.[1]

Nimitystä muotokentän halkaisija käytetään kuvaamaan yksimuotokuidun aluetta, jolla valo tehollisesti etenee. Tärkeimmät käytössä olevat kuitutyypit ovat monimuotokuiduista 50/125 μm (GI), 62,5/125 μm (GK) sekä 100/140 μm (GN). Näistä kuiduista GK on yleisin. Vastaavasti tärkeimpiä yksimuotokuituja ovat standardi yksimuotokuitu 9/125 μm (SM), dispersiosiiirretty yksimuotokuitu 8/125 μm (DS) sekä alhaisen dispersion kuitu.[1]

3.3 Kuitumateriaalit

Tele- ja tietoverkkojen kuidut valmistetaan kvartsilasista . Vähemmän vaativissa olosuhteissa voidaan käyttää myös kuituja, joiden ydin on lasia ja kuori muovia tai jotka ovat kokonaan muovia. Taitekerroinero kuidussa saadaan sopivaksi sekoittamalla kvartsilasiin sopivaa lisäainetta kuten germaniumoksidia (GeO_2). Tyypillinen taitekerroinarvo ytimelle on 1,46 ja taitekerroinero 1-2 %. Yksimuotokuidussa ero voi olla jopa vähemmän. Valmistuksen yhteydessä kuitu suojataan ensiöpäällysteellä joka on tyypillisesti akrylaattia. Tämä suojaa kuitua sen jatkokäsittelyssä naarmuuntumiselta ja epäpuhtauksilta.[1]

Yleensä ensiöpäällyste on halkaisijaltaan 250 μm luokkaa. Tunnusväri on päällysten pinnassa. Kaapeleihin tulevat kuidut suojataan lisäksi toisiopäällysteellä tai muulla suojaavalla kaapelirakenteella. Kuidun murtolujuus on tyypillisesti luokkaa 4-5 GPa. Tämä vastaa yli 50 N voimaa sekä noin 5 % venymää kuidulla, jonka kuoren halkaisija on 125 μm . Palautumaton venymäalue ei kuitenkaan ole kuidulla suuri, joten rasitettaessa se katkeaa äkillisesti.[1]

Kuidussa olevat heikot kohdat kuten mikrohalkeamat ja naarmut vaikuttavat myös kuidun katkeamisherkkyyteen merkittävästi. Ensiöpäällysten tehtävänä on suojata kuitua juuri näiltä väsymistä edistäviltä seikoilta. Kun kuituun vaikuttaa pitkäaikainen vetojännitys, kuitu altistuu kosteudelle sekä siinä on mikrohalkeama, tällöin kuidun väsyminen tulee esille.[1]

Valmistuksen yhteydessä kuidulle tehtävässä rasiustestissä ns. proof-testissä, mahdolliset heikot kohdat karsitaan pois. Testissä rasiutetaan kuitua tietyllä voimalla ja tätä vastaavalla venymällä. Voima on huomattavasti pienempi kuin kuidun murtolujuus ja jos kuidussa on heikko kohta se katkeaa. Kun kuitu on läpäissyt testin, sen elinikä voidaan laskea testissä käytetyn venymän ja kuidun käyttöaikaisen venymän perusteella. Käyttöaikaisen venymän tulisi yleensä olla enintään 1/3 testin venymästä. Nykyään käytetään rasiustestissä yleisemmin 0,69 GPa jännitystä, mikä vastaa 1 % venymää 125 μm kuidulla.[1]

Jotta kuitu ei vioittuisi on tärkeää noudattaa annettuja minimitaivutussäteitä. Myös kuidun vaimennus kasvaa taivutettaessa. Kun taipuma on yli 1 mm puhutaan makrotaipumista, jos alle, on kyseessä mikrotaipuma. Mikrotaipumia voi syntyä esimerkiksi silloin, kun kuitua painetaan karheaa pintaa vasten.[1]

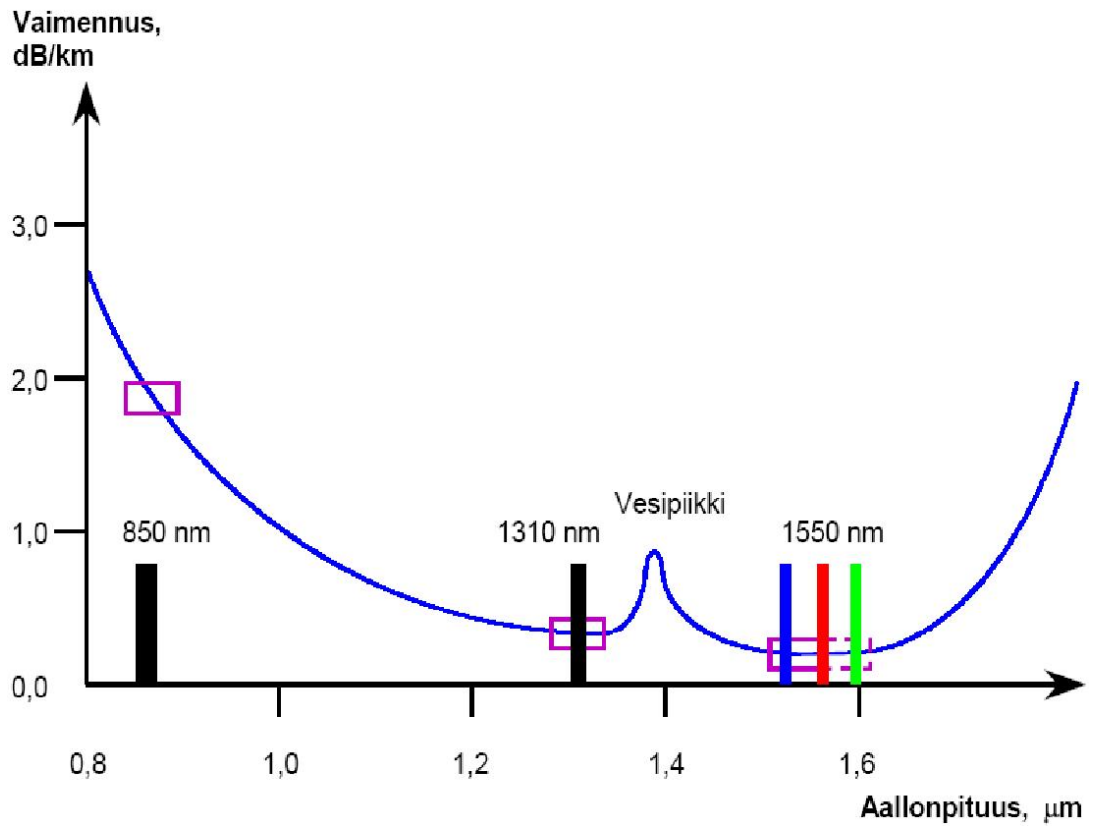
3.4 Kuitujen optiset ominaisuudet

Tärkeimpiä optisia ominaisuuksia ovat monimuotokuiduista puhuttaessa vaimennus, kaistanleveys ja numeerinen aukko. Yksimuotokuitujen tärkeimmät ominaisuudet ovat vaimennus, dispersio sekä raja-aallonpituus. Seuraavassa käsitellään joitakin optisia ominaisuuksia hieman syvemmin.[1]

3.4.1 Vaimennus

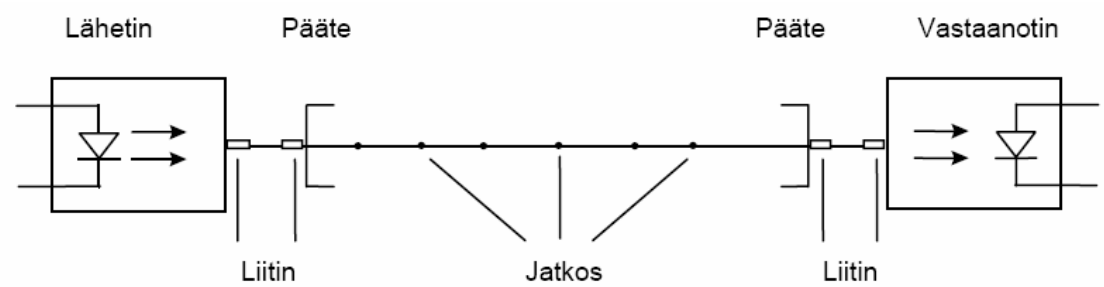
Vaimennus aiheuttaa valotehon alenemista kuidussa. Vaimennus ilmaistaan käyttäen yksikköä dB/km. Pääosin vaimennus aiheutuu absorptiosta ja sironnasta. Absorptio nimitystä käytetään ilmiöstä, jossa tapahtuu kuidussa olevien epäpuhtauksien, infrapuna-alueen sekä ultraviolettialueen aiheuttamaa valotehon imeytymistä kuidun materiaaliin. [1]

OH-ionit ovat tärkeimpiä vaimennusta aiheuttavia epäpuhtauksia. Sironnalla tarkoitetaan kuidussa olevien pienten taitekerroinerojen aiheuttamaa valon siroutumista joka suuntaan. Taitekerroinerot johtuvat kuidun valmistuksen ja lasiaineen jäähtymisen yhteydessä syntyneistä aallonpituutta pienemmällä alueella olevista tiheysvaihteluista. Kuituaineen rakeisuudella sekä homogeenisuutta kasvattamalla päästään parempaan sirontavaimennukseen. Kuvassa 3.4 on esitettyä kvartsilasista valmistetun kuidun vaimennuksen riippuvuus käytetystä aallonpituudesta.[1]



KUVA 3.4 Periaatekuva kuidun vaimennuksen suhteesta aallonpituuteen[1]

1310 nm ja 1550 nm alueiden välissä oleva vaimennuspiikki on OH⁻-ionista johtuva ns. vesipiikki. Lisäksi kuidun vaimennusta lisäävät mikro- ja makrotaipumat, vety sekä radioaktiivinen säteily. Nämä lisävaimennusta aiheuttavat tekijät pyritään eliminoimaan kaapelirakenteilla sekä asennusmenetelmillä. Tiedonsiirrossa on käytössä kolme eri aluetta eli ikkunaa 850 nm, 1310 nm sekä 1550 (C) nm alueet. Optisten vahvistimien toiminta-alueita pystytään jo saatavilla olevilla laitteilla laajentamaan ja tämä onkin tuonut kaksi uutta aluetta S-kaistan 1460 –1530 nm (sininen) ja L-kaistan 1565 – 1625 nm (vihreä). Lisäksi ITU-standardi sisältää joitakin lisäkaistoja, jotka mahdollistavat aallonpituusalueen kasvattamisen moninkertaiseksi.[1,11] Alla olevassa kuvassa 3.5 on esitetty esimerkkitalanne kuidulla toteutetusta siirtoyhteydestä:



Kuva 3.5 Esimerkkiyhteys sisältäen lähettimen ja vastaanottimen sekä kuituyhteyden.[1]

Ryhdyttäessä laskemaan yhteydelle kokonaisvaimennusta on otettava huomioon seuraavat asiat:

Yhteyden pituus l , km

Kuidun vaimennus α , dB/km

Kuitujatkosten lukumäärä s , kpl

Kuitujatkosten keskimääräinen jatkosvaimennus α_s , dB

Liittimien lukumäärä c , kpl

Liittimien keskimääräinen liitosvaimennus α_c , dB

Korjausjatkosvara δ_r , dB

Varmuusvara δ_s , dB

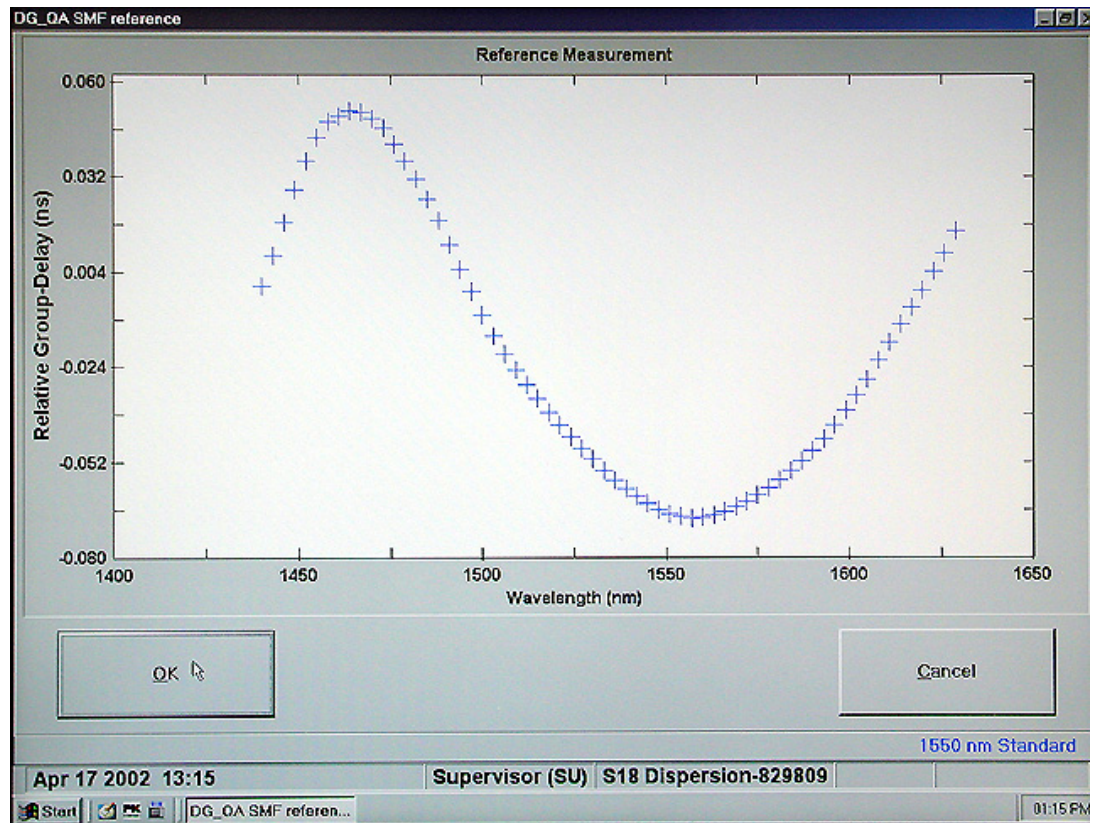
Näiden tietojen perusteella voidaan laskea kokonaisvaimennus A :

$$A = l * \alpha + s * \alpha_s + c * \alpha_c + \delta_r + \delta_s$$

Mikäli yhteydessä on haaroituksia, on niiden aiheuttama vaimennus otettava huomioon vaimennuksen laskennassa. Esimerkiksi jako kahteen aiheuttaa 3,5 dB vaimennuksen ja neljään jako 7 dB vaimennuksen. Kuituja jatkettaessa tulisi käyttää aina saman tyyppisiä kuituja. Muulloin syntyy siirtosuunnassa lisävaimennusta, joka määräytyy ytimien halkaisijasuhteiden ja numeeristen aukkojen suhteen perusteella.[1]

3.4.2 Yksimuotokuidun dispersiot

Yksimuotokuituja tutkittaessa merkittävin dispersiolaji on kromaattinen dispersio. Kromaattinen dispersio jakautuu puolestaan materiaalidispersioon ja aaltojohdedispersioon. Ilmiö johtuu siitä että valosignaalin sisältämät hiukan toisistaan poikkeavat aallonpituudet etenevät kuidussa eri nopeuksilla. Kromaattinen dispersio vaikuttaa sitä vähemmän mitä kapeampi lähetettävän valon spektri on. Kromaattinen dispersio on materiaaliominaisuus, eikä siihen voida vaikuttaa asennusmenetelmillä. Yksimuotokuiduissa esiintyy kromaattisen dispersion lisäksi polarisaatiomuotodispersiota PMD (Polarisation Mode Dispersion). Yksimuotokuidussa valosignaali etenee kahdessa eri polarisaatiomuodossa. Eri polarisaatioisilla säteillä on hiukan erilaiset etenemisnopeudet. Polarisaatiodispersion suuruus riippuu kuidun geometriasta sekä kuidun jännitystiloista. Mikäli kuitu olisi ideaalisen pyöreä ja jännityksetön olisi eri polarisaatioisilla säteillä sama nopeus. PMD-katto tulee vastaan 40 Gbit/s nopeudella. Pienemmillä taajuuksilla vaikutus alkaa näkyä, kun siirtomatkat ovat pitkiä, useita satoja kilometrejä. Dispersioiden merkitys korostuu siirtomatkan pidetessä sekä lähetystaajuuden kasvaessa. Tällöin valopulssit uhkaavat leventyä viereisen pulssin kanssa päällekkäisiksi. Kuvassa 3.6 on esitettyä kromaattinen dispersio ja polarisaation muotodispersio mittausta. Tämä mittausta suoritetaan valmistuksen yhteydessä kaikille kuiduille.[1,11]



K

Kuva 3.6 Kuidun kromaattinen dispersio ja polarisaation muodispersio mittaus.[13]

3.4.3 Epälineaariset ilmiöt

Optisten vahvistimien myötä tehotasojen noustua on esiin tulleet epälineaariset ilmiöt. Ne häiritsevät signaalia pitkällä sekä nopeilla 10 Gbit/s luokkaa olevilla järjestelmillä ja tiheässä aallonpituuskanavoinnissa DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Erilaisin teknisin järjestelyin voidaan ilmiöiden vaikutusta kuitenkin minimoida. Näitä ovat muun muassa lähettimen moduloinnin muokkaus tai monikanavaisissa järjestelmissä kanava välinkasvattaminen. Epälineaarista ilmiöistä merkittävimpiä ovat Brillouin-sironta, Raman-sironta, Itseisvaihemodulaatio SPM (Self Phase Modulation) ja neljän aallon sekoitus FWM (Four Wave Mixing).[1,11]

3.4.4 Raja-aallonpituus

Raja-aallonpituus on yksimuotokuidun ominaisuus, mikä määrittelee pienimmän valon aallonpituuden, jolla valo kyseisessä kuidussa etenee yksimuotoisesti. Kun lähetettävän valon aallonpituus alittaa tämän rajan, jakautuu se useisiin eteneviin muotoihin. Tällöin yksimuotokuidusta voidaan ajatella tulevan monimuotokuitu. Yksimuotokuidun käytössä on tärkeää, että raja-aallonpituutta ei aliteta. Kuidun pituus vaikuttaa myös päästä päähän näkyvään raja-aallonpituuteen. Häntäkuitu ja kytkentäkaapeli ovat vain muutaman metrin pituisia. Häntäkuidussa ja kytkentäkaapelissa on käytettävä hieman pienempää raja-aallonpituutta, kuin varsinaisessa kaapelissa.[1]

3.4.5 Kaistanleveys

Muotodispersio sekä kromaattinen dispersio aiheuttavat monimuotokuidulle rajallisen kaistanleveyden. Monimuotokuidun kaistanleveydellä ilmaistaan siirrettävän signaalin suurinta mahdollista taajuutta suhteutettuna matkaan. Kaistanleveyteen vaikuttaa käytettävä aallonpituus ja sen yksikkö on MHz*km. Kun kuidun matka puolittuu, kaksinkertaistuu maksimitaajuus, jota yhteydessä voidaan käyttää. Vastaavasti matkan pidetessä kaksinkertaiseksi puolittuu käytettävä maksimitaajuus puoleen. Ilmiö johtuu siitä, että kuituun lähetetyt pulssit levenevät ja vaimenevat matkalla. Mitä pidempi matka on sitä enemmän pulssit levenevät ja kun pulssit levenevät liikaa, niitä ei enää kyetä erottamaan toisistaan. Lisäksi kun lähetystaajuutta kasvatetaan, ovat pulssit lähempänä toisiaan, mikä rajoittaa yhä enemmän pulssien sallittua levenemää. Kaistanleveys onkin suurin sekä siirtonopeutta että matkaa rajoittava tekijä.[1]

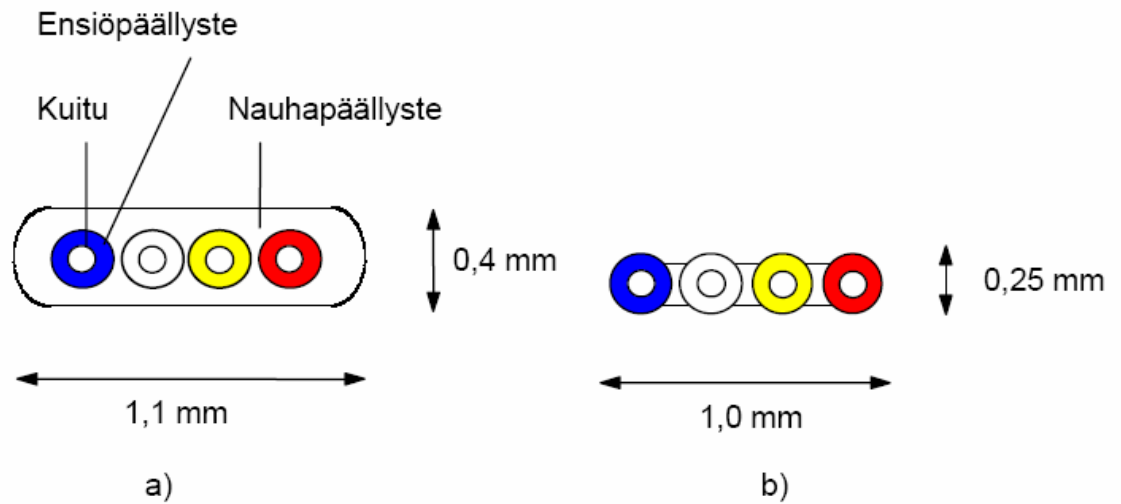
3.4.6 Numeerinen aukko

Etenkin monimuotokuiduille ilmoitetaan yleensä myös numeerinen aukko. Numeerinen aukko on määritelty edellä kohdassa 3.1. Numeerinen aukko vaikuttaa valon kuituun kytkeytymiseen, sekä ytimeltään erikokoisten kuitujen yhteen liittämiseen.[1]

4. KAAPELIRAKENTEET

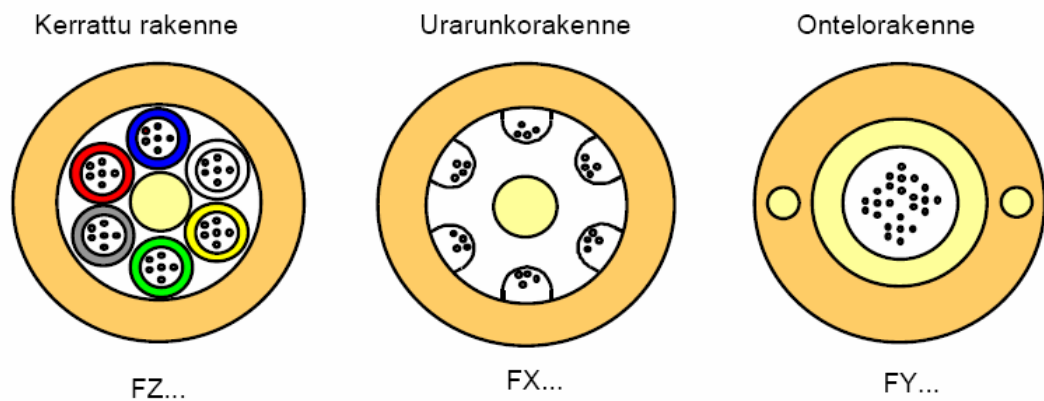
Jotta kuitua voitaisiin käyttää tehokkaasti tiedon siirtoon pitkillä ja monesti olosuhteiltaan vaativillakin reiteillä, tarvitsee kuitu suojakseen kestävän kaapelirakenteen. Suuri merkitys kaapelirakenteella on asennettaessa kuituja ulkotiloihin ja vesistöihin. Kaapeli-rakenne suojaa kuitua myös kuljetuksen ja varastoinnin aikana. Yksi kaapeli käsittää useimmiten lukuisia kuitupareja, jotka on useimmiten aseteltu sen ytimen urarakenteeseen. Kaapelin oletetaan yleisesti kestävän jopa 30 vuotta. Kaapelirakenteelle asetetaan useita vaatimuksia: sen tulee olla materiaaliltaan sopiva, helposti asennettava ja edullinen valmistaa. Rakenteensa perusteella valokaapeli voidaan jakaa seuraaviin osiin: kuidut ja niiden suojaus, kaapelin sydänrakenne, täyteaine, veto- ja lujite-elementit, vaippa.[1]

Kuidun suojana on ensiöpäällyste. Ensiöpäällysteen lisäsuojana käytetään toisiöpäällystettä tai muuta toisiosuojausta. Toisiöpäällyste voi olla tiukka tai väljä. Ontelarakenteessa kaapelisydämen muodostava putki on samalla väljä toisiöpäällyste. Kuitunauhassa ensiöpäällystetyt kuidut ovat vierekkäin. Nauha voi olla ympäriliimattu, teippituettu tai reunaliimattu. Kuitunauha sisältää 2 – 24 kuitua. Kuvassa 4.1 on esitetty kaksi esimerkkiä kuitunauhoista.[1]



Kuva 4.1 Ympäriliimattu(a) ja reunaliimattu(b) kuitunauha [1]

Kaapelin sydänrakenteita on kolmenlaisia: kerrattu rakenne, urarunkorakenne sekä ontelorakenne. Nämä rakenteet on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2 Kaapelin sydänrakenteita[1]

Kerratussa rakenteessa toisiopäällystetyt kuidut tai kuituryhmät on kerrattu samankeskeisesti keskielementin ympärille. Kerrattu rakenne voi olla joko tiukka tai väljä. Keskielementti toimii kerratussa rakenteessa vetoelementtinä. Tämä on kaapelityypeistä vanhin. Urarunkorakenteessa sydän muodostetaan muovirakenteesta, jossa on pituussuuntaisia uria.

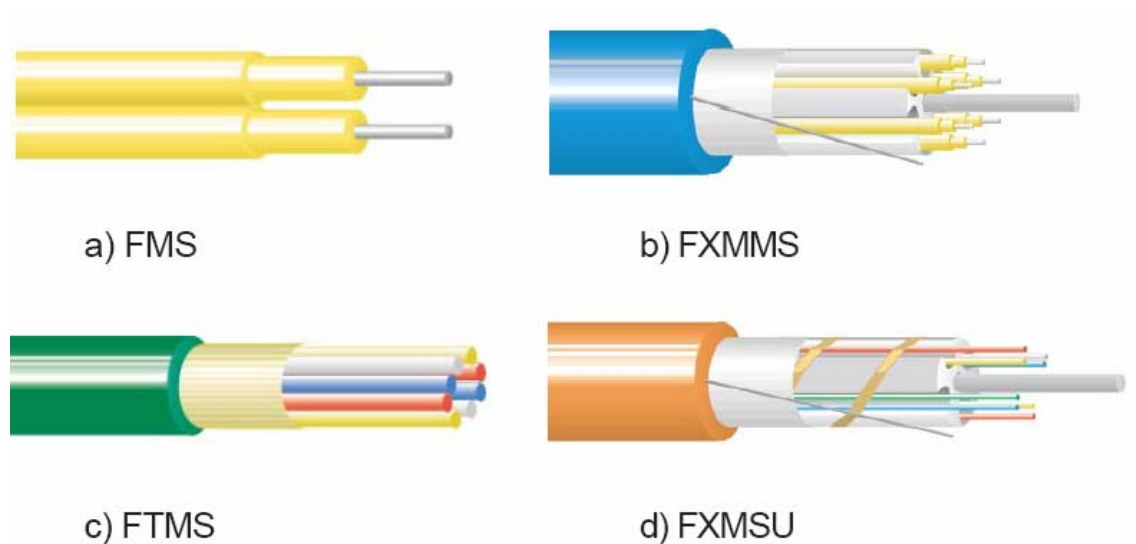
Urat kiertävät rungon ympäri joko vaihtosuuntaisesti tai helikaalisesti. Kuidut asetellaan uriin väljästi. Etuna tällä rakenteella ovat sen hyvä puristuslujuus ja selkeä rakenne asennuksen kannalta. Ontelorakenne muodostuu yhdestä putkesta, jonka sisällä väljästi asetetut ensiöpäällystetyt kuidut sijaitsevat. Tunnistuksen helpottamiseksi kuidut on ryhmitelty sopivasti. Puristuslujuus on hyvä ontelorakenteella. Vetolujuus saadaan riittäväksi vaipan ja sydämen välissä olevalla lujitekerroksella tai vaipassa olevilla vetoelementeillä.[1]

Kuitunauhakaapeli voidaan toteuttaa kaikilla yllä olevilla rakenteilla. Urarunko on yleisin käytetty rakenne, koska se mahdollistaa kuitunauhojen suuremman pakkaustiheyden. Kaikille kaapelityypeille valmistaja ilmoittaa standardien mukaiset testatut mekaanisten ominaisuuksien raja-arvot. Näitä arvoja tulee noudattaa kaikissa asennuksen ja käytön vaiheissa. Lämpötila-alueet kaapelille on ilmoitettu sekä asennukselle että käytölle.[1]

Kaapeli voidaan jakaa myös ulko- ja sisäkaapeleihin. Sisäkaapeleita ovat rakennusten nousu- ja runkokaapelit sekä asennuskaapelit. Sisäkaapelit eivät sisällä rasvoja tai metalleja. Sydänrakenteeltaan ne voivat olla mitä vain kolmesta edellä mainitusta perusrakenteesta. Kuvassa 4.3 on esitetty erilaisia sisäkaapeleita. Sisätiloihin asennettavien kaapeleiden vaipat ovat itsestään sammuvia ja vähän savua muodostavia. Palo-ominaisuuksien kannalta on Suomessa perinteisesti ollut sisäkaapeleiden vaatimuksena yksittäisenä itsestäänsammutus (IEC 60332-1). Tarkempi vaatimus olisi nippuna itsestäänsammutus (IEC 60332-3). Tämä vastaakin käytännön tilannetta paremmin, kun kaapelit on asennettu vieriviereen kaapelihyllyssä tai tikkailla. Tiukimman vaatimuksen asettaa standardi (IEC 60331). Tämä tarkoittaa että kaapelin tulee toimia jonkin aikaa tullessa. [1]

Kaapelin paloturvallisuusominaisuuksien ilmoittamiselle ei ole yhtä standardisoitua menettelytapaa. Seuraavassa on esitetty yleisesti käytettyjä merkintöjä selityksineen.[1]

LS0H	Low Smoke, Zero Halogen
LSZH	Low Smoke, Zero Halogen
HFFR	Halogen Free, Fire Retardant
FRZH	Fire Retardant, Zero Halogen
LSFRZH	Low Smoke, Fire Retardant, Zero Halogen



Kuva 4.3 Asennuskaapeli(a), asennuskaapeli(b), kerroskaapeli(c) sekä nousu- ja aluekaapeli(d).[1]

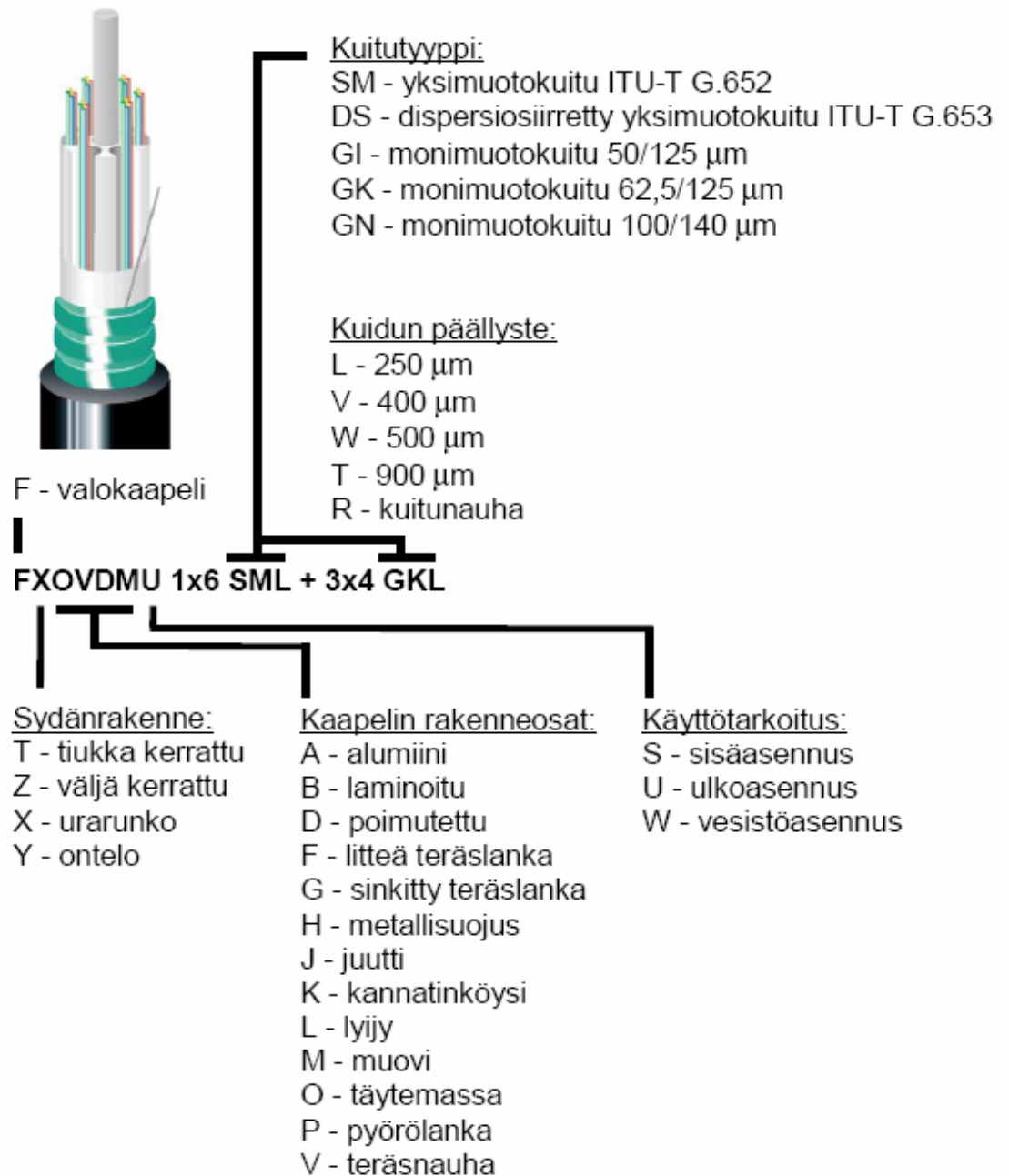
Ulkokaapeli voidaan jakaa kolmeen lajiin: kanava- ja maakaapelit, ilmakaapelit sekä vesistökaapelit. Kanavaan asennettava kaapeli on asennuksen jälkeen hyvin suojattu. Kaapelin tulee kuitenkin kestää asennuksen aikainen rasitus ja kanavassa vallitsevat olosuhteet. Kanavakaapeleissa on yleensä muovivaippa, johon on laminoitu pituussuuntainen ja limitetty alumiini- tai teräsnauha.[1]

Viimeaikoina ovat yleistyneet kaapelit joissa metallinauhaa ei ole ollenkaan. Tällöin kaapelin vetolujuuden on kuitenkin oltava riittävä. On huomattava että kevyempi kaapeli vaatii myös pienemmän voiman vedettäessä.

Ilmaan asennettavalle kaapelille on tyypillistä käyttöolosuhteiden laaja vaihtelu. Suomessa ilmakaapelit ovat tyypillisesti niin sanottuja 8-rakenteita, joissa kannatinvaijeri on osa vaippaa ja kiinni siinä kapean kannaksen avulla.

Vesistökaapelit ovat pyörölanka-armeerattuja. Vesistökaapeleiden tulee kestää niihin kohdistuvaa painetta, vetorasitusta sekä hankausta, joka aiheutuu liikkeestä pohjaa vasten. Kaapelin tulee myös asettua hyvin pohjan mukaisesti. Matalan veden kaapeleille riittää esimerkiksi vain kahdella armeerauskerroksella varustettu kaapeli. Syvän veden kaapelit sen sijaan edellyttävät paljon raskaamman armeeraus- ja vaipparakenteen. Kuitujen hermeettisenä suojana käytetään hermeettisesti päällystettyjä kuituja tai kupari- ja lyijyputkia.[1]

Tyypimerkintä muodostetaan Suomessa käytössä olevan järjestelmän mukaan. Samoin on sovittu järjestelmä kuituryhmien ja kuitujen tunnistamiseksi kaapelissa. Nämä tunnistusmerkinnät on määritelty standardissa SFS 5648. Tyypimerkinnässä voidaan lisäksi ilmoittaa tarvittaessa kuidun siirto-ominaisuuksista vaimennus ja monimuotokuidun kaistanleveys. Tämä kuitenkin tekee merkinnästä melko pitkän. Kuvassa 4.4 on esitetty kaapelin tyypimerkinnän muodostus.[1]

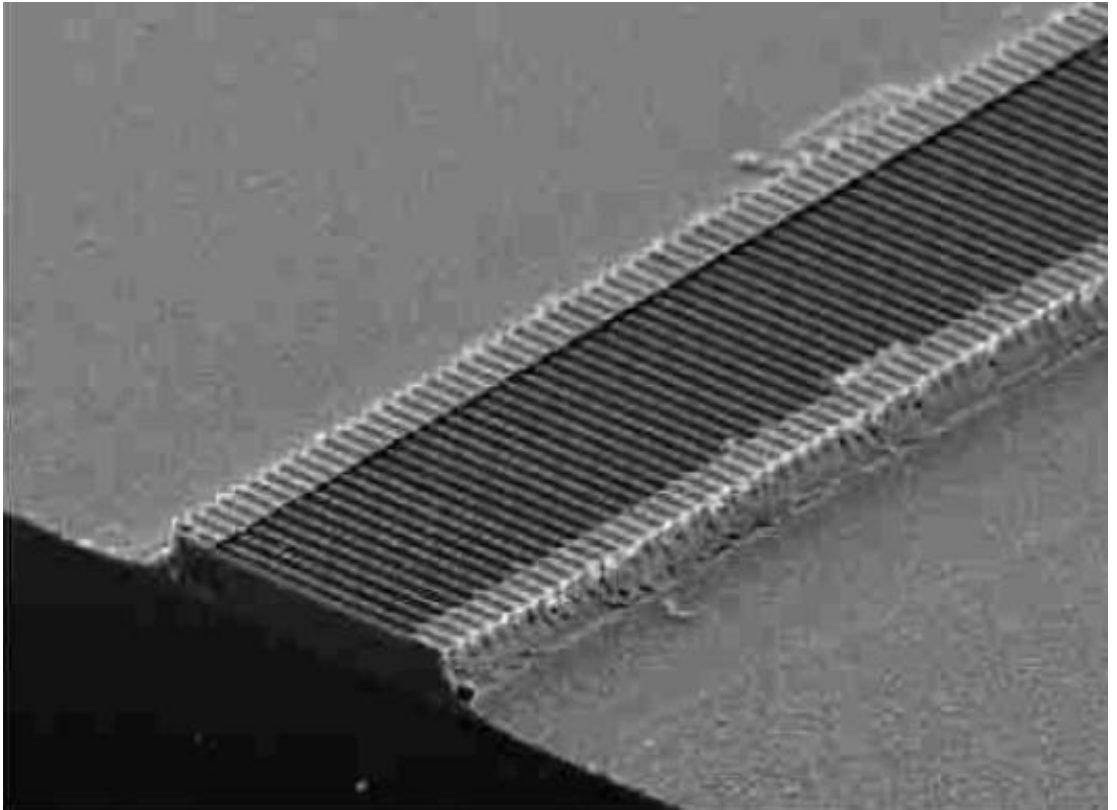


Kuva 4.4 Kaapelin tyyppimerkinnän muodostuminen [1]

5. OPTISET LÄHETTIMET

Optisen lähttimen tehtävänä on nimensä mukaan muuntaa sähköinen signaalin valon muotoon ja lähettää se siirtotielle. Optisessa tiedonsiirrossa käytetään kahden tyyppisiä puolijohteisiin perustuvia lähttimii. Kuituun voidaan heijastaa valoa joko LED- tai laserkomponentteja käyttäen. Laserin etuna on, että sillä voidaan saavuttaa suurempi lähtöteho, kapeampi spektri sekä saavuttaa pienempi nousuaika. LED-lähttimiiä käytetään lähinnä monimuotosovelluksissa, johtuen niiden rajatumasta käyttö-etäisyydestä ja hitaammasta siirtonopeudesta. Pitkillä yhteyksillä käytetäänkin laser-lähetintä, johtuen sen kapeammasta spektristä sekä suuremmasta lähtötehosta.[1]

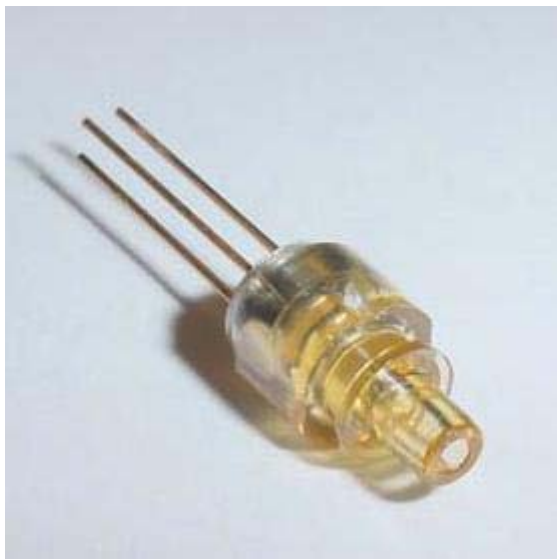
Tietoliikennelasereissa käytetään yleisesti DFB-rakennetta eli hajautettua takaisin kytkentää. DFB-laseri on rakenteeltaan sellainen, että se vahvistaa vain yhtä aallonpituutta ja muut moodit häviävät. Tällöin emittoituva valo on lähes monokromaattista. DFB-laserin spektrin leveys on 0,1 nm luokkaa. Fabry-Perot-laser emittoi useampia aallonpituuksia, tällöin sen optisen spektrin leveys on muutamia nanometrejä. Fabry-Perot-laserissa vahvistuvat aallonpituuden kaikki monikerrat, kun taas DFB-laserissa vahvistuu voimakkaimmin aallonpituus, jonka puolikas vastaa heijastinten välistä etäisyyttä. Kuiduista tai liittimistä aiheutuvat heijastukset takaisin DFB-laserille aiheuttavat tehon ja aallonpituuden vaihtelua. DFB-lasermoduleissa onkin tästä syystä usein sisään rakennettu optinen isolaattori, joka estää optisen takaisinkytkennän. Kuvassa 4.1 on esitetty kuinka DFB-laserissa voidaan optinen takaisinkytkentä toteuttaa yhden pinnan sijaan myös hilalla, jonka voidaan ajatella rakentuvan useammasta heijastavasta pinnasta, kun taas Fabry-Perot-ontelossa valo heijastuu onteloiden päistä ja liikkuu edestakaisin ontelossa. Tällä hetkellä DFB-lasermoduuli on yleisin käytetyistä laser - lähttimistä./10/ Nykypäivän DFB-lähttimet ovat varustettu monikvanttikaivoilla. Monikvanttikaivojen toiminnasta on kerrottu enemmän sivulla 17.[10]



KUVA 5.1 DFB-laserdiodi mikroskoopilla kuvattuna. Kuvassa voidaan selvästi erottaa tasaisin välein olevat heijastavat pinnat eli hilan.[10]

LED-lähttimen tehotaso on yleensä -20...-5 dBm ja laser-lähttimien tehotaso -10...+10 dBm luokkaa. Kuidun numeeristen aukkojen ja pinta-alojen suhde vaikuttaa suuresti LED-lähttimellä kuituun saatavaan tehoon. Tämän vuoksi on tärkeää tietää kuitutyypin kytkeytyvä teho. Myös laser-lähttimen osalta on tärkeää tietää, mille kuitutyypille sen lähtöteho on ilmoitettu. Laser-lähtin on tyypillisesti varustettu kuidunpätkällä, johon käytettävä kuitu hitsataan. Perinteisissä Ethernet 10 Mbit/s sekä Fast Ethernet 100 Mbit/s -sovelluksissa käytetään yleensä LED-lähttimiä johtuen niiden huomattavasti alhaisemmasta hinnasta. Gigabit Ethernet -sovelluksissa joudutaan käyttämään laser-lähttimiä. Sillä LED-lähttimien spektrit ovat liian leveitä, eivätkä niiden modulointinopeudet ole riittäviä. Myös niiden nousu- ja laskuajat ovat aivan liian pitkiä. [1,10]

Lasereiden korkeasta hinnasta johtuen käyttöön tarvitaan edullisempi lasertekniikka, VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser) tarjoaa tähän mahdollisuuden. Tämä mahdollistaa laser-lähttimen saatavuuden samalla hintaluokalla kuin LED-lähttimen. Aktiivinen alue VCSEL on kohtisuorassa kiekkoon nähden, tämä helpottaa niiden valmistusprosessia ja alentaa niiden valmistuskustannuksia. Tämä vaikeuttaa esimerkiksi puolijohdekiekkolla laserille tehtävää testausta. Poiketen tavallisiin lasereihin VCSEL:n valonsäteen muoto on pyöreä, tämä parantaa tehon johtamista kuituun. VCSEL voidaan usein myös virittää eli sen aallonpituutta voidaan säätää mm. muuttamalla sen kaviteetin pituutta.[1,10] Kuvassa 4.2 on nähtävissä Finisarin kauppaama 5 Gbit/s siirtonopeuksille asti suunniteltu VCSEL.



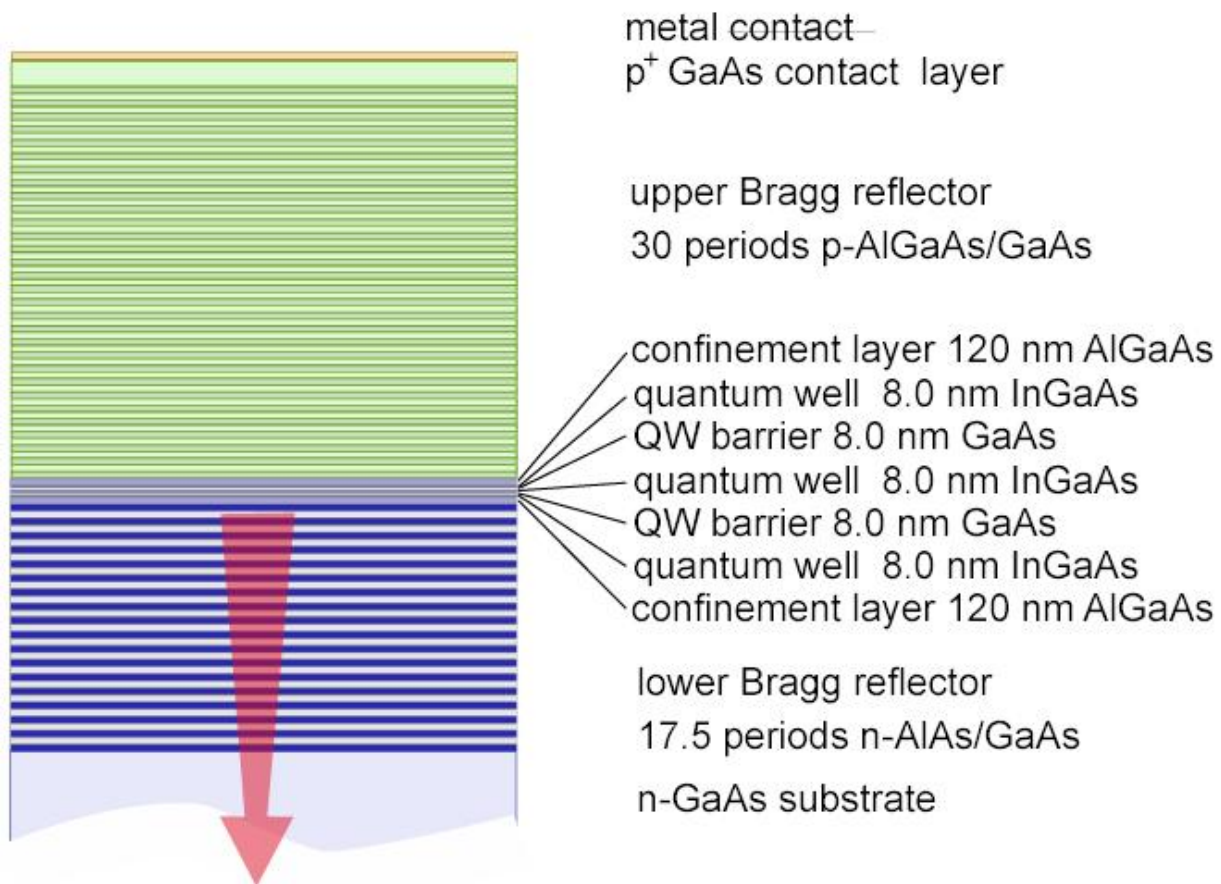
Kuva 5.2 Finisarin VCSEL, joka toimii 850 nm aallonpituus alueella. [15]

Aikaisemmin laserdiodeissa aktiivinen alue sijoitettiin puolijohdepinnan suuntaisesti. VCSEL:n ongelmina ovat erityisesti vahvistus ja toiminta suurilla tehoilla. Koska kaviteetti pituudet ovat hyvin lyhyitä tyypillisesti 1-3 emittoitun laservalon pituudesta, yhdellä läpäisyllä fotonilla on pienet mahdollisuudet saada aikaan stimuloitu emissio. Tästä syystä tarvitaan huomattavasti voimakkaampi takaisineijastus, 99,9 % luokkaa, kun taas perinteisillä lasereilla

heijastus on 30 % luokkaa. Tällaisia heijastuksia ei voida saavuttaa käyttämällä metallisia heijastimia. VCSEL:ssä onkin käytössä DBR(Distributed Bragg Reflector). Nämä muodostetaan asettelemalla materiaaleja, joilla on erilaiset heijastuskertoimet päällekkäisiin kerroksiin. Lämpötila saattaa myös nousta ongelmaksi, jos laite on huonosti suunniteltu, koska DBR-kerrokset toimivat myös energiaa pumppaavina johtimina, jolloin esiintyy lämpenemistä, johtuen käytettyjen aineiden resistanssista.[14]

VCSEL on kehittynyt paljon alku ajoista. Useimmat tämän päivän VCSEL-laitteista sisältävät myös kvanttikaivoja. Kuvassa 4.3 on esitetty tällaisen laitteen periaatteellinen toiminta. VCSEL-laitteet, joissa käytetään aallonpituuksia 650 – 1300 nm perustuvat yleensä gallium arsenidiin(GaAs). Kuvasta nähdään laitteen erikerrokset. Quantum well-kerrokset muodostavat kvanttikaivot, nämä on toteutettu Indium Gallium Arsenidista(InGaAs). GaAsista ja Alumiini Gallium Arseniidista($Al_xGa_{(1-x)}As$) muodostetaan kerrokset resonaattoriin.[14]

Tämä on suosittu tapa valmistaa VCSEL, koska hilan materiaali ei vaihdu äkisti kun yhdistettä muutetaan. Se mahdollistaa lukuisten hilan kanssa täsmäävien epitaalisten kerroksien asettamisen GaAs-pinnalle. AlGaAs:n taitekerroin ei kuitenkaan muutu kovinkaan voimakkaasti kun Al-osuutta kasvatetaan, tällöin voidaan minimoida vaadittujen kerrosten määrä verrattuna vaihtoehtoisiin materiaaleihin.



Kuva 5.3 Realistinen rakennekuva Monikvanttikaivo VCSEL:sta.[14]

Toinen uusi laser-tyyppi on monikvanttikaivolaseri MQWL(Multi Quantum Well Laser). MQWL-tekniikkaa on käytetty myös kuvan 5.2. VCSEL-laitteessa tätä tekniikkaa hyödynnetään myös DFB-lasereiden yhteydessä. Kvanttikaivo on puolijohdekerroksista valmistettu energialoukku, johon varauksenkuljettajat – negatiiviset elektronit ja positiiviset aukot – kerääntyvät. Näitä sähkövarauksia ei kuitenkaan oteta kvanttikaivosta yksittäin, vaan kaivo purkautuu kerralla tyhjäksi kun on tyhjäntyäkseen. Näin syntyy oikeantaajuista ja kasvaneen energiatason ansiosta kirkasta valoa. MQWL-sovelluksilla päästään hyvinkin suuriin tehokkuuksiin, mutta tietoliikenteessä tuskin tullaan koskaan tarvitsemaan niin suuria tehoja kuin tällä tekniikalla kyettäisiin saavuttamaan.[5]

Uutta kehitystyötä tehdään jatkuvasti. Southamptonin yliopiston maineikkaat Optoelectronics Research Centrerin (ORC) ja Penn State -yliopiston tutkijat ovat yhteisvoimin kehittäneet tavan valmistaa puolijohdepiirejä, kuten transistoreja optisen kuidun sisälle. Näin optisia signaaleja olisi mahdollista manipuloida jo optisen kuidun sisällä. Uusi tekniikka mahdollistaisi tulevaisuudessa valosignaalien manipuloinnin eli generoida, ilmaista ja vahvistaa sekä säädellä aallonpituutta kuidun sisällä muuttamatta sitä välillä sähköiseksi signaaliksi. Näin sen käsittely olisi halvempaa, nopeampaa ja tehokkaampaa. Tämän uuden tekniikan on esitetty mahdollistavan myös entistä paremmat kuitujen haaroitusmenetelmät.[8]

Rakentamalla laser kuidun sisään kyetään tuottamaan aallonpituuksia, joita ei muutoin saataisi käyttöön. Tutkijat saivat muodostettua puolijohteen kuituun kaasukasvatusmenetelmän (CVD) avulla. Prosessissa germanium-yhdisteet höyrystyvät, ja ne pakotetaan kovalla paineella ja 500 °C lämpötilassa kuituhuokosten läpi. Kemiällisen reaktion ansiosta kuituhuokosiin muodostuu sisäänpäin kasvavia kiteitä eli eräänlaisia johtimia.[8]

6. OPTISET VASTAANOTTIMET

Optiset vastaanottimet perustuvat valodiodeihin, joiden sähköinen johtavuus on suoraan verrannollinen vastaanotettuun valotehoon. Ilmaisindiodia edeltää usein optinen esivahvistin. Valodiodeina käytetään estosuuntaan esijännitettyjä PIN(P – doped Intrinsic N-doped)-diodeja. Kuituoptiikan valodiodeissa erityispiirteenä on suuri valoherkkä alue. Vyörydiodeja eli APD(Avalance PhotoDiode)-diodeja on käytetty aikaisemmin nopeissa tiedonsiirtoyhteyksissä. PIN-diodien nopeudet, herkkyys ja valmistustekniikat ovat kehittyneet valtavasti.[1,11]

APD-diodit vaativat suuren ulkoisen jännitteen jolla aikaansaadaan nopea elektronivyöry valosignaalin kohdatessa valoherkän alueen. APD-diodien käyttö onkin vähentynyt, johtuen niiden huonoista kohinaominaisuuksista ja korkeasta hinnasta, huolimatta sen paremmasta herkkyydestä. Tärkeimmät ominaisuudet vastaanottimelle ovat herkkyys ja dynamiikka. Herkkyydellä tarkoitetaan pienintä tehotasoa, jolla

virheetön toiminta saavutetaan. APD-ilmaisimen herkkyys on luokkaa -65 - -45 dBm ja PIN-diodin -55 - -40 dBm luokkaa. Herkkyys riippuu siirtonopeudesta. Dynamiikalla puolestaan ilmoitetaan tehoalue, jolla saavutetaan riittävän virheetön vastaanottimen toiminta. Lyhyillä etäisyyksillä voidaan joutua käyttämään ylimääräisiä vaimentimia, mikäli vastaanottimen dynamiikka ei ole riittävä.[1,11] Kuvassa 5.1 on nähtävissä Finisarin PIN-valodiodi, joka toimii 850 nm aallonpituusalueella.

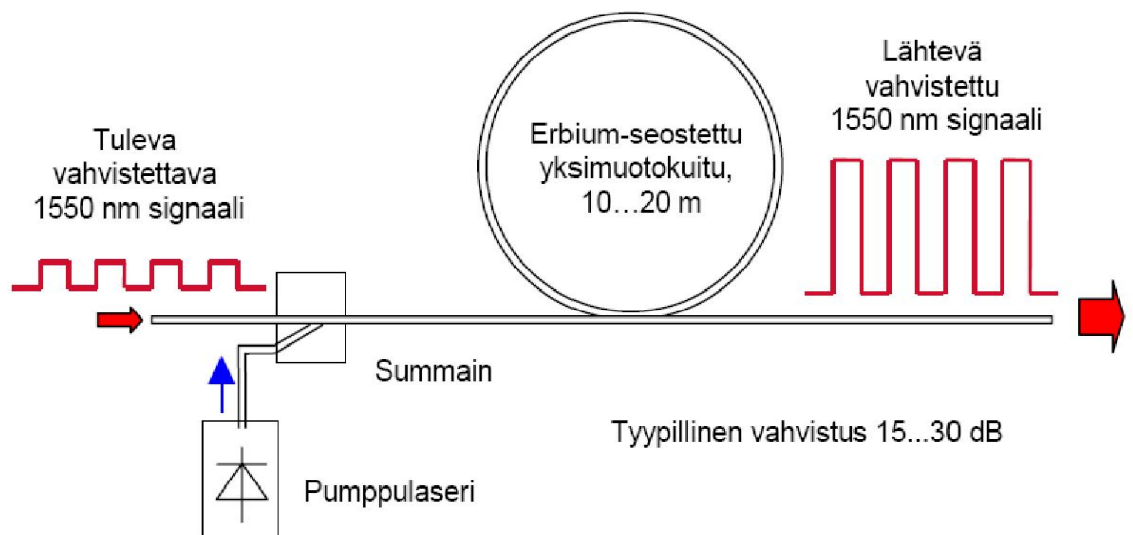


Kuva 6.1 Tämä PIN-valodiodin toimii 155 Mbit/s nopeudesta aina 4,25 Gbit/s nopeuksille. [15]

7. OPTINEN VAHVISTIN

Siirtomatkojen kasvaessa on optiseen tiedonsiirtoonkin jouduttu kehittelemään menetelmiä signaalin vahvistamiseen. Ilman vahvistimia ei voida saavuttaa yli 100 km siirtomatkoja. Nopeuksien kasvaessa ja aallonpituuskanavien lisääntyessä on optinen vahvistin Erbium Doped Fibre Amplifier (EDFA) saavuttanut suuren suosion. Optisen vahvistimen etuna on, ettei siinä jouduta muuttamaan signaalia missään vaiheessa sähköiseen muotoon, vaan valoa vahvistetaan suoraan.[1]

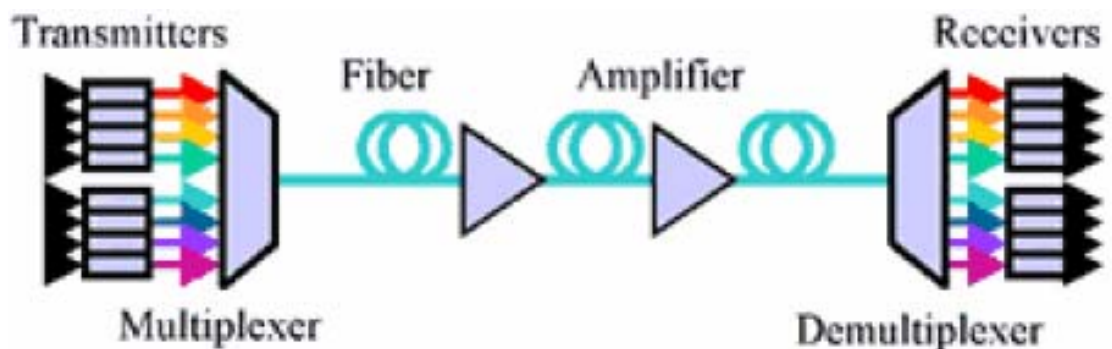
Nykyisien ns. kuituvahvistimien toiminta perustuu erbiium-seostettuun kuituun ja pumppulaseriin. Pumppulaserin tehtävänä on saada seostetun kuidun elektronit viritystilaan. Kun vahvistettava signaali osuu virittyneisiin elektroneihin, tapahtuu stimuloitu emissio, jolloin elektroni vapauttaa fotonin samassa vaiheessa ja samansuuntaisena, kuin sen laukaissut fotonit. Tällöin etenevä signaali voimistuu lisättyjen fotonien ansiosta. tyypillinen vahvistus on 15 – 30 dB. Saavutettu lähtötaso voi olla jopa +20 dBm. Etenkin yksimuotokuidussa näin suuret lähtötasot saattavat aiheuttaa epälineaarisia ilmiöitä, tämä on otettava huomioon järjestelmää suunniteltaessa. Kuvassa 7.1 on esitetty optisen vahvistimen periaatteellinen toiminta.



KUVA 7.1 Optisen vahvistimen toimintaperiaate.[1]

EDFA kehitettiin alun perin korvaamaan optical-electrical-optical (OEO) – vahvistimet joissa signaali oli välillä muutettava elektroniseen muotoon. Tämän ne ovatkin tehneet lähes täydellisesti.

Optinen vahvistin kykenee toimimaan kaikilla kanavilla yhtä aikaisesti, jotka ovat sen toiminta alueella. Niin kauan kun EDFA:lla on käytettävissään riittävästi pumpattua energiaa, voi se vahvistaa niin monta signaalia kuin sinne kyetään multiplesoituna syöttämään. EDFA salliikin täten yksikanavaisen järjestelmän nopeuden päivittämisen, vaihtamalla linkin molemmissa päissä olevat laitteet. Tällöin olemassa olevaa EFDA-laitetta tai laitteita ei tarvitse muuttaa pitkilläkään yhteyksillä. Tällöin yhtä aallonpituutta käyttävät EDFA-yhteydet voidaan samalla lailla päivittää WDM-laitteilla kohtuullisin kustannuksin. WDM-tekniikasta on kerrottu enemmän kohdassa ”8”. EDFA:n kustannustehokkuus paranee sitä mukaa, mitä enemmän kanavia kyetään multipleksaamaan 1550 nm kaistalle.[1] Kuvassa 7.2 on esitetty tyypillinen yhteys, jossa käytetään EDF-vahvistinta.



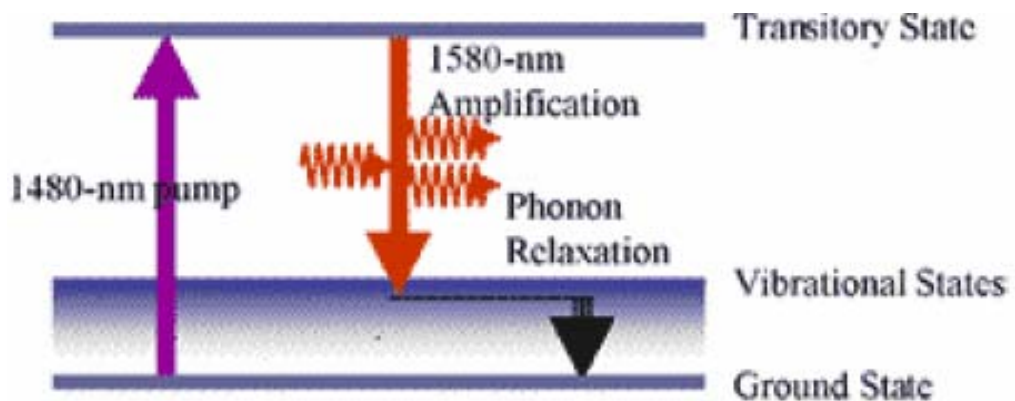
Kuva 7.2 Tyypillinen WDM siirtolinja, jossa käytetään EDF-vahvistinta.[16]

Lyhyemmällä aallonpituus alueella toimiville, optisille vahvistimille tarvitaan muita korkeamman viritystilan omaavia maametalliepäpuhtausseosaineita, kuten Praseodymium korvaamaan Erbium. Näille vahvistimille käytetään lyhennettä PDF(A) (Praseodymium Doped Fiber Amplifier).[11]

Puolijohdeteknologian ja uusiin ASIC-piireihin perustuva sähköinen optinen vahvistin. SOA (Semiconductor Optical Amplifier)-laitteet, ovat kehittyneet viime aikoina huomasti. Uudet SOA-laitteet ovat: pienikokoisia, vaativat vähän tehoa, ovat edullisia sekä omaavat tasaisen vahvistuksen eri aallonpituus alueilla. SOA-vahvistin

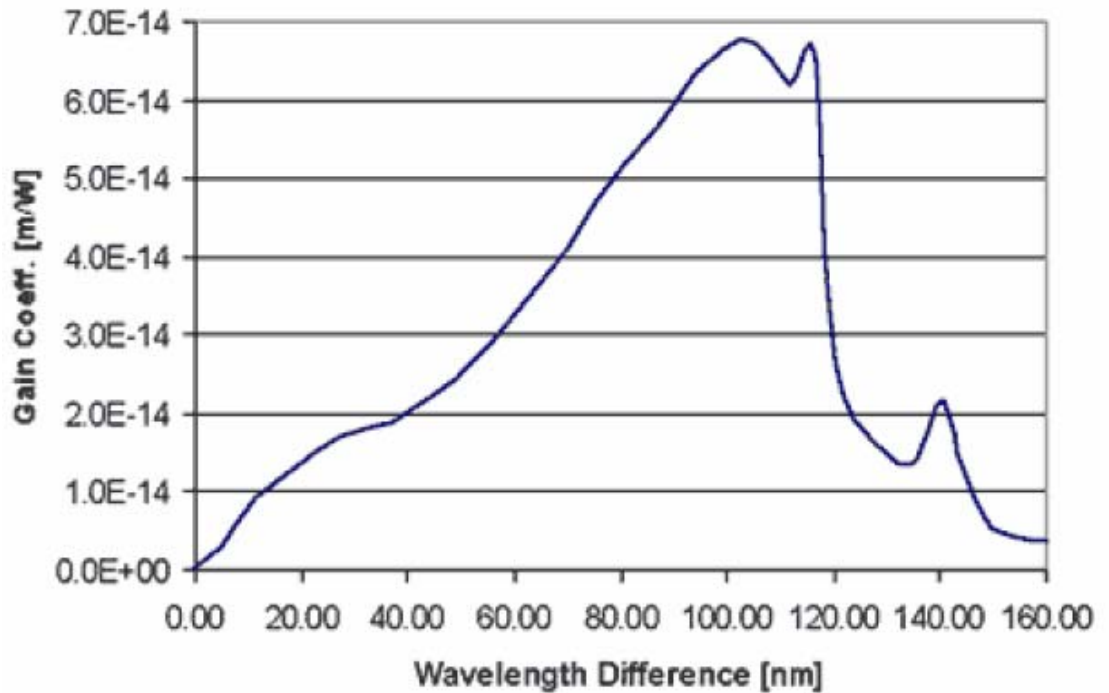
on oikeastaan laserlaite, jonka aktiiviseen alueeseen kuidussa saapuva valo laukaisee stimuloitua emissiota, ja tuleva valosignaali vahvistuu. Vahvistimessa käytetään samaa puolijohdeyhdistettä, kuin laserdiodissa. SOA-laitteiden vahvistus on kuitenkin selvästi pienempi, kuin EDFA-laitteilla. SOA-laitteiden pääasiallinen käyttökohde ovatkin kaupunkeja yhdistävät verkot.[11]

Optisen tiedonsiirron kokonaiskuluja vähentämään on kehitetty raman-vahvistin. Ramanvahvistaminen tapahtuu itse siirtokuidussa ja vaikuttaa leveälle aallonpituusalueelle. Itse raman-vahvistus syntyy, kun pumppulaserin lähettämä fotonin luovuttaa energiansa luodakseen uuden fotonin signaalin aallonpituusalueella. Kuva 7.3 havainnollistaa tätä tapahtumaa.[16]



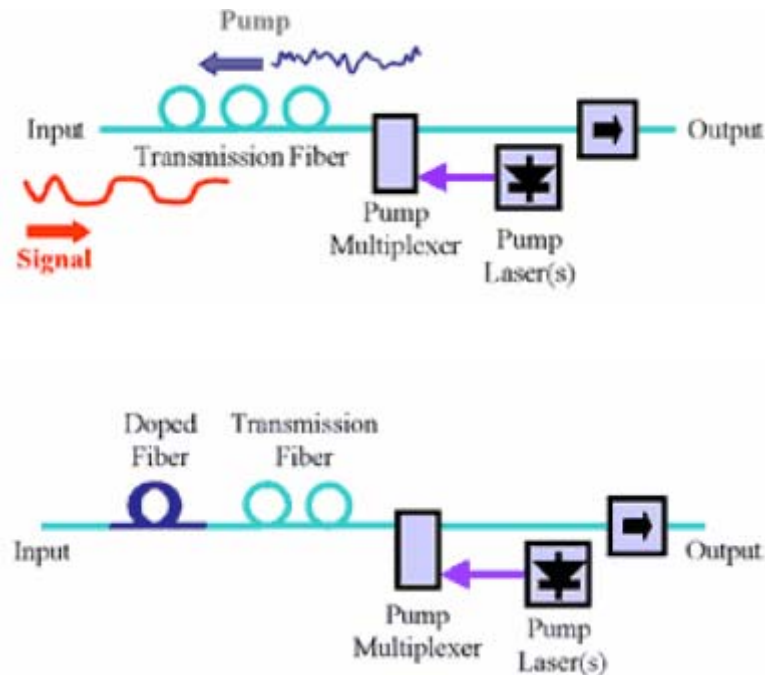
Kuva 7.3 Energia tasot raman-vahvistuksen aikana.[16]

Vahvistin vaikuttaa kuidussa useiden kilometrien alueella. Kuituyhteyden ollessa 100 km raman-vahvistin vaikuttaa loppupään 40 km matkalla, eikä mitään erillistä pistemäistä vahvistinta tarvita. Tällöin paikalliset tehotasot eivät kohoa liian korkeiksi ja epälineaaristen häiriöiden vaikutus on vähäistä.[11] Raman-vahvistin vahvistaa voimakkaimmin 100 nm pumppulaserin aallonpituuden yläpuolella olevia aallonpituuksia, kuten kuvasta 7.4 voidaan todeta.[16]



Kuva 7.4 raman-vahvistimen vahvistus on voimakkain noin 100 nm aallonpituus erolla.[16]

Raman-vahvistin sijoitetaan kuituvälin loppupäähän, pumppulaserin edessä vastakkaiseen suuntaan. Tällöin vahvistavan pumppulaserin vaikutus on suurimmillaan siellä missä signaali on heikoimmillaan. Toiminta parametrit raman-vahvistimelle määrittävät käytetty aallonpituus, tehotaso, kuitutyypin ja vastaanottimen herkkyys. Raman-vahvistus on epälineaarista ja pumppulaserin tehotason on oltava vähintään 500 mW luokkaa. EDF-vahvistimissa vastaava tehotaso on vain 100 mW luokkaa.[11] Kuvassa 7.5 on esitetty erilaisia raman-vahvistimen käyttö mahdollisuuksia.

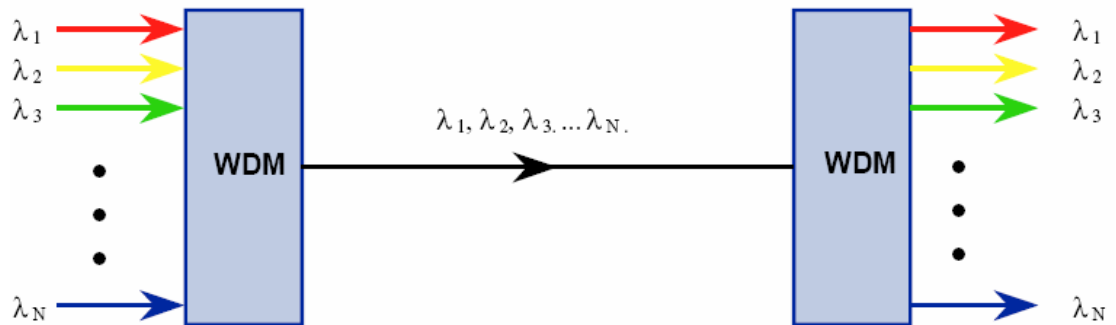


Kuva 7.5 raman-vahvistinta voidaan käyttää joko itsenäisesti tai EDF-vahvistimen kanssa

Raman-vahvistimilla voidaan pitkällä jänneväleillä vähentää tarvittavien EDF-vahvistimien määrää ja täten alentaa kokonaiskuluja. Uusissa Raman vahvistimissa on useita pumppulaser aallonpituuksia multipleksattuna, jolloin laajempi aallonpituuskanavien alue on vahvistettavissa. Raman vahvistimien avulla voidaan DWDM-kanavien määrää kasvattaa ja informaation siirtonopeutta lisätä.[11,16]

8. WDM JA PASSIIVISET HAAROITTIMET

WDM eli aallonpituuskanavointi tarkoittaa, että kuidussa siirretään samanaikaisesti useita eri aallonpituuksia. Kutakin optista kanavaa eli aallonpituutta voidaan käyttää SDH-, ATM- tai IP-signaalien siirtoon. Kuvassa 8.1 on esitetty WDM:n toiminta periaate.[1]



Kuva 8.1 WDM:n toimintaa kuvaava lohko esitys.[1]

WDM-järjestelmän lähettimessä käytetään multiplekseriä lähetettävien signaalien liittämiseksi toisiinsa ja demultiplekseriä vastaanottopäässä erottamaan signaalit toisistaan. Oikean tyyppistä kuitua käytettäessä on mahdollista saada laite, joka tekee molemmat toiminnot samanaikaisesti ja toimia optisen add-drop multiplekserinä. Modeemeissa käytetty optinen suodatin on yleensä yksittäistaaajuus Fabry-Pérot-interferometri, joka on kiinteä ohuella kalvolla päällystetty lasi.[7]

Ensimmäinen WDM-järjestelmä yhdisti vain kaksi signaalia. Tämän päivän järjestelmät käsittelevät jopa 160 signaalia. Tämä mahdollistaa teoreettisesti 10 Gbit/s kuitu-järjestelmän siirtokapasiteetin kasvattamisen yli 1.6 Tbit/s yhdelle kuituparille. WDM-järjestelmät ovatkin syystä saavuttaneet suuren suosion, sillä ne mahdollistavat siirtokapasiteetin valtavan kasvattamisen ilman kaapeleiden lisäämistä. Käyttämällä WDM-teknologiaa ja optisia vahvistimia, voidaan nykyiset verkot päivittää koskematta varsinaiseen runkoverkkoon. Olemassa olevan linkin kapasiteettia voidaan laajentaa, päivittämällä ainoastaan multiplekserit ja demultiplekserit.[7]

Useimmat WDM-järjestelmät käyttävät siirtotienä yksimuotokuitua. Tiettyjä WDM:n muotoja voidaan käyttää myös monimuotokuiduilla. Ensimmäiset WDM-järjestelmät olivat kalliita ja mutkikkaita käyttää. Nykyaikainen standardisointi sekä parempi WDM-järjestelmien ymmärtäminen ovat tehneet siitä paljon halvemmän valmistaa. WDM-järjestelmän demultiplekserin täytyy täyttää vastaanottimelle vaadittu aallonpituusselektiivisyys.[7]

WDM-järjestelmät on jaettu kahteen markkinointikategoriaan, dense ja coarse WDM. Molemmat teknologiat perustuvat samalle periaatteelle käyttää useita aallonpituuksia yksittäisessä kuidussa. Teknologioiden erot ovat aallonpituuksien sovituksessa, kanavien määrässä ja mahdollisuudessa vahvistaa signaalia optisessa tilassa.[7]

WDM-järjestelmät joutuvat tänä päivänä toimimaan eri protokollien kautta, jolloin ne muodostavat vain siirtojärjestelmänrunгон. Yleisin liitäntä protokolla on SDH (Synchronous Digital Hierarchy) /ATM (Asynchronous Transfer Mode). Nämä ovat vanhempia tekniikoita ja niistä löytyy runsaasti tietoa eri lähteistä, eikä niitä ole siten käsitelty tässä työssä.

8.1 Coarse Wavelength Division Multiplexing

CWDM tulee sanoista "Coarse Wavelength Division Multiplexing". CWDM:n kohdalla valittu kanavajako ja taajuuden vakaus olivat sellaiset, ettei optisia EDFA-vahvistimia voida käyttää. Perinteisesti ITU-standardin mukaisesti termillä CWDM:llä tarkoitettiin, että kaksi tai mahdollisesti useampi signaali sekoitetaan yhteen kuituun. Tällöin signaalit olivat 1550 nm ja 1310 nm alueilla.[7]

ITU-standardissa on tänä päivänä standardoitu CWDM:lle 20 kanavavälin taulukko. Käytössä on aallonpituudet väliltä 1310nm – 1610 nm. Monia CWDM-aallonpituuksia, jotka ovat alle 1470 nm pidetään käyttökelvottomina vanhemmilla kuiduilla. Uusimmilla kuiduilla, joissa vaimennus on lyhyilläkin aallonpituuksilla huomattavasti pienempi, saadaan kaikki 20 kanavaa käyttöön.[7]

Ethernetin fyysisen kerroksen standardissa LX-4 käytetään neljää aallonpituutta kuljettamaan yhteensä 10 Gbit/s tietovirtaa. CWDM-järjestelmän pääpiirre on että siinä signaaleja ei ole asetettu siten että niitä olisi mahdollista vahvistaa optisella vahvistimella EDFA:lla. Tästä johtuen CWDM-järjestelmän käyttöetäisyys rajoittuu noin 60 km paikkeille 2,5 Gbit/s siirtonopeudella. Tämä rajoittaa järjestelmän käyttömahdollisuudet lähinnä kaupunkiverkkoihin. Löysemät taajuuden stabiilisuuden vaatimukset mahdollistavat CWDM-komponenttien alemman hintatason.[7]

CWDM on käytössä myös kaapelitelevisioverkoissa, joissa eri aallonpituuksia käytetään erisuuntiin liikkuvissa datavirroissa. Näissä järjestelmissä käytetään aallonpituuksia joiden erot ovat suuret, esimerkiksi tuleva data voi käyttää 1310 nm kun lähtevä taas 1550 nm aallonpituutta.[7]

Viimeisintä kehitystä CWDM:n osalta edustaa Small Form Factor PLuggable(SFP) – vastaanotin. SFP - vastaanotin käyttää standardisoituja CWDM-aallonpituuksia. SFP optiikka sallii vanhempienkin SFP – rajapintaa tukevien järjestelmien helpon päivittämisen. Tällöin järjestelmän voidaan helposti päivittää sallimaan multipleksoidun datan siirron kuitua pitkin. Lisäksi etuna on halpa passiivioptinen multipleksauslaite.[7]

8.2 Dense Wavelength Division Multiplexing

DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing), On alkuperäisesti käytetty 1550 nm aallonpituisten optisten signaalien multiplexointiin. Tällöin on ollut mahdollista käyttää EDFA – vahvistimia, joiden tehokas toiminta-alue sijoittuu 1530 – 1560 nm välille. DWDM-järjestelmän kanavataulukko on nähtävissä liitteessä 1.

DWDM – järjestelmä sisältää useita pääkomponentteja. DWDM-terminaali multiplekserin, joka sisältää yhden aallonpituuden kääntäjän jokaista käytettävää aallonpituutta kohden. Kääntäjä ottaa vastaan sisään tulevan optisen signaalin, muuntaa tämän signaalin elektroniseen muotoon ja uudelleen lähettää sen multipleksoituna käyttäen 1550 nm alueella olevaa laseria. Ensimmäiset DWDM – järjestelmät 1990-luvun puolivälillä sisälsivät 4 tai 8 aallonpituutta. Nykyiset kaupalliset järjestelmät voivat kuljettaa yli 128 signaalia.[7]

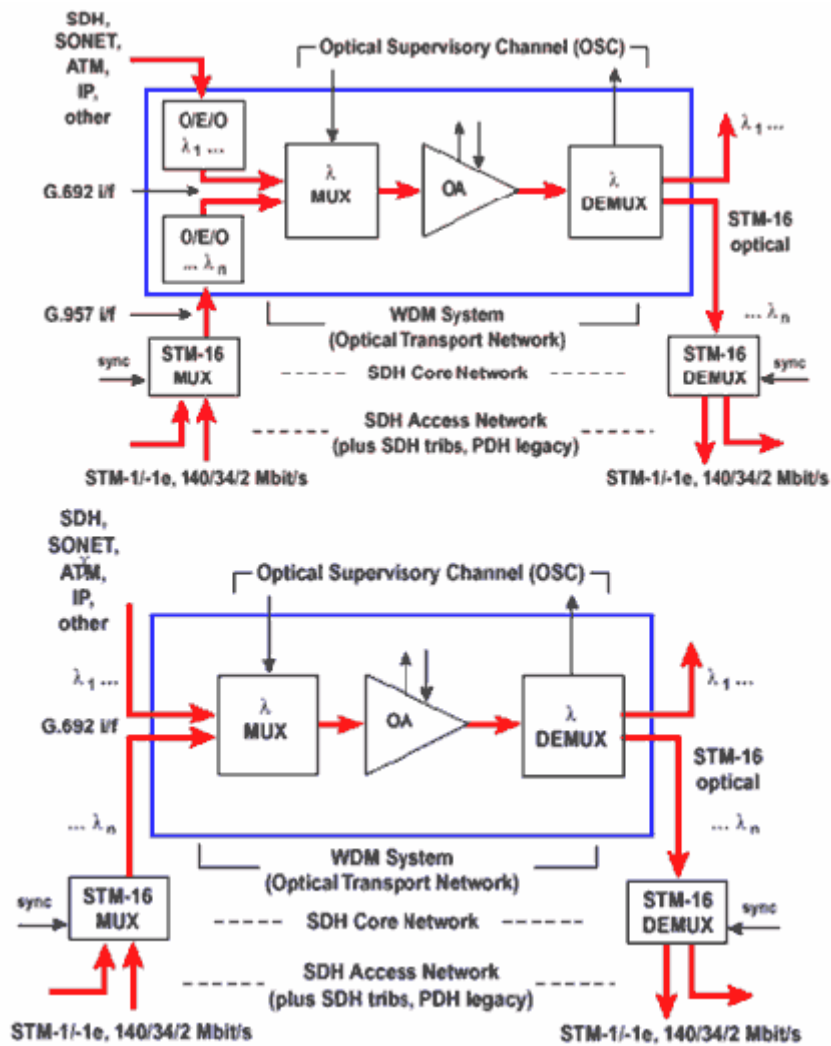
Siirtolinjan välillä oleva optinen add-drop multiplekseri, tämä voi olla myös kaukainen vahvistus paikka, joka vahvistaa useita aallonpituuksia kuljettavaa signaalia. Signaali on saattanut matkata satoja kilometrejä ennen saapumistaan. Hienostuneimmissa järjestelmissä useat signaalit voidaan poimia pois sekoitetusta signaalista ja lähettää paikallisesti. Tällöin puhutaan solmu kohdista, joissa tarkkaillaan myös kulkevaa signaalia ja lähetetään mittaustuloksia, jotka

mahdollistavat kuidun katkeamien ja virheellisten signaalien paikantamisen. Verkon ylläpidon kannalta tämä on hyvin tärkeää.[7,17] DWDM-siirtoyhteyden rakenne selviää kuvasta 8.2.[17]

DWDM-terminaali käänteismultiplekseri. Demultiplekseri purkaa usean aallonpituuden sekoitetun signaalin takaisin yksittäisiksi signaaleiksi ja purkaa ne erillisille kuiduille, joista asiakaskerrosjärjestelmät voivat ne havaita.[7,17]. Demultiplexerin tehtävä on havainnollistettu kuvassa 8.2.

Kaukaisille asiakaskerrosjärjestelmille demultipleksoidut signaalit lähetetään yleensä OEO – kääntimen kautta. Toisiotutkavastaimet voivat joissakin nimellisesti 40 GHz taajuudella toimivissa järjestelmissä suorittaa myös virheenkorjausta etukäteen lasketun korjaustiedon perusteella FEC (Forward Error Correction)[7].

Optinen valvonta kanava OSC(Optical Supervisory Channel). Tämä on toteutettu lisä aallonpituudella, joka on yleensä EDFA:n vahvistus alueen ulkopuolella (1510 – 1620 nm) 1310 nm tai vastaava. OSC kuljettaa tietoa moniaallonpituussignaalista samoin kuin kaukaisia tietoja optiselta terminaalilta tai EDFA-laitteelta. Sitä käytetään myös yleisesti etäkäyttöisiin ohjelmistopäivityksiin ja operaattorin verkonhallintatietojen välityksiin.[7,17] OSC-kanavan tiedonvälitystä on havainnollistettu kuvassa 8.2.



Kuva 8.2 WDM-järjestelmän rakennetta kuvaava lohkokkaavio. Yllä avoin järjestelmä ja alempana integroitu.[17]

Tämän päivän järjestelmät käyttävät 50 GHz tai jopa 25 GHz kanavaväliä aina 160 kanavan järjestelmissä. DWDM – järjestelmän on kyettävä ylläpitämään stabiilimpi aallonpituus ja taajuus, kuin mitä CWDM – järjestelmässä vaaditaan, johtuen pienemmistä aallonpituuseroista. Tyypillisesti backbone toteutetaan DWDM:llä, jolloin järjestelmässä käytetään 16 – 128 aallonpituutta. Laser-lähtimen lämpötilan täytyy olla tarkasti kontrollissa, jotta estetään todella kapean taajuusikkunan siirtyminen viereiselle kanavalle. Mutta koska DWDM tarjoaa suuremman maksimi siirto kapasiteetin. Se on tiedonsiirto hierarkiatasossa korkeammalla kuin CWDM,

esimerkiksi internetin runkoverkossa. DWDM-laitteet ovat kuitenkin tyypillisesti kalliimpia kuin CWDM-laitteet, johtuen niiden pienestä tuotantomäärästä sekä suuresta siirtokapasiteetista.[7]

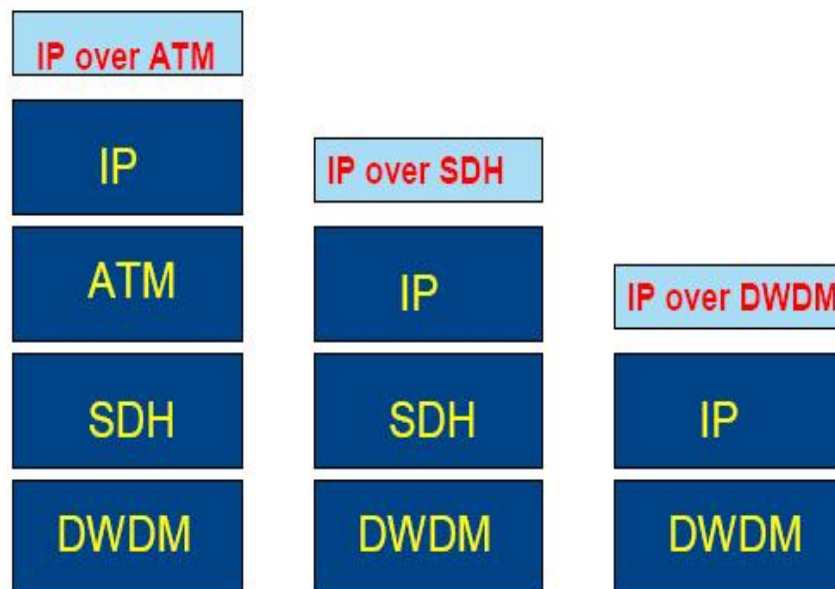
Vuonna 2006 Siemens Osakeyhtiö kertoi toimittavansa Finnet-yhtiölle optisen DWDM-siirtoverkon. Uusi teknologia nostaa Finnet Carrierin runkoverkon siirtonopeuden useisiin kymmeneen gigabittiin sekunnissa. Myös LAN-lähiverkko-liitynnässä tiedonsiirtonopeus voidaan tällöin nostaa 10 gigabittiin sekunnissa. Testikäyttöön verkon ensimmäinen vaihe on otettu Helsingin ja Kuopion välillä. Uusi DWDM-siirtoverkko on käytössä vuonna 2006, tällöin esimerkiksi yhden kirjaston verran tietoa voitaisiin siirtää Helsingistä Ouluun muutamassa sekunnissa.[9]

Varhaiset ensimmäisen sukupolven toisiotutkavastaimien ulostulosignaali oli lähes analoginen kopio sisään tulleesta optisesta signaalista, hieman signaalia selventäen. Tämä rajoitti varhaisen DWDM:n suosiota, koska signaali piti saada liitännäisverkkoon ennen kuin se heikkeni liikaa. Signaalin seuranta oli myös erittäin rajattua. Tämän päivän DWDM-järjestelmät sisältävät siirrettäviä ja ohjelmallisesti säädettäviä lähetin-vastaanotin moduuleja jotka voivat toimia 40 tai 80 kanavalla. Tämä vähentää huomattavasti tarvittavien moduulien määrää, kun muutama moduuli kykenee käsittelemään koko lähetysalueen. DWDM:n välissä olevat optiset järjestelmät voivat sallia tiettyjen aallonpituuskanavien lisäämisen ja poimimisen. Vanhemmissa järjestelmissä tämä oli tehtävä manuaalisesti lisäämällä tai vaihtamalla aallonpituus-valitsinkortti. Tämä oli kallista ja vaati joissakin järjestelmissä aktiivisen liikenteen lakkauttamista, sillä korttien vaihto katkaisi optisen yhteyden.

Reconfigurable Optical Add-Drop multiplexer (ROADM) mahdollistaa sen että verkko-operaattorit voivat ohjelmallisesti säätää multiplekseriä pelkillä lähetetyillä komennoilla. ROADM on suunniteltu niin, että aallonpituuksien lisääminen tai poistaminen ei keskeytä läpäisevää signaalia. Lukemattomia teknologisia lähestymistapoja on kehittynyt ROADM:sta, muun muassa hinnan, optisen tehon ja joustavuuden vaikutuksesta.[7]

Tulevaisuuden kuituoptisissa verkoissa tullaan siirtymään kytkentöjen optiseen suorittamiseen. Tällöin IP-Ethernet-kehys voidaan kytkeä suoraan DWDM:n multipleksoituun tietovirtaan, ja välistä jäävät pois SDH/ATM-kehukset. Yksi merkittävimmistä tämän mahdollisistavista tekniikoista on MOEMS(MicroOptoElectroMechanical Systems), josta käytetään usein myös nimitystä MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems), näistä on kerrottu lisää kohdassa ”9”. Kuvassa 8.3 on esitetty siirtyminen tämän hetkisestä tilanteesta uuteen ratkaisuun.[6] DWDM-järjestelmille on suunniteltu kuitutyyppejä, joilla saavutetaan kanavien välinen alhainen ylikuuluvuus alhaisella dispersiolla. Yksi näistä kuitutyypeistä on ITU-T G.655.

IP-liikenne tulee siirtymään IP- optimoituun infrastruktuuriin



Kuva 8.3 Kuljetusverkon toteutustapoja.[6]

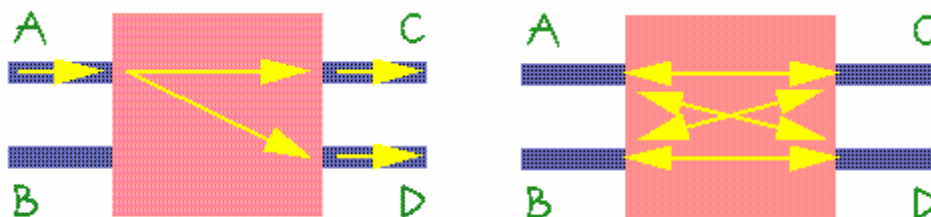
8.3 Haaroittimet

Haaroitin on passiivinen komponentti, joka jakaa yhden kuidun valotehon useampaan kuituun. Jos kaikkiin kuituihin jaettava valoteho on yhtä suuri, jakosuhte ilmoitetaan muodossa 1:N. Tehoa jaettaessa syntyy luonnollisesti vaimennusta. Jakosuhteen ja vaimennukset vastaavat yleensä seuraavaa taulukkoa.

Jakosuhte	Vaimennus, dB
1:2	3,5
1:4	7,0
1:8	10,5
1:16	14,0
1:32	17,5

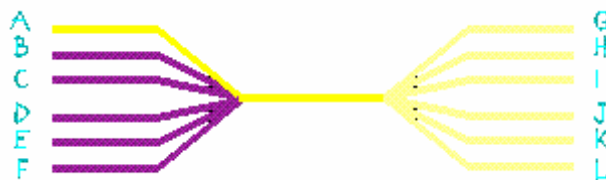
Haaroittimet on varustettu joko liittimillä tai kuituihin hitsattavilla häntäkuiduilla. Haaroittimen jakama teho voi olla myös erisuuruinen eri lähtöhaaroissa, esimerkiksi 10 % tehosta toiseen haaraan ja 90% toiseen. [1,18]

Haaroittimia on monen tyyppisiä. Yksinkertaisimmillaan haaroitin voidaan ajatella passiiviseksi laitteeksi, joka jakaa valosäteen. Yksinkertaisin haaroitin on niin sanottu 2 x 2 haaroitin, joka jakaa valon kumpaankin ulostuloporttiin. Mikäli kuidussa kuljetetaan tietoa molempiin suuntiin, on valolla siis 8 erilaista etenemismahdollisuutta.[18] Kuvassa 8.4 on esitetty tällainen haaroitin.



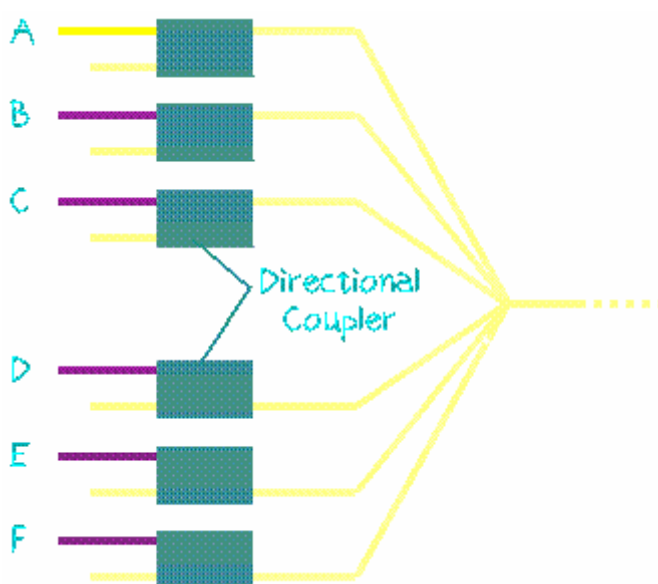
Kuva 8.4 neljäporttinen eli 2 x 2 haaroitin.[18]

Haaroitin voidaan valmistaa muun muassa kietomalla kaksi kuitua yhteen ja kuumentamalla niitä, jolloin ytimet yhdistyvät osittain. Kuidun toimintaan vaikuttaa huomattavasti se, onko kuitu yksi- vai monimuotokuitu. Yksimuotokuidulla on oikealla haaroittimen pituudella mahdollista joko yhdistää tai erottaa kaksi aallonpituutta toisistaan. Y-haarat eli 1 x 2 haarat ovat yksi avain komponenteista haaroituksessa. Niitä voidaan myös yhdistää ja tehdä 1 x 4, 1 x 8 tai useampiakin haaroja. Tähtihaaroittimessa valo jakautuu kaikkiin lähtöportteihin. Tähtihaaroittimen toiminta on esitetty kuvassa 8.5.



Kuva 8.5 Tähtihaaroittimen toiminta.[18]

Heijastustähtihaaroittimessa valo heijastetaan takaisin A-F-porteille silmukan avulla. Heijastunut signaali erotetaan suuntakytkimen avulla erilliseen kuituun, kuten kuvassa 8.6.[18]

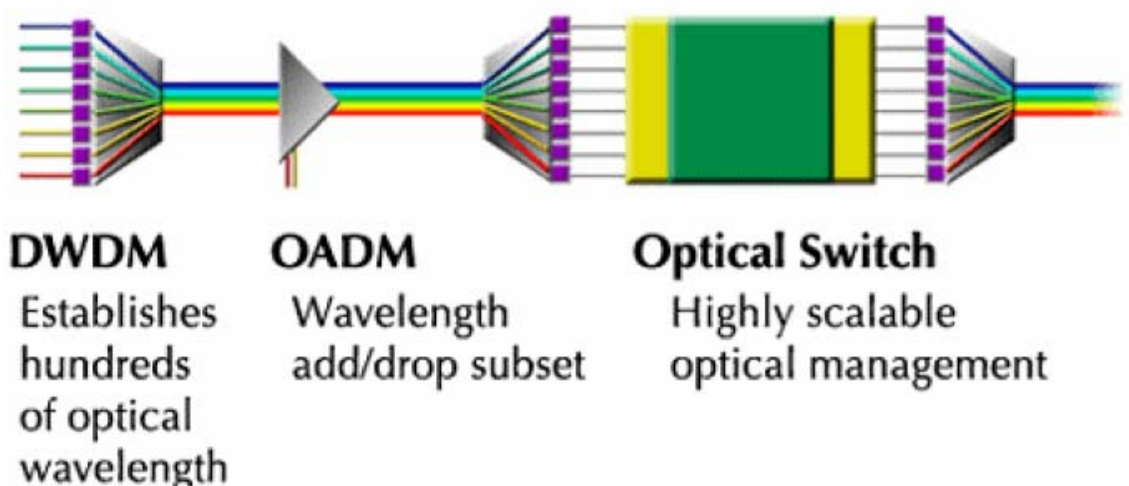


Kuva 8.6 Heijastuneen signaalin erottaminen suuntakytkimen avulla.[18]

9. MEMS JA OPTISET KYTKIMET

MOEMS ja MEMS komponentteja on jo kaupallisesti saatavilla, niitä käytetään erityisesti kytkimissä ja multiplexereissä. MEMS komponentit eivät välttämättä sisällä optiikkaa, mutta tätä nimitystä käytetään yleisesti. Näillä termeillä tarkoitetaan mikroskooppisten pienistä rakenteista valmistettuja laitteita. Laitteet voivat sisältää optiikkaa, elektroniikkaa sekä mekaniikkaa. Näin hienomekaaniset laitteet tarvitsevat kuitenkin suojakseen kaasukerroksen, joka on laitetta ympäröivän lasikuvun alla.

Optiset kytkimet voivat suorittaa kytkennän, joko sähköisesti (O-E-O) tai toiminta voi olla kokonaan optinen (O-O-O). Älykkäät runkoverkonoptiset-kytkimet parantavat tiedonsiirron toimintoja, suuren taajuuskaistan ristikytkentöjä sekä data-keskeistä tiedonsiirtoa. Ne palvelevat entistä paremmin lukuisten data-tyyppien siirtoa runkoverkossa. Nämä uudet laitteet on suunniteltu palvelemaan data-liikenteen vaatimuksia paremmin, samalla palvelen muitakin palveluita kuten ääntä ja videota. [19] Uudet järjestelmät palvelevat paremmin sellaisia palveluita kuten internet, elokuvat, lääkinnän sovellukset, interaktiiviset asiakaspalvelut ja ne avaavat monia mahdollisuuksia kehittää uusia palveluita. Kuvassa 9.1 on esitetty lohko-kaavion avulla tyypillisen WDM-verkon komponentit.



Kuva 9.1 Tyypilliset optisen tiedonsiirron elementit(WDM).[19]

Kuten edellä totesimme, on optisia kytkimiä kahdenlaisia, optis-elektro-optisia sekä täysin optisia. Optiselektro-optiset eli O-E-O-kytkimet muuntavat valosignaalin sähköiseksi ja kytkevät sen uudelleen, jonka jälkeen signaali muunnetaan takaisin valopulssiksi uudessa kanavassa. Täysinoptiset-kytkimet eli O-O-O-kytkimet eivät muunna signaalia ollenkaan sähköiseksi, vaan käyttävät mikroskooppisen pieniä optisia komponentteja valosignaalin ohjaukseen. Tuotanto kustannuksiltaan molempien kytkintyyppien valmistajat kehittävät koko ajan halvempia tuotantomenetelmiä ja kustannuslennuksia on lupailtakin. Kytöntä valitessa, tulee tarkastella kytkinten ominaisuuksia ja sovittaa niitä käyttökohteen vaatimuksiin.[19]

Operaattoreista toiset ovat vedonneet optisen verkon evoluutioon ja päätyneen älykkääseen O-E-O-kytkimeen. Toiset ovat haaveilleet vielä suuremmista säästöistä, eliminoimalla elektroniset komponentit ja päätyneen täysinoptiseen-kytkimeen. Näitä uuden sukupolven kytkimiä tarkastellaan nimityksellä täysinoptinen-verkko AON(all-optical-network).[19]

Teoriassa AON on siirtotie, joka on täysin kytketty ja hallinnoitu optisella tasolla. Tavoitteena, että AON on nopeampi ja halvempi kuin optiset verkot, jotka käyttävät siirtotiellä sähköisiä komponentteja. Kuten usein aiemminkin, tässäkin tapauksessa, käyttöön otettaessa, teoria ei ole aivan vastannut odotuksia. Selvää kuitenkin on, että kumpikin kytkintyyppi on löytänyt paikkansa optisessa tiedonsiirrossa.[19]

Seuraavassa on esitelty tarkemmin kummankin kytkimen ominaisuuksia erikseen. O-O-O- ja O-E-O-kytkinten vastaan asettelussa on syytä muistaa, että tehokkain hyötysuhde verkossa saadaan älykkäiden optiselektro-optis-kytkimien, ja uuden sukupolven täysinoptisten-kytkimien optimoidulla käytöllä.

9.1 Täysin optiset kytkimet

MEMS-teknologian käyttö on suositeltavin tapa valmistaa täysin optinen kytkin. Muut tekniikat eivät ole ominaisuuksiltaan kilpailukykyisiä, MEMS-teknikan etuja vastaan. Yleisesti tästä tekniikasta käytetään nimitystä 3D MEMS. Taulukossa 9.1 on verrattu eri tekniikoilla toteutettujen täysin optisten kytkinten ominaisuuksia.[19]

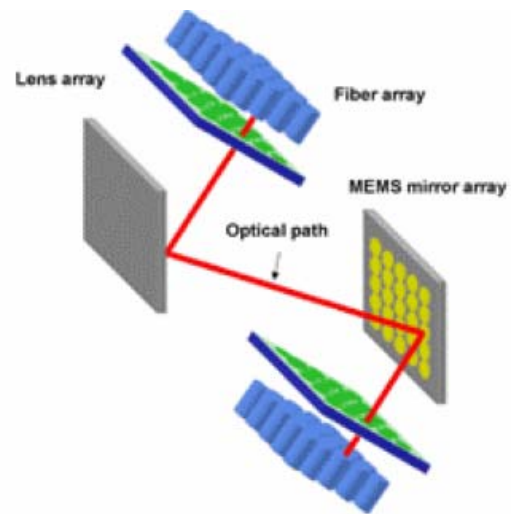
	<i>Free-space</i>		<i>Guided Wave</i>	
	<i>MEMS</i>	<i>Liquid Crystal</i>	<i>Thermo-Optic Bubble</i>	<i>Thermo-Optic/ Electro-optic Waveguide</i>
Scalability	✓	X	X	X
Loss	✓	?	X	?
Switching time	✓	?	?	✓
Cross-talk	✓	?	?	?
Polarization Effects	✓	? ✓	? ✓	X
Wavelength Independence	✓	✓	✓	X
Bit-rate Independence	✓	✓	✓	✓
Power Consumption	✓	✓	X	X
		✓ good	? unsure	X bad

Taulukko 9.1 Kytkinrakenteiden toteutus tapojen vertailu.[19]

Täysinoptinen kytkin kykenee käsittelemään DWDM-järjestelmän satoja kanavia, muuntamatta niitä missään vaiheessa sähköiseksi. O-O-O-kytkin on silloin vahvimmillaan, kun solmupisteen läpikulkevat datamäärät ovat suuria, esimerkiksi 80 %. MEMS-tekniikka mahdollistaa parhaan kytkentäjärjestelmän, joka kykenee käsittelemään kaikkien kuitujen kuljettamia valosäteitä, joissa kussakin kulkee satoja aallonpituuksia. Kuvassa 9.2 on esitetty 3D MEMS tekniikalla toteutettu O-O-O-kytkimen malli.[19]

Complementary features

- **Virtues**
 - Scales beyond 1000 x 1000 in single stage
- **Challenges**
 - Large number of mirrors with tight tolerances
 - Control of Mirrors
- **Require meticulous engineering**
 - Mirror-control algorithm
 - Fiber arrays
 - Lens arrays
 - Mechanical packaging



Kuva 9.2 3D MEMS tekniikalla toteutetun kytkimen toimintaa kuvaava malli.[19]

3D MEMS-kytkimessä on porttien määrä kohotettu mahdollisimman suureksi, samalla kytkentävaimennusten minimointiin pyrkien. Tämän päivän kytkimet ovat porteiltaan 256 x 256 – 1000 x 1000. Lähitulevaisuudessa tulossa on jopa 8000 x 8000 portin kytkimiä. Portti luku on vain yksi O-O-O-kytkinten ominaisuus. Kytkimiä voidaan tarkastella myös niiden maksimitiedonläpäisyn osalta. Optinen kytkin on siirtonopeus- ja protokollariippumaton. Tuhansien porttien ja siirtonopeuden rajoittamattomuuden yhdistelmä, takaa laitteen suorituskyvyn tulevaisuudessakin. Täysinoptinen-kytkin tuo myös joustavuutta verkkoon.[19]

Suurimpia ongelmia täysinoptisten-kytkinten osalta, tuovat kytkentähäviöt, jotka ovat 6 – 15 dB luokkaa. Vaimennukseen vaikuttaa kytkimessä tapahtuvien heijastusten määrä ja käytetty tekniikka. 3D MEMS-kytkimet voidaan asettaa yhteen tasoon, jolloin kytkennästä aiheutuneet vaimennukset saadaan minimoitua. DWDM-järjestelmässä on 6 dB vaimennuskin huomattava. Ongelmaa voidaan vähentää laserlähettimien tehoa nostamalla, jolloin voidaan varmistaa, että signaali läpäisee kytkentämatriisin, tämä kuitenkin kohottaa ympäröivän laitteiston kustannuksia.[19]

AON:n kannalta, fyysisistä ominaisuuksista tärkeimpiä ovat: kromaattinen dispersio, PMD, epälineaariset ilmiöt, polarisaatioriippuvainen vaimentuminen, WDM kaistanpäästökanavan kapeneminen, komponenttien ylikuuluminen ja vahvistimen kohinan vahvistuminen. Täysinoptinen-kytkin ei vielä kykene tehokkaasti käsittelemään kaikkia optisenverkon kytkentä tilanteita. Eikä siten AON:n tekeminen ole vielä suotavaa.[19]

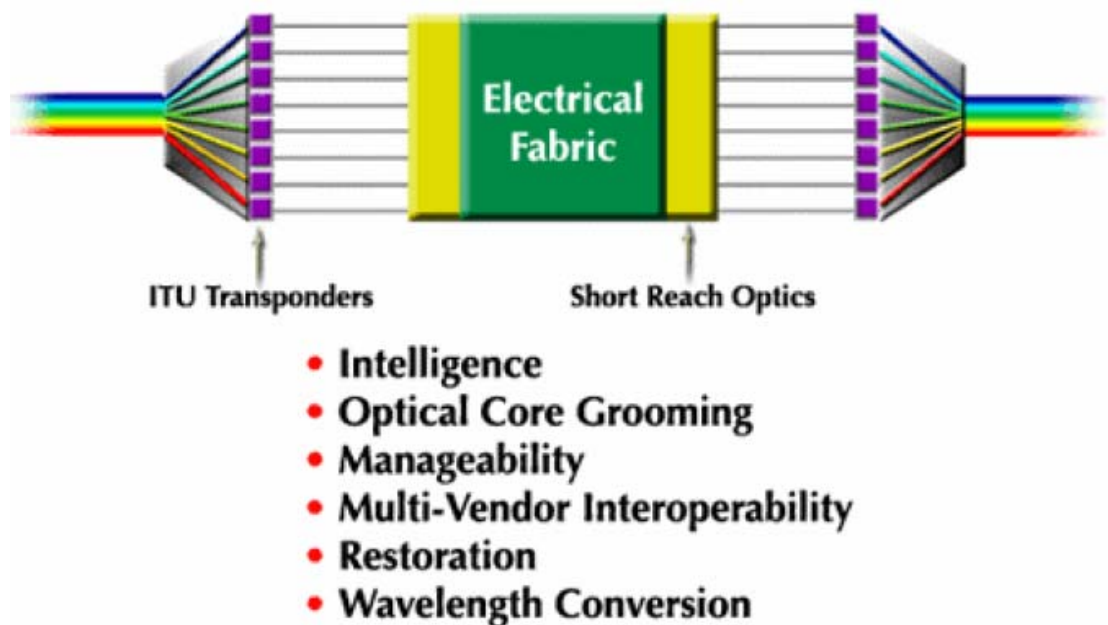
Täysinoptinen-kytkin tarjoaa myös huomattavan säästön sekä tilan, että tehonkulutuksen suhteen. Perinteisiin SDH-laitteiston ristikytkimiin verrattuna O-O-O-kytkin tarjoaa 92 % tilan säästön sekä 96 % energian säästön.[19]

9.2 Älykkäät optiselektro-optiset-kytkimet

Verkonhallintatoiminnot, jotka ovat tärkeä osa verkkohallintaa, ovat mahdollisia suorittaa tänä päivänä käyttämällä optista-kytkintä jolla on sähköiseen toimintaan perustuva kytkentä matriisi. Nämä älykkäät O-E-O-kytkimet ovat tätä päivää ja laskevat laajakaistaisen hallintaväylän tarvetta, samalla tarjoten helpon vian etsinnän sekä tärkeän suorituskyvyn mittaustiedon välityksen, jolla helpotetaan verkon tilan tarkkailua. Elektronista kytkentää käyttävä O-E-O-kytkin, kykenee myös tarjoamaan aallonpituuden terävöittämistä, jota täysin optinen kytkin ei pysty suorittamaan. O-O-O-kytkin pystyy kuitenkin tarjoamaan uudenlaisia aallonpituuspalveluja, kun taas O-E-O-kytkin tarjoaa uudenlaisia laajakaistapalveluja. Tämä mahdollistaa uusien palveluiden tarjonnan, jotka eivät hallinnan ja ylläpidon osalta lisää operaattorin tehtäviä entisestään. [19]

O-E-O-kytkin laskee myös tarvetta hallita laajan kaistanleveyden kasautumia, prosessoimalla tietoa 2,5 Gbit/s nopeudella. Elektronisen kytkennän avulla, O-E-O-kytkin kykenee selviämään verkonepäkohdista, jotka tällä hetkellä rajoittavat täysinoptisen-kytkimen käyttöä dynaamisessa silmukkarakenteessa. Älykäs optiselektro-optinen-kytkin yhdistää viimeisimmän tekniikan kehityksen, kehittyneen ohjelmiston kanssa.

Tällä kyetään tarjoamaan dynaaminen optinenverkko, data-keskeisen tiedonsiirron vaatimuksiin. Itseis-3R uudistamistoiminnot sallivat älykkään optisen-kytkimen käytön monissa eri verkko topologioissa, mukaan lukien silmukka rakenteessa.[19] Kuvassa 9.3 on esitetty opto-elektro-optista-kytkintä kuvaava lohkokaavio sekä käsittely sen etuja.



Kuva 9.3 Optiselektro-optisen-kytkimen edut[19]

Älykkäät optiselektro-optiset-kytkimet ovat laajasti saatavilla ja ne kykenevät vastaamaan tämän päivän teknisiin vaatimuksiin. Tuotantomenetelmien kehittyessä älykkäiden O-E-O-kytkinten hintataso on myös laskenut. Uusien O-E-O-kytkinten energian kulutus on myös alhaisempi ja ne laskevat täysin optisen-kytkinten tarvetta. Älykkäät O-E-O-kytkimet kykenevät myös vastaamaan nykyisiin data-keskeisen tiedonsiirron vaatimuksiin.

9.3 OxO

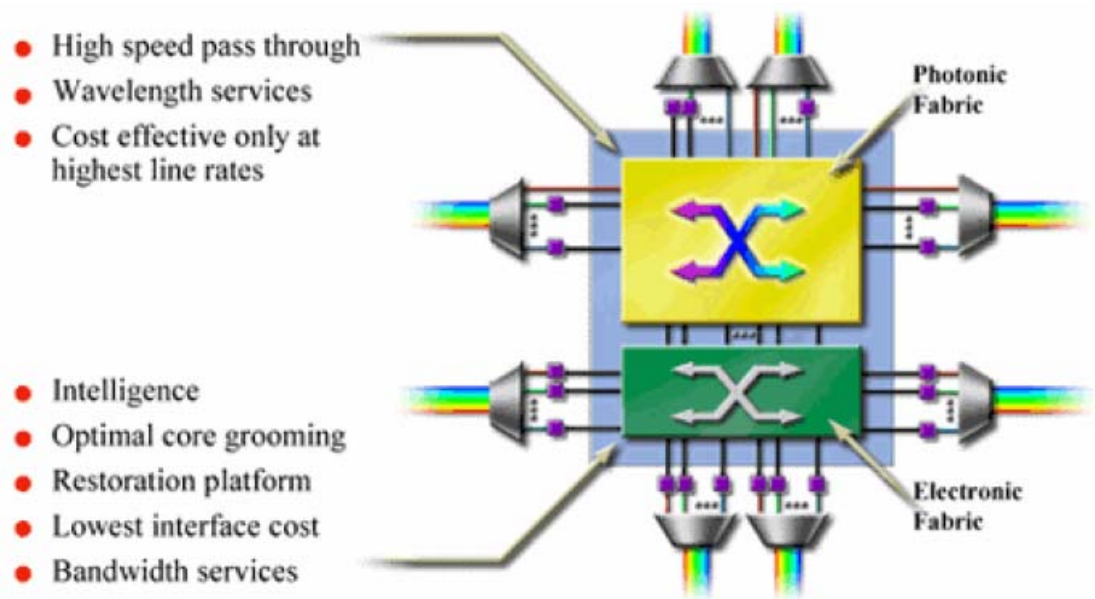
Älykäs O-E-O-kytkin kykenee jo vastaamaan seuraavan sukupolven verkkojen vaatimuksiin, ilman niitä riskejä, joita O-O-O-kytkimet aiheuttavat. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, etteivätkö täysin optiset kytkimen olisi tarpeellisia seuraavan sukupolven verkossa. Täysinoptinen-kytkin tulisi lisätä verkkoon oikeaan aikaan, kun siitä on eniten hyötyä, tämä sallisi halvemmat ja helpommin hallittavat dynaamiset verkot. Näitä kahta kytkintä ei tulisikaan vertailla toisiaan kilpailevina tekniikoina, vaan niiden käyttö tulisi suunnitella palvelemaan verkon tarpeita mahdollisimman hyvin.

OxO-termillä tarkoitetaan kummankin kytkimen käyttöä samassa verkossa, hyödyntäen kummankin kytkimen tarpeelliset ominaisuudet. Tällöin kyetään tarjoamaan kummankin kytkimen tarjoamat uudet, kaistanleveys sekä päästä päähän aallonpituus palvelut. O-E-O-kytkimet vähentävät ongelmia, jotka täysin optisessa verkossa vahvistuisivat, sekä mahdollistavat tehokkaan multipleksaus ja demultipleksaus toiminnot. O-O-O-kytkimet sallivat tilan- sekä energiasäästöjen parantamisen, samalla tarjoten siirtonopeus ja protokolla läpäisykyvyn uusille palveluille.[19] Taulukossa 9.2 on esitetty OxO:n etuja verrattuna pelkästään OOO- tai O-E-O-kytkimillä rakennettuihin verkkoihin.

Function	Transparent 'All-Optical' Switch	Electronic Switch	Best of O&E
Performance-monitoring	Complex	Simple	Simple
Connection-verification	Complex	Simple	Simple
Fault-isolation	Complex	Simple	Simple
Automatic Topology-discovery	Complex	Simple	Simple
Graceful scaling in line rate	Yes	No	Yes
Multicast	No	Yes	Yes
Subrate grooming	No	Yes	Yes
Unconstrained restoration algorithm?	No	Yes	Yes
In-band signaling	No	Yes	Yes

Taulukko 9.2 OxO:n tarjoamat edut muihin ratkaisuihin verrattuna.[19]

Täysinoptiset-kytkimet tulevat kehittymään tulevaisuudessa yhä tehokkaammiksi ja luotettavimmiksi, kun niiden käytöstä saadaan enemmän kokemuksia. Tällöin niiden käyttö tulee kasvamaan entisestään. Tulevaisuudessakaan ei kuitenkaan kumpikaan kytkintyyppi tule syrjäyttämään toista, vaan edelleen tärkeää on verkon tarkka optimoiminen, mikä mahdollistaa kaikkien palveluiden tehokkaan käytön.[19] Kuvassa 9.4 esitetään OxO:n toimintaa.



Kuva 9.4 OxO:n toimintaa kuvaava lohkokaavio.

Täysinoptinen-kytkin tarjoaa läpikulkevalle tiedolle nopean kulkureitin, sekä tarjoaa aallonpituuspalvelut. Optiselektro-optinen-kytkin tarjoaa älykkäät toiminnot, korjaa pulssia, suorittaa virheenkorjausta, tarjoaa alemmat liityntäpintakustannukset sekä tarjoaa kaistanleveyspalvelut.[19]

10. YHTEENVETO

Voidaan todeta, että Suomessa on jo nyt erittäin kattava kuituverkko. Tulevaisuudessa on ennustettu, että vuoteen 2008 mennessä kuituverkko on laajentunut kattamaan käytännössä kaikki kylät ja erilliset kaupunginosat. Nykyiset siirtonopeudet STM4/STM16 (622 Mbit/s/2,5 Gbit/s) tulevat kasvamaan siten, että STM64 (10 Gbit/s) tulee laajojen alueverkkojen ja runkoverkkojen perusnopeudeksi. Myös uuden G.656-lisääntyvä käyttö tuo mukanaan STM 256 (40 Gbit/s) siirtonopeuden käytön, ainakin pahiten kuormitetuille runko- ja alueverkon linkeille. DWDM- ja CDWM-tekniikoiden (useiden STM16/64/256 yhteyksien ajo samanaikaisesti yhdellä kuituparilla) käyttö tulee kapasiteettitarkastelussa lisääntymään merkittävästi vuoteen 2008 mennessä. Tiedonsiirtoliikenteen vuosittaisen kasvun on ennustettu olevan 100 % luokkaa. WDM-tekniikka pystyy vastaamaan näihin kehitysvaatimuksiin vielä pitkän aikaa.

Seuraavien vuosien aikana ollaan NGN(Next Generation Networks)-suosituksissa muovaamassa selkeästi kuljetuskerrosta nykyisestä SDH/ATM-perustaisesta WDM-perustaiseksi. Tyypillisesti backbone on toteutettu DWDM-tekniikalla. Solmupisteissä(add drop point) aallonpituudet, joko kytketään edelleen tai pudotetaan alueverkkoihin tai suoraan liityntäverkkoihin. Tyypillisesti solmupiste muuntaa optisen datan sähköiseen muotoon, jonka jälkeen se voidaan ohjata haluttuun paikkaan. Tulevaisuudessa kuitupohjaisessa verkossa tullaan kytkennät suorittamaan optisesti. Tämä mahdollistaa SDH/ATM-kehysien pois jäämisen, jolloin IP-Ethernet-kehys kytketään suoraan DWDM:n multipleksoituun tietovirtaan. Tämä vastaa kuvan 8.3 oikeassa laidassa esitettyä kuljetusverkon ratkaisua.

Nykypäivän kaapelit ovat erittäin korkeatasoisia. Niissä on kyetty saavuttamaan erittäin alhainen vaimennus ja miltei poistamaan vesipiikin vaikutus. Valmistusmenetelmien kehittyessä tullaan luultavasti saavuttamaan vielä parempia tuloksia ja kyetään vähentämään, muun muassa kuidun valmistuksessa lämpötilan vuoksi syntyviä pieniä taitekerroin eroja, jotka aiheuttavat säröytymistä. Kaapelirakenteet suojaavat hyvin kuituja ulkopuolisilta häiriöiltä ja mekaanisilta haitoilta. Kuitumäärät kaapeleissa voivat vielä kasvaa vaikka tälle ei vielä ole paineita WDM-tekniikan suuren siirtokapasiteetin ansiosta.

Lähetinlaitteiden kehitys on huimaa yhä parempien ja tehokkaampien puolijohde-lasereiden kehityksen myötä. Tärkeimpiä viime vuosien kehityksiä ovat olleet monikvanttikaivolaser(MQWL) sekä vertikaalisesti emittoiva laser (VCSEL). Monet tämän päivän lasereista sisältävät MQWL-tekniikkaa sillä se parantaa laserin suoritus-kykyä huomattavasti. VCSEL on lyönyt itseään läpi halpana ratkaisuna. Sen toimintaa rajaavat kuitenkin käytettävissä oleva 850 nm aallonpituus. Nopeissa järjestelmissä tänä päivänä suosituin lasertyyppi on DFB johtuen sen kapeasta spektristä, jolloin spektrin leveneminen kuidussa ei muodostu niin suureksi ongelmaksi. Lisäksi DFB-laserin emittoimat aallonpituusalueet ovat erittäin käyttökelpoisia. Yhtenä lähettimien kehityssuuntana on yhä useampien laserlähettimien integroiminen samaan piiriin. Tämä mahdollistaa yhä useamman aallonpituuden kuituun kytkemisen järkevällä tavalla.

Vastaanottimien kannalta ovat PIN-valodiodit tänä päivänä käytetyimpiä. Vastaanottimien kehityksen vaatimukset ovat vastata lähettimien tarpeita, eikä niiden suhteen ole mitään radikaalia odotettavissa. Optisten vahvistimien tehokas toiminta-alue on tällä hetkellä 1550 nm aallonpituusalueella. Tällä kyetään vastaamaan tiedonsiirto-kapasiteetin vaatimuksiin vielä vuosia, joten välitöntä kehitystarvetta ei ole. Osavaikutuksena tähän on lyhyempien aallonpituuksien suurempi vaimentuminen.

11. LÄHTEET

Painetut lähteet

- 1 Valokaapelit tele- ja tietoverkoissa. Helkama 2001.
- 2 Optinen kaapelointi kiinteistössä. Helkama 2004.
- 3 Optical communications rules of thumb. John Lester Miller, Dr. Edward Friedman 2003.

Sähköiset lähteet

- 4 Helkama [www-sivu]. [viitattu 18.11.2006] saatavissa: <http://www.helkama.com>
- 5 Tiede lehti [sähköinen artikkeli]. [viitattu 16.11.2006] saatavissa: <http://www.tiede.fi/arkisto/artikkeli.php?id=677&vl=2006>
- 6 Next Generation Network työryhmän loppuraportti [sähköinen dokumentti]. [viitattu 20.11.2006] Saatavissa: www.huoltovarmuus.fi/documents/3/TYS-2005-3_Next-Generation_Networks-Loppuraportti_final.pdf
- 7 Verkkotietosanakirja [www-sivu]. [viitattu 17.11.2006] saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Wavelength_division_multiplexing
- 8 Tietokone lehti [sähköinen artikkeli]. [viitattu 21.11.2006] saatavissa: http://www.tietokone.fi/uutta/uutinen.asp?news_id=28003&tyyppi=1
- 9 Tietokone lehti [sähköinen artikkeli]. [viitattu 21.11.2006] saatavissa: http://www.tietokone.fi/uutta/uutinen.asp?news_id=26211&tyyppi=1
- 10 Oulun yliopiston elektroniikan laboratorion aineisto [sähköinen dokumentti] [viitattu 10.11.2006] saatavissa: www.electronics oulu.fi/Opetus/OE/Optinen_hajautettu_takaisinkytkenta.pdf
- 11 EVTEK ammattikorkeakoulun aineistoa [sähköinen dokumentti] [viitattu 13.11.2006] saatavissa: <http://users.evtek.fi/~karisv/tm00/optverk3.htm>
- 12 Prosessori lehti [sähköinen artikkeli] [viitattu 19.11.2006] saatavissa: <http://www.prosessori.fi/es98/wdm.htm>
- 13 Data-Glass Oy [www-sivu] [viitattu 15.11.2006] saatavissa: <http://www.data-glass.com/virtuaalivierailu.htm>

- 14 Verkkotietosanakirja [www-sivu]. [viitattu 17.11.2006] saatavissa:
<http://en.wikipedia.org/wiki/VCSEL>
- 15 Finisar [www-sivu]. [viitattu 18.11.2006] saatavissa:
<http://www.finisar.com/index.php?file=product&var=product&level=A>
- 16 International Engineering Consortium (IEC) [sähköinen dokumentti] [viitattu 6.12.2006] saatavissa: <http://www.iec.org/acrobat.asp?filecode=118>
- 17 International Engineering Consortium (IEC) [sähköinen dokumentti] [viitattu 6.12.2006] saatavissa: <http://www.iec.org/acrobat.asp?filecode=40>
- 18 Australian Photonics CRC [www-sivu] [viitattu 6.12.2006] saatavissa:
<http://oldsite.vislab.usyd.edu.au/photonics/devices/networks/coupler0.html>
- 19 International Engineering Consortium (IEC) [sähköinen dokumentti] [viitattu 9.12.2006] saatavissa: <http://www.iec.org/acrobat.asp?filecode=108>
- 20 MEMS Optical, Inc [www-sivu] [viitattu 9.12.2006] saatavissa:
<http://www.memsoptical.com/>

11. LIITTEET

Liite 1 DWDM kanava taulukko

Liite 1 ITU-T standardien mukaiset DWDM-kanavoinnit 50 GHz ja 100 GHz kanaväleille.

L α		L β		C α		C β		S α		S β	
THz	nm	THz	nm	THz	nm	THz	nm	THz	nm	THz	nm
186.00	1611.79	186.05	1611.35	191.00	1569.59	191.05	1569.18	196.00	1529.55	196.05	1529.16
186.10	1610.92	186.15	1610.49	191.10	1568.77	191.15	1568.36	196.10	1528.77	196.15	1528.38
186.20	1610.06	186.25	1609.62	191.20	1567.95	191.25	1567.54	196.20	1527.99	196.25	1527.60
186.30	1609.19	186.35	1608.76	191.30	1567.13	191.35	1566.70	196.30	1527.22	196.35	1526.83
186.40	1608.33	186.45	1607.90	191.40	1566.31	191.45	1565.90	196.40	1526.44	196.45	1526.05
186.50	1607.47	186.55	1607.04	191.50	1565.50	191.55	1565.09	196.50	1525.66	196.55	1525.27
186.60	1606.60	186.65	1606.17	191.60	1564.68	191.65	1564.27	196.60	1524.89	196.65	1524.50
186.70	1605.74	186.75	1605.31	191.70	1563.86	191.75	1563.45	196.70	1524.11	196.75	1523.72
186.80	1604.88	186.85	1604.46	191.80	1563.05	191.85	1562.64	196.80	1523.34	196.85	1522.95
186.90	1604.03	186.95	1603.60	191.90	1562.23	191.95	1561.83	196.90	1522.56	196.95	1522.18
187.00	1603.17	187.05	1602.74	192.00	1561.42	192.05	1561.01	197.00	1521.79	197.05	1521.40
187.10	1602.31	187.15	1601.88	192.10	1560.61	192.15	1560.20	197.10	1521.02	197.15	1520.63
187.20	1601.46	187.25	1601.03	192.20	1559.79	192.25	1559.39	197.20	1520.25	197.25	1519.86
187.30	1600.60	187.35	1600.17	192.30	1558.98	192.35	1558.58	197.30	1519.48	197.35	1519.09
187.40	1599.75	187.45	1599.32	192.40	1558.17	192.45	1557.77	197.40	1518.71	197.45	1518.32
187.50	1598.89	187.55	1598.47	192.50	1557.36	192.55	1556.96	197.50	1517.94	197.55	1517.55
187.60	1598.04	187.65	1597.62	192.60	1556.55	192.65	1556.15	197.60	1517.17	197.65	1516.78
187.70	1597.19	187.75	1597.76	192.70	1555.75	192.75	1555.34	197.70	1516.40	197.75	1516.02
187.80	1596.34	187.85	1595.91	192.80	1554.94	192.85	1554.54	197.80	1515.63	197.85	1515.25
187.90	1595.49	187.95	1595.06	192.90	1554.13	192.95	1553.73	197.90	1514.87	197.95	1514.49
188.00	1594.64	188.05	1594.22	193.00	1553.33	193.05	1552.93	198.00	1514.10	198.05	1513.72
188.10	1593.79	188.15	1592.52	193.10	1552.52	193.15	1551.12	198.10	1513.34	198.15	1512.96
188.20	1592.95	188.25	1592.52	193.20	1551.72	193.25	1551.32	198.20	1512.58	198.25	1512.19
188.30	1592.10	188.35	1591.68	193.30	1550.92	193.35	1550.52	198.30	1511.81	198.35	1511.43
188.40	1591.26	188.45	1590.83	193.40	1550.12	193.45	1549.72	198.40	1511.05	198.45	1510.67
188.50	1590.41	188.55	1589.99	193.50	1549.32	193.55	1548.91	198.50	1510.29	198.55	1509.91
188.60	1589.57	188.65	1589.15	193.60	1548.51	193.65	1548.11	198.60	1509.53	198.65	1509.15
188.70	1588.73	188.75	1588.30	193.7	1547.72	193.75	1547.32	198.70	1508.77	198.75	1508.39
188.80	1587.88	188.85	1587.46	193.80	1546.92	193.85	1546.52	198.80	1508.01	198.85	1507.63
188.90	1587.04	188.95	1586.62	193.90	1546.12	193.95	1545.72	198.90	1507.25	198.95	1506.87
189.00	1586.20	189.05	1585.78	194.00	1545.32	194.05	1544.92	199.00	1506.49	199.05	1506.12
189.10	1585.36	189.15	1584.95	194.10	1544.53	194.15	1544.13	199.10	1505.74	199.15	1505.36
189.20	1584.53	189.25	1584.11	194.20	1543.73	194.25	1543.33	199.20	1504.98	199.25	1504.60
189.30	1583.69	186.35	1583.27	194.30	1542.94	194.35	1542.54	199.30	1504.23	199.35	1503.85
189.40	1582.85	189.45	1582.44	194.40	1542.14	194.45	1541.75	199.40	1503.47	199.45	1503.10
189.50	1582.02	189.55	1581.60	194.50	1541.35	194.55	1540.95	199.50	1502.72	199.55	1502.34
189.60	1581.18	189.65	1580.77	194.60	1540.56	194.65	1540.16	199.60	1501.97	199.65	1501.59
189.70	1580.35	189.75	1579.93	194.70	1539.77	194.75	1539.37	199.70	1501.21	199.75	1500.84
189.80	1579.52	189.85	1579.10	194.80	1538.98	194.85	1538.58	199.80	1500.46	199.85	1500.09
189.90	1578.69	189.95	1578.27	194.90	1538.19	194.95	1537.79	199.90	1499.71	199.95	1499.34
190.00	1577.86	190.05	1577.44	195.00	1537.40	195.05	1537.00	200.00	1498.96	200.05	1498.59
190.10	1577.03	190.15	1576.61	195.10	1536.61	195.15	1536.22	200.10	1498.21	200.15	1497.84
190.20	1576.20	190.25	1575.78	195.20	1535.82	195.25	1535.43	200.20	1497.46	200.25	1497.09
190.30	1575.37	190.35	1574.95	195.30	1535.04	195.35	1534.64	200.30	1496.71	200.35	1496.34
190.40	1574.54	190.45	1574.13	195.40	1534.25	195.45	1533.86	200.40	1495.97	200.45	1495.60
190.50	1573.71	190.55	1573.30	195.50	1533.47	195.55	1533.07	200.50	1495.22	200.55	1494.85
190.60	1572.89	190.65	1572.48	195.60	1532.68	195.65	1532.29	200.60	1494.48	200.65	1494.11
190.70	1572.06	190.75	1571.65	195.70	1531.90	195.75	1531.51	200.70	1493.73	200.75	1493.36
190.80	1571.24	190.85	1570.83	195.80	1531.12	195.85	1530.72	200.80	1492.99	200.85	1492.62
190.90	1570.42	190.95	1570.01	195.90	1530.33	195.95	1529.94	200.90	1492.25	200.95	1491.88