

Opinnäytetyö (AMK)  
Elektroniikka  
Tietoliikennejärjestelmät  
2012

Tuukka Väilä

# LASERIN JA LEDIN KÄYTTÖ OPTISESSA TIEDONSIIRROSSA



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

Turun ammattikorkeakoulu

Elektroniikka | Tietoliikennejärjestelmät

Toukokuu 2012 | Sivumäärä 30

Ohjaaja: Yliopettaja Juha Nikkanen

Tuukka Väliä

# LASERIN JA LEDIN KÄYTTÖ OPTISESSA TIEDONSIIRROSSA

Tässä opinnäytetyössä keskityttiin selvittämään laserien ja LEDien käyttöä optisessa tiedonsiirrossa. Työssä perehdyttiin lisäksi laserien ja LEDien ominaisuuksiin, rakenteisiin sekä niiden muihin käyttökohteisiin.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli koota yhteen tietoa laserin ja LEDin käytöstä optisessa tiedonsiirrossa eri lähteisiin perustuen. Opinnäytetyön teoreettisena lähtökohtana käytettiin alaan liittyviä tietokirjoja sekä artikkeleita. Työssä käytetyt lähteet haettiin erilaisia tietokantoja, muita hakutoimintoja sekä alaan liittyviä Internet-sivuja apuna käyttäen.

Opinnäytetyössä perehdyttiin lopulta enemmän lasereihin, koska ne ovat suositumpi ja yleisempi vaihtoehto optisissa lähettimissä kuin LEDit. Työssä tehty tarkastelu osoitti, että lasereita on monenlaisia ja niitä pystytään hyödyntämään monin eri tavoin esimerkiksi lääke- ja sotilasteollisuudessa. Viime aikoina myös LEDien käyttö on yleistynyt ja niitä voidaan käyttää esimerkiksi valaisimissa ja televisioissa.

ASIASANAT:

laser, LED, optinen tiedonsiirto

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Communication Systems

May 2012 | Total number of pages 30

Instructor: Juha Nikkanen, Lic.Sc.(Tech.), Principal Lecturer

Tuukka Väliä

## USE OF LASER AND LED IN OPTICAL TRANSMISSIONS

The focus in this Bachelor's Thesis was to research possibilities of using lasers and LEDs in optical transmission. The aim of this thesis was also to explore abilities, structures and other possible ways of using laser and LED.

The purpose of this Bachelor's Thesis was to collect and combine information about the use of laser and LED in optical transmission based on different references. Literature and articles dealing with the subject constituted the theoretical basis for this thesis. The references used in this thesis were searched by using different electronic databases and websites.

Eventually this Bachelor's Thesis focused more on lasers because they are more popular and a more common option in optical transmitters than LEDs. The inspection made in this thesis showed that there are many kinds of lasers and that lasers can be used in many different ways, for example, in medical and military industries. Recently the use of LEDs has also become more common and they can be used in lighting and in televisions.

KEYWORDS:

Laser, LED, Optical transmission

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2 OPTISET LÄHETTIMET</b>	<b>2</b>
2.1 Optisen tiedonsiirron historia	2
2.2 Laser	3
2.2.1 Laserin historiaa	4
2.2.2 Laserin rakenne	4
2.2.3 Lasersäteen muodostaminen	6
2.2.4 Käänteisen miehityksen merkitys	7
2.2.5 Laseroituminen	8
2.2.6 Laserin käyttökohteet	10
2.3 LED	10
2.3.1 LEDin historiaa	10
2.3.2 LEDin rakenne ja toiminta	11
2.3.3 Käyttökohteet	11
<b>3 LASERTYYPPEJÄ</b>	<b>12</b>
3.1 Puolijohdelaser	12
3.2 Kaasulaser	12
3.3 Kemiaalliset laserit	13
3.4 Väriainelaserit	13
3.5 Kiinteän olomuodon laserit	13
3.6 Vapaaelektronilaser	13
<b>4 LÄHETINKOMPONENTIT</b>	<b>15</b>
4.1 Valon tuottaminen	15
4.2 Laser	16
4.2.1 Laserlähettimien parametrit	17
4.3 Muoto	20
4.4 Fabry-Perot-laserit	20
4.5 DFB-laser	21
4.6 External Cavity Lasers	23
4.7 VCSEL	24
4.8 Mode-Locked Lasers	25
4.9 Säädetävät laserit	26
4.10 Kuitulaser	27

4.11 LED	28
<b>5 YHTEENVETO</b>	<b>29</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>30</b>

## **KUVAT**

Kuva 1 Alexander Graham Bellin piirros aurinkopuhelimesta.	3
Kuva 2 Laserin rakenne.	5
Kuva 3 Laseroitumisen tapahtuminen.	8
Kuva 4 Fabry-Perot-suodatin.	21
Kuva 5 DFB-laser ja DBR-laser.	22
Kuva 6 Ulkoisen kaviteetin laserin rakenne.	23
Kuva 7 VCSEL-laserin rakenne.	25

## KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

Anodi	on elektronisessa systeemissä elektrodi, jolle negatiiviset ionit eli anionit virtaavat, kun kennoon kytketään negatiivinen jännite.
FSK	taajuusmodulaatiomenetelmä(Frequency-Shift Keying)
FSO	optinen tiedonsiirto vapaassa tilassa(Free Space Optics)
FWHM	puoliarvoveveys(Full Width at Half Maximum)
Heliografi	on laite jolla, siirretään tietoa auringon valon heijastusta muuttamalla.
Käänteinen miehitys	tarkoittaa, että systeemissä hiukkaset ovat jakaantuneet niin, että hiukkasia on enemmän ylemmällä energiatilalla kuin alemmalla.
Laser	on laite, joka tuottaa koherenttia valoa. Koherenttissa valossa kaikki valoallot ovat samanpituisia ja värähtelevät samassa suunnassa ja samalla taajuudella. Tulee sanoista Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.
LED	valodiodi(Light-Emitting Diode)
Maser	eli Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Maser tarkoittaa vahvistettuja ja tahdistettuja mikroaaltoja.
OTDM	Optical Time Division Multiplexing.
OOK	modulaatiomenetelmä(on-off keying)
Resonaattori	on järjestelmä, joka värähtelee eli resonoi tietyillä taajuuksilla isommalla amplitudilla kuin muilla taajuuksilla.
RONJA	on lyhenne sanoista Reasonable Optical Near Joint Access. RONJA on optisen tiedonsiirron standardi.
TDM	eli Time Division Multiplexing on teknologia jolla, multipkeksataan yksi tai useampi signaali näennäisesti

samanaikaisesti kanavaan, mutta fysikaalisesti ne menevät vuorotellen sinne.

WDM

eli Wavelength Division Multiplexing on teknologia jolla, multipleksataan useampia optisia kantaaltoja yhteen valokuituun käyttäen laserin eri aallonpituuksia.

# 1 JOHDANTO

Tässä työssä käsitellään optisissa lähettimissä käytettäviä laseria ja LEDiä. Tarkoituksena on perehtyä yleisesti laserien ja LEDien toimintaan sekä erilaisiin toteutustapoihin ja käyttökohteisiin.

Muita tutkimuksia, jotka olisivat käsitelleet suoraan samanlaista aihetta, ei löytynyt, mutta optista tiedonsiirtoa käsitteleviä töitä on tehty, ja niissä on sivuttu optisia lähettimiä, kuten esimerkiksi Sami Hautamäen opinnäytetyössä ”Optisen tiedonsiirron komponentit”. Muunlaisissa töissä on myös tutkittu kuituverkkoja, joissa on ollut mainintoja optisista vahvistimista ja näin myös sivuttu valon tuottamista ja lähettimiä.

Tähän työhön löytyi vaihtelevasti lähteitä, koska monessa teoksessa laseria ja LEDiä selvitettiin enemmän ilmiönä kuin lähetinkomponentteina. Jotkin lähteet, kuten esimerkiksi vuoden 1998 ”Understanding Optical Communications”- teos ovat hieman vanhoja, mutta laserin ja LEDin periaatteet ovat kuitenkin pysyneet samanlaisina jo pidemmän aikaa. Tämän vuoksi työssä on kuitenkin käytetty edellä mainittua teosta lähteenä.

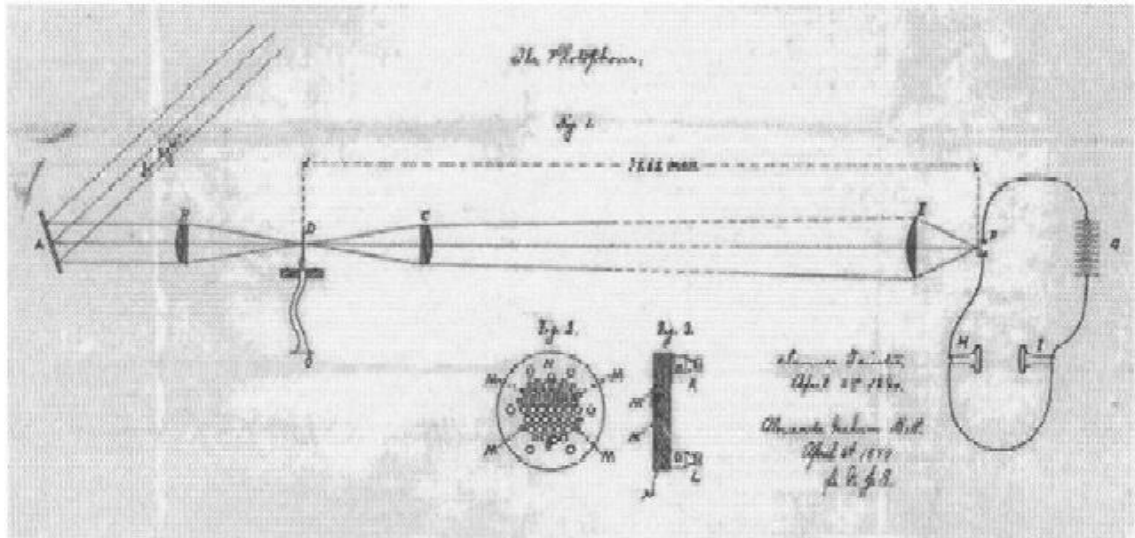
Tämän työn toisessa luvussa käydään läpi yleisemmin sitä, miten laser ja LED muodostuvat sekä niiden erilaisia käyttömahdollisuuksia. Luvussa 3 käsitellään erilaisia laserin muodostamiskeinoja ja luvussa 4 selvitetään laserin ja LEDin käyttöä optisessa tiedonsiirrossa.



## 2 OPTISET LÄHETTIMET

### 2.1 Optisen tiedonsiirron historia

Optisen tiedonsiirron historia sijoittuu tuhansien vuosien taakse. Jo antiikin kreikassa käytettiin kiillotettuja kilpiä viestitykseen auringonvalon avulla. Vuorten huipuille sytytettyjä liekkejä käytettiin viestitystarkoitukseen etenkin pitkillä matkoilla. Vaikka tuolloin olikin mahdollista lähettää vain yksi bitti informaatiota kerrallaan, oli tuo nopein keino saada tärkeät tiedot toimitettua kauas. Claude Chappe keksi 1790-luvulla optisen lennättimen, jota kutsutaan Chappe lennättimeksi. Tällä keinolla oli mahdollista lähettää tietoa käyttämällä tornin huipulla olevaa palkkia, johon oli kiinnitetty kaksi pienempää palkkia. Palkeilla on mahdollista tehdä 192 erilaista asentoa, jotka voivat tarkoittaa yhtä kirjainta, sanaa tai kokonaista lausetta. Tornit olivat tavallisesti toisistaan noin 8 – 10 km:n etäisyydellä. Yksi aikaisemmista langattomista optisen tiedonsiirron laitteista, joka käytti elektronisia ilmaisimia, on vuonna 1880 Alexander Graham Bellin ja hänen avustajansa Charles Sumner Tainterin kehittämä valopuhelin, jossa valon lähteenä oli aurinko. Kuvassa yksi oleva valopuhelin toimii heliografien periaatteella, jossa ääni muunnetaan peilin värähtelyksi. Vastaanotin koostui seleenikristallista, joka muutti optisen signaalin sähköiseksi. Moderni aika sisätilojen optisessa tiedonsiirrossa on aloitettu 1979, kun F.R. Gfeller ja U. Bapst ehdottivat käytettäväksi hajapäästöä infrapunasäteilyn kaistalle sisäkommunikoinnissa. Tuon ajan jälkeen on tapahtunut paljon optisessa tiedonsiirrossa, vastaanottimien ja lähettimien optiikassa sekä elektroniikassa. [1, 2]



Kuva 1 Alexander Graham Bellin piirros aurinkopuhelimesta. [2]

## 2.2 Laser

Laser on akronyymi merkittävimmälle tapahtumalle laserissa eli valon vahvistukselle stimuloitulla emissiolla. On olemassa monia erilaisia lasereita, mutta jokaisella on yksi yhteinen asia: ne sisältävät materiaalia, joka on kyvykäs vahvistamaan säteilyä. Tätä materiaalia kutsutaan aktiiviseksi laseroivaksi väliaineeksi, koska säde vahvistuu mennessään sen läpi. [3]

Laser perustuu stimuloituun emissioon, jossa valo vahvistetaan tuomalla elektroniin fotonin, joka muuttaa atomin vireystilaa. Atomi antaa toisen fotonin, joka lähetetään samaan suuntaan kuin atomin lävistänyt fotonin ja näin valonsäde vahvistuu. Laserin valo on parasta, mitä optisessa tiedonsiirrossa voi käyttää. Laser pystyy tuottamaan erittäin vahvan ja joissakin tapauksissa jopa useiden kilowattien tehon. Tiedonsiirtosovelluksissa on puolijohdelasereissa tarjolla 20 mW:n teho, tämä on enemmän kuin tavallinen LED pystyy tarjoamaan. Toiset puolijohdelaserit, kuten ne, joita käytetään pumppuina optisissa vahvistimissa, pystyvät 250 mW:n ulostuloon. Koska laserin valo tuotetaan rinnakkaisista säteistä, pystytään valosta noin 80 % siirtämään kuituun. Laserin valo on koherenttia. [4]

### 2.2.1 Laserin historiaa

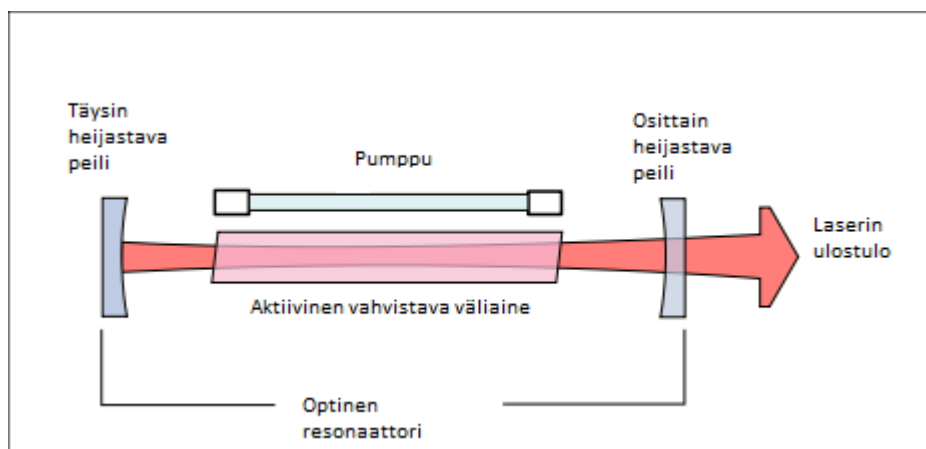
Ensimmäisen kerran laserista teorioi Albert Einstein vuonna 1917 kirjassaan "On the Quantum Theory of Radiation". Myöhemmin vuonna 1928 Rudolf W. Ladenburg todisti stimuloitun emission ja negatiivisen imeytymisen ilmiöiden olevan mahdollisia. Einsteinin tutkimuksiin palattiin kuitenkin vasta vuonna 1953, kun Charles Townes oppilaineen rakensi ensimmäisen maserin. Charles Townes jatkoi tutkimuksiaan Arthur Leonard Schawlow'n kanssa vuonna 1957 tarkoituksenaan kehittää infrapunasäteilylaser, mutta tutkimuksien edetessä infrapunasäteily sai jäädä ja he keskittyivät näkyvän valon aallonpituuksiin. Tutkimuksia kutsuttiin aluksi optiseksi maseriksi. Samanaikaisesti Gordon Gould työskenteli tohtorin väitöskirjansa kanssa aiheenaan virittyneen talliumin energiatasot. Gould ja Townes tapasivat myöhemmin samana vuonna, ja näiden keskusteluiden pohjalta Gould sai ajatukseksensa, että laserissa voisi käyttää apuna resonaattoria. [5]

Ensimmäisen toimivan laserin kehitti kuitenkin vuonna 1960 Theodore H. Maiman. Maimanin laser käytti hyväkseen voimakasta energian lähdettä kiihdyttääkseen atomeita synteettisessä rubiinissa korkeilla energiatasoilla. Tietyllä energiatasolla muutamat atomit emittoivat valon hiukkasia eli fotoneja. Nämä uudelleen luodut fotonit iskivät muita atomeja luoden nopealla tahdilla uusia identtisiä fotoneja ja vahvistamalla valon intensiteettiä. Maiman pystyi jatkamaan tätä stimuloitun emission ja vahvistuksen prosessia lisäämällä täysin heijastavan hopeapeilin laitteen toiseen reunaan, ja toiseen reunaan osittain heijastavan hopeapeilin. Tällaisella asettelulla fotonit sinkoivat edestakaisin peilien välissä, kunnes ne saivat tarpeeksi voimakkuutta purskahtaakseen osittain hopeoidun peilin läpi voimakkaana koherenttina valon säteenä. Kuitenkin osa säteestä pääsee peilin lävitse koko ajan. [5]

### 2.2.2 Laserin rakenne

Laser rakentuu kolmesta pääasiallisesta osasta, jotka ovat energian lähde, joka on yleensä pumppu, aktiivisesta laseroivasta väliaineesta ja kahdesta tai

useammasta peilistä, jotka muodostavat optisen resonaattorin. Kuvassa kaksi on esitetty laserin rakenne. [6]



Kuva 2 Laserin rakenne. [14]

Pumppu on laserin energianlähde. Pumppu voi koostua sähköisestä purkauksesta, salamalampusta, kaarilampusta, toisen laserin valosta tai kemiallisesta reaktiosta. Laseroivan väliaineen koostumus määrää pumpun tyyppin, kuten myös sen, miten energia siirretään väliaineeseen. [6]

Aktiivinen laseroiva väliaine on ratkaisevin osa laserissa, mistä johtuu aallonpituus ja muut laserin ominaisuudet. Erilainen aine laseroivassa väliaineessa antaa erilaisen spektrin joko lineaarisen tai laajan. Laajalla spektrillä on mahdollista säätää laserin taajuutta. On olemassa satoja jopa tuhansia erilaisia aktiivisia laseroivia väliaineita, joilla on mahdollista saada aikaiseksi laseroituminen. Laseroiva väliaine viritetään pumpulla, jotta saadaan luotua käänteinen miehitys, ja siitä syystä vahvistavassa väliaineessa tapahtuu fotonien spontaani ja stimuloitu emissio, joka johtaa optiseen vahvistumiseen. [6]

Optinen resonaattori tai optinen kaviteetti on yksinkertaisimmillaan rakennettuna kahdesta peilistä laseroivaan väliaineeseen. Peileihin on tehty optinen pinnoite, joka määrittää heijastumistehon. Tyypillisesti toinen peili on täysin heijastava ja toinen on osittain heijastava. Jälkimmäistä kutsutaan ulostulon liittimeksi, koska

se päästää osan valosta ulos kaviteetista muodostamaan laserin säteen. Monimutkaisemmissa lasereissa voidaan käyttää kaviteetteja, jotka on muodostettu neljän tai useamman peilin avulla. Peilien muotoilulla ja asettelulla voidaan määrittää aallonpituus sekä muita laserin ominaisuuksia. [6]

Muitakin optisia laitteita voidaan sijoittaa resonaattoriin, kuten pyöriviä peilejä, suodattimia, modulaattoreita ja vaimentimia. Näillä saadaan aikaan erilaisia ominaisuuksia laserin ulostuloon, kuten säädettävä aallonpituus ja mahdollisuus tuottaa laserpulsseja. Jotkin laserit eivät käytä ollenkaan optista kaviteettia, vaan luottavat erittäin vahvaan optiseen vahvistukseen, jolla muodostetaan vahvistettu spontaani emissio ilman valon kiertoa vahvistavassa väliaineessa. [6]

### 2.2.3 Lasersäteen muodostaminen

Laserin tärkein toimintaperiaate on stimuloitu emissio. Joka tapahtuu seuraavassa järjestyksessä. [4]:

1. Aluksi atomissa oleva elektroni on matalalla tasaisella energiatasolla, jota usein myös kutsutaan maatasoksi.
2. Energia tuodaan ulkopuolelta atomiin, ja se absorboituu atomin rakenteeseen, jolloin elektroni muuttuu korkeaan energiatilaan.
3. Fotoni saapuu atomiin samanarvoisella energiamäärällä, joka elektronin pitää päästää pois, jotta se tasaantuisi.
4. Saapuva fotoni laukaisee resonanssin virittyneessä atomissa. Tämän seurauksena virittynyt elektroni jättää virittyneen tilan, ja siirtyy takaisin tasaiseen tilaan luovuttaen ylimääräisen energian, josta muodostuu fotoni.

Syntyneen fotonin tärkeät tunnusmerkit ovat identtinen aallonpituus, vaihe ja suunta kuin jo olemassa olevalla fotonilla. Fotoni, joka käynnisti reaktion, ei ole absorboitunut, ja se jatkaa liikettään alkuperäisellä radallaan uuden fotonin kanssa. [4]

Eristämällä melkein mitä tahansa materiaalia tiettyyn tilaan, ja pommittamalla sitä energialla sellaisessa muodossa, että se absorboituu, jotakin tapahtuu yleensä aina. Yleensä tämä jokin on valon spontaani emissio ja lämmön syntyminen. Useimmat materiaalit muuttuvat ensin kuumuudesta punaiseksi ja sen jälkeen valkoiseksi sitä tahtia, kun energiaa lisätään niihin. [4]

Materiaalit, jotka pystyvät stimuloituaan emissioon ovat eteviä sen takia, että niissä on korkea energiataso, joka on metastabiili. Metastabiilissa tilassa atomi voi pitää korkean energiantilan pidempään ennen kuin se laukeaa spontaanisti. [4]

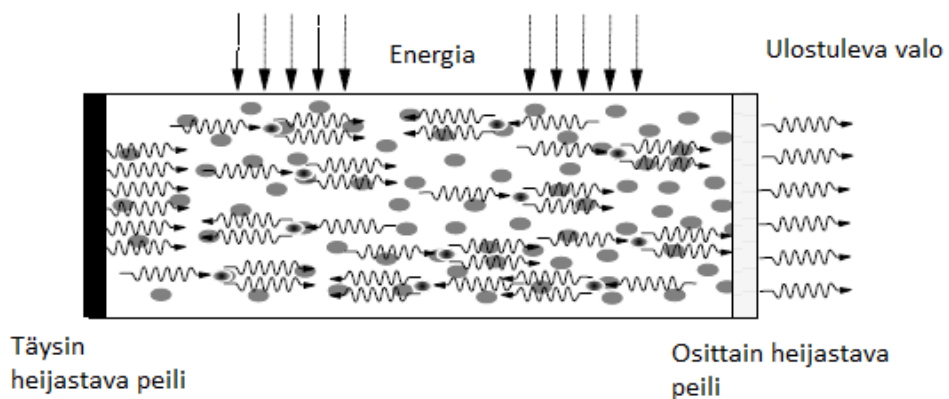
Stimuloidun emission aikaansaamiseksi tarvitaan myös toinen olosuhde tapahtuvaksi eli käänteisen miehityksen pitää tapahtua. Käänteinen miehitys tapahtuu, kun elektroneja on enemmän korkeassa energiatilassa kuin matalassa energiatilassa. Ilman tätä olosuhdetta stimuloitua emissiota ei tapahdu. [4]

#### 2.2.4 Käänteisen miehityksen merkitys

Käänteisen miehityksen tarve stimuloidulle emissiolle ei ole itsestään selvä. Korkeamman energiatilan elektronit käyvät läpi stimuloidun emission riippumatta siitä, kuinka monta elektronia on maapotentiaalissa. Ongelma on siinä, että maapotentiaalissa olevat elektronit absorboivat fotoneja juuri sillä aallonpituudella, millä elektronit korkeammalla energiatilalla käyvät lävitse stimuloitua emissiota. Pitää olla korkeampi mahdollisuus, että tapahtuu stimuloitu emissio kuin absorboituminen, jotta laseroituminen on mahdollista. Joten ei tarvita käänteistä numeroa elektroneja molemmissa tiloissa, vaan tarvitaan todennäköisyys, että tuleva fotoni kohtaa varautuneen elektronin ja, että stimuloitu emissio on todennäköisempää kuin maapotentiaalissa olevan elektronin kohtaaminen ja absorboituminen. Käänteinen miehitys tapahtuu silloin, kun virittyneessä tilassa olevien elektronien määrä ylittää maapotentiaalissa olevien elektronien määrän. Tämä tapahtuu, kun on todennäköisempää, että tapahtuu stimuloitu emissio. [3, 4]

### 2.2.5 Laseroituminen

Paikka, jossa operaatio tapahtuu, on nimeltään kaviteetti ja se on kahden peilin välissä, ja tämä on esitetty kuvassa kolme. Kun energiaa lisätään, elektronit nousevat korkeammalle energiatilalle. Spontaani emissio alkaa tapahtua heti, kun elektronit saavuttavat korkeamman energiantilan. Suurin osa spontaanin emission synnyttämästä valosta ei mene lähellekään peilejä, vaan ne sammuvat kammiossa. Merkittäviä asioita ei ala tapahtumaan kuitenkaan ennen, kuin riittävä määrä elektroneja saapuu virittyneeseen tilaan ja käänteinen miehitys tapahtuu. Osa spontaanista emissiosta kuitenkin tuottaa fotoneja, jotka osuvat peileihin. Nämä fotonit heijastuvat takaisin materiaaliin, mutta näistäkin suurin osa sammuu nopeasti. Kuitenkin pieni osa fotoneista on juuri oikeassa kulmassa, ja heijastuvat takaisin samaa reittiä kuin ne tulivat. Fotonit yltävät vastapään peileihin, ja alkavat heijastua edestakaisin peilien välissä. Kun fotonit kimpoavat edestakaisin peileissä, ne ottavat yhteen virittäytyneiden elektronien kanssa. Saapuvat fotonit stimuloivat emission virittäytyneiden elektronien kanssa, jotka luovuttavat uuden fotonin. Nämä uudet fotonit ovat täysin samassa suunnassa, vaiheessa ja omaavat saman aallonpituuden kuin fotonit, jotka virittivät emission. Siispä nämä fotonit kimpoavat edestakaisin peilien välissä. Näin valon määrä peilien välissä kasvaa nopeasti, kunnes se hallitsee emissiota. [3,4]



Kuva 3 Laseroitumisen tapahtuminen. [4]

Valon pitää kuitenkin päästä ulos. Tämä tapahtuu siten, että toinen peili on vain osittain heijastava. Tietty määrä valosta pääsee ulos tämän peilin lävitse. Teho kasvaa todella nopeasti, kunnes lähtevän valon määrä tasoittuu siihen summaan, jolla energiaa pumpataan kavitettiin. Heijastuksen määrä, jota tarvitaan peileissä, on funktio vahvistuksen määrästä kavitteetissa. Kun jotkin laserit tarvitsevat ison heijastuksen, jopa 80 %, joillekin riittää pienempi määrä. Puolijohdelasereissa, joita käytetään tiedonsiirto tarkoituksissa, on tarkoituksellista antaa suhteellisen pieni heijastus liitoksessa, jonka muodostavat halkaistu loppupinta ja ilma, jotka muodostavat peilin. Tässä tapauksessa numeraalinen heijastuminen on noin 6 %. Kun laseroituminen on alkanut, suurin osa virittäytyneistä atomeista kohtaa stimuloivan fotonin ennen kuin ne ovat ehtineet purkautua spontaanisti. Joten spontaani emissio on vähentynyt huomattavasti, mutta ei kuitenkaan loppunut kokonaan. Suurin osa spontaanista emissiosta eli noin 99,9 % jättää kavitteen eikä vaikuta paljonkaan laseroitumiseen, koska se ei ole oikeassa suunnassa peilien suhteen. Kuitenkin pieni määrä spontaanista emissiosta sattuu olemaan oikeassa suunnassa peilien suhteen, ja aloittaa laseroitumisen. Tämä ylimääräinen laseroitumisen muoto on siis samassa suunnassa, mutta eri vaiheessa tuotetun valon kanssa. Tästä ei kuitenkaan koidu suurempaan haittaa tiedonsiirron lasereihin. Ilmiötä kutsutaan vahvistetuksi spontaaniksi emissioksi, ja se on kohinan lähteenä optisissa vahvistimissa. Se voi myös käynnistää muotohyppelyn joissakin lasereissa. [3, 4, 7]

Edellä oleva kuvaus on kovin yleistävä sen vuoksi, että laseroituminen voi tapahtua niin laajalla alueella eri materiaaleja ja olosuhteita. Laseroituminen voi tapahtua missä vain, jos on energiakuilu, jossa elektronien pitää hypätä tavoittaakseen stabiilin tilan. Laaja valikoima materiaaleja voi toteuttaa stimuloitun emission, eikä materiaalin olomuoto vaikuta laseroitumisen mahdollisuuteen. Kiinteät, nestemäiset ja kaasumaiset olotilat ovat kaikki käyttökelpoisia, eivätkä pelkästään vain atomit käy lävitse spontaania emissiota. Molekyylit omaavat monimutkaisia elektronikiertoratoja ja olomuotoja, ja niissä on eriäviä energiatasoja sekä laseroitumisen erityispiirteitä. Nämä tulevat



elementeistä, joista ne koostuvat. Myös ionit pystyvät toteuttamaan stimuloitun emission ja näitä voidaan käyttää lasereissa. [3, 7]

On tärkeää huomata, että laseroitumisessa syntyvän valon aallonpituus tulee täysin laseroivan materiaalin ominaisuuksista. Tähän voidaan vaikuttaa vain hieman, mutta materiaaleja, jotka saavat aikaan laserissa 800 nm:n aallonpituuden, ei ole mahdollista saada tuottamaan valoa 1300 nm:n aallonpituudella. [3,7]

### 2.2.6 Laserin käyttökohteet

Laserin keksimisen jälkeen sille on kehitetty paljon erilaisia käyttösovelluksia niin tieteellisessä, sotilaallisessa, kaupallisessa kuin lääketieteellisessäkin käytössä. Tätä on edesauttanut koherenttisuus, korkea monokromaattisuus, sekä kyky tavoittaa korkea teho. Lääketieteessä lasereita käytetään esimerkiksi, kirurgiassa, munuaiskivien hoidossa, silmäleikkauksissa ja hampaiden hoidossa. Teollisuudessa lasereita käytetään apuna leikkaamisessa, hitsaamisessa ja mittaamisessa. Sotilaallisessa käytössä lasereita käytetään kohteiden merkkaukseen, tähtäysapuna ja vaihtoehtona tutkalle. [3, 4]

## 2.3 LED

LED eli valodiodi on puolijohdekomponentti, joka säteilee valoa, kun sen läpi johdetaan sähköä. LEDejä käytetään useissa sovelluksissa kuten ilmaisivaloina monissa erilaisissa sovelluksissa ja nykyään niiden käyttö on lisääntynyt myös valaisinkäytössä. Ensimmäiset LEDit esiteltiin vuonna 1962, jolloin se oli vain himmeä punainen valo, mutta nykyään LEDejä on tarjolla niin näkyvänä, ultraviolettina kuin infrapuna aallonpituuksillakin. LED perustuu elektroluminenssi-ilmiöön. Toisin kuin lasereissa, LEDien valo ei ole koherenttia ja näin sen spektrin leveys on 30 – 60 nm:ä. [10]

### 2.3.1 LEDin historiaa

Henry Josep Round löysi elektroluminenssi-ilmiön vuonna 1907. Vuonna 1927, venäläinen Oleg Vladimirovich Losev raportoi, että hän oli luonut ensimmäisen

LEDin. Hänen löydöstään kirjoitettiin venäläisissä, englantilaisissa ja saksalaisissa tiedejulkaisuissa, mutta käyttöön keksintö ei kuitenkaan levinnyt muutamaankin vuosikymmeneen. Ensimmäisen näkyvän LEDin kehitti vuonna 1962 Nick Holonyak Jr., ja sen vuoksi häntä pidetään LEDin isänä. Ensimmäisiä LEDejä käytettiin 7-segmentin näytöissä, ja kalliimmissa laboratorio- ja elektroniikkatestisovelluksissa. Myöhemmin ne levisivät käytännönläheisiin sovelluksiin, kuten televisioihin, radioihin ja laskimiin. [11, 12]

### 2.3.2 LEDin rakenne ja toiminta

LED koostuu mikrosirusta joka on valmistettu puolijohdeesta, jota on seostettu epäpuhtauksilla, jotta voidaan luoda pn-liitos. Kuten diodeissa, sähkövirta virtaa helposti p-puolelta tai anodista n-puolelle tai katodiin, mutta ei vastakkaiseen suuntaan. Varauksenkantajat eli elektronit ja aukot kulkeutuvat liitokseen elektrodeista eri varauksella. Kun elektroni kohtaa aukon, tippuu se matalammalle energiatasolle ja vapauttaa energiaa josta muodostuu fotoni. Muodostuneen valon aallonpituuden ja värin muodostukseen vaikuttaa se, millainen on kaistanväli pn-liitoksessa, eli kuinka paljon energiaa mahtuu valenssikaistan ja konduktiokaistan väliin. Pii ja germanium diodeissa elektronit ja aukot uudelleenyhdistyvät säteilemättömällä siirtymisellä, joka tuottaa ei-optisen emission, koska nämä ovat epäsuoria materiaaleja ja fotoni ei pysty emittoimaan. [4]

### 2.3.3 Käyttökohteet

LEDejä käytetään nykyään paljon valaistuksessa, niitä voidaan käyttää ajoneuvo-, sisä-, ulko- ja esimerkiksi kasvivalaistuksessa. LEDien kestoikä voi olla yli 50 000 tuntia. LEDit ovat hyviä valaisimia kasvihuonekäytössä, koska niiden tuottamasta tehosta 75 % menee muuhun kuin valon tuottamiseen, tämä energia kuluu esimerkiksi lämmöksi. [13]

### 3 LASERTYYPPEJÄ

Lasereita on monia erilaisia tyyppjä, joiden toimintatapa eroaa toisistaan, kuten niiden käyttökohteetkin.

#### 3.1 Puolijohdelaser

Laserdiodi on laser, jonka aktiivisen vahvistavan väliaineen muodostaa puolijohde, joka on samanlainen kuin LEDeissä. Laserdiodi muodostetaan piristämällä ohutta kerrosta kristallipiikiekkoa. Piristyksen seurauksena muodostuu n-tyyppinen alue ja p-tyyppinen alue, joista muodostuu pn-liitos. Yleisin tällaisista lasereista on Fabry-Perot-laser, mutta ne tuottavat suhteellisen leveän spektrin eivätkä ole sopivia sovelluksissa, jotka vaativat koherentin vastaanoton tai aaltopituuden multipleksausta. Fabry-Perot-lasereita pystytään kuitenkin muokkaamaan lisäämällä kaviteettiin esimerkiksi ritilä, jonka avulla pystytään tuottamaan kapeampaa spektrin leveyttä. Näitä lasereita kutsutaan DFB- ja DBR-lasereiksi. [4]

#### 3.2 Kaasulaser

Kaasulasereissa sähköinen virta purkautuu sähköisen virran läpi ja tuottaa koherentin valon. Kaasulaser on tunnettu sen isosta tehosta. Kaasulaser oli ensimmäinen jatkuvanvalon laser ja lisäksi ensimmäinen laser, joka toimi periaatteella, jossa sähköinen energia muutetaan ulostulevaksi valoksi. Kaasulasereita käytetään yleisesti teollisuudessa metallien leikkaamiseen. Heikoimpia kaasulasereita käytetään myös arkisemmissä asioissa, kuten esimerkiksi helium-neonkaasulaseria kaupan kassan viivankoodinlukijana. Kaasulasereita ei yleisesti käytetä optisessa tiedonsiirrossa. On kuitenkin tilanteita, joissa niitä käytetään lähettiminä, kuten esimerkiksi ulkokäytössä, jossa on lyhyet etäisyydet ja näköyhteys lähettimen ja vastaanottimen välillä. [4]

### 3.3 Kemialliset laserit

Kemialliset laserit ovat lasereita, jotka saavat energiansa kemiallisesta reaktiosta. Kemiallisia lasereita käytetään teollisuudessa eri materiaalien leikkaamiseen ja poraamiseen, koska ne pystyvät saavuttamaan jatkuvan aallon ulostulon useiden megawattien teholla. [4]

### 3.4 Väriainelaserit

Väriainelaser käyttää aktiivisena laseroivana väliaineena orgaanista väriainetta, joka on yleensä nestemäistä. Aktiivista laseroivaa väliainetta kutsutaan värisaineeksi sen takia, koska se on kirkkaasti värjätty, eikä siksi että sitä käytettäisiin jonkin värjäämiseen. Väriainelasereita pystyään käyttämään laajemmalla aallonpituus alueella kuin kaasu- ja kiinteäolotilanlasereita. Tämän takia väriainelaserit ovat tarkoituksenmukaisia säädettäviin lasereihin ja pulssilasereihin. Korvaamalla väriaine toisenlaisella aineella on mahdollista muuttaa aallonpituutta samassa laserissa, mutta tämä voi vaatia kuitenkin optisten komponenttien vaihdon. Väriainelasereita käytetään muun muassa tatuointien poistossa. [4]

### 3.5 Kiinteän olomuodon laserit

Kiinteän olomuodon lasereissa vahvistavana laseroivana väliaineena käytetään kiinteän olomuodon omaavaa ainetta. Puolijohdelaserit käyttävät myös kiinteää ainetta väliaineena, mutta ne kuuluvat yleisesti katsoen eri luokkaan kuin kiinteän olomuodon laserit. Laseroivana väliaineena käytetään yleensä lasia tai kiteistä ainetta, jota on seostettu esimerkiksi erbiümilla. [4]

### 3.6 Vapaaelektronilaser

Vapaaelektronilasereissa ei tarvita ollenkaan atomeja, eli säteilyä ei saada aikaiseksi kaasun, nesteen tai kiinteän olomuodon laserien tavoin virittämällä elektronitiloja, vaan laseroitumiseen tarvitaan ainoastaan elektroneja. Vapaaelektronilaserissa käytetään sädettä elektroneja hiukkaskiihdyttimessä.

Elektronisäde kulkee magneettikentän lävitse sinimuotoista mutkittelevaa reittiä lähes valonnopeudella ohittaen oskillaattorin niin, että se luovuttaa fotoneja. Tätä siirtymistä pystytään stimuloimaan ja elektronisäde laseroituu. [4, 15]

## 4 LÄHETINKOMPONENTIT

On kahdenlaisia laitteita, joita käytetään valon tuottamiseen ja näitä ovat laserit ja LEDit. Tiedonsiirtojärjestelmissä lähetetään informaatiota lähettimestä vastaanottimeen. Tärkein näistä lähetintyypeistä on laser. Lähettimien tehtävänä on muuttaa sähköinen signaali valoksi ja syöttää se eteenpäin kuituun. Optinen lähetin hyväksyy sähköisen signaalin sisääntuloon, käsittelee signaalin ja moduloi sen optoelektroniseen laitteeseen, kuten LEDiin tai laserdiodiin luodakseen optisen signaalin, joka pystytään lähettämään eteenpäin. Tyypillisesti LED-lähetin toimii 850 – 1300 nm:n alueella, ja laser lähettää 1300 – 1500 nm:n alueella. [7, 8]

### 4.1 Valon tuottaminen

Yleisin näkökulma on, että on vain yksi keino tuottaa valoa, ja se on elektronin nopea tilan muutos korkeasta energialatauksesta matalampaan energialataukseen. Kun näin tapahtuu, pitää vapautuvan energian mennä jonnekin, ja usein se emittoituu valoksi. Tietenkin tämä tapahtuu oikeassa kontekstissa, erityisessä materiaalissa ja rakennelmassa. Valon emissio voi tapahtua spontaanisti, tai se voi olla toisen oikeassa energiassa olevan fotonin stimuloimaa. [3, 4]

Jotta stimuloitu ja spontaani emissio tapahtuisi, pitää elektroniin saada jostain energiaa, jotta se vaihtaisi tilaa matalalta tasolta korkealle energiatasolle. Tämä energia voi tulla monella eri tavalla:

- Lämpö on yksi yleisimmistä keinoista lisätä energiaa, jotta elektroni saataisiin korkeammalle energiatasolle. Useimmiten elektroni luovuttaa heti energiansa ja palaa takaisin matalammalle energiatasolle. Tämä on hehkulampun toimintaperiaate. [3, 4, 7]
- Sähköinen purkaus tapahtuu, kun sähkövirta johdetaan kaasun lävitse kuten neonin. Sähkövirran energia ionisoituu eli hajottaa kaasun kemialliset sidokset. Tämä prosessi injektoidaan energiaa kaasussa oleviin

elektroneihin, ja kun nämä elektronit regeneroituvat takaisin molekyyleiksi, ne luovuttavat energian valon muodossa. [3, 4, 7]

- Sähkövirta on eri kuin sähköinen purkaus. Tätä tapahtuu niin lasereissa kuin LEDeissä. Sähkövirta, joka johdetaan puolijohde pn-liitokseen, vaatii että elektronit ja aukot muodostuvat uudelleen liitoksessa. Tämän uudelleen muodostumisen johdosta elektronit siirtyvät korkean energian konduktiokaistalta matalammalle ja stabiilimmalle valenssikaistalle. Tämä johtaa joko spontaaniin emissioon tai laseroitumiseen riippuen siitä, miten laite on rakennettu. [3, 4, 7]
- Kemiallinen reaktio voi johtaa valon syntymiseen. On useita kemiallisia reaktioita, jotka voivat johtaa valon emissioon ja nämä eivät aina tapahdu lämpenemisen kautta. Kemiallisessa reaktiossa atomit ja molekyylit uudelleen järjestyvät. Usein uudelleen järjestäytyminen johtaa siihen, että elektronit jäävät korkeampaan energiatasoon. Ylijäävä energia luovutetaan lämpönä, mutta se voidaan luovuttaa myös valona. [3, 4, 7]

## 4.2 Laser

Laser on periaatteessa optinen vahvistin ympäröitynä heijastavalla kaviteetilla, jonka ansiosta laser oskilloi positiivisella takaisinkytkennällä. Puolijohdelaserit käyttävät aktiivisena laseroivana väliaineena puolijohdeita, kun taas kuitulaserit käyttävät erbijum seostettua kuitua laseroivana väliaineena. Puolijohdelaserit ovat kaikista eniten käytössä valonlähteinä optisissa tiedonsiirtojärjestelmissä. Ne ovat kompakteja ja yleensä vain muutaman sadan mikrometrin kokoisia. Koska ne ovat käytännössä vain pn-liitoksia, niitä pystytään valmistamaan isoja määriä, käyttämällä kehittyntä integroitua puolijohdeteknologiaa. Toinen etu on, että niissä ei tarvita optista pumppausta, kuten kuitulasereissa. Itse asiassa kuitulaser käyttää tyypillisesti puolijohdelaseria pumppuna. Puolijohdelaserit ovat erittäin tehokkaita muuntamaan sisään tulevan sähköisen energian ulosmeneväksi optiseksi energiaksi. [3, 4, 8, 9]

Sekä puolijohde että erbijumkuitulaserit pystyvät saavuttamaan suuret ulosmenotehot, jotka ovat tyypillisesti 0 ja 20 dBm:n välissä. Kuitenkin

puolijohdelaserit, joita käytetään WDM lähteissä, omaavat ulosmenon 0 ja 10 dBm:n välillä. Kuitulasereita käytetään yleensä erittäin lyhyiden jaksollisten pulssijonojen tuottamiseen, käyttämällä muotolukitus tekniikkaa. [9]

#### 4.2.1 Laserlähettimien parametrit

Tutkimuksilla on kehitetty suuri määrä erilaisia tiedonsiirtolasereita. Tärkeimmät yksityiskohdat tiedonsiirtolasereissa ovat spektrin leveys, viivaleveys, koherenssipituus ja -aika, teho, toiminta kaistanleveys, taajuusstabiliteetti, modulaatiomenetelmä sekä säätöala ja nopeus.

Edes yksinkertaisimmat puolijohdelaserit eivät tuota pelkästään yhden aallonpituuden valoa. Ne tuottavat valikoiman aallonpituuksia, ja tätä ominaisuutta kutsutaan laserin spektrin leveydeksi. Vaikka tämä vaikuttaa, että se olisi vastoin laseroitumisen periaatetta, niin ei se ole. Puolijohdelaserissa peilitettyä kaviteettia käytetään valon luomiseen. Mekaanisen välttämättömyyden takia kaviteetti on tarpeeksi pitkä, jotta voitaisiin tuottaa useampia aallonpituuksia. Tyypillisesti on mahdollisuus kahdeksaan muotoon ja tuolloin spektrin leveys on 6 nm – 8 nm. Eri aallonpituuksia ei tuoteta samanaikaisesti, vaan laser tekee ensin muutaman nanosekunnin ajan yhtä hallitsevaa muotoa, vaihtaa sen jälkeen toiseen ja sen jälkeen taas uuteen muotoon ja niin edelleen. Ulostulon teho ei vaihtelee, vaan ainoastaan ulostulon muoto. [4]

Lasereissa ja LEDeissä teho, joka esitetään spektrikuviossa, muistuttaa kuvana soittokelloa, joten on vaikea päättää, mistä käyrä alkaa ja mihin se loppuu. Tämän vuoksi spektri leveyttä kutsutaan usein puoliarvioleveydeksi eli FWHM:si. FWHM lasketaan pisteiden välissä käyrällä jotka sijoittuvat paikkaan jossa teho on laskenut puoleen huippuarvostaan. Tätä kutsutaan myös 3 dB:n pisteeksi. [4]



Spektrin leveys on tärkeää, koska:

- Mitä leveämpi valon lähteen spektri on, sitä enemmän dispersiota signaali kärsii kulkiessaan kuidussa. Dispersio ei ole yhtä suuri ongelma lasereille, kuin mitä se on LEDeille. [4]
- WDM:ssä yritetään pakata kanavat mahdollisimman lähelle toisiaan, jotta voitaisiin maksimoida kanavien määrä. Mitä kapeampi spektrin leveys on, sitä enemmän mahtuu kanavia. [4]
- Ei ole mahdollista käyttää taajuus- tai vaihemodulaatiotekniikoita ja koherenttia ilmaisua, mikäli linjanleveys ei ole huomattavasti kapeampi kuin moduloitavan signaalin kaistanleveys. Näiden modulaatiomenetelmien käyttö on kuitenkin vähentynyt. Käyttämällä kuituvahvistimia tavalliset pin-diodi vastaanottimet, jotka käyttävät on-off avainnusta pystyvät samaan suorituskykyyn kuin koherentit ilmaisukeinot. Tämä saavutetaan uudelleen vahvistamalla signaali juuri ennen vastaanottoa. [4]
- Hyvin kapeat spektrileveydet ovat alttiita useille ei-linearisille ilmiöille, joita ei haluta esiintyvän. Yksi tällaisista on stimuloitu Brillouin sironta. [4]

Puolijohdelaserit eivät tuota jatkuvaa aallonpituusaluetta koko spektrin leveydelle, vaan ne tuottavat sarjan viivoja diskreetteinä aallonpituuksina. Viivojen leveydet vaihtelevat sen mukaan, minkälainen laser on käytössä. Viivaleveys on käänteisesti verrannollinen laserin koherenssi pituuteen. [4]

Tietty laserin viiva emittoituu vain tietyllä aallonpituudella vastaten vain tiettyyn muotoon laserin kaviteetissa. Ajan myötä aallonpituus vaihtelee keskusaallonpituuden ympärillä, ja tämän vaihtelun määrä on viivaleveys. Jos emission näytteellä, joka otetaan tietyllä ajanhetkellä laserista, on sama aallonpituus ja vaihe kuin näytteellä, joka otetaan myöhemmin samasta laserista, silloin laser on koherentti tuon ajan suhteen. Aika, jonka koherenssi

säilyy, on nimeltään koherenssiaika, ja matka, jonka valo matkustaa tuossa ajassa tyhjiössä, on nimeltään koherenssipituus. [4]

LEDin koherenssiaika on noin 0,5 ps ja koherenssipituus 150  $\mu\text{m}$ . Yksinkertaisella laserilla koherenssiaika on noin 0,5 ns, ja matka, jonka se matkustaa tuossa ajassa on 15 cm. Hyvätasoinen kapean kaistanleveyden omaava laser voi omata koherenssiajan, joka on kestoaltaan muutaman mikrosekunnin, ja koherenssipituuden, joka on 200 m. [4]

Lähetetty signaali heikkenee matkatessaan kuidussa. Siksi mitä voimakkaampi signaali on, sitä pidemmälle se pääsee ilman, että sitä tarvitsee regeneroida eli uudistaa. Tämän lisäksi optinen vastaanotin tarvitsee tietyn minimimäärän tehoa jokaista vastaanotettua bittiä kohden. Mikäli bittinopeuden haluaa tuplata, pitää myös tuplata teho tai säätää vastaanottimen herkkyyttä. Lähettimissä on ylärajat lähetettävälle teholle niin kuin vastaanottimissa on ylärajat herkkyuden säädölle. On mahdollista myös saada korkeampi bittinopeus vähentämällä vaimennusta, ja tällä tavalla lisäämällä signaalin tehoa vastaanottimessa. Joissakin tapauksissa signaalin teho on rajaavampi tekijä rakennelmalle kuin kuidun kapasiteetti. [4]

Laserin pitää myös pystyä toimimaan tarkoituksenmukaisilla aallonpituuksilla, joihin rakennelma on suunniteltu. Laserin operointi aallonpituus riippuu siitä, mitä materiaaleja on käytetty laseroitumiseen ja laserin kaviteetin rakennelmasta. Tätä kutsutaan toimintakaistanleveydeksi. [4]

Yksikaistaisessa systeemissä, jossa käytetään hajanaista ilmaisua, epävakaus laserin aallonpituudessa ei haittaa. WDM-tekniikkaa käyttävien laserien pitää kuitenkin pysyä niille osoitetulla kaistalla ja vaeltamisesta on todellista haittaa. Fabry-Perot-laserit varioivat 0,4 nm / 1 °C muutosta kohti. Yksimuotolaserit ovat parempia tämän suhteen, mutta lämmön kontrollointi on silti tärkeää. OOK-modulaatiota käyttävät laserit päästävät viserryksen ennen jokaista pulssia. [4]

Keskeisenä toimintaperiaatteena laserille on käytettävät modulaatiomenetelmät ja se kuinka nopeasti ne toimivat. Kaikki laserit toimivat OOK-moduloinnilla ja

jotkin FSK:lla, mutta muut modulaatiomenetelmät vaativat ulkoisen modulaattorin sen jälkeen, kun valo on luotu. [4]

WDM-menetelmissä, lähettimissä ja vastaanottimissa on tarve vaihtaa useiden kaistanleveyksien välillä. On useita eri tekniikoita toteuttaa tämä vaihto, mutta mitä nopeammin tuon vaihdon pystyy tekemään, sitä kapeampi on kaista, millä laite pystyy operoimaan. Siksi laserin säätöala ja nopeus ovat tärkeitä ominaisuuksia. [4]

### 4.3 Muoto

Optiikassa muoto on reitti, jota pitkin valo etenee systeemin läpi. Monimuotokuidussa kuitu mahdollistaa valolle useamman reitin kulkea. Monimuotolaser mahdollistaa useita reittejä valolle sen kaviteetissa ja näin tuottaa useita aallonpituuksia. Nämä laserit eivät kuitenkaan tuota useita aallonpituuksia samanaikaisesti jatkuvalla virralla, vaan vaihtavat tehon muodosta toiseen nopealla tahdilla näennäisesti sattumanvaraisesti, kun ne lähettävät yhtä pulssia. Valo, joka tuotetaan monimuotolasereissa, ei ole monimuotoistavaloa, ja tämä valo kulkee yksimuotoisena yksimuotokuidussakin erinomaisesti. [4]

### 4.4 Fabry-Perot-laserit

Fabry-Perot-laser on käsitteellisesti vain LED, jossa on peilipari. Peilejä tarvitaan, jotta saadaan aikaan oikeat olosuhteet laseroitumisen tapahtumiseksi. Fabry-Perot-laser saa nimensä ja toimintaperiaatteensa siitä, että sen kaviteetti toimii, kuten Fabry-Perot-resonaattori. Kuvassa neljä oleva Fabry-Perot-suodatin toimii siten, että valo pääsee kaviteettiin osittain heijastavasta peilistä, esimerkiksi vasemmalta ja poistuu toisesta osittain heijastavasta peilistä oikealle. Ainoastaan aallonpituudet, jotka resonovat kaviteetissa pääsevät lävitse, ja muut aallonpituudet vaimenevat voimakkaasti. Tämä johtuu siitä, että peilit on sijoitettu puolen aallonpituuden matkalle toisistaan. Tätä periaatetta käytetään muuten Fabry-Perot-lasereissa, mutta valo emittoituu kaviteetissa, eikä sitä tuoda sinne ulkopuolelta. Käytännössä kaikissa lasereissa on

samanlainen kaviteetti kuin Fabry-Perot-lasereissa. Mutta kun kaviteetti on huomattavasti pidempi kuin kyseessä oleva aallonpituus, silloin resonoituu useita lähekkäisiä aallonpituuksia. Näin jää tapahtumasta tärkeä Fabry-Perot-laserin filtterointi eli suodattaminen. Tuotetun aallonpituuden suhteessa peilien etäisyyden saa laskettua seuraavan kaavan avulla: [4]

$$Cl = \frac{\lambda * x}{2 * n}$$

Missä:  $\lambda$  = aallonpituus

$Cl$  = kaviteetin pituus

$x$  = satunnainen kokonaisluku: 1, 2, 3, 4...

$n$  = vahvistavan väliaineen taitekerroin

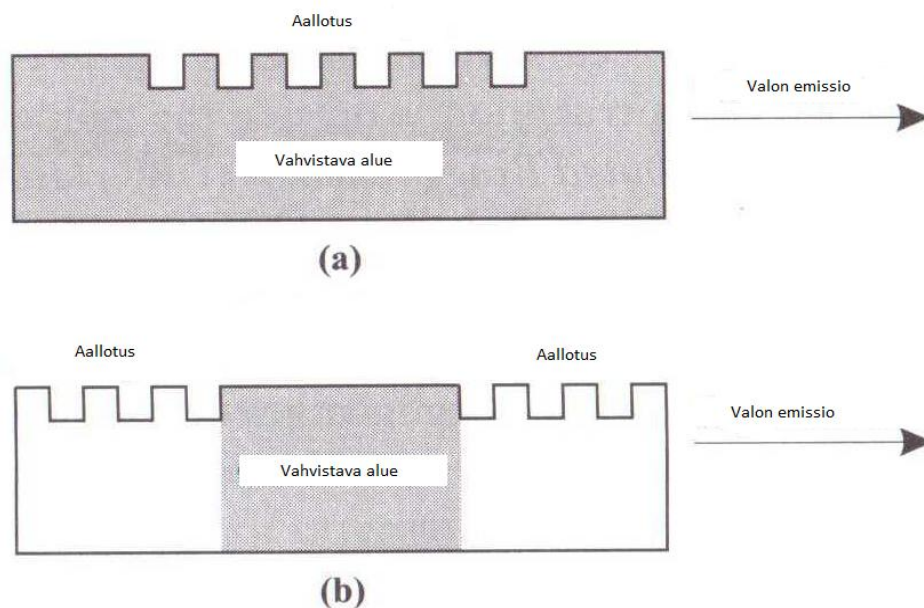


Kuva 4 Fabry-Perot-suodatin. [4]

#### 4.5 DFB-laser

Kun Fabry-Perot-lasereissa valon takaisinkytkentä tapahtuu kaviteetin lopussa heijastavissa päissä, DFB-lasereissa eli Distributed-Feedback-lasereissa valon takaisinkytkentä tapahtuu sarjassa lähekkäin kytkettyjä heijastimia. Yleisin keino saavuttaa tämä on tehdä jaksollista aaltomaista variaatiota kaviteetin leveyteen, kuten esitetään kuvassa viisi. Kuvassa viisi ylempi rakenne kuvaa DFB-laseria. Kaviteetin aallotetussa osassa kyseessä oleva valoalto käy lävitse sarjan heijastumia. Tämän seurauksena nämä heijastuvat aallot liittyvät alkuperäiseen aaltoon ja vahvistavat sitä. Syy tällaiseen käyttäytymiseen on sama kuin Fabry-Perot-laserin kaviteetissa. Tämän ilmiön nimi on Braggin ehto. Braggin ehto

täyttyy usealla aallonpituudella, mutta vahvin lähetetty aalto tapahtuu aallonpituudelle, jonka aallotettu jaksonaika on tasan puolet aallonpituudesta, toisin kuin jokin monikerta siitä. Tämä aallonpituus vahvistuu etuoikeutetusti muihin aallonpituuksiin verraten. Hyvällä suunnittelulla lähettimeen, tällaisella ilmiöllä pystytään vaimentamaan muut pituussuuntaiset muodot ja näin laser oskilloisi vain yhtä pituussuuntaista muotoa, jonka aallonpituus olisi tasan kaksi kertaa aallotettu jaksonaika. Muuttamalla aallotuksen jaksonaikaa pystytään saamaan ulostuloon erilaisia aallonpituuksia. Kaikkia lasereita, jotka käyttävät avukseen aallotettua aallonopastusta saadakseen aikaiseksi yhden pituussuuntaisen muodon voidaan kutsua DFB-lasereiksi, mutta tällöin aallotuksen pitää tapahtua kaviteetin vahvistavassa osassa. Kun aallotus tapahtuu vahvistavan alueen ulkopuolella, kutsutaan laseria hajautetuksi Braggin heijastimeksi eli DBR-lasereiksi. Kuvassa viisi alempi rakenne on DBR-laserin. DBR-laserin etu on se, että vahvistusalue on kytketty irti alueesta, jossa valitaan aallonpituus, koska näin on mahdollista kontrolloida molempia alueita erikseen. DFB-lasereita on vaikeampi valmistaa kuin Fabry-Perot-lasereita ja ne ovat huomattavasti kalliimpiakin, mutta DFB-lasereita tarvitaan melkein kaikissa korkean nopeuden järjestelmissä nykypäivänä. Heijastukset DFB-laseriin saavat sen aallonpituuden ja tehon heittelehtimään, joten laserin eteen asennetaan eriste materiaalia estämään heijastusten sisääntulo. [4, 9]



Kuva 5 DFB-laser ja DBR-laser. [9]

#### 4.6 External Cavity Lasers

External Cavity Lasers eli ulkoisen kaviteetin laser. Oskillaation tukahduttaminen useammalla kuin yhdellä pitkittäissuuntaisella muodolla voidaan tavoittaa myös lisäämällä laseriin toinen kaviteetti vahvistavan kaviteetin perään, jota kutsutaan ulkoiseksi kaviteetiksi. Tämä on esitetty kuvassa kuusi. Kuten, ensisijaisessa kaviteetissa on resonoituja aallonpituuksia, niin on myös ulkoisessa kaviteetissa. Tämä voidaan saavuttaa käyttämällä heijastavia päitä ulkoisessa kaviteetissa myös. Ulkoisen kaviteetin ansiosta on mahdollista, että laser oskilloi vain niillä aallonpituuksilla jotka ovat resonantteja sekä ensisijaisessa että ulkoisessa kaviteetissa. On mahdollista suunnitella molemmat kaviteetit niin, että taataan vain yksi aallonpituus vahvistavalla kaistanleveydellä näihin olosuhteisiin. Näin laseriin saadaan yhden pituussuunnan muoto. Ulkoisessa kaviteetissa ei tarvitse käyttää Fabry-Perot-kaviteettia, vaan voidaan käyttää diffraktio ritilää. Tällaista laseria kutsutaan ulkoisen ritilän kaviteetti laseriksi, ja laserin päähän, joka on ritilää vasten, on annettu heijastumisen estävä päällinen. Aallonpituudet, jotka heijastuvat takaisin diffraktio ritilästä määräytyvät ritilän kaltevuudesta. Ulkoisen kaviteetin laser yleensä rakentuu aallonpituudet valitsevasta peilistä eikä tasaisesta peilistä. Heijastavuus on määräävä funktio aallonpituudet valitsevassa peilissä, ja vain tietyt aallonpituudet käyvät läpi korkeat heijastukset ja pystyvät laseroitumaan. Yhden muodon laser pystytään tekemään, jos aallonpituudet valitseva peili valitaan hyvin. Ulkoisen kaviteetin lasereita ei pysty moduloimaan suoraan korkeilla nopeuksilla, koska kaviteetti on niin pitkä. [9]

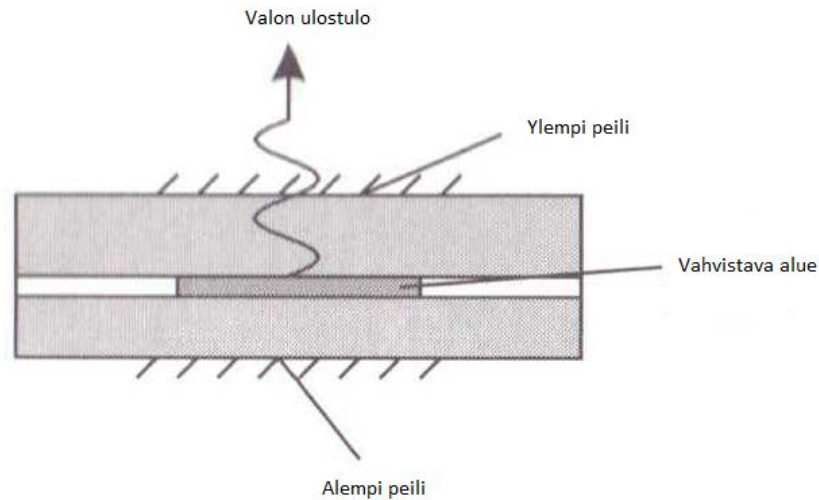


Kuva 6 Ulkoisen kaviteetin laserin rakenne. [9]

## 4.7 VCSEL

Vertical Cavity Surface-Emitting Laser eli pystysuunnan pintaemittiva laser on laser joka toimii vain yhdellä pitkittäissuuntaisella muodolla. Tekemällä kaviteetista mahdollisimman lyhyen on mahdollista saada aikaan, että vain yksi pituussuuntainen muoto ilmenee vahvistavalla kaistanleveydellä. On helpompaa tehdä erittäin ohut aktiivinen kerros, jos aktiivinen kerros on sijoitettu puolijohteen substraattiin. Tämä johtaa pystysuuntaiseen kaviteettiin, jossa peilit on sijoitettu ylä- ja alapuolelle puolijohdekierokkoon, kuten on esitetty kuvassa seitsemän. Laserin ulostulo tulee näin yleensä laserin yläpäähän. Koska vahvistava alue on hyvin lyhyt pituudeltaan, niin vaaditaan erittäin heijastavat peilit, jotta laserin oskillaatio tapahtuisi. Voimakkaasti heijastavat peilit on vaikea toteuttaa metallista, siksi käytetään pinkkaa vaihtelevia matala- ja korkeaindeksisiä eristeitä jotka heijastavat hyvin, mutta ovat aallonpituuden suhteen valitsevia. [9]

VCSELin ongelma on iso resistanssi, jonka sisään syötetty virta kohtaa. Resistanssi johtaa tuntuvaan lämpenemiseen, ja siksi laser tarvitsee tehokkaan tuulettimen. Monet eristemateriaaleista, joita käytetään peilien valmistamiseen omaavat matalan lämmönjohtokyvyn, siksi VCSELien käyttö huoneenlämmössä on ollut vaikeaa. Mutta viime vuosina uusia materiaaleja on kehitetty ja VCSELlejä on pystytty käyttämään 1,3  $\mu\text{m}$ :n aallonpituudella huoneenlämmössä. VCSELien etuja verrattaessa reunaemittiviin lasereihin on yksinkertaisempi ja tehokkaampi liitäntä kuituun, helpompi pakkaaminen ja testaaminen ja mahdollisuus integrointiin monimuotolaitteisiin. VCSELlejä, jotka toimivat 0,85  $\mu\text{m}$  on kaupallisessa käytössä, ja niitä käytetään matalahintaisissa ja lyhyen matkan monimuotokuituyhteyksissä. Yksimuotokuituyhteyksissä kaupallisella alalla käytetään 1,3  $\mu\text{m}$ :n VCSELlejä. [9]



Kuva 7 VCSEL-laserin rakenne. [9]

#### 4.8 Mode-Locked Lasers

Mode-locked lasers eli muotolukittuja lasereita käytetään, jotta voidaan tuottaa kapeita optisia pulsseja, joita tarvitaan korkean nopeuden TDM systeemeissä. Muotolukitseminen ei ole sama asia kuin pulssien tuottaminen käynnistämällä ja sammuttamalla laseria. On kaksi vaihtoehtoista keinoa muotolukitsemiselle: aktiivimuotolukitus ja passiivimuotolukitus. Passiivimuotolukituksessa pulssit tuotetaan väliaikana, joka säteellä kestää mennä peilistä peiliin vastaamaan kiertoaikaa laserin kaviteetissa. Puolijohdelasereissa kaviteetti on liian lyhyt tämän kaltaiseen pulssin luomiseen, mutta ulkoisen kaviteetin lasereissa ja kuitulasereissa kaviteetti on tarpeeksi pitkä muotolukittuihin pulsseihin hyvällä erottelulla. Näillä pystytään tuottamaan erittäin nopeat vuot pulsseja, joita tarvitaan OTDM systeemeissä. Passiivissa laitteessa substanssi on asetettu optisen takaisinkytkennän reitille, joka toimii saturoivana vaimentimena. Saturoiva vaimennin vaimentaa valon määrätulle maksimi arvolle. Matalilla valon tasoilla se vaimentaa kaiken tukehdutta laseroitumisen, mutta korkeilla valon tasoilla se saturoi ja päästää korkean intensiteetin pulssit läpi.



Aktiivimuotolukituksessa esimerkiksi Braggin kenno asetetaan valon reitille, ja tämä toimii sulkimena kaviteetissa. [4, 9]

#### 4.9 Säädettävät laserit

Säädettävät laserit ovat tarvittavia komponentteja WDM verkkoihin useasta syystä. DFB-laserit toimivat hyvin nykyajan laitteissa, mutta jokainen aallonpituus tarvitsee oman laserin, tämä johtaa siihen, että satakanavaisessa WDM systeemissä tarvitaan sata erilaista laseria. Tämä johtaisi niin tila kuin hinta ongelmiin, jotka säädettävä laser vie pois. Säädettävät laserit mahdollistavat myös optisten verkkojen uuskkoonpanon, koska ne mahdollistavat aallonpituuden valinnan. Toinen käyttökohde on verkoissa, joissa data tarvitsee siirtää paketti kerrallaan eri aallonpituudella. Säädettävät laserit ovat myös stabiileja useimmissa WDM laboratorioissa ja testiympäristöissä, joissa niitä käytetään erilaisten optisten laitteiden testaamiseen. Ideaalinen säädettävä laser on laite, jota voidaan säätää nopeasti yli leveän jatkuvan säätöalueen joka on sata nanometriä. Sen pitää myös olla stabiili koko elinikänsä ja helposti kontrolloitava. [9]

Ulkoisen kaviteetin lasereita pystytään säätämään, jos ritilän keskusaallonpituutta tai muuta aallonpituutta valitsevaa peiliä pystytään vaihtamaan. Aallonpituuden, jonka ritilä valitsee heijastukseen vahvistavaan kaviteettiin määrää ritilän kaltevuus ja etäisyys kaviteetista. Joten muuttamalla ritilän kaltevuutta ja etäisyyttä vahvistavasta kaviteetista laserin aallonpituutta pystytään säätämään. Tämä on hidas operaatio, koska ritilän kulmaa säädetään mekaanisesti. Tämän kaltainen säätäminen on hyvä keino testauslaitteissa, mutta ei valonlähteissä kommunikaatiolaitteissa. [9]

Kuten aiemmin käsiteltiin, VCSEL-lasereissa haasteena on 1,55  $\mu\text{m}$ :n aallonpituudella saada riittävä kaviteetti, saada korkeasti heijastavat peilit, käsitellä lämpöhukka ja saada laser toimimaan yhdellä pituusmuodolla. Tähän on ratkaisuna kehitetty keino, jolla ylempi peili korvataan mikro elektromekaanisella kalvolla. Kaviteetin pituutta voidaan säätää liikuttamalla ylempää peiliä kytkemällä jännitettä läpi ylemmältä peililtä alemmalle. Ylempi

peili on kaareva, jotta estetään säteen pääsemistä pois kaviteetista, joka johtaa parempaan stabiliteettiin laseroitumisessa. Lämmön johtamiseksi pois alemmasta peilistä, siihen on kaiverrettu reikä indiumfosfori substraattiin. [9]

Tavanomainen DRB-laser koostuu yhdestä vahvistavasta alueesta, jota kontrolloidaan syöttämällä myötäsuuntaan biasoitunutta virtaa. Vaihtamalla tätä virtaa voidaan säätää ainoastaan ulostulon tehoa, mutta ei aallonpituutta. Rakennelmaa voidaan muokata lisäämällä toinen elektrodi, joka syöttää erillistä virtaa Braggin alueelle, joka on kytketty irti vahvistavasta alueesta. Tämänlainen rakennelma mahdollistaa aallonpituuden hallinnan ilman, että muutetaan ulostulon tehoa. Säädetävissä DRB-laserissa on useita lähekkäin asetettuja kaviteettimuotoja, jotka vastaavat kaviteetin pituuteen, joista yksi, joka laseroi, vastaa aallonpituuden huippuun Braggin ristikossa. Aallonpituuden huippua ristikossa vaihdellaan vaihtelemalla virtaa, ja laser loikkii yhdestä kaviteetista toiseen. Kun virta vaihtelee, vaihtelee myös Braggin aallonpituus ja näin vaihtelee laserin aallonpituus. Jos halutaan jatkuvaa säätämistä koko aallonpituuden toimintasäteelle, voidaan lisätä kolmas kaviteetti, johon syötetään omaa virtaa. [9]

#### 4.10 Kuitulaser

Kuitulaser on laser, jonka vahvistava väliaine on sisällä kuidussa ja sitä piristetään harvinaisilla maa-aineilla, kuten erbiumilla ja ytterbiumilla. Kuidun epälineaarisuudet, kuten stimuloitu Raman sironta vahvistavat sädettä laserissa. Laserin peilit valmistetaan usein kuidun sisällä olevina Braggin ritilöinä, koska niissä aallonpituus valikoituu luonnostaan. Laserin valo pumpataan erbiumille aallonpituudella 980 nm tai 1480 nm, koska se on aktiiviselle vahvistavalle väliaineelle sopiva aallonpituus laseroitumiseen. Kuitulaserin etu on korkea teho, joka voi olla jopa 50 mW, joka on huomattavasti enemmän kuin puolijohdelasereilla voi saada. [4]

#### 4.11 LED

Laserit ovat kalliita laitteita, eivätkä ne ole siis kustannussyistä järkeviä monissa laitteissa, joissa datanopeudet ovat vähäisiä ja matka on lyhyt. Tällaisissa tapauksissa LEDit tarjoavat halvemman vaihtoehdon. LED on myötäsuntaan biasoitu pn-liitos, joka tarkoittaa sitä, että sähköisyys virtaa vain eteenpäin. Uudelleen yhdistelemällä injektoituja kuljettajia, elektroneja p-tyypin alueella ja aukkoja n-tyypin alueella, spontaani emissio tuottaa valon. Epätoivottu ei-emissoiva uudelleenyhdistyminen on myös mahdollista, ja se on tärkeä tekijä, joka vaikuttaa LEDin toimintaan. Koska spontaani emissio tapahtuu koko kaistanleveydellä vahvistavalla väliaineella, LEDillä valon ulostulo tapahtuu leveällä kaistalla toisin kuin laserilla. LED voidaan ajatella laserina, jonka peilit eivät ole kovinkaan heijastavat. Jos LEDiin lisää pumpun, sen virta vain tehostaa spontaania emissiota, eikä ole mahdollista rakentaa stimuloitua emissiota, koska peilit heijastavat huonosti. Tästä syystä LEDit eivät pysty tuottamaan korkeita ulostulotehoja, kuten laserit ja tyypilliset tehot ovat luokkaa -20 dBm. LEDejä ei pysty moduloimaan suoraan korkeimmilla datanopeuksilla kuin muutamaa sata megabittiä sekuntia kohden. [9]

Joissakin matalan nopeuksien, pienen budjetin sovelluksissa on vaatimuksena lähteelle kapea spektrin leveys. DFB-laserit tuottavat kapean kaistan, mutta saattavat olla liian kalliita tällaisiin sovelluksiin. Tällaisissa tapauksissa LED-viipalointi tulee halvemmaksi vaihtoehdoksi. LED-viipaloinnissa kapeaulostuloinen optinen kuitu asetetaan LEDin eteen. [9]

## 5 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tarkastella laserien ja LEDien käyttöä optisessa tiedonsiirrossa. Lisäksi selvitettiin laserien ja LEDien ominaisuuksia, rakenteita ja niiden muita käyttökohteita. Opinnäytetyössä suoritettu tarkastelu osoitti, että lasereita on monenlaisia ja niitä pystytään hyödyntämään nykyään esimerkiksi lääke- ja sotilasteollisuudessa. Tässä työssä perehdyttiin enemmän lasereihin, koska ne ovat edelleen suositumpi ja yleisempi vaihtoehto optisissa lähettimissä kuin LEDit. Myös LEDien käyttö on viime aikoina yleistynyt, ja nykyään niitä käytetään niin valaisimissa kuin televisioissakin. LEDejä käsiteltiin enemmän yleisellä tasolla, mutta niistäkin selvitettiin toimintaperiaatteet ja käyttökohteet.

Tämä opinnäytetyö kokoaa yhteen tietopaketin lasereista ja LEDeistä, ja sitä voi hyödyntää, esimerkiksi tiedonlähteenä tai käyttää apuna lasereihin ja LEDeihin liittyvässä tiedonhaussa.

Jatkossa olisi hyödyllistä tutkia konkreettisemmin, miten lasereita ja LEDejä hyödynnetään laajemmin teollisuudessa.

## LÄHTEET

- [1] Hecht, J. "A Short History of Fiber Optics". [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.sff.net/people/Jeff.Hecht/history.html> (luettu 28.3.2012)
- [2] Hranilovic, S. 2005. Wireless Optical Communication Systems. Boston: Springer Science+Business Media, Inc.
- [3] Milonni, P. & Eberly, J. 2010. Laser Physics. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [4] Dutton, H. 1998. Understanding Optical Communications. North Carolina: IBM Redbooks.
- [5] LaserFest. 2012. "Early history". [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.laserfest.org/lasers/history/early.cfm> (luettu 28.3.2012)
- [6] Koechner, W. 2006. Solid-State Laser Engineering. 6<sup>th</sup> edition. New York: Springer Science+Business Media, Inc.
- [7] Thys, M. & Desmet, E. 2011. Laser Beams: Theory, Properties and Applications. New York: Nova Science Publishers, Inc.
- [8] Kuusivaara, J. "Optiikan käyttö tiedonsiirtotekniikassa". [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38116/1997/esitelmat/41712j/> (luettu 19.4.2012)
- [9] Ramaswami, R. & Sivarajan, K. 2002. Optical Networks: A Practical Perspective. Second edition. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- [10] Csele, M. 2004. Fundamentals of Light Sources and Lasers. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [11] Zheludev, N. "The life and times of the LED – a 100-year history". Nature photonics. Vol. 1, s.189–192, 2007. Saatavilla: <http://www.nanophotonics.org.uk/niz/publications/zheludev-2007-ltl.pdf> (luettu 4.5.2012)
- [12] Bush, S. 2010. "50 year history of the LED". [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.electronicweeky.com/Articles/18/02/2011/49501/50-year-history-of-the-LED.html> (luettu 9.5.2012)
- [13] Lumilab. 2012. "LED-teknologia". [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.lumilab.fi/index.php/fi/yritys/led-teknologia> (luettu 20.5.2012)
- [14] Lakkasuo. 2010. "Laserin rakenne". [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lasercons.svg> (luettu 20.5.2012)
- [15] European XFEL. 2012. "The principle of a free-electron laser" [www-dokumentti]. Saatavilla: [http://www.xfel.eu/overview/how\\_does\\_it\\_work/](http://www.xfel.eu/overview/how_does_it_work/) (luettu 5.6.2012)