

Laserit

Rami Keskinarkaus
LuK-tutkielma
Fysiikan tutkinto-ohjelma
Oulun yliopisto
Kevät 2023

Sisällysluettelo

1	Johdanto	3
2	Laserien toiminta	5
2.1	Atomien elektronien siirtymät ja energiatasot	5
2.2	Molekyyliden energiatilat	5
2.3	Stimuloitu emissio	7
2.4	Miehitysinversio	8
2.5	Optinen resonanssiontelo	9
2.6	Laservalon ominaisuudet	10
3	Lasertyypit	11
3.1	Puolijohdelaserit	11
3.2	Kiinteän aineen laserit	13
3.3	Nestelaserit	14
3.4	Kaasulaserit	15
3.4.1	Kaasuatomilaserit	15
3.4.2	Kaasumolekyylilaserit	16
3.4.3	Excimer-laserit	16
3.4.4	Kemialliset laserit	17
3.5	Vapaaelektronilaserit	17
4	Laserit osana tieteellistä tutkimusta	19
4.1	Gravitaatioaaltojen havaitseminen	19
4.2	Laserspektroskopia	20
4.3	Laserjäähdytys	20
4.4	Optiset pinsetit	21
5	Yhteenveto	21
6	Lähteet	22

1 Johdanto

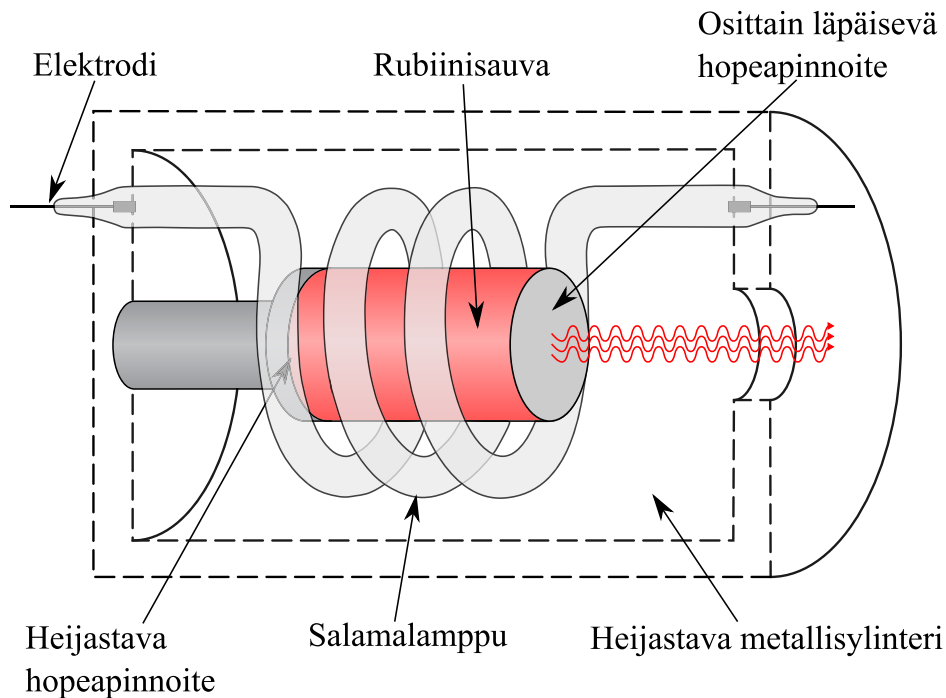
Sana “laser” on akronyymi sanoista “Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation” (“valon vahvistaminen säteilyn stimuloidulla emissiolla”). Laser on siis valon vahvistamiseen ja suuntaamiseen kehitetty laite, jolla pystytään tuottamaan vain yhdestä hyvin kapeasta aallonpituusalueesta koostuvaa ja pienelle alueelle kohdistuvaa valoa. Usein lasereiksi kutsutaan myös laitteita, jotka vahvistavat näkyvän valon aallonpituusalueen ulkopuolella olevia infrapuna-, ultravioletti- ja röntgenaallonpituuksia. Lasereiksi voidaan kuitenkin yleisesti kutsua laitteita, joiden tuottaman säteilyn aallonpituudet ovat optisella alueella, eli aallonpituuksien 10 nm ja 1 mm välillä[1]. Sanaa laser käytetään yleisesti myös kuvaamaan laservaloa tuottavaa prosessia.

Albert Einstein määritteli laserin toiminnan periaatteen vuonna 1916, kun hän esitti teorian sähkömagneettisen säteilyn stimuloidusta emissiosta sen jälkeen, kun Max Planck oli keksinyt kvanttiteorian vuonna 1900. Saksalainen atomifyysikko Rudolph Landenburg määritteli teoreettisen kuvauksen stimuloidusta emissiosta ja negatiivisesta absorptiosta vuonna 1928, minkä jälkeen Willis Lamb ja Robert Rutherford havaitsivat stimuloidun emissioon kokeellisesti vuonna 1947.[2–4]

Yhdysvaltalainen fyysikko Charles Townes huomasi vuonna 1951, että stimuloidulla emissiolla olisi mahdollista saada aikaan kirkasta suunnattua valoa. Hän keksi, ettei atomien ja molekyylien tarvitse noudattaa termodynamiikkaa, vaan atomeita tai molekyyliä voidaan virittää siten, että korkeammalla energiatasolla on enemmän atomeja tai molekyyliä kuin matalammalla energiatasolla. Vuonna 1953 Townes, James Gordon ja Herbert Zeiger onnistuivat kehittämään mikroaaltoihin perustuvan maserin, joka on lyhenne sanoista “Microwave Amplification by the Stimulated Emission of Radiation” (“mikroaaltojen vahvistaminen säteilyn stimuloidulla emissiolla”).[2]

Ensimmäisen toimivan laserin kehitti yhdysvaltalainen insinööri ja fyysikko Theodore Maiman vuonna 1960. Hän oli muodostanut teorian, jonka mukaan synteettisen rubiinin avulla voisi luoda laservaloa. Hän päätti testata teoriaa suunnittelemalla uudenlaisen ja yksinkertaisen mallin, jonka tarkoituksena oli saada aikaan punaisesta aallonpituudesta koostuvia lyhytkestoisia laserpulsseja. Kyseisen mallin rakenne on esitetty kuvassa 1.1. Siinä halkaisijaltaan noin 1 cm ja pituudeltaan noin 2 cm olevan synteettisen rubiinisauvan ympärillä on jousen muotoinen valokuvauksessa käytetty valkoista valoa tuottava ksenon salamaputki, joka on heijastavan metallisylinterin sisällä. Synteettinen rubiini koostuu alumiinioksidista (Al_2O_3), jota on seostettu kromilla (Cr). Tarkoituksena kokeessa oli, että lampun lähettämä säteily virittäisi rubiinin sisältämiä kromiatomeja, jolloin siitä emittoituisi punaista aallonpituutta olevia laserpulsseja. Laitteen toiminnan testaus toteutettiin valoherkällä putkella, joka muuttaa valon oskilloskoopin näytöltä havaittaviksi sähköpulsseiksi.[5]

Koetta suoritettaessa kävi kuitenkin ilmi, että rubiinisauvan emittoima fluoresenssivalo oli liian heikko. Maiman ratkaisi ongelman pinnoittamalla rubiinisauvan päät hopealla, ja



Kuva 1.1: Ensimmäinen laservaloa tuottava laite.[5]

tekemällä toisesta pinnoitteesta osittain valoa läpäisevän. Näiden pinnoitteiden avulla säteet saatiin heijastumaan useita kertoja rubiinisauvan sisällä, jolloin säteet vahvistuivat. Lampun jännitettä nostettiin alkuarvosta 500 V ylöspäin, jolloin rubiinisauvasta emittoituva valo kirkastui, ja kun jännite oli ylittänyt arvon 950 V, alkoi muodostua laserpulseja, jotka näkyivät oskilloskoopin näytöllä lyhyinä ja terävinä piikkeinä.[5]

Myöhemmin samana vuonna 1960 fyysikot Ali Javan ja William Bennett onnistuivat kehittämään ensimmäisen jatkuvaa laservaloa tuottavan helium-neon laserin. Tästä kaksi vuotta myöhemmin Robert Hall keksi ensimmäisen diodilaserin, joka oli valmistettu galliumarsenidista (GaAs) ja tuotti valoa aallonpituudella 850 nm. Tämän jälkeen on kehitetty lukuisia erilaisia ja eri aallonpituuksilla toimivia laservaloa tuottavia laitteistoja, joihin lukeutuvat muun muassa väriainelaserit, kemialliset laserit ja vapaaelektronilaserit.[4,6]

Laserista on tullut nopeasti tärkeä työkalu eri aloilla, kuten lääketieteessä, kemiassa, tekniikassa, teollisuudessa ja tietoliikenteessä. Erilaiset laserit ovat myös edesauttaneet tutkimusta esimerkiksi kvanttioptiikassa, materiaalitutkimuksessa, gravitaatioaaltojen havaitsemisessa, yleisen suhteellisuusteorian kokeissa sekä kosmologiassa.[2]

Tämän kandidaatintutkielman tarkoituksena on kuvata keskeisimmät fysikaaliset ilmiöt, joihin erilaisten lasereiden toiminta perustuu, sekä esitellä yleisimpien lasereiden toimintaperiaatteet. Lisäksi tutkielman lopussa esitellään lasereiden sovelluskohteita erityisesti tieteellisessä tutkimuksessa.

2 Laserien toiminta

Tässä luvussa käsitellään laserien toimintaan liittyvät keskeiset fysikaaliset ilmiöt, kuten väliaineen ja valon vuorovaikutuksesta aiheutuvat atomien ja molekyylien energiatilojen väliset siirtymät, stimuloitu emissio sekä laseroivan väliaineen miehitysinversio. Lisäksi esitellään laservalon ominaisuudet sekä optisen resonanssiontelon rakenne ja toimintaperiaate.

2.1 Atomien elektronien siirtymät ja energiatasot

Bohrin atomimallin mukaan atomin energia voi saada vain tiettyjä arvoja. Alinta energiatasoa kutsutaan perustasoksi ja tätä korkeammat energiatasot ovat virittyneitä energiatasoja, joiden energiat riippuvat atomin elektronirakenteesta. Näin ollen kaikilla saman alkuaineen erillisillä atomeilla on samat energiatasot, mutta energiatasot poikkeavat eri alkuaineiden välillä.[7]

Atomi voi virittyä korkeammalle energiatasolle, esimerkiksi törmäämällä kimmottomasti tai vuorovaikuttamalla tietyn taajuisen fotonin kanssa. Fotonin energia E riippuu säteilyn taajuudesta ν ja se voidaan määrittää yhtälöstä

$$E = h\nu, \quad (1)$$

missä h on Planckin vakio. Vain foton, jonka energia on atomin energiatasojen välisen erotuksen suuruinen, voi virittää atomin näiden energiatasojen välillä. Samalla foton absorboituu. Vastaavasti atomin virityksen purkautuessa vapautuu foton, jonka energia on sama kuin virityksen purkautumiseen liittyvä atomin sisäisen energian muutos.[7,8]

Perustilaa korkeammalle energiatilalle virittynyt atomi palaa takaisin perustilaan tai alemmalle viritystilalle tyypillisesti noin 10^{-8} sekunnin kuluttua. Jokin atomin viritystiloista voi kuitenkin olla laservalon muodostumisen kannalta merkittävä metastabiili viritystila, jolla atomi pysyy noin 10^{-3} sekuntia.[7]

2.2 Molekyylien energiatilat

Molekyylit koostuvat kahdesta tai useammasta atomista, minkä vuoksi niillä on elektronisten energiatilojen lisäksi molekyylin värähtelyyn ja rotaatioon liittyviä energiatiloja. Kuten atomien elektroniset energiatilat, myös molekyylien värähdys- ja rotaatioenergiatilat ovat kvantittuneet.[9]

Tarkastellaan yksinkertaista kaksiatomista molekyyliä, jonka rotaatioenergiatilat liittyvät molekyylin pyörimiseen massakeskipisteensä ympäri. Molekyylin rotaatioenergiatasot E_l saadaan määritettyä yhtälöstä

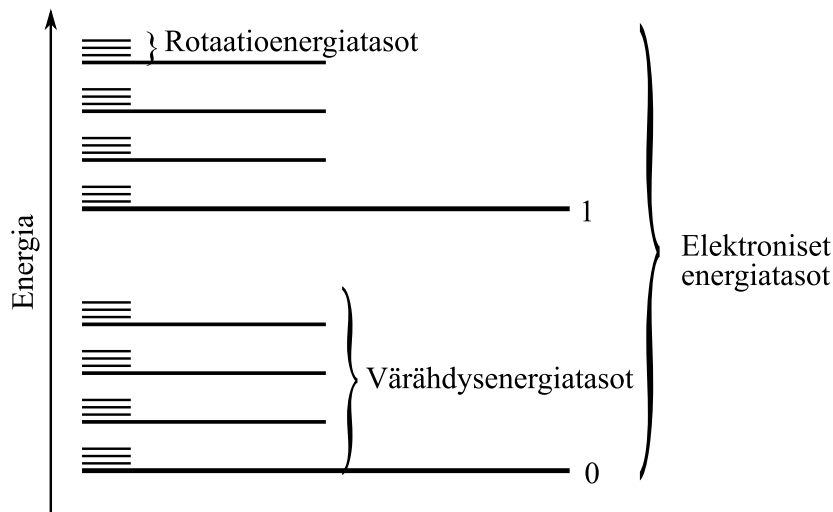
$$E_l = l(l+1) \frac{\hbar^2}{2I}, \quad l = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

missä l on rotaatiokvanttiluku, $\hbar = h/2\pi$ on redusoitu Planckin vakio ja I on molekyylin hitausmomentti massakeskipisteensä ympäri. Pyörimismäärän kvantittumisesta seuraa siis myös kaksiatomisen molekyylin rotaatioenergian kvantittuminen, ja kulmaliikemäärän säilyminen asettaa rajoituksia mahdollisille siirtymille eri energiatasojen välillä. Sallitut siirtymät noudattavat valintasääntöä, jonka mukaan kvanttiluvun l täytyy muuttua yhdellä, eli $\Delta l = \pm 1$. [7]

Pyörimisen lisäksi kaksiatomisen molekyylin atomit voivat lisäksi värähdellä tasapainoasemiensa ympärillä atomien välisen janan suuntaisesti. Pienillä värähdysliikkeillä palauttavan voiman voidaan olettaa olevan verrannollinen poikkeamaan tasapainopisteestä, jolloin systeemi on harmoninen värähtelijä. Kaksiatomisen molekyylin värähdysenergiatasot E_n saadaan yhtälöstä

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar\omega, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

missä n on värähdyskvanttiluku, $\hbar = h/2\pi$ on redusoitu Planckin vakio ja ω on värähtelyn kulmataajuus. [7]



Kuva 2.1: Energiatasokaavio hypoteettisen molekyylin mahdollisista energiatarjoista. [9]

Yleisesti molekyylin värähdysenergiatasojen väliset energiaerot ovat paljon pienempiä kuin atomin elektronisten energiatarjojen, mutta kuitenkin paljon suurempia kuin molekyylin rotaatioenergiatarjojen väliset energiaerot. Molekyylin energiatarjoja on havainnollistettu kuvan 2.1 energiatarjoissa. Kun yhtälön (2) mukainen rotaatioenergia ja yhtälön (3) värähdysenergia yhdistetään, saadaan energiatarjojen E_{nl} yhtälö

$$E_{nl} = l(l+1) \frac{\hbar^2}{2I} + \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar\omega, \quad (4)$$

mistä nähdään, että jokaista värähdyskvanttilukua n kohti on useita rotaatiokvanttiluvun l arvoja, jotka muodostavat sarjan lähekkäin sijaitsevia energiatarjoja. Värähdysenergiata-

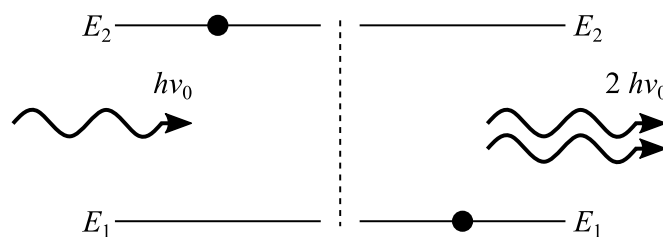
sot noudattavat valintasääntöä $\Delta n = \pm 1$. Tämä sääntö ei kuitenkaan päde elektronisten siirtymien tapauksessa.[7]

Kolmesta tai useammasta atomista muodostuvilla molekyyileillä on useita eri värähdysmoodeja, joista jokaisella on sen taajuuteen liittyvät energiatasot. Esimerkiksi hiilidioksidimolekyylillä (CO_2) on molekyyliisidosten taipumiseen, symmetriseen venymiseen ja epäsymmetriseen venymiseen liittyvät värähdysmoodit. Molekyyli voi siirtyä energiatasolta toiselle saman värähdysmoodin viritystilojen välillä tai myös eri värähdysmoodien energiatasojen välillä.[7]

2.3 Stimuloitu emissio

Atomi voi siirtyä energiatasolta toiselle vuorovaikuttamalla valon kanssa kolmella eri tavalla, jotka ovat fotonin absorptio, spontaani emissio ja stimuloitu emissio. Stimuloitu emissio on atomin energiatasoihin liittyvä prosessi, jossa virittyneessä tilassa E_2 olevaan atomiin osuva foton ei absorboidukaan, vaan aiheuttaa atomin virityksen purkautumisen, jolloin atomi siirtyy alemmalle energiatasolle E_1 . Tämä prosessi on esitetty kuvan 2.2 stimuloitun emission energiatasokaaviossa, jossa katkoviivan vasemmalla puolella on tilanne juuri ennen fotonin osumista virittyneeseen atomiin, ja oikealla on tilanne fotonin osumisen jälkeen. Atomiin osuvan fotonin energian E täytyy kuitenkin olla noin atomin energiatasojen välisen erotuksen suuruinen, eli $E = h\nu_0 \approx E_2 - E_1$, missä ν_0 on fotonin taajuus.[10, 11]

Stimuloitun emission seurauksena atomista vapautuva foton on energialtaan, suunnaltaan, vaiheeltaan sekä polarisaatioltaan identtinen atomiin osuneen fotonin kanssa. Näin ollen sähkömagneettisen kentän energia kasvaa yhdellä kvantilla $h\nu_0$, eli valo vahvistuu. Laserin tuottama valo on stimuloitua emissiota, joka on saanut alkunsa spontaanista emissiosta.[10, 11]



Kuva 2.2: Stimuloitu emissio.[10]

2.4 Miehitysinversio

Termodynaamisessa tasapainotilassa olevat aineen muodostavat atomit tai molekyylit noudattavat lämpötilasta riippuvaa Boltzmannin jakaumaa

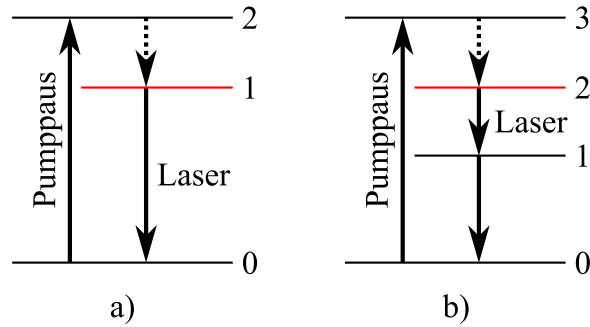
$$P_i = P_1 e^{-(E_i - E_1)/k_B T}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (5)$$

missä P_i on todennäköisyys, jolla atomi on tilassa E_i , P_1 on todennäköisyys, jolla atomi on tilassa E_1 , k_B on Boltzmannin vakio ja T on lämpötila. Boltzmannin jakauman mukaan alemmalla energiatasolla on enemmän atomeja tai molekyylejä kuin ylempillä energiatasolla. Tällöin stimuloitua absorptiota tapahtuu enemmän kuin stimuloitua emissiota, jolloin laservaloa ei muodostu.[10]

Lasereiden tapauksessa väliaineen atomien tai molekyyliden virittämistä kutsutaan yleisesti pumppaamiseksi, joka voidaan toteuttaa esimerkiksi optisesti, sähköisesti, kemiallisesti tai kaasun dynaamisella prosessilla. Laseroivaa väliainetta virittämällä on mahdollista saavuttaa tilanne, jossa ylempillä energiatasolla on enemmän atomeja tai molekyylejä kuin alemmalla energiatasolla. Tätä väliaineen tilaa kutsutaan miehitysinversioksi, jossa materiaali voi toimia säteilyn vahvistimena.[2, 10]

Miehitysinversion saavuttaminen vaatii laseroivalta väliaineelta vähintään kolme energiatailaa. Näistä energiatailoista lasersiirtymän alkutila on aina metastabiili, koska muuten miehitysinversiota ei saada aikaan. Atomi pysyy pidempään metastabiilissa viritystilassa kuin muissa viritystilassa, mikä mahdollistaa atomien siirtymisen tälle metastabiilille tilalle väliainetta pumppatessa. Esimerkiksi kuvan 2.3 mukaisissa kolmitasoisissa ja nelitasoisissa lasereissa atomit viritetään pumppausenergialla ylimmille energiatasoille 2 ja 3, joista ne siirtyvät nopeasti emittoimatta säteilyä seuraaville alemmille energiatasoille, jotka ovat merkittynä kuvassa punaisella.[12, 13]

Nelitasoinen laser on hyötysuhteeltaan parempi kuin kolmitasoinen laser, koska laservaloon liittyvä alempi energiataso ei ole atomin perustila. Näin ollen ylempi energiataso voidaan miehittää samalla, kun laserin alempi energiataso pysyy lähes tyhjänä, koska atomit siirtyvät spontaanisti alemmalta lasertasolta perustilalle. Tästä johtuen nelitasoisella laserilla pystytään tuottamaan jatkuvaa laservaloa.[2]



Kuva 2.3: a) Kolmitasaisen ja b) nelitasaisen laserin energiatasokaaviot.[14]

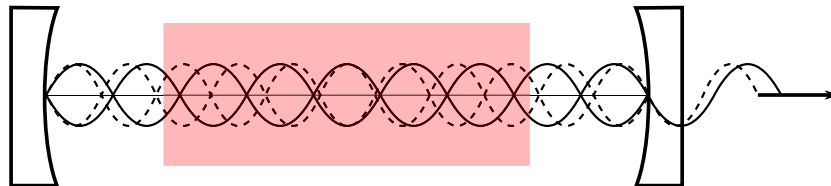
2.5 Optinen resonanssiontelo

Laservalon muodostumisen kannalta keskeinen elementti on optinen resonanssiontelo tai resonaattori, joista yksinkertaisin on Fabry-Pérot-ontelo, joka koostuu kahdesta vastakkain olevasta peilistä, joista toinen on osittain valoa läpäisevä. Optimaalinen peilin läpäisyaste, jolla laser toimii tehokkaimmin, riippuu lasertyypistä, mutta tyypillinen arvo on 1–50%. Peilit voivat olla joko tasopeilejä tai pallopeilejä. Varsinainen käyttökelpoinen lasersäde muodostuu, kun osa resonanssiontelon peilien välissä edestakaisin heijastuvasta säteilystä läpäisee osittain säteilyä läpäisevän peilin. Resonanssiontelo voi koostua myös kolmesta tai useammasta peilistä, jolloin valo heijastuu peileistä rengasmaisesti ja poistuu yhden osittain läpäisevän peilin kautta.[2,9,10]

Resonaattori ohjaa fotoneja edestakaisin laseroivassa väliaineessa, jolloin säteily vahvistuu käänteismiehitetyksen ja stimuloidun emission seurauksena. Resonanssiontelon optinen pituus määrittää seisovan aallon mahdolliset resonanssitaajuuudet ν_m , jotka voidaan määrittää yhtälöstä

$$\nu_m = m \frac{c}{2d}, \quad m = 1, 2, 3, \dots, \quad (6)$$

jossa c on valonnopeus ja d on resonanssiontelon optinen pituus eli peilien välinen etäisyys. Resonaattoriin muodostuu siis pitkittäisiä värähdysmoodeja, joissa solmukohdat ovat peilien kohdilla. Kuvassa 2.4 on esitetty kaksi pitkittäistä moodia.[10]



Kuva 2.4: Resonaattorin kaksi pitkittäistä moodia.[15]

Pitkittäisten moodien lisäksi pallopeilien muodostamassa resonaattorissa esiintyy poikit-

taisia irradianssikuvioita eli TEM-moodeja. TEM on lyhenne sanoista “Transverse Electric and Magnetic field”. Esiintyvät TEM-moodit riippuvat resonaattorin rakenteesta ja peilien pintojen muodoista. Perusmoodi on TEM₀₀-moodi, jossa on vain yksi säteilyvoimakkuuden huippu, jonka intensiteetti heikkenee eksponentiaalisesti reunoja kohti.[10]

Resonaattorin sisällä tapahtuu häviöitä, jotka aiheutuvat osittain läpäisevästä peilistä, optisista pinnoista sekä taitekertoimen epähomogeenisuudesta väliaineessa. Osa valosta siroaa väistämättä resonaattorin optisilla pinnoilla, vaikka ne olisivat kuinka sileitä tahansa. Häviötä aiheutuu myös diffraktiosta, kun laservalo poistuu resonaattorista. Yhteensä nämä muodostavat muutaman prosentin häviön useimpien jatkuvatoimisten resonaattoreiden tapauksessa.[9]

Laserpeilit ovat yleensä niin sanottuja Braggin peilejä, eli dielektrisiä peilejä, joissa lasi-substraatin päälle on asetettu vuorotellen korkean taitekertoimen ja matalan taitekertoimen materiaalikerroksia. Osa tulevasta säteilystä heijastuu jokaisesta rajapinnasta, ja kokonaisheijastuma riippuu näiden heijastusten vaihe-eroista. Jotta valon heijastuminen saadaan maksimoitua, jokaisen kerroksen täytyy olla juuri oikean paksuinen heijastuvan valon aallonpituuteen nähden. Siten tietyn kerroksen etupinnasta ja takapinnasta heijastuneet valonsäteet ovat samassa vaiheessa keskenään. Näin ollen resonaattori toimii fotonien suuntaamisen lisäksi myös taajuussuotimena, koska vain yhtälön (6) mukaiset taajuudet voivat muodostaa seisovan aallon resonanssionteloon.[9, 10]

2.6 Laservalon ominaisuudet

Laservalolla on samat ominaisuudet ja käyttäytyminen kuin tavallisella valolla, kuten valon aalto-hiukkanluonne, polarisaatio, optinen interferenssi ja eteneminen dielektrisessä väliaineessa. Sillä on kuitenkin tiettyjä erityispiirteitä, joita ei ole muista lähteistä peräisin olevalla valolla. Näitä ovat erityisesti laserilla tuotetun valon monokromaattisuus, suuntautuneisuus ja koherenttisuus.[9]

Laservalo on lähes monokromaattista, koska vain tietyn taajuinen laseroivasta väliaineesta riippuva sähkömagneettinen aalto voi vahvistua stimuloitun emission seurauksena. Lisäksi resonanssiontelo mahdollistaa vain tiettyjen resonanssiontelon pituuden määrittämien resonanssitajuuksien värähtelyn, minkä johdosta mahdolliset muut aallonpituudet suodatuvat pois. Käytännössä kuitenkin esimerkiksi mekaaninen kuormitus ja lämpörasitus voivat muuttaa laserin optista pituutta, mikä vaikuttaa laserin tuottaman valon aallonpituuteen. Lisäksi epätarkkuusperiaate rajoittaa laservalon monokromaattisuuden astetta.[9, 10, 16]

Valon voidaan sanoa olevan koherenttia, kun sen sisältämien fotonien aallonpituudet, suunnat ja vaiheet ovat lähes samat. Säteilyn koherenttisuus voidaan jakaa pitkittäiseen ja poikittaiseen koherenttisuuteen. Poikittainen koherenttisuus tarkoittaa samalla sähkömagneettisen aallon aaltorintamalla olevien pisteiden vaihe-eroa, joka on nolla, kun poikittainen koherenttisuus on täydellinen. Muussa tapauksessa poikittainen koherenttisuus on

vain osittaista. Laservalon tapauksessa tämä tarkoittaa sitä, että lasersäteen yläreunan valo on koherenttia säteen alareunan valon kanssa. Pitkittäinen koherenttisuus on laservalon monokromaattisuusasteen mitta, eli mitä monokromaattisempaa valo on, sitä suurempi on pitkittäisen koherenttisuuden aste. Laservalon koherenttisuudella on suuri merkitys etenkin interferometriassa ja holografiassa.[9, 10, 16]

Laservalo on myös hyvin suunnattua eli sen kulmahajonta on hyvin pieni. Tämä on seurausta optisen resonanssiontelon geometriasta, joka mahdollistaa valon vahvistumisen vain yhdessä suunnassa. Tällöin vain säteet, jotka kulkevat resonaattorin keskiviivan suuntaisesti, voivat kulkea edestakaisin peilien välillä, ja poistuessaan osittain läpäisevän peilin kautta, niiden suunta muuttuu vain hieman johtuen valon diffraktiosta. Tyypillisesti laservalon hajontaa mitataan milliradiaaneina. Laservalon suunnattavuudesta sekä kohdistumisesta pienelle alueelle seuraa laservalon kirkkaus ja korkea säteilyteho pinta-alayksikköä kohti.[9, 10]

Jatkuvatoimisen laserin lisäksi on mahdollista toteuttaa pulssilaser, joka tuottaa lyhyitä laserpulsseja, joiden kesto voi olla vain muutamia femtosekunteja. Pulssimuotoinen laser voidaan toteuttaa resonaattorin laatua muuttamalla (“Q-switching”), resonanssiontelon tyhjentämällä tai moodin lukituksella. Tyypillisesti pulssilasereiden toiminta perustuu pumppausenergian varastoitumiseen väliaikaisesti väliaineen miehitysinversioon, resonaattoriin tai pumppauslähteen energialähteeseen. Useita eri pulssitustapoja on myös mahdollista käyttää samanaikaisesti.[9, 10]

3 Lasertyypit

Laserit voidaan ryhmitellä esimerkiksi laseroivan väliaineen perusteella kaasulasereihin, nestelasereihin ja kiinteän aineen lasereihin. Saman ryhmän sisällä on kuitenkin useita erilaisia ja eri tavoin toimivia lasereita, ja osa lasereista ei kuulu selkeästi mihinkään ryhmään, minkä vuoksi tarkka ryhmittely on haastavaa. Tässä luvussa esitellään puolijohdelasereiden, kiinteän aineen lasereiden, kaasulasereiden, nestelasereiden ja vapaaelektronilasereiden toimintaperiaatteet sekä keskeisimmät ominaisuudet ja sovelluskohteet.

3.1 Puolijohdelaserit

Puolijohde- tai diodilaser on yleisin lasertyyppi, ja se poikkeaa rakenteeltaan ja toiminnaltaan merkittävästi muista lasereista. Se on kaikkein pienin laser, ja sillä on erittäin hyvä hyötysuhde, joka voi olla jopa noin 70 %. Puolijohdelasereiden erilainen toimintaperiaate vaatii kahden eri materiaalin yhdistämistä laservalon tuottamiseen kyseisten materiaalien liitoskohdassa. Muihin lasereihin verrattuna puolijohdelaserin emittoima valo on kuitenkin vähemmän suunnattua ja koherenttisuuspituus on suhteellisen lyhyt, mikä johtuu laserdiodin pienestä koosta.[9, 10, 15]

Puolijohde koostuu atomeista, joiden uloimmalla elektronikuorella olevat elektronit ovat tiukemmin sidoksissa kiteen atomeihin kuin johteilla, eivätkä elektronit siksi pysty liikkumaan yhtä vapaasti materiaalissa. Esimerkiksi pii on puolijohde, jonka uloimmalla elektronikuorella on neljä elektronia, jotka muodostavat kiteessä sidoksen vierekkäisten atomien kanssa. N-tyyppin puolijohde saadaan, esimerkiksi kun puolijohdetta seostetaan saman koluokan atomeilla, joilla on uloimmalla elektronikuorella viisi elektronia. Tällöin kiteeseen jää ylimääräisiä elektroneja, jotka voivat tietyissä olosuhteissa toimia virrankuljettajina. Vastaavasti p-tyyppin puolijohteessa seostus tapahtuu atomeilla, joilla on uloimmalla elektronikuorella vain kolme elektronia, jolloin kiteeseen jää elektroniaukkoja. Kuten elektronit, myös elektroniaukot pystyvät toimimaan virrankuljettajina.[9]

Laserdiodi voidaan muodostaa yhdistämällä jaksollisen järjestelmän ryhmien 13 ja 15 tai ryhmien 12 ja 16 alkuaineilla seostetut puolijohteet. Neljä yleisintä puolijohdelasermateriaalia ovat galliumarsenidi (GaAs), indiumfosfidi (InP), galliumnitridi (GaN) ja sinkkiselenidi (ZnSe). Taulukossa 1 on esitetty näiden yhdistepuolijohdeiden energiaraot E_g ja vastaavat aallonpituudet λ lämpötilassa 300 K.[15]

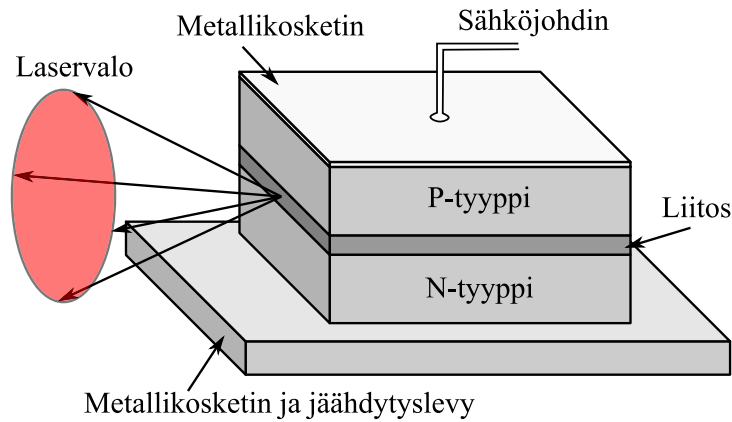
Taulukko 1: Yleisten yhdistepuolijohdeiden energiaraot ja aallonpituudet.[15]

Materiaali	Lyhenne	Energiarako E_g (eV)	Aallonpituus λ (nm)
		($T = 300$ K)	($T = 300$ K)
Galliumarsenidi	GaAs	1,42	873
Indiumfosfidi	InP	1,35	918
Galliumnitridi	GaN	3,36	369
Sinkkiselenidi	ZnSe	2,71	458

Kuvassa 3.1 esitetty yksinkertainen puolijohdelaser koostuu pienestä alle yhden millimetrin pituisesta n- ja p-tyyppin puolijohdeiden muodostamasta kiteestä, jonka päälle on liitetty johdin. Laserdiodin liitoksen yli kytketään jännite päästösuuntaan. Tällöin laservalo muodostuu p-puolijohdeiden ja n-puolijohdeiden liitoksessa, kun n-tyyppin puolijohdeiden elektronit yhdistyy p-tyyppin elektroniaukon kanssa. Miehitysinversiota pidetään yllä sähkövirran avulla, jolloin tapahtuu stimuloitua rekombinaatiota. Rekombinaatiossa vapautuvan energian suuruus riippuu laserdiodin energiaraosta E_g , eli energiaerosta n-tyyppin puolijohdeiden elektronien ja p-tyyppin elektroniaukkojen välillä. Materiaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa energiaraon suuruuteen ja emittoituvan laservalon aallonpituuteen λ . Tyypillisestä laserista poiketen puolijohdelaser ei välttämättä vaadi peilejä laservalon muodostamiseen, koska materiaali vahvistaa valoa hyvin tehokkaasti, ja pelkkä liitosmateriaalin ja ilman välisessä rajapinnassa tapahtuva heijastuminen riittää valon vahvistamiseen.[10, 15]

Puolijohdelasereita käytetään tiedonsiirrossa optisten kuitujen välityksellä sekä erilaisissa levysoittimissa. Diodilasereita hyödynnetään lisäksi lasersoittimissa, lasertulostimissa ja useissa lääketieteellisissä sovelluksissa. Hyvän hyötysuhteen ansiosta puolijohdelasereita

käytetään myös tiettyjen kiinteän aineen lasereiden pumppaamiseen.[9, 15]



Kuva 3.1: Yksinkertainen puolijohdelaser.[10]

3.2 Kiinteän aineen laserit

Kiinteän aineen laserit hyödyntävät kiinteässä olomuodossa olevaa materiaalia, kuten lasia, kiteistä ainetta tai keramiikkaa laservalon tuottamiseen. Niissä optisesti läpinäkyvään matriisiin on seostettu metalli-ioneja, jotka saadaan siirtymämetalleista, kuten kromista tai titaanista, tai vaihtoehtoisesti harvinaisista maametalleista, kuten neodyymistä tai ytterbiumista. Väliaineen pumppaaminen voidaan toteuttaa salamalampun tai toisen laserin tuottaman valon avulla. Yleensä virittämiseen käytettävä laser on puolijohdelaser, jonka pumppaaminen tapahtuu sähkövirran avulla.[2, 10]

Kiinteän aineen laserin aallonpituuteen vaikuttaa seostettavan epäpuhtausionin lisäksi hieman myös ionia ympäröivä matriisi. Yleisimpiä isäntämateriaaleja ovat oksidit, fluoridit ja lasi, kuten alumiinioksidi (Al_2O_3), yttriumlitiumfluoridi (YLiF_4), piidioksidi (SiO_2) ja fosforipentoksidi (P_2O_5). Yleisesti oksideilla on paremmat termomekaaniset ominaisuudet, mutta fluorideilla puolestaan on paremmat termo-optiset ominaisuudet. Lasilla on kiteitä huonompi lämmönjohtavuus, minkä vuoksi sillä on huonommat termomekaaniset ja termo-optiset ominaisuudet. Tyypillisesti kiinteän aineen laserin aallonpituus on lähi-infrapuna-alueella, ja sillä on mahdollista tuottaa sekä jatkuvaa laservaloa että lyhyitä tai ultralyhyitä laserpulsseja.[2, 10, 16]

Yleisin kiinteän aineen laser on Nd:YAG-laser, jossa neodyymi-ionit (Nd^{3+}) korvaavat noin yhden prosentin yttriumioneista (Y^{3+}) yttriumalumiinigranaatissa ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$). Materiaalista valmistetun sauvan halkaisija on tyypillisesti 3–6 mm ja pituus 5–15 cm. Materiaalin pumppaamiseen voidaan käyttää lampua tai AlGaAs-puolijohdelasera. Nd:YAG-laserilla on useita eri siirtymiä, jotka tuottavat jatkuvaa tai pulssitettua laservaloa. Siirtymä, jota vastaava aallonpituus on $1,064 \mu\text{m}$, on kuitenkin eniten käytetty. Nd:YAG-laserin tuottama

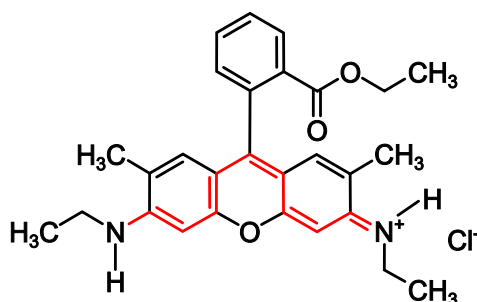
maksimi teho on yleisesti noin 1–3 kW, ja hyötysuhde voi olla yli 10 % puolijohdelaserilla viritettäessä.[10, 16]

Kiinteän aineen lasereilla on paljon erilaisia käyttökohteita esimerkiksi tutkimuksessa, teollisuudessa ja lääketieteessä. Rubiinilaseria ($\text{Cr:Al}_2\text{O}_3$) käytetään erityisesti holografias- sa sekä plasman ominaisuuksien, kuten elektronitiheyden ja lämpötilan mittauksessa. Neodyymilasereita hyödynnetään materiaalin käsittelyyn, kuten poraamiseen, hitsaamiseen ja lasermerkkaukseen. Neodyymilaserilla on myös useita tieteelliseen tutkimukseen ja lääketie- teeseen liittyviä sovelluskohteita. Tietyillä kiinteän aineen lasereilla aallonpituus on säädet- tävissä laajalla spektrialueella, minkä ansiosta niitä voidaan hyödyntää esimerkiksi spekt- roskopiassa. [15, 16]

3.3 Nestelaserit

Nestelaserit ovat väriainelasereita, joissa väliaineina käytetään liuoksia, joissa tiettyjä pitkä- ketjuisia orgaanisia molekyyliä on liotettu johonkin liuottimeen, kuten metanoliin, etano- liin, glyseroliin tai veteen. Väliaineen virittäminen täytyy toteuttaa optisesti valolla, joka voi olla peräisin esimerkiksi kaasulaserista. Väriainelaserit pystyvät emittoimaan näkyvällä aal- lonpituusalueella olevia aallonpituuksia, ja vain muutamalla eri väriaineella pystytään kat- tamaan koko näkyvien aallonpituuksien spektri. Väriainelaserilla on suuri kaistanleveys (50– 100 nm), mikä mahdollistaa erittäin lyhyiden moodilukittujen pulssien tuottamisen.[2, 10, 16]

Kuvassa 3.2 on esitetty väriainelasereissa paljon käytetty orgaaninen molekyyli rodamiini 6G, joka emittoi valoa oranssilla aallonpituusalueella, kun siihen kohdistetaan vihreää valoa. Molekyylin osaa, joka aiheuttaa molekyylin värin, kutsutaan kromoforiksi, ja se on merkitty kuvassa 3.2 punaisella. Rodamiini 6G:n tapauksessa liuottimena käytetään yleisesti etanolia.[2, 16]



Kuva 3.2: Rodamiini 6G -molekyyli. Punaisella merkityt sidokset muodostavat molekyylin kromoforisen alueen.[16]

Väriaineliuos heikkenee ajan kuluessa, koska molekyylit tuhoutuvat valolla viritettäessä. Tämä vaikeuttaa jatkuvatoimisen laserin toteuttamista. Väriainelasereiden sijasta käytetäänkin usein laajaspektrisiä kiinteän aineen lasereita.[2]

Väriainelasereita käytetään eniten tutkimukseen perustuvissa kokeissa, joissa tarvitaan kapeakaistaista säädettävää laservaloa tai ultranopeita optisia pulsseja. Tunnetuin spektroskopinen sovelluskohde on isotooppien erottelu, jolla pystytään esimerkiksi selektiivisesti virittämään tiettyjä uraanin isotooppeja, minkä seurauksena saadaan rikastettua uraania. Väriainelasereilla voidaan myös hidastaa atomien liikettä hyvin alhaisiin nopeuksiin säätämällä laserit tiettyihin atomin absorptiotaajuuksiin. Ultranopeilla laserpulsseilla voidaan tutkia muun muassa puolijohteiden ja kiinteiden aineiden viritystilojen dynamiikkaa.[15]

3.4 Kaasulaserit

Kaasulaserit voidaan jakaa lasi- tai kvartsiputkessa kaasumaisessa olomuodossa olevan laseroivan väliaineen mukaan kaasuatomilasereihin, kaasumolekyylilasereihin sekä Excimerlasereihin. Yleisimpiä laseroivia kaasuja ovat argon, heliumin ja neonin seos sekä hiilidioksidin, typen ja heliumin muodostama seos. Yleisesti pumppaus tapahtuu sähkövirran avulla. Muita mahdollisia pumppaustapoja ovat kaasun dynaaminen laajeneminen, kemiallinen pumppaus ja optinen pumppaus laserilla.[2, 10, 16]

Kaasulasereille tyypillinen lasersäteen viivanleveyyteen vaikuttava ilmiö on epähomogeeninen leveneminen ja erityisesti Doppler-leveneminen. Tämän tyyppisten lasereiden hyötysuhde on yleisesti alle 1 %, koska suuri osa atomien virittämiseen käytetystä sähköstä muuttuu lämmöksi, minkä vuoksi laseria joudutaan usein jäädyttämään esimerkiksi vedellä.[2, 10]

3.4.1 Kaasuatomilasemit

Kaasuatomilasereille on ominaista taajuuden kapea kaistanleveys aallonpituusalueella 200–5000 nm. Monet kaasuatomilasereiden kaasuista ovat huoneenlämpötilassa kaasumaisessa olomuodossa, mutta monet täytyy ionisoida, jotta saadaan muodostettua laser atomin ioinisoitujen tilojen avulla. On myös useita kaasuatomi- ja kaasuionilasereita, joissa laseroiva aine täytyy höyrystää kaasumaiseen tilaan. Tavallisesti pumppaus on toteutettu kaasuatomilasereissa putken päissä olevien kahden elektrodin välisellä sähköpurkauksella.[15, 16]

Kaasuatomilasericassa atomin laservaloon liittyvät ylempi ja alempi energiatila kuuluvat yhdelle laseroivan väliaineen atomille. Esimerkiksi helium-neon (HeNe) -laserissa neonatomit tuottavat laservalon ja heliumatomit avustavat pumppausprosessissa. Suurin osa HeNe-lasereista emittoivat valoa aallonpituudella 632,8 nm.[2, 9, 10]

Myös metallihöyrylaserit ovat kaasuatomilasereita, ja niissä korkeassa lämpötilassa oleva metallihöyry on laseroivana väliaineena, ja puskurikaasuna on helium tai neon. Tyypillisesti metallina on kadmium, kupari, kulta tai lyijy. Useimmat metallihöyrylaserit ovat pulssilasereita, joiden pulssipituus on noin 10–50 ns ja toistotaajuus jopa 100 kHz.[15]

Helium-neon-laseria käytetään erityisesti interferometriassa. Argon- ja kryptonlasereita

käytetään esimerkiksi lääketieteessä, lasertulostamisessa, stereolitografiassa ja kiinteän aineen lasereiden ja väriainelasereiden pumppaamisessa. Kuparihöyrylaseria voidaan hyödyntää suuren tehon ansiosta materiaalien ablaatioon, sekä pumppaamaan väriainelasereita, joita käytetään uraanin rikastamiseen. Kultahöyrylaseria puolestaan käytetään fotodynaamisessa terapiassa, jolla hoidetaan tiettyjä syöpiä.[15]

3.4.2 Kaasumolekyylilaserit

Molekyyleillä on elektronikonfiguraatioihin liittyvien energiatasojen lisäksi eri rotaatio- ja värähdystiloihin liittyvät energiatilat. Tyypillisesti kaasumolekyylilaserissa laservaloon liittyvät ylempi ja alempi energiatila ovat elektronisen perustilan eri värähdys-rotaatiotiloja. Näiden värähdys-rotaatiotilojen energiat eroavat siten, että emittoituva laservalo on keski-infrapuna-alueella. Sähköpurkauksella tapahtuvan pumppauksen lisäksi tehokkaita kaasumolekyylilasereita voidaan pumpata elektronisuihkuilla tai kaasun dynaamisella prosessilla.[10]

Tärkein kaasumolekyylilaser on hiilidioksidilaser (CO_2), josta saatavan laservalon aallonpituudet ovat noin $10,6 \mu\text{m}$ ja $9,6 \mu\text{m}$. Se voi toimia todella korkeissa kaasunpaineissa, sillä ylemmät lasertasot ovat paljon lähempänä hiilidioksidimolekyylin perustilaa kuin kaasuaatomilasereissa, jolloin elektronilämpötila voi olla matalampi. Korkean paineen seurauksena ylemmän lasertason miehitys on suurempi tilavuusyksikköä kohti, mikä mahdollistaa korkeamman tehon laseroivan väliaineen tilavuusyksikköä kohti. Tyypiltään CO_2 -laserit ovat jatkuvatoimisia, ja niiden hyötysuhde on 10–40 %. Muita kaasumolekyylilasereita ovat hiilimonoksidilaser (CO) ja typpilaser (N_2).[10, 15, 16]

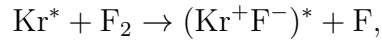
Hiilidioksidilasereita käytetään materiaalin käsittelyssä ja lääketieteessä, joissa laseria hyödynnetään todella pienen alueen kuumentamiseen. Hiilimonoksidilasereita voidaan hyödyntää materiaalin käsittelyssä, ja typpilasereiden tuottamaa ultraviolettivaloa käytetään yleisesti väriainelasereiden pumppaamiseen.[15, 16]

Kaukoinfrapunakaasulaserit tuottavat sähkömagneettista säteilyä hieman alle aallonpituudesta $30 \mu\text{m}$ noin aallonpituuteen $1,8 \text{ mm}$. Ensimmäiset kaukoinfrapunaserit olivat vesihöyrylaser ja vetysyanidi (HCN) -laser. Muita yleisesti käytettyjä molekyylejä ovat esimerkiksi metanoli (CH_3OH), vinylideenifluoridi ($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2$) ja fluorimetaani (CH_3F). Sovelluskohteisiin kuuluvat esimerkiksi plasmadiagnostiikka, puolijohteiden spektroskopia, ilmaspektroskopia, astronomia, kuvantaminen ja tutka.[15]

3.4.3 Excimer-laserit

Excimer-laserissa väliaineena toimii jalokaasun ja halogeenin muodostama seos. Virittyneessä tilassa olevalla jalokaasuaatomilla on yksi elektroni uloimmalla elektronikuorella, mikä mahdollistaa ionisidoksen halogeeniatomin kanssa, koska halogeeneilla puuttuu uloimmalta elektronikuorelta yksi elektroni. Esimerkki tällaisesta reaktiosta on kryptonin ja fluorin

välisen ionisidoksen muodostuminen



jossa virittyneet kryptonatomit on saatu aikaan sähköpurkauksella tai elektronisuihkulla. Reaktiossa muodostunut molekyyli $(\text{Kr}^+\text{F}^-)^*$ on laseriin liittyvä ylempi energiatila. Excimer-laserit ovat tavallisesti pulssilasereita, joille on tyyppillistä suhteellisen korkea keskimääräinen teho (noin 50 W) sekä UV-alueella oleva laservalo.[10]

Excimer-lasereita käytetään pääasiassa materiaalin käsittelyssä, lääketieteessä, fotolitoografiassa ja väriainelasereiden pumppaamisessa. Yleinen lääketieteellinen sovelluskohde on näönkorjauksessa käytetty LASIK-silmäleikkaus.[15]

3.4.4 Kemialliset laserit

Kemiallisessa laserissa kaksi tai useampi aine reagoi eksotermisesti keskenään. Samalla vapautuu energiaa ja muodostuu uutta ainetta, joka voi olla alkuainetta tai yhdistettä, jonka atomit tai molekyylit ovat kemiallisen energian johdosta virittyneessä tilassa. Näin ollen aineessa vallitsee miehitysinversio, mikä mahdollistaa stimuloitun emission. Kemiallisilla lasereilla tuotetun laservalon aallonpituus on noin 3–10 μm , ja niillä on mahdollista päästä hyvin suuriin lasertehoihin. Esimerkkeinä kemiallisista lasereista ovat vetyfluoridi (HF) -laser ja deuteriumfluoridi (DF) -laser.[9, 16]

Vetyfluoridilaserissa käytetään F_2 - ja H_2 -kaasun muodostamaa seosta jatkuvan laservalon tuottamiseen. Fluorimolekyyleistä muodostuu tietty määrä fluoriatomeja, jotka reagoivat vetymolekyylien kanssa reaktiossa



jossa muodostuu vetyatomi, joka voi edelleen reagoida fluorimolekyylin kanssa reaktiossa



jossa muodostuva fluoriatomi voi taas reagoida vetymolekyylin kanssa. Tässä ketjureaktiossa voi syntyä suuri määrä virittyneitä HF-molekyylejä (HF^*).[16]

Kemiallisia lasereita käytetään sovelluksissa, joissa sähköenergiaa ei välttämättä ole saatavilla. Korkean energian vuoksi kemialliset laserit ovat pääasiassa sotilaallisessa käytössä, josta esimerkkinä jatkuvaa laservaloa tuottava DF-laser MIRACL (“Mid-Infrared Advanced Chemical Laser”). MIRACL-laserin suurin teho on noin 2,2 MW, ja se on kehitetty ohjustorjuntaan.[15, 16]

3.5 Vapaaelektronilaserit

Vapaaelektronilaserit (FEL) poikkeavat muista lasereista, sillä niissä laservalo muodostuu tyhjiössä oskilloivista vapaista elektroneista. Lähes valonnopeudella kulkevat elektronit ohjataan elektronilähteestä, kuten varastorenkaasta tai lineaarikiihdyttimestä, magneettien

avulla laserin peilien muodostamaan resonaattoriin, jossa undulaattorin periodisesti suuntaansa muuttava magneettikenttä saa elektronit kulkemaan sinimuotoista rataa pitkin. Tällöin elektronit emittoivat sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus saadaan yhtälöstä

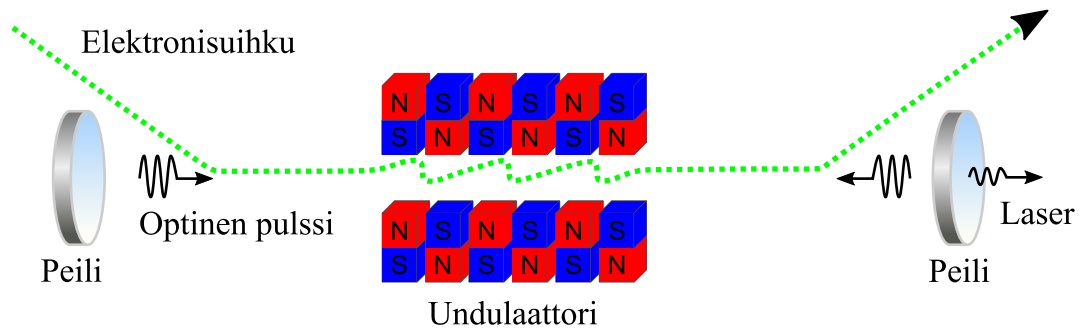
$$\lambda_0 = \frac{\lambda_q}{2} \left(\frac{1}{1 + K^2} \right) \left(\frac{E}{m_0 c^2} \right)^2, \quad (9)$$

missä λ_q on magneettikentän jakson pituus, K on vakio, jota kutsutaan undulaattoriparametriksi, E on elektronin energia ja m_0 elektronin massa ja c on valonnopeus tyhjiössä. Undulaattoriparametri K saadaan yhtälöstä

$$K = \frac{e \langle B \rangle \lambda_q}{2\pi m_0 c}, \quad (10)$$

missä e on elektronin varaus ja B on magneettikentän voimakkuus, josta on otettu keskiarvo undulaattorin pituussuunnassa. Yhtälöistä 9 ja 10 havaitaan, että aallonpituuteen vaikuttavat elektronien energia E , undulaattorin magneettiparien välinen etäisyys λ_q ja magneettikentän voimakkuus B . Vapaaelektronilaserissa lasersäteen sähkömagneettinen kenttä ja relativistiset elektronit vuorovaikuttavat keskenään, jolloin tapahtuu stimuloitua emissiota.[16]

Kuvassa 3.3 on esitetty periaatekuva laserpulsseja tuottavasta vapaaelektronilaserista, jossa on kesto- tai sähkömagneettien muodostama jaksollisesti suuntaansa muuttava magneettikenttä eli undulaattori. Elektronit saapuvat undulaattorin toisesta päästä ja poistuvat toisesta ohjausmagneettien avulla.[16]



Kuva 3.3: Vapaaelektronilaserin periaatekuva.[17]

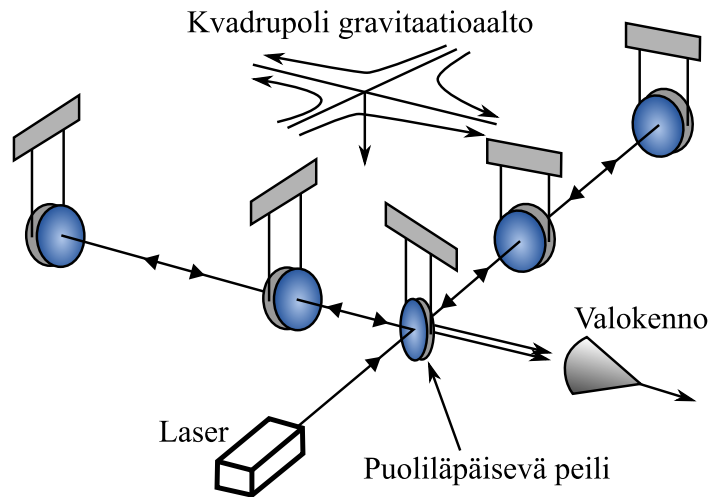
Vapaaelektronilasereiden hyödyntämistä rajoittavat niiden suuri koko ja kalleus, mutta niillä päästään esimerkiksi aallonpituusalueille 100–400 μm ja alle 100 nm, joille perinteisillä lasereilla ei kovin helposti päästä. Vapaaelektronilasereille olisikin paljon mahdollisia sovelluskohteita esimerkiksi biolääketieteessä, fotokemiassa, isotooppien erottelussa, materiaalinkäsittelyssä ja fysiikan tutkimuksessa.[15, 16]

4 Laserit osana tieteellistä tutkimusta

Tieteellisessä tutkimuksessa lasereilla on paljon sovelluskohteita, joista tärkeimpiä ovat interferometriä sekä erilaiset spektroskopiset menetelmät. Tässä luvussa käsitellään laserin hyödyntämistä gravitaatioaaltojen havaitsemisessa, Doppler-vapaassa spektroskopiassa ja femtosekuntispektroskopiassa. Lisäksi tarkastellaan hieman niin kutsuttuja optisia pinsettejä sekä laserjäähdytystä.

4.1 Gravitaatioaaltojen havaitseminen

Gravitaatioaalto aiheutuvat massan kiihtymisestä, esimerkiksi mustien aukkojen törmäyksessä toisiinsa. Laserinterferometrinen gravitaatioaalto-observatorio (LIGO) havaitsi ensimmäistä kertaa gravitaatioaaltoja vuonna 2015. Vaikka LIGO:lla pystytään havaitsemaan ja tutkimaan gravitaatioaaltoja, esimerkiksi aaltojen suuntien ja polarisaatioiden selvittämiseen vaaditaan laaja verkosto gravitaatioaaltojen havaitsemiseen suunniteltuja observatorioita. Gravitaatioaaltojen aiheuttamat signaalit pystytään myös erottamaan paremmin laitteistosta ja ympäristöstä aiheutuvista häiriösignaaleista, kun interferometrit sijaitsevat eri paikoissa.[10, 18]



Kuva 4.1: Laserinterferometrisen gravitaatioaalto-observatorion periaatekuva.[10]

Kuvassa 4.1 on esitetty periaatekuva LIGO:sta, jossa yhdistyvät Michelsonin interferometri sekä molemmissa interferometrin haaroissa olevat Fabry-Pérot-ontelot, joiden avulla interferometrin haarojen efektiiviset pituudet saadaan noin 50-kertaisiksi. Vaijerien varassa riippuvien peilien väliset etäisyydet voivat muuttua gravitaatioaaltojen vaikutuksesta. Nämä muutokset ovat kuitenkin hyvin pieniä, minkä vuoksi interferometrin haarojen täytyy olla neljän kilometrin pituiset, jotta gravitaatioaaltoista aiheutuvat pienet liikkeet pystytään

havaitsemaan. LIGO:ssa käytetään diodilaserilla pumpattua Nd:YAG-laseria, jonka emittoiman laservalon teho on 10 W ja aallonpituus 1064 nm. Laservalon teho ja aallonpituus täytyy kuitenkin vakauttaa ennen varsinaiseen interferometriin ohjaamista.[10, 18, 19]

4.2 Laserspektroskopia

Doppler-leveneminen rajoittaa tarkkuutta, jolla kaasun spektri voidaan mitata. Laservaloa hyödyntävän Doppler-vapaan kyllästysspektroskopian avulla on kuitenkin mahdollista määrittää Doppler-vapaa spektri. Siinä säädettävästä laserista peräisin oleva lasersäde jaetaan pumppaus- ja mittaussäteeksi, jotka kulkevat tutkittavan kaasun läpi vastakkaisiin suuntiin. Intensiteetiltään suurempi pumppaussäde virittää tutkittavan kaasun atomit tai molekyylit korkeammalle energiatasolle, ja pumppaussäteen reitille asetettu laite katkoo lasersädettä tietyllä taajuudella. Kun pumppaussäde on katkaistu, heikompi intensiteettinen mittaussäde absorboituu kaasuun, ja kun pumppaussäteen reitti ei ole katkaistu, mittaussäde vaimenee vähemmän, ja havaitsemalle rekisteröityy vahvempi signaali. Tämä modulointi tapahtuu kuitenkin vain atomeille tai molekyylielle, joiden nopeus on nolla lasersäteiden etenemissuunnassa, eli kun lasersäteet vuorovaikuttavat samojen molekyylien tai atomien kanssa. Tällöin mitatusta signaalista saadaan määritettyä kaasun Doppler-vapaa spektri.[19, 20]

Erityisesti aallonpituudeltaan säädettävillä lasereilla on ollut suuri merkitys spektroskopiassa, koska suuri laserin kaistanleveys mahdollistaa erittäin lyhyet laserpulsit. Esimerkiksi titaani-safiiri-laserilla pystytään tuottamaan alle viisi femtosekuntia kestäviä moodilukittuja laserpulseja, joita pystytään käyttämään femtosekuntispektroskopiassa lyhytkestoisten prosessien tutkimiseen. Femtosekuntispektroskopialla pystytään tutkimaan esimerkiksi kemiallisten sidosten muodostumista ja katkeamista erilaisissa kemiallisissa reaktioissa.[10, 19]

4.3 Laserjäähdytys

Laserjäähdytyksessä kaasunäytteen sisältämien atomien tai molekyylien nopeutta hidastetaan laserkenttien avulla, jolloin pystytään käsittelemään yksittäisiä atomeja tai molekyyliä. Jäähtyminen perustuu siihen, että atomi tai molekyyli absorboi fotonin ja emittoi toisen fotonin, jonka energia on hieman suurempi, jolloin kyseisen atomin tai molekyylin liike hidastuu.[10, 19]

Fotonin törmätessä epäelastisesti atomiin, atomin liikemäärä pienenee fotonin liikemäärän h/λ verran. Vastaavasti atomi saa satunnaiseen suuntaan kohdistuvan spontaanin emission seurauksena rekyylienergiaa. Kun laserkentän taajuus on hieman pienempi kuin atomin energiatiilojen välisen siirtymän resonanssitaajuus, laserkentän suuntaan liikkuvien atomien nopeus kasvaa ja kenttää vastakkaiseen suuntaan liikkuvien atomien nopeus hidastuu. Laserjäähdytyksessä tarvitaan useita lasersäteitä, koska atomien ja molekyylien liike tapahtuu kolmessa ulottuvuudessa. Lisäksi laservalon aallonpituutta täytyy muuttaa lähemmäs ener-

giatilojen välisen siirtymän resonanssitajuutta atomien jäähtyessä. Atomien lämpötila voi laskea laserjäähdytyksessä alle millikelvinin absoluuttisen nollapisteen yläpuolelle. Laserjäähdytyksellä on keskeinen rooli esimerkiksi Bosen–Einsteinin kondensaatin muodostamisessa.[10, 19]

4.4 Optiset pinsetit

Kohdistetun lasersäteen säteilypainetta voidaan käyttää optisina pinsetteinä esimerkiksi bakteerien, virusten, DNA-juosteiden ja muiden mikroskooppisten kappaleiden käsittelyyn. Laserjäähdytyksestä poiketen tässä menetelmässä hyödynnetään vain yhtä lasersädettä. Käytännössä optiset pinsetit ovat usein muunneltuja mikroskooppeja, joissa lasersäde kohdistetaan mikroskoopin objektiivin läpi näytealustalle.[10]

5 Yhteenveto

Laserien toiminta perustuu säteilyn stimuloituun emissioon, laseroivan väliaineen miehitysinversioon sekä peilien tai heijastavien pintojen muodostamaan optiseen resonanssionteloon. Erilaisista lasertyypeistä yleisimmät ovat puolijohdelaserit, kiinteän aineen laserit, kaasulaserit, nestelaserit ja vapaaelektronilaserit. Mahdollisten sovelluskohteiden kannalta keskeisiä laserien parametreja ovat säteilyn aallonpituus, pitkittäinen ja poikittainen koherentsisuus sekä laserin teho. Pulssilaserien tapauksessa myös pulssin pituudella ja toistotaajuudella on tietyissä sovelluksissa tärkeä merkitys.

Lasereita voidaan käyttää hyvin laajasti eri tarkoituksiin, mutta tässä tutkielmassa keskityttiin erityisesti lasereiden käyttöön tieteellisessä tutkimuksessa. Esimerkkejä mahdollisista sovelluskohteista ovat gravitaatioaaltojen havaitseminen, Doppler-vapaa kyllästyspektroskopia, femtosekuntispektroskopia, laserjäähdytys sekä optiset pinsetit. Laserin keksiminen on ollut käännteentekevä askel etenkin tieteen ja teknologian edistymisen kannalta, ja laser tulee olemaan myös jatkossa keskeinen työkalu monilla eri tieteenaloilla sekä teknologiassa ja teollisuudessa.

6 Lähteet

- [1] Stillman G. E. 21 - Optoelectronics. Reference data for engineers: radio, electronics, computer, and communications. 9. painos. USA: Newnes; 2002. doi: 10.1016/B978-075067291-7/50023-6.
- [2] Bretenaker F., Treps N. Laser: 50 years of discoveries. Singapore: World Scientific Publishing; 2015.
- [3] Gross A. J., Herrmann T. R. History of lasers. *World Journal of Urology*, 25(3):217–220; 2007. doi: 10.1007/s00345-007-0173-8.
- [4] Singh S. C., Zeng H., Guo C., Cai W. Lasers: fundamentals, types, and operations; 2012. doi: 10.1002/9783527646821.ch1.
- [5] Hecht J. Beam : the race to make the laser. New York: Oxford University Press; 2005.
- [6] Al-Amri M. D., El-Gomati M. M., Zubairy M. S. Optics in our time. Springer; 2016. doi: 10.1007/978-3-319-31903-2.
- [7] Young H., Freedman R. University physics with modern physics. 15. painos. Harlow: Pearson Education; 2020.
- [8] Grant I. S., Phillips W. R. Electromagnetism. 2. painos. Chichester: John Wiley & Sons; 2011.
- [9] Ewing J., Hecht J., Hitz C. B. Introduction to laser technology. 4. painos. Hoboken: John Wiley & Sons; 2012.
- [10] Pedrotti L. M., Pedrotti F. L., Pedrotti L. S. Introduction to optics. 3. painos. Cambridge: Cambridge University Press; 2018. doi: 10.1017/9781108552493.
- [11] Halliday D., Resnick R., Walker J. Fundamentals of physics. 10. painos. John Wiley & Sons; 2014.
- [12] Eisber R., Resnick R. Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei, and particles. 2. painos. John Wiley & Sons; 1985.
- [13] Kittel C. Introduction to solid state physics. 8. painos. John Wiley & Sons; 2005.
- [14] Corner L. Introduction to laser physics. arXiv: Accelerator Physics; 2020.
- [15] Silfvast W. T. Laser fundamentals. 2. painos. Cambridge University Press; 2004.
- [16] Svelto O. Principles of lasers. 5. painos. Springer; 2010. doi: 10.1007/978-1-4419-1302-9.

- [17] Clarke J., Dunning D., Surman M., Thompson N. ALICE free electron laser. Science and Technology Facilities Council. Saatavissa: <https://www.astec.stfc.ac.uk/Pages/ALICE-free-electron-laser.aspx>. Haettu: 24.4.2023.
- [18] Abbott R., Amin R. S., Araya M., Aston S., Barr B., Barsotti L., *et al.* LIGO: the laser interferometer gravitational-wave observatory. *Reports on progress in physics*, 72(7), pp. 076901-076901 (25); 2009. doi: 10.1088/0034-4885/72/7/076901.
- [19] Hecht J. Understanding lasers: an entry-level guide. 4. painos. John Wiley & Sons; 2019.
- [20] Telle H. H., González Ureña Á. Laser spectroscopy and laser imaging: an introduction. CRC Press; 2018. doi: 10.1201/9781315156989.