

Riina Hietikko

LASERDIODIEN ULOSTULOPEILIN PASSIVOINTI IONISÄDESPUTTEROINNILLA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Diplomityö
Syyskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Riina Hietikko: Laserdiodien ulostulopeilin passivointi ionisädesputteroinnilla
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Teknis-luonnontieteellinen DI-tutkinto-ohjelma
Syyskuu 2020

Laserdiodeilta vaaditaan eri sovelluksiin yhä suurempaa ulostulotehoa ja parempaa kestävyyttä. Yksi merkittävimpiä näitä ominaisuuksia rajoittavia tekijöitä on laserdiodien päätypeilien laatu. Kun puolijohdekietto kllivataan laserbaareiksi ja baarien fasetit altistuvat ilmalle, voivat pinnalle jääneet katkenneet sidokset, muut hilavirheet, adsorboituneet epäpuhtaudet ja pinnan oksidikerros muodostaa pintatiloja puolijohdemateriaalin energia-aukon alueelle. Nämä pintatilat toimivat säteilemättömän rekombinaation keskuksina, mikä saa fasetin paikallisen lämpötilan kohoamaan ja voi lopulta johtaa kriittiseen optiseen vaurioon (engl. Catastrophic Optical Damage, COD). Fasettien laatua ja kestävyyttä voidaan parantaa erilaisilla passivointikäsitteilyillä. Tyypillisessä passivointikäsitteilyssä pinta ensin puhdistetaan epäpuhtauksista ja oksidikerroksesta, jonka jälkeen pinnalle pinnoitetaan passivointikerros sekä varsinainen heijastava pinnoite. Tällainen passivointiprosessi voidaan toteuttaa ionisädesputteroinnilla. Kahden ionilähteen ionisädesputterointilaitte mahdollistaa fasettien puhdistuksen ja pinnoituksen samassa laitteessa purkamatta tyhjiötä välissä, jolloin fasetit eivät altistu ilmalle prosessin aikana.

Tässä diplomityössä pyrittiin parantamaan laserdiodien kestävyyttä optimoimalla laserdiodien fasettien passivointi ionisädesputteroinnilla. Passivointiprosessin parantamiseksi tässä työssä toteutettiin 11 erilaista passivointikäsitteilyä varioimalla ionisädesputterointilaitteen parametreja, puhdistuksessa käytettäviä kaasuja ja passivointikerroksen materiaalia. Passivointiprosessin onnistumista tutkittiin mittaamalla passivoitujen laserbaarien vuotovirrat ja laserdiodien COD-tasot sekä eliniät. Passivointikäsitteilyjen vaikutusta puolijohdemateriaaliin ja pintaan tutkittiin fotoluminesenssinäytteiden ja atomivoimamikroskooppikuvien avulla sekä kuvaamalla fasetit optisella mikroskoopilla. Ionisädesputteroinnilla passivoitujen laserdiodien tuloksia verrattiin passivoimattomien sekä referenssiprosessilla passivoitujen laserdiodien tuloksiin.

Ionisädesputteroinnilla saavutettiin parhaat tulokset, kun fasetit puhdistettiin vedyllä ja argonilla, apuionilähteen 40 V:n positiivisella jännitteellä ja 10 minuutin puhdistusajalla. Passivointikerroksen osalta parhaat tulokset saavutettiin piinitridikerroksella. Typen käyttäminen puhdistuksessa argonin sijaan tai amorfisen piin käyttäminen passivointikerroksena heikensi laserdiodien COD-tasoa ja eliniäitä. Ionisädesputteroinnilla toteutetuilla passivointikäsitteilyillä laserdiodien COD-tasot ja eliniät jäivät kuitenkin matalammiksi kuin referenssiprosessilla passivoitujen laserdiodien, mikä voi kertoa ionisädesputteroinnin huonosta soveltuvuudesta fasettien passivointiin tai epäpuhtauksien pääsemisestä fasetille prosessin aikana.

Fasettien kuvaaminen optisella mikroskoopilla prosessin eri vaiheissa paljasti, että sputteroitun pinnoitteeseen syntyi vaurioita, kun laserdiodeja kuumennettiin juotosprosessin aikana. Sekä kasvatusmenetelmä että kasvatusmateriaali vaikuttivat fasetin kestävyteen kuumennettaessa, sillä vaurioita ei syntynyt referenssiprosessilla passivoituille faseteille, ja vaurioalueita syntyi laajemmin piikerroksella passivoituille kuin piinitridikerroksella passivoituille faseteille. COD-tasojen perusteella fasettien puhdistus optimoituilla prosessiparametreilla vaikutti kuitenkin onnistuneeseen. Lisäksi kaikki testatut passivointikäsitteilyt kasvattivat fotoluminesenssinäytteiden fotoluminesenssisignaalin tasoa, joten testatuissa passivointikäsitteilyissä ionien energia ei ollut niin suuri, että se olisi merkittävästi vaurioittanut puolijohdemateriaalin kiderakennetta. Jatkossa laserdiodien fasettien laadun parantaminen voisi onnistua optimoimalla prosessiparametreja edelleen tai testaamalla muita menetelmiä kuin ionisädesputterointia.

Avainsanat: laserdiodi, passivointi, plasmapuhdistus, COD-taso, pinnoitus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Riina Hietikko: Optimization of laser diode facet passivation with ion beam sputtering
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Programme in Science and Engineering
September 2020

Laser diodes are used in a wide range of applications that require high optical output power and improved reliability. One significant factor restricting these features is the quality of laser diode facets. Facets are usually formed by cleaving semiconductor wafer into laser bars which exposes the facets to air. Dangling bonds caused by the cleaving, adsorbed impurities and oxide layer on the facet may form surface states inside the band gap of the semiconductor. Surface states act as centers for non-radiative recombination, which increases the local temperature of the facet and may eventually lead to catastrophic optical damage (COD). Quality and durability of the facets can be improved by facet passivation that commonly consists of facet cleaning, passivation layer deposition and dielectric coating. This kind of passivation process can be carried out with ion beam sputtering (IBS). With two separate ion sources, cleaning and coating can be carried out without breaking the vacuum and exposing the facets to air during the process.

The goal of this thesis was to improve reliability of laser diodes by optimizing facet passivation process with IBS. For improving the process, 11 facet passivation processes with different sputtering parameters, working gases and passivation layer materials were tested. The removal of conductive surface states by passivation process was studied with reverse current measurements. COD level measurements and lifetime tests were used for determining the reliability of the laser diodes. Photoluminescence measurements and atomic force microscope (AFM) images were used to estimate the effects of the process on the semiconductor lattice and surface, respectively. In addition, facets were imaged with optical microscope. The results of the laser diodes passivated with IBS were compared with the results obtained from a reference passivation process and from unpassivated laser diodes.

The best results from IBS passivation processes were obtained with hydrogen and argon cleaning, 40 V assist source positive voltage, 10 min cleaning time and silicon nitride passivation layer. Cleaning the facets with hydrogen and nitrogen or using amorphous silicon as the passivation layer reduced the COD levels and lifetime significantly. However, laser diodes passivated with any of the tested IBS processes had lower COD levels and lifetime than the laser diodes passivated with the reference process. Either IBS is not a suitable method for facet passivation or impurities can get onto the facet at some point during the passivation process.

Imaging the facets with optical microscope between process phases revealed that heating the laser diodes during the mounting process caused white damage areas to appear on the facet. Both the deposition method and the passivation layer composition seemed to affect the durability of the facet during heating, since similar damage did not appear on the facets passivated with the reference process, and the facets passivated with silicon damaged more than the facets passivated with silicon nitride. However, COD levels indicated that facet cleaning with the optimized process parameters was successful. In addition, photoluminescence signal measured from separate photoluminescence samples was enhanced by all IBS passivation processes, which indicated that the ion energies used in the cleaning and coating processes were sufficiently low and did not damage the semiconductor lattice. The quality of laser diode facets could still be improved by further optimization of passivation process parameters or by using another method than IBS for facet passivation.

Keywords: laser diode, facet passivation, plasma cleaning, catastrophic optical damage, coating

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Tampereen yliopiston Fotonikan laboratorion Optoelektronikan tutkimuskeskuksessa yhteistyössä Modulightin kanssa. Aivan ensimmäiseksi haluan kiittää tarkastajiani Adj. Prof. Jukka Viheriälää ja TkT Jari Nikkistä saamastani ohjauksesta, osaamisenne jakamisesta ja uusien näkökulmien esiin tuomisesta. Suuri kiitos Jarno Reunalle opastuksesta IBS:n ja AFM:n saloihin sekä hyvistä neuvoista ja teknisestä tuesta työn aikana. Erytinen kiitos myös Antti Saarelle siitä, että perehdytit minut kärsivällisesti puhdastilatyöhön, autoit minut työn alkuun etkä unohtanut minua myöhemminkään projektin aikana. En olisi oppinut tämän työn aikana yhtä paljon ilman näin hyvää ohjausta teiltä kaikilta.

Olen saanut olla yli kaksi vuotta osana mahtavaa ja osaavaa Modulightin porukkaa, joka piristää jokaisen työpäivän. Kiitos koko Modulightin väelle kannustuksesta ja tuesta niin työtehtävissä kuin tässä diplomityöprojektissa. Erytisesti olen kiitollinen Seppo Orsilalle ja TkT Petteri Uusimaalle mahdollisuudesta päästä toteuttamaan tämä mielenkiintoinen diplomityöprojekti. Suuri kiitos Erika Nojoselle siitä, että autoit minua valtavasti suuren prosessointimäärän kanssa ja hoidit vielä useimmiten ne kaikkein yksitoikkoisimmat prosessointivaiheet. Kiitos koko teknikkotiimille prosessointiavusta ja lämpimästä työilmapiiristä puhdastilassa. Kiitos Riina Ulkuniemelle parhaasta mahdollisesta tuesta ja rohkaisusta hyvinä ja huonoina päivinä. Kiitos Matius Hurskaiselle siitä, että sait muistilapulle raapustetut merkinnät näyttämään piirikaaviolta. Haluan kiittää myös Ville Vilokista ja Petri Melasta korvaamattoman kokemuksenne jakamisesta, TkT Lasse Orsilaa diplomityöprojektin aktiivisesta edistämisestä sekä Jukka-Pekka Alankoa ja TkT Soile Talmilaa työn käynnistämisestä.

Opiskeluaikani ei olisi ollut näin mahtavaa aikaa ilman opiskelukavereitani, joilta olen saanut apua laskuharjoituksiin, vertaistukea joka tilanteeseen ja mahtavia muistoja opiskeluajoilta. Kiitos että olette pitäneet huolen siitä, että olen muistanut myös rentoutua opintojen ohessa. Lopuksi haluan vielä kiittää perhettäni tuesta niin tämän diplomityöprosessin kuin koko elämäni aikana.

Tampereella, 21. syyskuuta 2020

Riina Hietikko

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	1
2	Puolijohdelaserit	4
2.1	Aktiivinen väliaine	4
2.2	Varauksenkuljettajien injektointi	7
2.3	Optinen kaviteetti	8
3	Puolijohteiden pintaominaisuuksia	12
3.1	Pintatilat	12
3.2	Puolijohdepinnan passivointi	14
4	Puolijohdepintojen puhdistus plasmatekniikoilla	17
4.1	Plasma	17
4.2	Ionisädesputterointi	19
5	Mittausmenetelmät	23
5.1	Vuotovirtamittaukset	23
5.2	Kriittinen optinen vauriotaso	25
5.3	Elinikämittaukset	26
5.4	Fotoluminesenssimittaukset	28
5.5	Atomivoimamikroskopia	29
6	Tulokset ja analyysi	32
6.1	Testatut passivointikäsitteyt	32
6.2	Passivointikäsitteytjen vaikutus laserdiodien kestävyteen	34
6.3	Passivointikäsitteytjen vaikutus puolijohdepintaan	38
7	Yhteenveto	45
	Lähteet	48

LYHENTEET JA MERKINNÄT

E	energia
L	kaviteetin pituus
N	atomien konsentraatio
U	jännite
α	amorfinen
λ	aallonpituus
ν	taajuus
σ	atomin vuorovaikutusala
e	alkeisvaraus
h	Planckin vakio
m	moodin kertaluku, positiivinen kokonaisluku
n	taitekerroin
p	liikemäärä
AFM	atomivoimamikroskopia (engl. Atomic Force Microscopy)
AR	osittain heijastava (engl. Anti-reflective)
CCP	kapasitiivisesti kytketty plasma (engl. Capacitively Coupled Plasma)
COD	kriittinen optinen vaurio (engl. Catastrophic Optical Damage)
COMD	päätypeilin kriittinen optinen vaurio (engl. Catastrophic Optical Mirror Damage)
CVD	kemiallinen höyryfaasipinnoitus (engl. Chemical Vapor Deposition)
DBR	Braggin peili (engl. Distributed Bragg Reflector)
DLD	tumma kidevirheviiva (engl. Dark Line Defect)
EEL	reunasta emittoiva laser (engl. Edge-Emitting Laser)
HR	korkea heijastavuus (engl. High reflective)
IBAD	ionisädeavustettu depositio (engl. Ion-Beam Assisted Deposition)
IBE	ionisäde-etsaus (engl. Ion Beam Etching)
IBS	ionisädesputterointi (engl. Ion Beam Sputtering)
ICP	induktiivisesti kytketty plasma (engl. Inductively Coupled Plasma)
PECVD	plasma-avustettu kemiallinen höyryfaasipinnoitus (engl. Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition)

PVD	fysikaalinen höyryfaasipinnoitus (engl. Physical Vapor Deposition)
RF	radiotaajuus (engl. Radio Frequency)
RIE	reaktiivinen ionietsaus (engl. Reactive Ion Etching)
SPM	koetinpyyhkäisymikroskopia (engl. Scanning Probe Microscopy)
VCSEL	pinnasta emittoiva vertikaalikaviteetilaser (engl. Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser)

1 JOHDANTO

Puolijohdelaserien teknologia on kehittynyt valtavasti sen jälkeen, kun ensimmäinen puolijohdelaser kehitettiin vuonna 1962. Laserdiodeista saatava ulostuloteho on kasvanut, niiden luotettavuus parantunut, saavutettavissa oleva aallonpituusalue laajentunut ja yksimoodinen operointi kehittynyt. [1] Laserdiodien markkinat jatkavat edelleen kasvamistaan, ja nykyään laserdiodeilla on useita sovelluksia muun muassa optisessa tietoliikenteessä, datan varastoinnissa, lääketieteessä, teollisuudessa sekä pumppulasereina kuitulasereille ja kiinteän olomuodon lasereille. Laserdiodien etuja ovat pieni koko, hyvä tehokkuus ja niiden kattama laaja aallonpituusalue. Sovelluskohteet vaativat laserdiodeilta edelleen yhä korkeampaa tehoa ja parempaa kestävyyttä. Yksi merkittävimpiä näitä ominaisuuksia rajoittavia tekijöitä on laserdiodien päätypeilien laatu [2].

Laserdiodien päätypeilit valmistetaan useimmiten kliivaamalla eli lohkaisemalla puolijohdekiekko laserbaareiksi kiderakenteen pitkin, jonka jälkeen päätypeilien heijastavuudet optimoidaan dielektrisillä pinnoitteilla. Kliivaamisen seurauksena puolijohdemateriaalin pintaan jää katkenneita kiderakenteen sidoksia, jotka reagoivat herkästi ympäristön hapen ja epäpuhtauksien kanssa. Pinnan katkenneet sidokset, mahdolliset muut hilavirheet, adsorboituneet epäpuhtaudet ja pinnalle muodostunut oksidi voivat luoda puolijohdemateriaalin energia-aukon alueelle ylimääräisiä energiatiloja, joita kutsutaan pintatiloiksi. Pintatilat toimivat säteilemättömän rekombinaation keskuksina kasvattaen säteilemättömän rekombinaation nopeutta pinnalla, mikä johtaa fasetin lämpenemiseen ja mahdollisesti jopa kriittiseen optiseen vaurioon. [2]

Kriittinen optinen vauriotaso eli COD-taso (engl. Catastrophic Optical Damage) on tällä hetkellä yksi merkittävimpiä laserdiodeista saatavaa ulostulotehoa ja laserdiodien kestävyyttä rajoittavia tekijöitä. Kriittinen optinen vaurio syntyy useimmiten laserdiodin päätypeilillä, kun puolijohdepinnan pintatilat lisäävät laserin valon absorptiota ja säteilemättömyyden rekombinaatiota. Absorptio, säteilemättömän rekombinaatio ja pinnan rekombinaatiovirrat saavat fasetin lämpötilan kohoamaan, mikä pienentää energia-aukkoa pinnalla ja lisää absorptiota entisestään. Tämä kierre voi lopulta johtaa fasetin paikallisen lämpötilan kohoamiseen niin suureksi, että päätypeilimateriaali alkaa sulaa ja laseriodi tuhoutuu käyttökelvottomaksi. Tätä tapahtumaa kutsutaan COD:ksi. [2]

Laserdiodien fasettien hyvä laatu on tärkeää sekä COD-tason kasvattamiseksi että fasetin pitkän aikavälin degradaation vähentämiseksi. Lupaavia elinikätuloksia on saatu kliivaamalla laserbaarit tyhjiössä ja pinnoittamalla ne välittömästi kliivaamisen jälkeen passivoivalla kerroksella purkamatta tyhjiötä, jolloin fasetit eivät pääse altistumaan ilmalle lainkaan [3].

Tällainen prosessointi on vielä melko kallista ja monimutkaista, eikä laitteiston kapasiteetti riitä kovin suuriin tuotantomääriin. Tästä syystä laserbaarien kliivaus voi olla käytännöllisempää tehdä ilmassa, jolloin fasetit kuitenkin hapettuvat helposti. Fasettien hapettuminen on ongelma erityisesti alumiinia sisältävissä puolijohderakenteissa, sillä alumiini on hyvin reaktiivista [4].

Fasettien laatua ja kestävyyttä voidaan parantaa erilaisilla passivointikäsitteillä, joilla pyritään vähentämään pintatilojen määrää puolijohdepinnalla ja pienentämään säteilemättömän rekombinaation nopeutta. Passivointikäsitteily koostuu tyypillisesti kolmesta vaiheesta. Ensin fasetit puhdistetaan epäpuhtauksista ja pinnalle jo muodostuneesta oksidikerroksesta. Tämän jälkeen pinnalle pinnoitetaan passivointikerros, joka säilyttää pinnan stabiilina ja toimii diffuusioesteenä. Lopuksi pinnoitetaan varsinainen peilirakenne. Fasettien puhdistaminen voidaan tehdä kemiallisesti liuoksella, pommittamalla pintaa reaktiivisilla ioneilla tai etsaamalla pintaa fysikaalisesti ionipommituksella. [2, 4] Passivointikerroksena on käytetty muun muassa piinitridiä (SiN_x) [5, 6], sinkkiselenidiä (ZnSe) [7, 8], piitä (Si) [4, 9] ja alumiininitridiä (AlN) [10, 11].

Fasettien passivointiin voidaan käyttää erilaisia plasmatekniikoita ja pinnoitusmenetelmiä, joista tässä työssä keskityttiin ionisädesputterointiin (engl. Ion Beam Sputtering, IBS). Ionisädeputteroinnissa kohdemateriaalia pommitetaan plasmalähteestä kiihdytetyillä ioneilla, jotka irrottavat kohdemateriaalin pinnasta atomeja. Kahdesta ionilähteestä koostuvalla ionisädesputterointilaitteella laserdiodien fasetit voidaan puhdistaa ja pinnoittaa samassa laitteessa purkamatta tyhjiötä välissä, jolloin puhdistetut fasetit saadaan pysymään puhtaina pinnoitukseen asti.

Tämän diplomityön tavoitteena oli parantaa ilmassa kliivattujen laserdiodien kestävyyttä optimoimalla laserdiodien fasettien passivointi ionisädesputteroinnilla. Passivointiprosessin kehittämiseksi työssä toteutettiin 11 erilaista passivointikäsitteilyä varioimalla puhdistuksessa käytettäviä kaasuja, passivointikerroksen materiaalia ja ionisädesputterointilaitteen parametreja. Fasetit puhdistettiin pääasiassa vedyllä ja argonilla, mutta myös vedyn ja typen yhdistelmää testattiin. Sopivia puhdistusparametreja etsittiin varioimalla ionisädesputterointilaitteen apuionilähteen positiivista jännitettä ja puhdistusaikaa. Passivointikerroksen materiaaleina testattiin piinitridiä ja amorfista piitä (α -Si).

Testattujen passivointiprosessien onnistumista tutkittiin mittaamalla passivoitujen laserbaarien vuotovirrat, jotka kertovat siitä, miten passivointi on onnistunut poistamaan pinnalta johtavia pintatiloja, sekä mittaamalla laserdiodien COD-tasot ja eliniät. Lisäksi passivointikäsitteilyjen vaikutusta puolijohdemateriaalin kiderakenteeseen ja pintaan tutkittiin kuvaamalla fasetit optisella mikroskoopilla, mittaamalla passivointikäsitteilyn vaikutus erillisten fotoluminesenssinäytteiden fotoluminesenssisignaaliin sekä kuvaamalla fotoluminesenssinäytteet atomivoimamikroskoopilla (engl. Atomic Force Microscopy, AFM). Ionisädesputterointilaitteella toteutettujen passivointiprosessien tuloksia verrattiin sekä passivoimattomien laserdiodien että referenssiprosessilla passivoitujen laserdiodien tuloksiin.

Tämän työn alussa kerrataan ensin lyhyesti puolijohdelasereiden perusteet ja laserin toiminnan edellytykset luvussa 2. Luvussa 3 perehdytään puolijohdepinnan ominaisuuksiin, pintatiloihin ja erilaisiin pinnan passivointimenetelmiin. Luvussa 4 esitellään puolijohdepintojen plasmapuhdistuksen periaate keskittyen ionisädesputterointiin, jota tämän työn passivointikäsittelyissä käytettiin. Mittausmenetelmät, joilla laseriodien fasettien passivoinnin onnistumista tässä työssä tutkittiin, on kuvattu luvussa 5. Lopuksi luvussa 6 esitetään tässä työssä testatut passivointikäsittelyt ja prosessien parametrit, analysoidaan laseriodien mittaustulokset ja tutkitaan passivointikäsittelyjen vaikutusta puolijohderakenteeseen ja pintaan.

2 PUOLIJOHDELASERIT

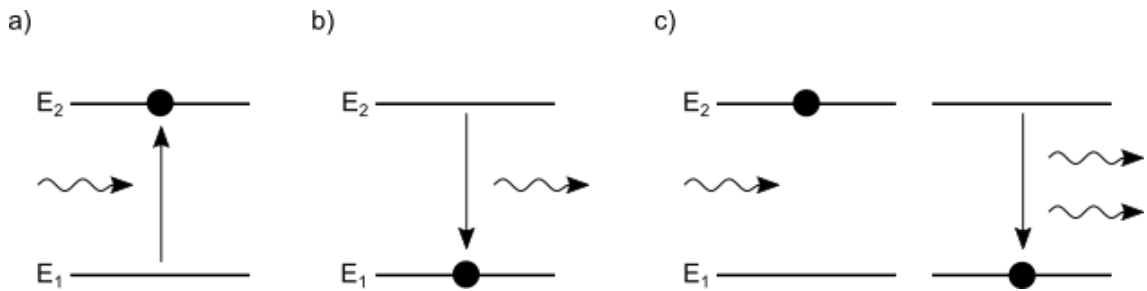
Laser on lyhenne sanoista *light amplification by stimulated emission of radiation*, eli valon vahvistaminen säteilyn stimuloidulla emissiolla. Laser on hyvin koherenttia, monokromaattista ja suunnattua valoa tuottava optoelektroninen laite, jonka toiminta perustuu stimuloituun emissioon. Laser tarvitsee toimiakseen vahvistimen ja vuotavan optisen kaviteetin. Aktiivisessa väliaineessa valo vahvistuu stimuloidulla emissiolla, varauksenkuljettajien injektoinnilla saadaan luotua ja ylläpidettyä populaatioinversio, ja optinen kaviteetti tarjoaa tarvittavan optisen takaisinkytkennän. Tärkeä lasereiden alaluokka on puolijohdelaserit, joissa aktiivisena väliaineena toimii puolijohdemateriaali.

2.1 Aktiivinen väliaine

Laserin toiminta perustuu stimuloituun emissioon, joka voidaan esittää kuvan 2.1 tapaan kahden energiatilan systeemin avulla. Puolijohdelaserin toiminnan ymmärtämisen kannalta tärkeimmät tällaisessa systeemissä tapahtuvat prosessit ovat absorptio, spontaani emissio, stimuloitu emissio ja säteilemätön rekombinaatio. Absorptiossa materiaaliin osuva fotonin saa elektronin virittymään alemmalta energiatilalta ylemmälle, jolloin fotonin absorboituu. Absorption tapahtumiseksi fotonin energian $h\nu$, missä h on Planckin vakio ja ν fotonin taajuus, on oltava vähintään yhtä suuri kuin energiatilojen välinen energiaero $E_2 - E_1$. Kun elektroni virittyy ylemmälle energiatilalle, se jättää alemmalle energiatilalle jälkeensä tyhjän energiatilan eli aukon, ja syntyy elektroni-aukkopari. Aukkoja on yksinkertaisinta käsitellä elektronien kaltaisina varauksenkuljettajina, joiden varaus on positiivinen ja itseisarvoltaan yhtä suuri kuin elektroneilla.

Spontaanissa emissiossa ylemmälle energiatilalle virittynyt elektroni palaa spontaanisti alemmalle energiatilalle, jolloin emittoituu fotonin, jonka energia vastaa energiatilojen välistä energiaeroa. Syntyvän fotonin suunta ja vaihe ovat satunnaisia. Prosessia, jossa elektroni siirtyy ylemmältä energialta alemmalle energiatilalle eliminoiden yhden elektroni-aukkoparin, kutsutaan rekombinaatioksi. Rekombinaatio voi tapahtua myös säteilemättömästi, jolloin elektronin palatessa alemmalle energiatilalle ei synny fotonia, vaan energia vapautuu lämpönä kiderakenteeseen. Kidehilan virheet ja epäpuhtaudet, kuten seostettujen puolijohdeiden seostusatomit, luovat puolijohdeiden energia-aukon kohdalle energiatiloja, jotka toimivat säteilemättömän rekombinaation keskuksina. [12]

Kun elektroni on valmiiksi virittynyt perustilalta ylemmälle energiatilalle, voi materiaaliin osuva fotonin, jonka energia on yhtä suuri kuin kahden energiatilan välinen energiaero, saada



Kuva 2.1. Absorptio (a), spontaani emissio (b) ja stimuloitu emissio (c) kahden energiatilan systeemissä. Stimuloitu emissio voi tapahtua, kun elektroni on valmiiksi virittynyt korkeammalle energiatilalle ja materiaaliin osuu fotoni, jonka energia on yhtä suuri kuin materiaalin energiatilojen välinen energiaero. Tällöin fotoni voi saada elektronin putoamaan viritystilalta takaisin perustilalle, jolloin emittoituu toinen fotoni. Perustuu lähteeseen [13].

elektronin putoamaan ylemmältä energiatilalta takaisin perustilalle. Tämän siirtymän seurauksena emittoituu fotoni, jonka energia on yhtä suuri kuin energiatilojen energiaero ja vaihe sekä suunta ovat samat kuin viritystilän purkautumisen aikaansaaneella fotonilla. Tätä prosessia kutsutaan stimuloituksi emissioksi. Kun materiaali on termisessä tasapainossa, suurin osa materiaalin atomeista ovat alemmalla energiatilalla, eli alemman energiatilan populaatio on suurempi kuin ylemmän energiatilan. Tällöin absorptio nopeus materiaalissa on spontaanin emissio nopeutta suurempi ja valo vaimenee materiaalissa. Jotta aktiivinen väliaine vahvistaa valoa, tulee materiaalissa stimuloitun emissio olla voimakkaampaa kuin absorptio. Tämä ehto toteutuu, kun ylemmän energiatilan populaatio on suurempi kuin alemman energiatilan populaatio, mitä kutsutaan populaatioinversioksi. Kun stimuloitulla emissiolla syntyneet fotonit stimuloivat yhä uusia fotoneita emittoitumaan, valo vahvistuu. Materiaalia, jossa populaatioinversio saavutetaan ja valo vahvistuu stimuloitun emissio kautta, kutsutaan aktiiviseksi aineeksi. [13]

Puolijohdelasereissa aktiivisena väliaineena toimii puolijohdemateriaali. Puolijohteet ovat kiderakenteisia materiaaleja, joiden johtavuus on metallien ja eristeiden väliltä. Metallien korkea johtavuus perustuu energiavöiden limittymiseen tai vain osittain täyttyneisiin energiavöihin, mikä mahdollistaa elektronien vapaan liikkumisen. Eristeillä puolestaan valenssivyö eli ylin miehittetty energiavyö on kokonaan elektronien täyttämä, ja valenssivyön erottaa tyhjästä johtavuusvyöstä eli alimmasta miehittämättömästä energiavyöstä energia-aukko, jonka alueella ei ole sallittuja energiatiloja. Tällöin elektronit eivät pääse siirtymään tyhjille energiatiloille. Puolijohteissa valenssivyön ja johtavuusvyön välinen energia-aukko on niin pieni, että elektronit tarvitsevat vain vähän energiaa virittyäkseen valenssivyöltä johtavuusvyölle. Puolijohteita ovat jaksollisen järjestelmän ryhmän IV alkuaineet pii ja germanium, ryhmien III ja V alkuaineiden muodostamat yhdisteet kuten GaAs ja jotkut ryhmien II ja VI sekä IV yhdisteet. Puolijohteet voidaan jakaa suora- ja epäsuora-aukkoisiin sen mukaan, ovatko materiaalin valenssivyön suurin sallittu energia ja johtavuusvyön pienin sallittu energia saman elektronin aaltoluvun kohdalla. Valoa emittoivien puolijohdelaitteiden materiaaleiksi soveltuvat paremmin suora-aukkoiset puolijohteet, joissa elektroni pystyy siirtymään johtavuusvyöltä suoraan valenssivyölle, kun taas

epäsuora-aukkoisissa puolijohdeissa siirtymä vaatii muutoksen elektronin aaltoluvussa, jolloin osa siirtymässä vapautuvasta energiasta kuluu lämpönä hilaan. [12]

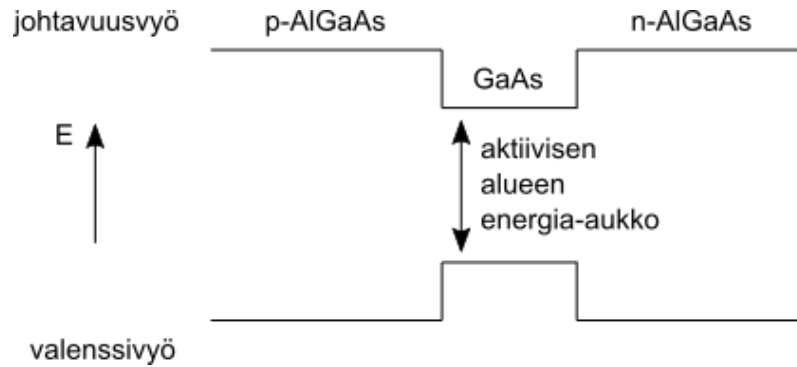
Puolijohdeiden johtavuutta on mahdollista muuttaa lämpötilan, optisen virittämisen tai epäpuhtauksien avulla. Epäpuhtauksien kontrolloitua lisäämistä puolijohdemateriaaliin kutsutaan seostamiseksi. Seostamattomassa ja hilavirheettömässä puolijohdeessa elektronien konsentraatio johtavuusvyöllä on yhtä suuri kuin aukkojen konsentraatio valenssivyöllä. Jos seostetussa puolijohdeessa elektronien konsentraatio on suurempi kuin aukkojen, puolijohdetta kutsutaan n-tyyppiseksi ja epäpuhtausatomeita donoreiksi. Vastaavasti jos aukkojen konsentraatio ylittää elektronien konsentraation puolijohdeessa, puolijohdetta kutsutaan p-tyyppiseksi ja epäpuhtausatomeita akseptoreiksi. Seostusatomit luovat puolijohderakenteeseen ylimääräisiä energiatiloja energia-aukon alueelle. Esimerkiksi kun ryhmän IV puolijohdetta seostetaan ryhmän V alkuaineella, syntyvässä n-tyyppisessä puolijohdeessa seostusatomit muodostavat elektronien täyttämän energiatilan lähelle johtavuusvyötä, jolloin elektronit virittyvät helpommin johtavuusvyölle. Kun taas ryhmän IV puolijohdetta seostetaan ryhmän III alkuaineella, syntyvässä p-tyyppisessä puolijohdeessa lähelle valenssivyötä muodostuu tyhjä energiatila, jolle elektronit voivat virittyä jättäen jälkeensä aukkoja valenssivyölle. [12]

Puolijohdelasereita, joiden toiminta perustuu pohjimmiltaan p- ja n-tyyppisten puolijohdeiden liitokseen, kutsutaan laserdiodeiksi. Useimmat laserdiodeissa käytettävät puolijohdemateriaalit ovat ryhmien III ja V yhdisteitä, kuten GaAs [2]. Ensimmäisissä kehitetyissä laserdiodeissa p- ja n-puolet olivat samaa materiaalia ja vahvasti seostettuja. Pelkästään yhden seostetun materiaalin pn-liitoksesta koostuvilla puolijohdelasereilla on kuitenkin epäkäytännöllisen korkea kynnysvirta, koska seostusatomit toimivat säteilemättömän rekombinaation keskuksina. Ratkaisun tähän ongelmaan toi kuvassa 2.2 esitetty kaksoisheteroliitos, jossa aktiivisena väliaineena toimii kapea kerros seostamatonta puolijohdetta p- ja n-tyyppisten puolijohdekerrosten välissä. Aktiivisen alueen puolijohdemateriaalilla on pienempi energia-aukko kuin p- ja n-tyypin kerroksilla, mikä rajoittaa varauksenkuljettajat kapealle aktiiviselle alueelle, jolloin populaatioinversio saadaan luotua matalammalla kynnysvirralla. Vastaavasti aktiivisen alueen taitekerroin on suurempi kuin p- ja n-kerroksilla, jolloin rakenne toimii optisen aaltojohteen tavoin rajoittaen optisen kentän pääasiassa aktiiviselle alueelle. Tällainen rakenne vähentää laserin valon absorptiota p- ja n-kerroksissa. [13]

Jos kaksoisheteroliitoslaserin aktiivinen alue on niin ohut, että sen paksuus on de Broglie'n aallonpituuden kokoluokkaa, rakennetta kutsutaan kvanttikaivolaseriksi. Tällöin rakenteessa tapahtuu kvanttitason ilmiö, jossa energiatilat muuttuvat diskreeteiksi vertikaalisessa suunnassa, mikä pienentää energiatilojen tiheyttä kvanttikaivossa. De Broglie'n aallonpituus lasketaan kaavalla

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (2.1)$$

missä p on elektronin tai aukon liikemäärä. Laserin rakenne voi muodostua yhdestä tai



Kuva 2.2. Kaksoisheteroliitoslaserin yksinkertaistettu energiavyörakenne. Seostetut puolijohdekerrokset rajoittavat virtaa ja optista kenttää. Ohut seostamaton GaAs-kerros niiden välissä toimii aktiivisena alueena. Perustuu lähteisiin [2, 13].

useammasta kvanttikaivosta. Koska aktiivinen alue on tällöin hyvin kapea ja energiatilojen tiheys johtavuusvyöllä pieni, populaatioinversio saavutetaan entistä matalammalla kynnysvirralla. [12]

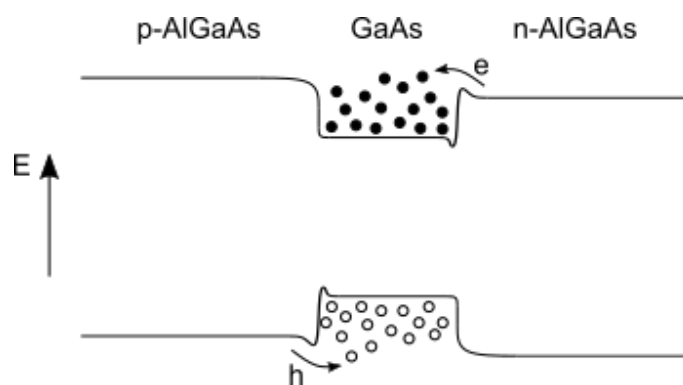
2.2 Varauksenkuljettajien injektointi

Populaatioinversion saavuttaminen ja ylläpitäminen aktiivisessa väliaineessa vaatii joko sähköisen tai optisen ulkoisen energialähteen. Puolijohdelasereissa populaatioinversio luodaan ja ylläpidetään yleensä sähköisesti kytkemällä pn-liitos päästösuuntaan, mutta elektroni-aukkoparit on mahdollista virittää myös optisesti. Päästösuuntaan kytketty pn-liitos saa aikaan varauksenkuljettajien injektioita. [2]

Enemmistövarauksenkuljettajina p-tyyppisessä puolijohdeosassa toimivat aukot ja vähemmistövarauksenkuljettajina elektronit, n-tyyppisessä puolijohdeosassa toisinpäin. Aivan p- ja n-tyyppisten puolijohdeosien liitosalueella osa n-puolen elektroneista diffusoituu p-puolelle ja osa p-puolen aukoista vastaavasti n-puolelle varauksenkuljettajien konsentraatioiden epätasapainon seurauksena. Liitoksen yli diffusoituneista varauksenkuljettajista tulee vähemmistövarauksenkuljettajia, jotka rekombinoituvat enemmistövarauksenkuljettajien kanssa. Diffusoituneet elektronit jättävät n-puolelle jälkeensä positiivisen varauksen ja diffusoituneet aukot puolestaan p-puolelle negatiivisen varauksen, joten liitosalueelle syntyy sähkökenttä, joka saa osan elektroneista ajautumaan p-puolelta n-puolelle ja osan aukoista vastaavasti n-puolelta p-puolelle. Näin liitoskohtaan muodostuu tyhjennysalue, jossa ei ole vapaita varauksenkuljettajia. Potentiaaliero tyhjennysalueen yli n- ja p-puolien välillä kutsutaan kontaktipotentialiksi. Kontaktipotentiali toimii potentiaalivallina, joka ylläpitää pn-liitoksen sisäisessä tasapainossa, jossa varauksenkuljettajien diffuusio- ja ajautumisvirrat kumoavat toisensa ja liitoksessa ei kulje nettovirtaa. [12]

Kun pn-liitokseen kytketään ulkoinen jännite, potentiaalivalli siirtymäalueen yli joko kasvaa tai pienenee riippuen syntyvän sähkökentän suunnasta tasapainotilan sähkökenttään verrattuna. Jos ulkoinen jännite kytketään siten, että p-puoli on positiivinen suhteessa n-puoleen, syntyvä sähkökenttä on vastakkainen tasapainotilan sähkökentälle, jolloin

potentiaalivalli liitosalueella pienenee ja useammat elektronit pystyvät diffusoitumaan n-puolelta p-puolelle ja aukot vastaavasti p-puolelta n-puolelle. Tällöin sähkövirta pystyy kulkemaan melko vapaasti liitoksen yli ja liitoksen sanotaan olevan kytketty päästösuuntaan. Injektiovirta liitoksen yli kasvaa jännitteen funktiona. Liitoksen yli diffusoituneet varauksenkuljettajat kasaantuvat aktiiviselle alueelle, jolloin elektronien konsentraatio johtavuusvyöllä ja vastaavasti aukkojen konsentraatio valenssivyöllä on suuri. Kuvassa 2.3 on havainnollistettu kaksoisheteroliitosta voimakkaasti päästösuuntaan biasoituna. Kun elektronien ja aukkojen populaatiot energiavöillä ovat tarpeeksi suuret, aktiivisella alueella saavutetaan populaatioinversio. Näiden aktiiviselle alueelle kerääntyneiden varauksenkuljettajien rekombinaatio tuottaa optisen vahvistuksen. [12]

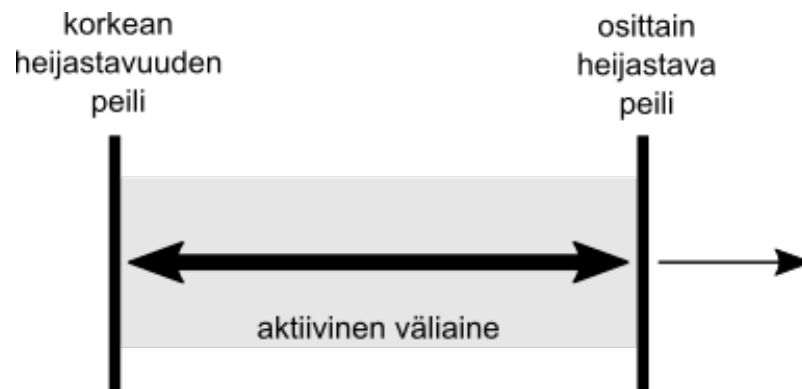


Kuva 2.3. Kaksoisheteroliitoslaser voimakkaasti päästösuuntaan biasoituna. Injektoidut elektronit ja aukot kerääntyvät kapean aktiivisen alueen potentiaalikaivoon. Elektronien ja aukkojen rekombinaatio aktiivisella alueella tuottaa optisen vahvistuksen. Perustuu lähteeseen [2].

Jos ulkoinen jännite kytketään estosuuntaan eli siten, että n-puoli on positiivinen suhteessa p-puoleen, syntyvä sähkökenttä vahvistaa tasapainotilan sähkökenttää, potentiaalivalli n- ja p-puolien välillä kasvaa entisestään ja elektronit ja aukot eivät pääse juuri lainkaan kulkemaan liitoksen yli. Estosuuntaan kytketyn pn-liitoksen yli kulkee n-puolelta p-puolelle vain pieni vuotovirta. Jos estosuuntaan kytketty ulkoinen jännite ylittää tietyn kriittisen rajan, pn-liitoksessa tapahtuu läpilyönti, jolloin estosuuntaan pääsee kulkemaan suurikin virta. [12]

2.3 Optinen kaviteetti

Aktiivisen väliaineen ja varauksenkuljettajien injektioinnin lisäksi laserin toiminta edellyttää positiivista takaisinkytkentää, joka saavutetaan optisella kaviteetilla. Yksinkertaisin kaviteetti on kuvassa 2.4 havainnollistettu Fabry–Pérot-resonaattori, joka koostuu kahdesta samansuuntaisesta tasopeilistä, joiden välissä on aktiivinen väliaine. Kaviteetissa fotonit heijastuvat peileistä edestakaisin vahvistaen fotonien energiatihelyttä kaviteetissa joka kerta kulkiessaan aktiivisen väliaineen läpi. Toinen peileistä tehdään osittain läpinäkyväksi, jolloin osa säteilystä pääsee poistumaan kaviteetista muodostaen laserin ulostulon. Laseroinnin tapahtumiseksi vahvistuksen väliaineessa tulee olla suurempi kuin kaviteetissa ja peileissä tapahtuvat häviöt. [13]



Kuva 2.4. Fabry–Pérot-resonaattori muodostuu kahdesta samansuuntaisesta tasopeilistä, joiden välissä on aktiivinen väliaine. Lasersäteily heijastuu peileistä edestakaisin vahvistuen joka kerta kulkiessaan aktiivisen väliaineen läpi. Toinen peileistä on osittain läpinäkyvä ja toimii ulostulona.

Laseriodit voidaan jakaa reunasta emittoiviin ja pinnasta emittoiviin sen mukaan, miten kaviteetti on toteutettu. Reunasta emittoivat laserit (engl. Edge-Emitting Laser, EEL) emittoivat nimensä mukaisesti puolijohderakenteen kasvatussuuntaan nähden rakenteen reunasta, jolloin kaviteetti on puolijohdekiekon pinnan suuntainen. Pinnasta emittoivat vertikaalikaviteetilaserit (engl. Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) emittoivat puolijohderakenteen pinnasta, jolloin kaviteetti on vertikaalinen eli toteutettu puolijohderakenteen kasvatussuuntaan. Tässä työssä keskitytään vain reunasta emittoiviin laseriodioidiin.

Reunasta emittoiville laseriodioidille kaviteetti toteutetaan useimmiten kliivaamalla eli lohkaisemalla laseriodin päädyt kidetasoa pitkin tasaisiksi, keskenään samansuuntaisiksi ja kaviteettiin nähden kohtisuoriksi pinnoiksi, faseteiksi. Fasetit voidaan muodostaa myös etsaamalla, jolloin riittävän tasaisuuden ja suoruuden saavuttaminen on haastavampaa. Usein jo pelkän puolijohdepinnan heijastavuus on tarpeeksi korkea laseroinnin saavuttamiseksi, esimerkiksi kliivattujen GaAs- ja InP-pintojen heijastavuus on noin 30 %, mutta heijastavuuksia voidaan optimoida pinnoittamalla fasetit dielektrisillä kerroksilla. Takafasetille pinnoitetaan yleensä korkean heijastavuuden (engl. High reflective, HR) pinnoite, jotta mahdollisimman suuri osa valosta heijastuisi takaisin väliaineeseen. Etufasetille puolestaan pinnoitetaan osittain heijastava (engl. Anti-reflective, AR) pinnoite laserin ulostuloa varten. [14]

Yksinkertaisimmillaan AR-pinnoite koostuu vain yhdestä kerroksesta, jonka taitekerroin on pinnoitettavan materiaalin taitekertoimen neliöjuuri ja optinen paksuus on $\lambda/4$. Tällöin ohutkalvon kummastakin pinnasta heijastuvat säteet kumoavat toisiaan heijastuksista aiheutuvan vaihe-eron takia. Tavallinen materiaali AR-pinnoitteessa on alumiinioksidi (Al_2O_3). HR-pinnoite koostuu puolestaan useasta vuorottelevasta matalan ja korkean taitekertoimen materiaalikerroksesta, joiden kunkin optinen paksuus on $\lambda/4$, jolloin kerrosten rajapinnoista heijastuvat säteet vahvistavat toisiaan interferenssin vaikutuksesta. [15] Tällaista rakennetta kutsutaan myös Braggin peiliksi (engl. Distributed Bragg Reflector, DBR). Yleinen matalan ja korkean taitekertoimen materiaalipari HR-pinnoitteissa on piidioksidi ja titaanioksidi (SiO_2

ja TiO_2). AR-päättypeilin heijastavuus on tavallisesti alle 10 % ja HR-päättypeilin heijastavuus yli 90 %.

Optisen kentän pitkittäismoodien kontrollointi tapahtuu kaviteetin avulla. Kun eri pitkittäismoodit heijastuvat päättyypeileistä, kaviteetissa värähtelevät moodit vahvistavat tai heikentävät toisiaan interferenssin vaikutuksesta, jolloin kaviteetti vahvistaa vain tiettyjä moodeja. Jos häviöt kaviteetissa jätetään huomiotta, kaviteetissa vahvistuvat ne moodit, jotka muodostavat kaviteettiin seisovan aallon eli täyttävät ehdon

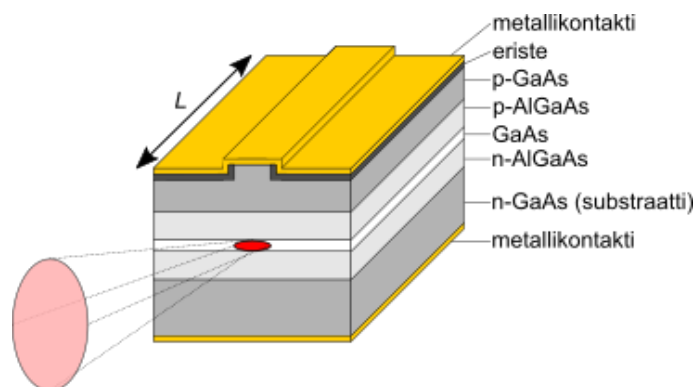
$$L = \frac{m\lambda}{2n}, \quad (2.2)$$

missä L on kaviteetin pituus, positiivinen kokonaisluku m on moodin kertaluku ja n on taitekerroin. Pitkittäismoodien etäisyydeksi toisistaan saadaan tällöin

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2Ln_g}, \quad (2.3)$$

kun n_g on materiaalin ryhmätaitekerroin. Reunaemittöivissä laserdiodeissa kaviteetti on käytännössä pidempi kuin aktiivisella alueella kulkevien pitkittäisten moodien välinen etäisyys, jolloin kaviteetti vahvistaa useampaa kuin yhtä moodia. Moodien valintaa voidaan tehostaa monimutkaisemmilla kaviteettirakenteilla. [2]

Optisen kentän poikittaismoodeja voidaan kontrolloida sekä vertikaalisessa että lateraaliosuunnassa. Vertikaalinen optisen kentän ja varauksenkuljettajien rajoittaminen mahdollisimman hyvin aktiiviselle alueelle tapahtuu epitaksiakerrosten avulla, kuten luvussa 2.1 esitetyissä kaksoisheteroliitos- ja kvanttikaivorakenteissa. Vertikaalista rajoittamista näissä rakenteissa voidaan edelleen tehostaa rajoittamalla varauksenkuljettajat ja optinen kenttä eri kerroksissa aktiivisen alueen ympärillä, kuten kuvan 2.5 puolijohderakenteessa. Tällöin sisemmät suurempiaukkoiset puolijohdekerrokset rajoittavat varauksenkuljettajat kapealle aktiiviselle alueelle, ja näitä kerroksia ympäröivät, vielä suurempiaukkoiset kerrokset rajoittavat optista kenttää matalamman taitekertoimen avulla. [2] Kuvan 2.5 yksinkertaistettu laserdiodin rakenne on myös tässä työssä valmistettujen laserdiodien pohjana.



Kuva 2.5. Tässä työssä valmistettujen laserdiodien rakenne yksinkertaistettuna. Kuvassa L on kaviteetin pituus.

Lateraaliosessa suunnassa voidaan varauksenkuljettajien ja optisen kentän lisäksi rajoittaa myös liitoksen läpi kulkevaa virtaa. Lateraalinen rajoittaminen voidaan toteuttaa useilla eri rakenteilla. Kaikissa rakenteissa optista kenttää rajoittaa optisen vahvistuksen vaihtelu rakenteessa, mutta joissain rakenteissa optisen kentän rajoittamista on lisäksi tehostettu taitekertoimen vaihtelun avulla. Oksidinauharakenteessa hapetetun eristekerroksen avulla rajoitetaan kontaktialuetta, josta varauksenkuljettajat injektoidaan materiaaliin. Harjannerakenteessa laseriodin päälle etsataan kapea harjanne, joka ympäröidään kerroksella eristävää matalamman taitekertoimen materiaalia. Tehokkain lateraalinen rajoittaminen saavutetaan rakenteella, jossa koko heteroliitosrakenne ympäröidään eristävällä, suurempiaukkoisella ja matalamman taitekertoimen aineella. [14]

3 PUOLIJOHTEIDEN PINTAOMINAISUUKSIA

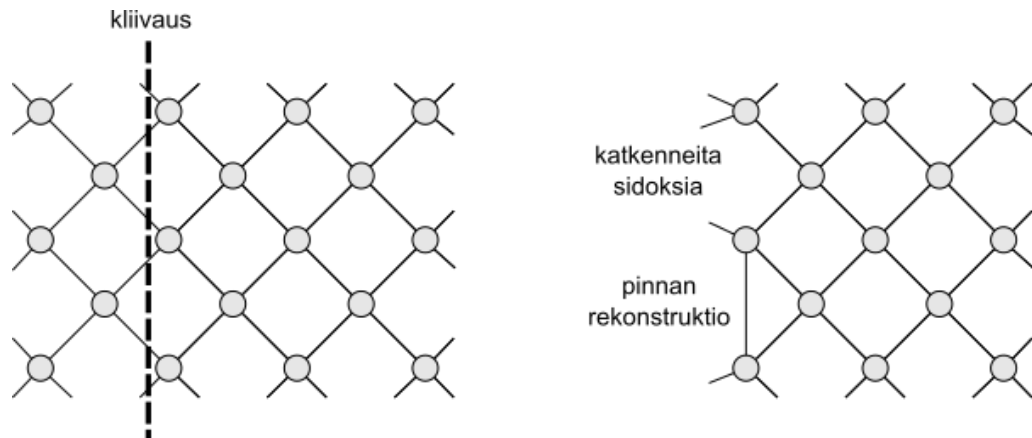
Laserdiodin luotettavuuden, kestävyuden ja saavutettavan ulostulotehon määrittää pitkälti laserdiodin päätypeilien laatu, joka vaikuttaa sekä laserdiodin COD-tasoon että pitkän aikavälin degradaatioon [3]. Kliivatulle puolijohdepinnalle muodostuvat pintatilat lisäävät säteilemättömiä rekombinaatioita, joka saa fasetin kuumentumaan ja voi lopulta johtaa laserdiodin pysyvään vaurioitumiseen. Fasetin laatua voidaan parantaa erilaisilla passivointikäsittelyillä, jotka vähentävät pintatilojen tiheyttä pinnalla ja siten pienentävät säteilemättömän rekombinaation nopeutta. Passivointikäsittely koostuu tyypillisesti kolmesta vaiheesta: pinnan puhdistamisesta, diffuusioesteenä toimivan passivointikerroksen pinnoittamisesta ja dielektrisen pinnoituksen pinnoittamisesta.

3.1 Pintatilat

Laserdiodien päätypeilit valmistetaan yleensä kliivaamalla puolijohdekierokko baareiksi puolijohderakenteen kiderakenteen pitkin, jolloin faseteista saadaan samansuuntaiset, kaviteettiin nähden kohtisuorat ja tasaiset. Yksinkertaistettu kuva 3.1 havainnollistaa, miten kliivaaminen katkaisee kiderakenteen sidokset. Kliivaamisen seurauksena puolijohdemateriaalin pintaan jää katkenneita saturoitumattomia sidoksia, jotka reagoivat herkästi ympäristön atomien ja molekyylien kanssa. [2] Pinnan katkenneiden sidosten energiatilojen muodostamat energiavyöt saattavat osua osittain päällekkäin varsinaisen puolijohdemateriaalin energiavyöiden kanssa, jolloin pinnan ja puolijohdemateriaalin energiavyöiden vuorovaikutus saa pinnan energiavyöt levenemään. Pinnan energiavyöt saattavat edelleen olla havaittavissa, jolloin niitä kutsutaan pintaresonansseiksi. Jos taas pinnan energiavyöt osuvat puolijohdemateriaalin energia-aukon alueelle, niitä kutsutaan pintatiloiksi. [16]

Kliivattu pinta pyrkii pienentämään energiaansa järjestämällä pinnan atomeja uudelleen, mitä kutsutaan pinnan rekonstruktiksi. Tämän takia pintatilojen tiheys pinnalla on yleensä pienempi kuin kliivatessa katkenneiden sidosten määrä. Mekanismi, jolla rekonstruktio käytännössä tapahtuu, riippuu kyseessä olevasta puolijohdemateriaalista, pinnan adsorboimista epäpuhtausatomeista sekä kiderakenteesta, jota pitkin pinta on kliivattu. [2] Esimerkiksi kliivatuilla ryhmien III ja V yhdistepuolijohdeiden (110)-pinnoilla rekonstruktio tapahtuu tyypillisesti siten, että pinnan kationit työntyvät hieman pinnasta ulospäin ja anionit sisäänpäin, mikä työntää pintatilojen energiavyöitä pois puolijohdeenergiavuonon alueelta. Tämä mekanismi perustuu lähinnä sidosten kiertymiseen, jolloin sidosten pituus muuttuu vain hieman. [17] Rekonstruktio voi tapahtua myös pinnalle adsorboituneiden

epäpuhtausatomien avulla, jolloin epäpuhtausatomit satureivat osan katkenneista sidoksista [16]. Puolijohdepintojen hilavirheitä ja rekonstruktiota on mahdollista tutkia yksityiskohtaisesti skannaavalla tunnelointimikroskoopilla [17, 18].



Kuva 3.1. Puolijohdemateriaalin kliivaaminen kidetasoa pitkin jättää pinnalle katkenneita satureitumattomia sidoksia. Pinta pyrkii pienentämään energiaansa järjestämällä pinnan atomeita uudelleen tai satureimalla osan katkenneista sidoksista, mitä kutsutaan rekonstruktioksi. Pinnalle jäävien katkenneiden sidosten energiavyöt voivat osua puolijohdemateriaalin energia-aukon alueelle, jolloin niitä kutsutaan pintatiloiksi. Perustuu lähteeseen [2].

Pintatilat ovat hyvin paikallisia, joten niiden tilatiheys pinnalla on hyvin suuri. Pintatilojen suuri tilatiheys saa Fermi-tason kiinnittymään tiettyyn energiaan pinnan kokonaisvaraustilanteen perusteella sen sijaan, että Fermi-taso määräytyisi varsinaisen neutraalin puolijohdemateriaalin perusteella. Tasapainotilassa Fermi-tason täytyy olla sama pinnassa ja puolijohdemateriaalissa, joten Fermi-tason kiinnittyminen johtaa puolijohdemateriaalin energiavöiden taipumiseen pinnassa, kun vyöt mukautuvat kiinnitettyyn Fermi-tasoon. Akseptorina toimiva pintatila muodostaa pinnalle negatiivisen varauksen täytyessään elektronilla, jolloin vyöt taipuvat ylöspäin. Vastaavasti pintatilan toimiessa donorina se muodostaa pinnalle positiivisen varauksen luovuttaessaan elektronin, jolloin vyöt taipuvat alaspäin. [2]

Fermi-tason kiinnittyminen riippuu pinnasta, pinnan rekonstruktiosta, kliivauksen laadusta ja pinnan kontaminaatiosta. Esimerkiksi GaAs:in tai usean muun ryhmien III ja V yhdistepuolijohteen puhtaan ja vauriottoman kliivatun (110)-pinnan energiatilat eivät lähtökohtaisesti osu energia-aukon alueelle [17]. Pinnan katkenneet satureitumattomat sidokset johtavat kuitenkin helposti hilavirheidensä syntymiseen, oksidin muodostumiseen ja ympäristön epäpuhtauksien adsorboitumiseen pinnalle, ja lisäksi kliivaus on voinut aiheuttaa vaurioita pintaan. Nämä kaikki voivat luoda energiatiloja energia-aukon alueelle ja aiheuttaa Fermi-tason kiinnittymisen. [2, 16]

Pintatilat toimivat rekombinaatiokeskuksina kasvattaen säteilemättömän rekombinaation nopeutta pinnalla, mikä johtaa fasetin lämpenemiseen ja pahimmillaan fasetin vaurioitumiseen. Kun pintatilat kasvattavat säteilemättömän rekombinaation nopeutta pinnassa, vähemmistövarauksen kuljettajat alkavat ehtyä pinnan lähellä, jolloin ympäriltä

alkaa virrata vähemmistövarauksenkuljettajia pinnan lähelle. Pinnalla tapahtuvan säteilemättömän rekombinaation nopeutta rajoittaa siis nopeus, jolla vähemmistövarauksenkuljettajat siirtyvät kohti pintaa. Pinnan säteilemättömän rekombinaation nopeus on InP-pohjaisilla laserdiodeilla huomattavasti pienempi kuin GaAs-pohjaisilla, joten fasettien laatu on suurempi ongelma lyhyemmän aallonpituuden GaAs-lasereilla. [2] GaAs-pohjaisten rakenteiden pinnan rekombinaationopeus on erityisen nopeaa siksi, että niiden pinta hapettuu nopeasti ilmalle altistuessaan. Erityisesti AlGaAs hapettuu helposti, sillä alumiini on hyvin reaktiivista. Hapettumisreaktioiden seurauksena syntyvät As ja As_2O_3 ovat todennäköisin suuren pintatilatehden aiheuttaja näissä materiaaleissa. [5] Hapettuminen on sitä nopeampaa, mitä suurempi osa alumiinia rakenteessa tarvitaan. Alumiinin käyttö toisaalta parantaa rakenteen lämpötilastabiilisutta, mutta toisaalta heikentää luotettavuutta. [4] Fasetin pinnan laatua voidaan parantaa sopivilla pinnan passivointikäsitteillä, jotka vähentävät pintatilojen määrää ja siten pienentävät säteilemättömän rekombinaation nopeutta pinnalla.

3.2 Puolijohdepinnan passivointi

Fasetin passivoinnilla tarkoitetaan fasetin prosessointia sen laadun parantamiseksi ja vaurioitumisen välttämiseksi. Passivoinnilla on monta tavoitetta. Sillä poistetaan pinnalta pintatiloja sitomalla pinnan katkenneita sidoksia ja poistamalla pinnalta epäpuhtauksia ja pinnalle jo muodostuneita oksideja, sekä täytetään hapettumiselle alttiita pintatiloja. Passivoinnilla vähennetään fasetilla tapahtuvaa valon siroamista stabilisoimalla pinnan kiderakennetta ja minimoidaan pinnoitteen absorptio laserin aallonpituudella. Lisäksi passivoinnilla estetään hapen diffuusiota ilmasta tai dielektripinnoitteesta puolijohdepintaan sekä vastavuoroisesti pinnan atomien diffuusiota pinnoitteeseen. [2, 4]

Tyypillisesti passivointikäsitteily koostuu kolmesta vaiheesta: pinnan puhdistuksesta, passivoivan kerroksen pinnoittamisesta ja varsinaisen peilirakenteen pinnoittamisesta. Ensimmäisen vaiheen eli puhdistuskäsittelyn tarkoitus on vähentää pintatilojen määrää ja poistaa pinnalta epäpuhtauksia ja pinnalle mahdollisesti jo muodostunut oksidikerros. [3] Epäpuhtauksista erityisesti termodynaamisesti epästabiilit aineet, kuten arseeni, arseenin oksidit ja vesi, on tärkeää saada poistettua, sillä ne edistävät fasetin vaurioitumista [7]. Puhdistuksella saadaan myös parannettua pinnoitteen adheesiota pintaan [19]. Fasetti voidaan puhdistaa kemiallisesti liuoksella, fysikaalisesti etsaamalla pintaa ionipommituksella tai yhdistämällä kemiallinen reaktio ionipommitukseen.

Kun fasetti passivoidaan pelkästään kemiallisesti liuoksen avulla, vältetään fasetin altistuminen energisten hiukkasten pommitukselle. Usein käytetty liuospuhdistusmenetelmä on sulfidointi [4, 20, 21], jossa kiviainet baarit upotetaan epäorgaanisten sulfidien liuokseen, tavallisimmin ammoniumsulfidi- eli $(NH_4)_2S$ -liuokseen. Tämän jälkeen fasetit huuhdellaan ja puhalletaan kuiviksi. Sulfidointikäsitteilyn on havaittu poistavan pinnalta oksideja ja muodostavan pinnalle sulfideja oksidien sijaan [2]. Sulfidoinnin jälkeen fasetti vaatii esimerkiksi SiN_x -kerroksen tai muun passivointikerroksen pinnoituksen, sillä sulfidikerros

hapettuu melko nopeasti altistuessaan ilmalle ja pinnan laatu alkaa vähitellen heikentyä kohti alkuperästä tilaansa [20]. Fasetin puhdistamista fysikaalisesti epäreaktiivisten ionien pommituksen avulla on kokeiltu muun muassa argonilla [4, 9]. Fysikaaliseen etsaukseen perustuva puhdistusmenetelmä voi perustua ionipommituksen sijaan myös laserablaatioon [22].

Puhdistusprosesseja, joissa hyödynnetään sekä kemiallista reaktiota että ionipommituksen pinnalle tuomaa lisäenergiaa ovat esimerkiksi hydrogenointi, jossa pintaa pommitetaan vetyioneilla [7], ja nitridaatio, jossa käytetään typpeä. Typpi sitoutuu pinnan III-atomeihin saturoiden pinnan katkenneita sidoksia ja muodostaen pinnalle kemiallisesti stabiilin nitridikerroksen [23]. Muodostuvan nitridikerroksen energia-aukko on puolijohdemateriaalia suurempi, mikä estää absorptiota laserin aallonpituudella. Kun pinta on puhdistettu argonin ja typen kaasuseoksella, on saatu parempia tuloksia kuin puhdistamalla vain toisella näistä kaasuista [6]. Vety ja typpi ovat kumpikin reaktiivisia kaasuja, jolloin ne puhdistavat pintaa kemiallisesti. Ioniavusteisessa puolijohdeiden puhdistuksessa käytetään hyvin matalia ionien energiaa, korkeintaan kymmenien elektronivolttien luokkaa, sillä puolijohderakenne vaurioituu helposti ionipommituksesta [9, 19].

Passivointiprosessin toisessa vaiheessa pinnoitettava passivointikerros on suojaava dielektripinnoite, jonka tarkoituksena on säilyttää pinta puhtaana puhdistuksen jälkeen. Passivointikerros toimii diffuusioesteena, suojaa fasettia ympäristön hapelta ja kosteudelta sekä osallistuu sopivan heijastavuuden muodostamiseen fasetille. Dielektrikerros voi kuitenkin jo itsessään heikentää laserlaitteen luotettavuutta, sillä pinnoitteesta voi diffusoitua happea puolijohdepintaan. [4] Passivointikerroksen pinnoittaminen tulee tehdä mieluiten välittömästi puhdistuksen jälkeen ja fasetin altistuminen hapelle puhdistuksen ja pinnoitusten välissä tulee minimoida. Tavallisia passivointikerroksen materiaaleja ovat esimerkiksi SiN_x [5, 6], ZnSe [7, 8] ja amorfinen pii eli $\alpha\text{-Si}$ [4, 9]. SiN_x -kerros on usein käytetty materiaali passivointikerroksessa, sillä se estää tehokkaasti kosteuden diffuusiota, se ei ole herkkä lämpötilalle ja sillä on suuri energia-aukko. Lisäksi kerroksesta saadaan kemiallisesti inertti ja mekaanisesti vahva. [5, 6] Myös ZnSe-kerroksella on laaja energia-aukko, se toimii tehokkaana diffuusioesteena hapelle ja lisäksi estää elektronien ja aukkojen pääsyn pinnalle vähentäen rekombinaatiota pinnalla [8]. SiN_x -passivoinnilla on joissain tutkimuksissa saavutettu pidemmät laseriodien eliniät kuin $\alpha\text{-Si}$ -passivoinnilla ja merkittävästi pidemmät kuin ZnSe-passivoinnilla [3]. Myös alumiininitridiä (AlN) on testattu passivointikerroksena [10, 11]. AlN on mekaanisesti vahvaa ja kemiallisesti stabiilia, mutta tutkimuksessa kerroksesta saatiin oksidivapaa vasta tarpeeksi alhaisessa jäännöspaineessa [10].

Amorfinen pii sekä muun muassa alumiini [24] ovat passivointikerroksina reaktiivisia. Muita reaktiivisia aineita, jotka voivat soveltua passivointikerrokseen, ovat esimerkiksi Ta ja Ti. Reaktiivisen passivointikerroksen toiminta perustuu siihen, että kerros sitoo korkean reaktiivisuutensa takia itseensä happea, oksideja, vettä ja muita reaktiivisia epäpuhtauksia, jotka diffusoituvat fasetilta passivointikerrokseen. Kerroksen pitää olla tarpeeksi paksu, jotta se saa sidottua itseensä tarpeeksi epäpuhtauksia. [2] Esimerkiksi 2 nm:n paksuista alumiinikerrosta on testattu [24].

Kolmas vaihe on varsinaisten AR- tai HR-kerroksien pinnoitus. Näiden kerrosten kasvatusta ei saa vaurioittaa passivointikerrosta, vaan pinnoitteiden tulee säilyttää fasetin laatu hyvänä. Pinnoitteiden absorptio laserin aallonpituudella tulee minimoida, pinnoitteiden hyvä adheesio puolijohdepintaan varmistaa ja pinnoitteiden stabiilisuudesta huolehtia, jotta ajan kuluessa ympäristöstä ei diffusoidu epäpuhtauksia aktiiviselle alueelle. [14] Haasteena on saada kasvatettua pinnoite, joka sekä osallistuu laseriodin fasetin passivoimiseen että tarjoaa sopivan heijastavuuden. Tavallisia AR-pinnoitteen materiaaleja ovat oksidit, kuten SiO_2 ja Al_2O_3 , jotka eivät sovellu varsinaiseksi passivointikerrokseksi, sillä happi voi diffuusoitua pinnoitteesta puolijohdemateriaalin pinnalle.

Kun fasetit kliivataan ilmassa, ne ehtivät hapettua ja adsorboida epäpuhtauksia ennen pinnoitusta. Fasettien pitkän aikavälin kestävyttä onkin saatu parannettua kliivaamalla baarit tyhjiössä. Ultratyhjiökliivauksessa laserbaarit kliivataan, pinotaan, passivoidaan ja mahdollisesti myös pinnoitetaan pitämällä baarit koko prosessin ajan tyhjiössä, jolloin kliivatut fasetit eivät altistu ilmalle lainkaan eikä fasettien plasmapuhdistusta tarvita. Ultratyhjiökliivaus suoritetaan tavallisesti noin 10^{-8} Pa:n paineessa. Laitteistosta riippuen baarit saatetaan poistaa tyhjiöstä fasettien passivoinnin jälkeen ja siirtää ne erilliseen pinnoituslaitteistoon päätypeilien pinnoitusta varten. Ultratyhjiökliivauslaitteistoista ei löydy paljoa yksityiskohtia kirjallisuudesta, mutta prosessin tuloksia on esitelty paljon [3, 25, 26, 27]. Ultratyhjiökliivaus on kuitenkin monimutkaista ja kallista, eikä se sovellu vielä suuren volyymin tuotantoon.

Yksi tunnettu ultratyhjiökliivausprosessi on alun perin IBM:n kehittämä E2-prosessi. Alkuperäisessä E2-prosessissa kliivausmerkki tehtiin laitteiston ulkopuolella ja kliivattava puolijohdekierokkeen pala kohdistettiin sen avulla oikealle kohdalle laitteistoon. Fasettien altistuminen ilmalle ja hapettuminen on pyritty minimoimaan pinnoittamalla fasetit välittömästi kliivauksen jälkeen ohuella α -Si-kerroksella. Passivoinnilla saadaan parannettua laseriodien COD-tasoa entisestään, kun jo kliivauksen aikana faseteille kohdistetaan piivirtaus, jotta fasetit altistuisivat kammion jäännöskaasuille mahdollisimman vähän. E2-prosessia on paranneltu vuosien aikana, ja nykyään laitteistot ovat pitkälle automatisoituja ja mahdollistavat korkeamman tuotantokapasiteetin ja pienemmät tuotantokustannukset. [2, 25] Tyhjiössä kliivaamisen on todettu parantavan merkittävästi laseriodien elinikää, mutta ei välttämättä COD-tasoa [3].

4 PUOLIJOHDEPINTOJEN PUHDISTUS PLASMATEKNIIKOILLA

Plasmaa hyödynnetään useissa eri puolijohdeteollisuuden prosesseissa, kuten ionisädesputteroinnissa, jossa ionisäde muodostetaan plasmalähteestä ja ionikiihdyttimestä koostuvalla ionilähteellä. Kahden ionilähteen ionisädesputterointilaitte tarjoaa laajemman parametrivalikoiman ohutkalvojen pinnoituksessa sekä mahdollistaa puolijohdepinnan puhdistuksen ja pinnoituksen samassa laitteessa purkamatta tyhjiötä välissä, jolloin vältetään pinnan altistuminen ilmalle prosessin aikana.

4.1 Plasma

Plasma koostuu positiivisesti varautuneista ioneista, elektroneista sekä neutraaleista atomeista tai molekyyleistä. Plasmassa elektroneja on suurin piirtein yhtä paljon kuin positiivisesti varautuneita ioneja, joten kokonaisuudessaan plasma on lähes neutraali. Plasmassa ioneja ja elektroneja kuluu koko ajan niiden törmätessä toisiinsa tai ympäröiviin rakenteisiin, mutta toisaalta ioneja ja elektroneja myös syntyy jatkuvasti ionisoivien törmäysten seurauksena. Plasma on stabiili, kun vapaita elektroneja kuluu ja syntyy yhtä nopeasti. Kun plasma koostuu molekyyleistä, plasmassa tapahtuu myös törmäyksiä, joissa elektroni dissosioi molekyylin kahdeksi hyvin reaktiiviseksi vapaaksi radikaaliksi. Plasman hehku syntyy törmäyksistä, joissa elektronin energia ei riitä atomin tai molekyylin ionisoimiseen, vaan elektronin energia virittää atomin tai molekyylin. Tämän viritystilan elinikä on hyvin lyhyt, joten viritystila purkautuu pian vapauttaen fotonin, jonka taajuus määrittää plasman värin. [28] Eri atomien ja molekyylien eri energiatasorakenteista johtuen esimerkiksi argonplasma on violettia, typpiplasma punertavaa ja vetyplasma valkoista.

Plasmaprosessit ovat yleisiä puolijohdeteollisuudessa. Plasman ioneja käytetään puolijohdemateriaalien ioni-implantaatioon esimerkiksi kiekkojen seostamisessa sekä irrottamaan materiaalin pinnasta atomeja esimerkiksi puhdistuksessa, sputteroinnissa ja pinnan kuvioden etsauksessa. Ohutkalvopinnoituksessa plasman ioneja käytetään tuomaan energiaa pinnalle. Tällöin pinnalta saadaan esimerkiksi poistettua heikosti sitoutuneita atomeja, tai pinnan atomeja saadaan autettua löytämään energian minimoiva sijainti lisäämällä niiden liikemäärää. Plasman elektroneja puolestaan voidaan hyödyntää pinnan neutralointiin tai kuumentamiseen kuumentamatta koko näytettä. Plasmaan perustuvia prosesseja ovat muun muassa reaktiivinen ionietsaus (engl. Reactive Ion Etching, RIE), plasma-avustettu kemiallinen höyryfaasipinnoitus (engl. Plasma-Enhanced Chemical Vapor

Deposition, PECVD) ja ionisädesputterointi. Kun ohutkalvot pinnoitetaan plasmamenetelmällä, kalvoihin saadaan parempi laatu, johtavuus, uniformisuus ja vähemmän epäpuhtauksia kuin haihduttamiseen perustuvilla depositiomenetelmillä, ja prosessi on kontrolloidumpi. [28]

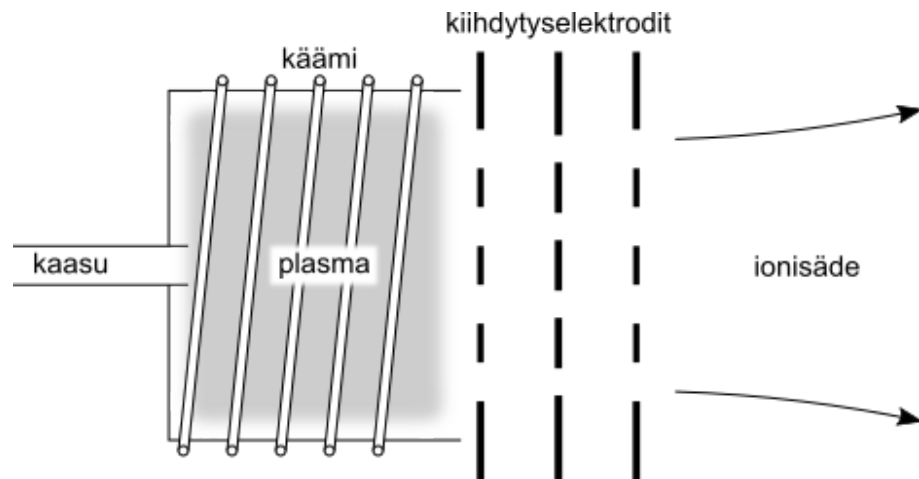
Plasmalähteissä plasma saadaan sytytettyä ja plasmaa ylläpitävä energia välitettyä kiihdyttämällä elektroneja joko tasavirralla kuumennetun katodin avulla Kaufman- tai DC-tyyppisissä plasmalähteissä, induktiivisesti tai kapasitiivisesti kytketyllä radiotaajuuskentällä RF-tyyppisissä plasmalähteissä tai magneetti- ja mikroaaltokenttien avulla ECR-tyyppisissä plasmalähteissä [29]. Ionisädesputteroinnissa plasmalähteenä käytetään usein induktiivisesti kytkettyä radiotaajuus- eli RF-lähdettä (engl. Radio frequency). Kapasitiivisesti kytketyssä plasmassa (engl. Capacitively Coupled Plasma, CCP) eli kun RF-teho on kytketty kahden samansuuntaisen elektrodilevyn väliin, substraatti on kiinni toisessa elektrodissa ja kontaktissa plasmaan, kun taas induktiivisesti kytketyssä plasmassa (engl. Inductively Coupled Plasma, ICP) RF-teho on kytketty käämiin ja plasma ja substraatti voidaan pitää erillään plasmasta.

Induktiivisesti kytketyssä plasmalähteessä työkaasulla täytettyä plasmalähteen säiliötä ympäröi käämi, johon syötetään RF-tehoa. Käämissä kulkeva värähtelevä virta saa aikaan värähtelevän sähkömagneettisen kentän, joka luo induktiivisesti värähtelevän sähkökentän, joka kiihdyttää sytyttämisvaiheessa työkaasuun injektoituja elektroneja tai syntyneen plasman vapaita elektroneja. Saatuaan tarpeeksi energiaa nämä kiihdytetyt elektronit törmäävät plasmäsäiliössä atomiin tai molekyyliin, joka ionisoituu ioniksi ja vapaaksi elektroniksi. Näiden törmäysten lisääntyessä plasmäsäiliö täyttyy ioneista ja elektroneista, eli syntyy plasma. [30]

Kun plasmalähde yhdistetään ionikiihdytimeen, saadaan ionilähde. Ionisädesputterointilaitteessa ionien kiihdyttämiseen käytetään tyypillisesti elektrodiristikkorakennetta. Esimerkiksi Hallin ilmiöön perustuvia, elektrodiristikottomia ionilähteitä on olemassa, mutta näiden ionilähteiden tuottamien ionisäteiden energia ei usein riitä sputterointiin. Elektrodirakenne kiihdyttää plasmasta elektrodirakenteeseen tunkeutuneet ionit, kokoaa sähkökenttensä avulla ioneista säteen kohti sputteroitavaa materiaalia ja mahdollistaa ionisäteen tarkan kontrolloinnin. Kiihdytin koostuu tyypillisesti kahdesta tai kolmesta elektrodiristikosta. Kuvassa 4.1 on havainnollistettu RF-plasmalähteestä ja kolmen elektrodiristikon kiihdyttimestä muodostuvaa ionilähdettä. Ensimmäisen elektrodin positiivinen jännite U_+ määrittää yhdessä plasman potentiaalin U_{plasma} kanssa ionien energian E_{ioni} :

$$E_{\text{ioni}} = e(U_+ + U_{\text{plasma}}), \quad (4.1)$$

missä e on alkeisvaraus. Plasman potentiaali on yleensä pieni suhteessa ensimmäisen elektrodin potentiaaliin, korkeintaan muutamia kymmeniä voltteja, joten käytännössä elektrodin positiivinen jännite määrittää pääasiassa ionien energian. Toinen elektrodi on negatiivisessa potentiaalissa ja kiihdyttää positiiviset ionit. Kolmas elektrodi on



Kuva 4.1. Ionisädesputterointilaitteissa usein käytetty induktiivisesti kytketystä RF-plasmalähteestä ja ionikiihdyttimestä koostuva ionilähde. Kiihdytin koostuu kolmesta elektrodiristikosta.

maapotentiaalissa ja hidastaa ioneja. Kolmannen elektrodin tarkoitus on pienentää ionisäteen divergenssiä ja estää hitaiden ionien kiihtymistä takaisin kohti kiihdytysverkkoa. [29]

4.2 Ionisädesputterointi

Ohutkalvojen pinnoitukseen on kehitetty laaja valikoima menetelmiä, jotka voidaan karkeasti jakaa fysikaaliseen höyryfaasipinnoitukseen (engl. Physical Vapor Deposition, PVD), kemialliseen höyryfaasipinnoitukseen (engl. Chemical Vapor Deposition, CVD) ja nestefaasidepositioon. PVD-menetelmissä pinnoitettavaa materiaalia irrotetaan kiinteästä materiaalista esimerkiksi kuumentamalla, laserablaatiolla tai ionipommituksella, jonka jälkeen materiaali kulkeutuu tyhjiössä pinnoitettavan substraatin pinnalle ja deposoituu muodostaen ohutkalvon. PVD-menetelmät voidaan edelleen jakaa haihdutusmenetelmiin ja sputterointiin. [31]

Sputteroinnissa kohdemateriaalia pommitetaan matalaenergisillä ioneilla, jotka irrottavat kohdemateriaalin pinnasta atomeja törmätessään pintaan. Kohdemateriaalista irrotetut atomit kondensoituvat pinnoitettavan substraatin pinnalle muodostaen ohutkalvon. Ohutkalvopinnoituksen lisäksi sputterointiprosessia voidaan käyttää ioni-implantaatioon tai etsaamiseen eli poistamaan epätoivottua materiaalia kohdemateriaalin pinnalta. [29] Sputteroinnin etuja ovat suuri depositionopeus, kasvatetun kerroksen uniformisuus laajalla alueella ja toistettavuus [30]. Sputterointi ei vaadi yhtä alhaista tyhjiötä kuin haihdutusmenetelmät, ja lisäksi sputteroinnilla saavutetaan parempi adheesio ja tiheimmät kalvot energisten ionien irrottaessa pinnalta heikosti sitoutuneita kasvatusaine- ja epäpuhtausatomeja. Toisaalta korkeaenergiset ionit saattavat myös aiheuttaa vaurioita kalvoon tai substraatille. [31] Sputterointi sopii laajalle valikoimalle materiaaleja, ja sillä pystytään pinnoittamaan yhdisteitä ja kontrolloimaan pinnoitteen stoikiometriaa paremmin kuin haihdutus- tai CVD-menetelmillä. Sputteroinnissa kaasuna käytetään yleensä argonia,

sillä se on inerttiä ja massaltaan lähellä useita tyypillisiä pinnoitettavia aineita, jolloin liikemäärän siirtyminen atomien välillä on tehokasta. [32] Sputterointiin käytettävän kaasun on tärkeää olla inerttiä siksi, että sputterointiin käytetyt ionit siroavat kohdemateriaalista, jolloin osa niistä kulkeutuu substraatille ja päätyy mukaan pinnoitettavaan kalvoon [29].

Sputterointimenetelmät voidaan käytetyn plasmalähteen perusteella jakaa DC-sputterointiin, RF-sputterointiin, magnetronisputterointiin ja ionisädesputterointiin (engl. Ion Beam Sputtering, IBS). Ionisädesputteroinnissa ionilähde, sputteroitava materiaali ja pinnoitettava substraatti ovat sputterointikammiossa erillään toisistaan, jolloin pinnoitteesta saadaan muihin sputterointimenetelmiin verrattuna puhtaampi ja sputterointiprosessi on paremmin kontrolloitavissa [29]. Erillisestä plasmalähteestä ionit kiihdytetään elektrodirakenteella ionisäteeksi, joka on kohdistettu sputteroitavaan materiaalikohtioon. Toisin kuin muissa sputterointimenetelmissä, ionisädesputteroinnissa pinnoitettava substraatti ei ole suoraan kosketuksissa plasman kanssa. Tällöin substraatti ei lämpene yhtä paljon ja lisäksi kammion paine saadaan pienemmäksi, mikä osaltaan vähentää pinnoitteeseen pääsevien epäpuhtauksien ja sputterointikaasun atomien määrää [30].

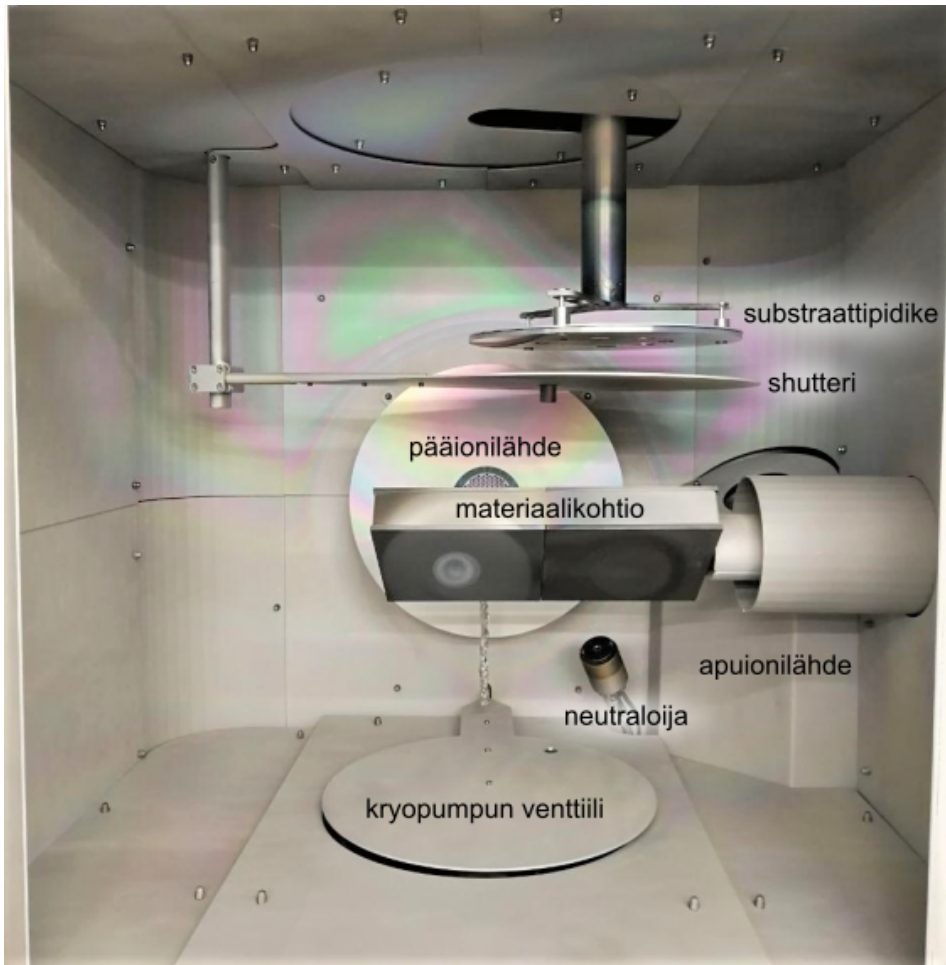
Ionisädesputterointi vaatii useimpien muiden ohutkalvokasvatusmenetelmien tapaan tyhjiön. Ilman tyhjiötä atomien törmäily taustakaasun atomeihin estäisi suurta osaa ioneista pääsemästä pinnoitettavalle substraatille asti. Atomin keskimääräinen vapaa matka eli matka, jonka atomi keskimäärin ehtii kulkea ennen törmäämistään toiseen atomiin, lasketaan kaavalla

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}N\sigma}, \quad (4.2)$$

missä N on atomien tai hiukkasten konsentraatio ja σ on atomin vuorovaikutusala. Mitä matalampi paine, sitä pienempi on atomien konsentraatio kammiossa ja sitä pidempi on atomien keskimääräinen vapaa matka. Pieni vapaa matka mahdollistaa sen, että pinnoitettavan aineen atomit pääsevät ionisädesputterointilaitteessa kulkeutumaan kohtiolta substraatille asti. [28]

Kuvassa 4.2 on esimerkkinä tässä työssä käytetty Cutting Edge Coatings Navigator-ionisädesputterointilaitte, jossa on kaksi erillistä ionilähdettä. Pinnoitettavat näytteet kiinnitetään kammion kattoon pyörivään pidikkeeseen. Substraattipidikettä pyöritetään, jotta ionisäde osuisi näytteille mahdollisimman tasaisesti. Substraattishutterilla voidaan tarvittaessa estää materiaalivirtaus kohtiolta näytteille. Kiinteät pinnoitusmateriaalit sijaitsevat keskellä kammiota olevassa kohtiossa, jota liikuttamalla ja kääntämällä saadaan vaihdettua pinnoitettava materiaali. Neutraloija suuntaa ionisäteeseen elektronivirtauksen, joka purkaa ionilähteestä kammioon kiihdytettyjen ionien varauksen estäen kammion komponenttien ja substraatin varautumisesta mahdollisesti aiheutuvat haitat. Kammion pohjassa olevan kryopumpun venttiilin kautta kammio pumpataan tyhjiöön. Kammion takaseinän pääionilähde on kohdistettu siten, että ionisäde osuu kohtioon, josta irtoava materiaali kulkeutuu substraatille. Apuionilähde puolestaan on kohdistettu suoraan substraattipidikettä kohti.

Kuvan 4.2 kaltainen kahden ionilähteen konfiguraatio mahdollistaa useiden erilaisten prosessien toteuttamisen yhdellä laitteella ja tuo lisää kontrolloitavuutta kasvatettavan



Kuva 4.2. Ionisädesputterointilaitteen rakenne. Pääionilähde on suunnattu kohti kasvatusmateriaaleja, kun taas apuionilähde on suunnattu suoraan kohti näytteitä.

kerroksen koostumukseen. Kun ohutkalvokasvatusta avustetaan suoraan substraatille kohdistetun ionisäteen avulla, kasvatusprosessia kutsutaan ionisädeavustetuksi depositioksi (engl. Ion-Beam Assisted Deposition, IBAD). Ionisädeavustettu depositio ei rajoitu vain ionisädesputterointiin, vaan avustava ionilähde on mahdollista yhdistää useaan eri kasvatusmenetelmään, esimerkiksi elektronisädehaihdutukseen. Ionisädeavustetussa depositiossa avustava ionisäde tuo lisää energiaa kasvavalle kalvolle pinnan atomien liikemäärän kasvattamiseksi, mikä nopeuttaa kasvatusta, lisää kasvatettujen kalvojen tiheyttä, mahdollistaa pinnoitteen ominaisuuksien paremman kontrolloinnin ja voi parantaa kalvon adheesiota substraattiin. Ionisädeavustetun deposition lisäksi kahden ionilähteen ionisädesputterointilaitteen apuionilähdettä voidaan käyttää etsaamaan materiaalia pois substraatin pinnalta. Tällaista prosessia kutsutaan ionisäde-etsaukseksi (engl. Ion Beam Etching, IBE). [30] Apuionilähdettä voidaan käyttää myös substraatin pinnan puhdistamiseen, kiillottamiseen tai tasoittamiseen. Apuionilähteellä voidaan tuoda lisää aineita mukaan kasvatusprosessiin, mikä mahdollistaa myös kiinteistä ja kaasumaisista alkuaineista koostuvien yhdisteiden kasvattamisen substraatin pinnalle. Näin voidaan kasvattaa esimerkiksi oksidi- ja nitridikalvoja. Tällaisia yhdisteitä on mahdollista pinnoittaa myös suoraan sputteroimalla kyseisestä yhdisteestä koostuvaa materiaaliakohtiota, mutta

sputteroinnin myötä kaasukomponentti poistuu kohtiolta kiinteää komponenttia nopeammin, jolloin kiinteää komponenttia pääsee pinnoitteeseen ylimäärin. Oikea stoikiometria saadaan paremmin varmistettua sputteroimalla vain kiinteää ainetta ja pitämällä ylimäärä kaasumaista ainetta taustalla. Depositioireaktio toteutetaan useimmiten käyttämällä apuioneina suoraan kaasumaisen aineen ioneja, mutta apuioneina voidaan käyttää myös toista inerttiä kaasua, joka aktivoi taustakaasun. [19] Tällaista sputterointimenetelmää, jossa kiinteä aine reagoi kaasumaisen aineen kanssa substraatin pinnalla muodostaen pinnalle yhdistekalvon, kutsutaan reaktiiviseksi sputteroinniksi [32].

Tässä työssä ionisädesputterointilaitteen apuionilähdettä hyödynnettiin laserdiodien etufasettien passivoinnissa. Pommittamalla pintaa ionisäteellä sopivalla energialla saadaan puolijohdemateriaalin pinnalta poistettua epäpuhtauksia ja pinnalle jo muodostunutta oksidia [19]. Tämän jälkeen apuionilähdettä hyödynnettiin $\text{SiN}_x\text{:H}$ -passivointikerroksen pinnoittamiseen siten, että pääionilähteen avulla sputteroititiin piikohtiota ja apuionilähteellä tuotiin pinnalle ylimäärä typpeä sekä pieni määrä vetyä pelkistämään mahdollista jäännöshappea näytteiden pinnalta. Kun laserbaarien etufasetit saadaan puhdistettua ja passivointikerros sekä AR-pinnoite pinnoitettua samassa laitteessa purkamatta tyhjiötä välissä, vältetään fasettien altistuminen ilmalle ja hapettuminen prosessivaiheiden välissä.

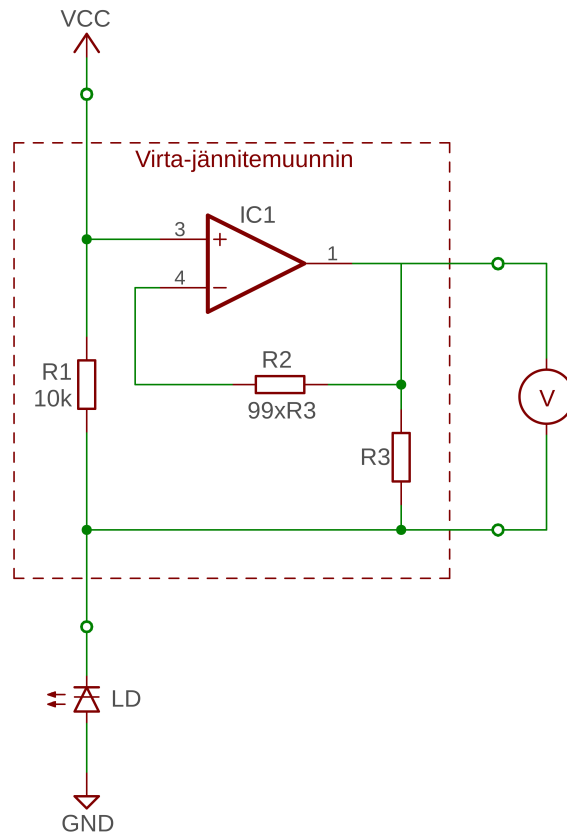
5 MITTAUSMENETELMÄT

Laserdiodien etufasettien passivointiprosessien onnistumista tutkittiin vuotovirtamittausten, COD-tasojen, elinikämittausten, fotoluminesenssispektrien ja atomivoimamikroskooppikuvien avulla. Laserdiodista mitattu vuotovirta kertoo passivoinnin onnistumisesta johtavien pintatilojen poistamisessa ja hapettumiselle alttiiden pintatilojen passivoinnissa. Laserdiodin COD-taso kuvaa, miten pinnoituksilla on onnistuttu minimoimaan absorptio laserin aallonpituudella, sekä kertoo vuotovirran tavoin pintatilojen poistamisen onnistumisesta. Laserdiodin elinikä kertoo, onko pinta saatu käsittelyllä pysymään passiivisena riittävän pitkän ajan. Fotoluminesenssispektri kertoo passivointikäsittelyn vaikutuksesta puolijohderakenteeseen, kun taas atomivoimamikroskooppikuvat paljastavat pinnan morfologian käsittelyn jälkeen ja tuottavat numeerista karheusinformaatiota pinnoista.

5.1 Vuotovirtamittaukset

Kun laserdiodia ei ole biasoitu, laserdiodin n- ja p-puolien välinen potentiaaliero, kontaktipotentiaali, toimii potentiaalivallina, joka pitää laserdiodin tasapainotilassa. Tällöin laserdiodin n- ja p-puolien välillä kulkevat diffuusio- ja ajautumisvirtakomponentit kumoavat toisensa, eikä laserdiodissa kulje nettovirtaa. Kun laserdiodi kytketään estosuuntaan eli siten, että n-puoli on positiivinen suhteessa p-puoleen, syntyvä sähkökenttä vahvistaa tasapainotilan sähkökenttää ja potentiaalivalli n- ja p-puolien välillä kasvaa entisestään. Tällöin vain hyvin harvat elektronit ja aukot pääsevät kulkemaan laserdiodin yli. Ideaalisen laserdiodin tapauksessa tällöin laserdiodissa kulkee estosuuntaan vain pieni, jännitteestä riippumaton ja vakio saturaativirta. Todellisuudessa estosuuntaan kulkeva virta riippuu jännitteestä varauksenkuljettajien syntyessä tyhjennysalueella, jolloin sitä kutsutaan vuotovirraksi. Tällaista varauksenkuljettajien syntymistä tyhjennysalueella tapahtuu erityisesti energia-aukon alueen rekombinaatiokeskuksissa, joihin myös pintatilat toimivat. Jos estosuuntaan kytketty ulkoinen jännite ylittää tietyn kriittisen rajan, laserdiodissa voi tapahtua läpilyönti, jolloin estosuuntaan pääsee kulkemaan suurikin virta. [12]

Tässä työssä laserdiodien vuotovirrat mitattiin kuvan 5.1 mukaisella kytkennällä. Laserdiodi kytkettiin jännitelähteen kanssa estosuuntaan ja piirissä kulkeva virta mitattiin tarkan virta-jännitemuuntimen avulla. Muuntimen ulostulojännite mitattiin yleismittarilla. Virta-jännitemuunnin vahvistaa jännitteen 100-kertaiseksi ja vähentää yleismittarin sisäisen resistanssin vaikutusta mittaukseen mahdollistaen virran mittaamisen nanoampeerien tarkkuudella. Muuntimen ulostulojännite on suoraan verrannollinen sisäänmenovirtaan.



Kuva 5.1. Kytentäkaavio laserdiodien vuotovirtojen mittausjärjestelystä.

Vuotovirran suuruus kertoo fasetin passivoinnin laadusta. Onnistunut passivointi parantaa laserdiodin tehokkuutta muun muassa poistamalla fasetilta johtavia pintatiloja ja passivoimalla hapettumiselle alttiita pintatiloja. Mitä pienempi vuotovirta, sitä vähemmän fasetilla on johtavia pintatiloja ja sitä paremmin hapettumiselle alttiit pintatilat ovat passivoituja. [4] Vuotovirran avulla voidaan lisäksi arvioida esimerkiksi puolijohteen sisäisten kidevirheiden tai sähköstaattisten purkausten aiheuttaman vaurion suuruutta laserdiodissa. Esimerkiksi sähköstaattisten purkausten aiheuttamat vuotovirrat ovat merkittävästi suurempia silloin, kun vaurio on syntynyt tyhjennysalueella. [2]

Schottky-diodien passivoinnin SiN_x -kerroksella on mitattu pienentävän vuotovirtaa yhdellä tai kahdella kertaluokalla, minkä pääteltiin aiheutuvan siitä, että passivointi pienentää estojännitteen seurauksena varautuvien pintatilojen konsentraatiota, mikä vähentää säteilemätöntä rekombinaatiota [33]. LEDien kohdalla sulfidiliuospassivoinnin on todettu pienentävän vuotovirtaa ja kasvattavan emission intensiteettiä useissa tutkimuksissa [21, 34]. Laserdiodien fasettien passivoinnin tyyppipuhdistuksella ja SiN_x -kerroksella on todettu pienentävän vuotovirtaa merkittävästi, kun taas piikerroksella passivoinnin on huomattu kasvattavan vuotovirtaa piikerroksen paksuuden funktiona. Ohut piikerros toimii mahdollisesti johtavana kanavana heikentäen laserdiodin tehokkuutta. [4]

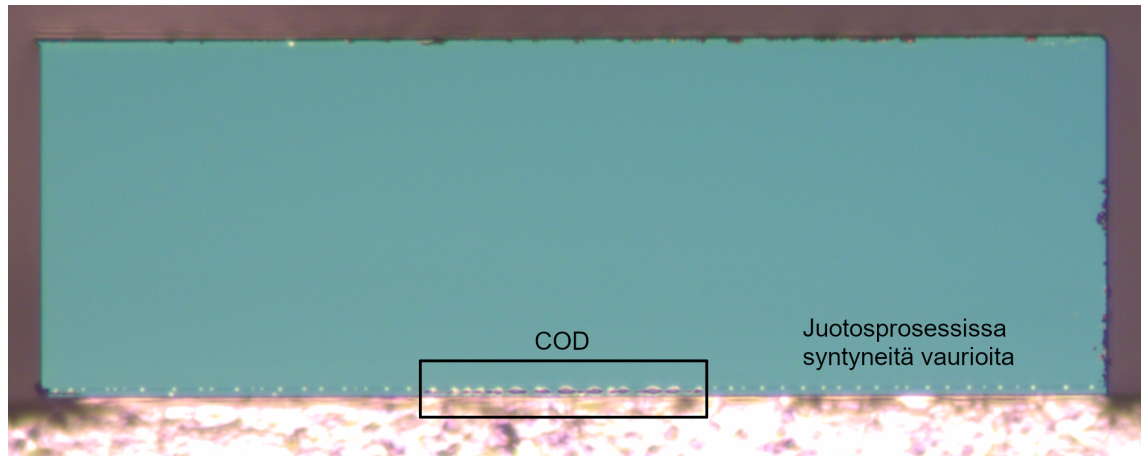
5.2 Kriittinen optinen vauriotaso

Vahvan optisen kentän vaikutuksesta laseriodi voi käytön aikana vaurioitua äkillisesti ja pysyvästi käyttökelvottomaksi. Tällaista optista vauriota kutsutaan kriittiseksi optiseksi vaurioksi eli COD:ksi (engl. Catastrophic Optical Damage). COD voi tapahtua laseriodin bulkkimateriaalissa tai päättypeileillä. Päättypeiillä tapahtuvaa COD:tä kutsutaan myös COMD:ksi (engl. Catastrophic Optical Mirror Damage). COMD tapahtuu, kun päättypeili altistuu suuremmalle tehotiheydelle kuin pystyy kestävänsä. [2]

Useimmiten COD tapahtuu etufasetilla, sillä osittain heijastava ulostulopeili altistuu suuremmalle tehotiheydelle kuin korkean heijastavuuden takafasetti. Laseriodioidilla, jotka eivät sisällä alumiinia, pinnan rekombinaatio on hitaampaa ja COD tapahtuukin yleensä takafasetilla Auger-rekombinaation vaikutuksesta. [35] COD rajoittaa laseriodien ulostulotehoa ja heikentää niiden luotettavuutta, joten se on yksi suurimpia haasteita korkean tehon laseriodien kehityksessä. Alhaiset COD-tasot ovat ongelma erityisesti alumiinia sisältävissä lasereissa. COD-tasoa voidaan kuitenkin parantaa fasetin passivoinnilla ja sopivalla pinnoituksella. [2]

Päättypeiillä tapahtuva COD syntyy, kun epäpuhtaudet ja hilavirheet puolijohderakenteen pinnalla aiheuttavat säteilemätöntä rekombinaatiota ja absorboivat laserin valoa. Absorptio, säteilemätön rekombinaatio ja suuret rekombinaatiovirrat pinnalla tuottavat lämpöä. Tietyllä kriittisellä tehotiheydellä fasetin paikallinen lämpötila alkaa kohota voimakkaasti, mikä puolestaan pienentää fasetin energia-aukkoa lisäten absorptiota ja fasetin kuumentamista edelleen. Tämä kierre johtaa lopulta päättypeilin sulamiseen. [2] Tämän lisäksi laseriodissa voi syntyä niin kutsuttu sekundäärinen vaurio, kun COD-vaurio etenee fasetilta kaviteettiin epitaksiakerrosta pitkin [35].

Mittaamalla laseriodien COD-tasot voidaan saada selville, miten passivoinnilla on onnistuttu poistamaan pintatiloja ja pinnoituksilla minimoimaan absorptio laserin aallonpituudella, ja siten vähentämään fasetin lämpenemistä käytön aikana [4]. Kuvassa 5.2 on optisella mikroskoopilla otettu kuva laseriodin AR-fasetista, joka on passivoitu yhdellä tässä työssä testatulla passivointikäsitteillä ja jonka COD-taso on mitattu. COD näkyy kuvassa pieninä tummina alueina sinivihreän fasetin alareunassa. Vaaleammat vaurioalueet ovat juotosprosessin aikana kuumentamisen seurauksena syntyneitä vaurioita. Kuvan alareunan kullanvärinen osa on alustaa, jolle siru on juotettu p-puoli alaspäin.



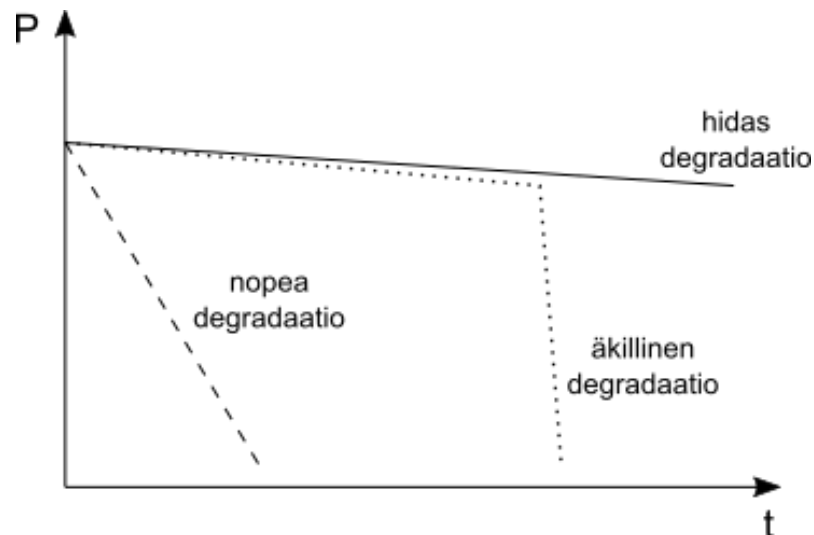
Kuva 5.2. Kriittinen optinen vaurio (COD) lasersirun fasetilla. Kuvan alareunan kullanvärinen osa on alustaa, jolle lasersiru on juotettu p-puoli alaspäin. COD näkyy tummina alueina sini-vihreän fasetin alareunassa. Vaaleat vaurioalueet ovat puolestaan syntyneet kuumentamisen seurauksena juotosprosessin aikana.

COD-taso eli kriittinen tehotiheys, jolla COD tapahtuu, määritetään yleensä operoimalla laserdiodia pulssitetusti korkealla virralla, jolloin materiaalin lämpeneminen on vähäisempää ja laserdiodin kuumentumisen aiheuttama optisen tehon heikentyminen ei estä COD:n tapahtumista. COD-tasoja on kuitenkin mitattu myös jatkuvalla virralla. COD:n välttämiseksi laserdiodeja on tärkeää operoida sopivilla parametreilla ja riittävällä jäähdytyksellä, jotta optinen ja terminen kuorma eivät kasva liian suuriksi. [36]

5.3 Elinikämittaukset

Useat laserdiodien sovelluskohteet vaativat laserdiodeilta kykyä operoida riittävän hyvällä tasolla tarpeeksi pitkän ajan. Vaikka COD on yleisin syy korkean tehon laserdiodien vaurioitumiselle ja yksi suurimmista haasteista laserdiodien luotettavuuden parantamisessa, laserdiodi voi vaurioitua myös muiden mekanismien kautta. Laserdiodin vaurioituminen voi tapahtua laserdiodin aktiivisella alueella, päätyypeileillä tai kontakteilla. Aktiivisella alueella tapahtuva vaurio aiheutuu puolijohdemateriaalin hilavirheistä, niiden muodostumisesta, liikkumisesta ja kasvamisesta. Hilavirheet voivat olla rakenteessa jo kasvatuksen jäljiltä, tai ne ovat voineet syntyä myöhemmissä prosessivaiheissa tai operoinnin aikana. Suuri injektiovirta ja korkea lämpötila lisäävät säteilemätöntä rekombinaatiota, hilavirheiden liikkumista sekä jännitteitä kiderakenteessa, mikä heikentää laserdiodin suorituskykyä ja edistää vaurioitumista. Päätyypeilien kaksi vaurioitumismoodia ovat fasetin pitkän aikavälin degradaatio ja luvussa 5.2 käsitelty COD. Päätyypeilien vaurioituminen aiheutuu, kun päätyypeili altistuu korkeammalle tehotiheydelle kuin pystyy kestäämään. Kontakteilla tapahtuva vaurioituminen puolestaan johtuu metallin diffuusiosta elektrodeilta tai juotteesta puolijohdemateriaaliin. [2]

Laserdiodin degradaatio operoinnin aikana voidaan luokitella nopeaksi, hitaaksi tai äkilliseksi sen perusteella, millä aikaskaalalla degradaatio tapahtuu. Kun laserdiodia operoidaan



Kuva 5.3. Laserdiodin degradaatio voidaan luokitella degradaation aikaskaalan perusteella nopeaksi, hitaaksi tai äkilliseksi. Perustuu lähteeseen [37].

vakiovirralla, nämä kolme degradaatiomoodia näkyvät ulostulotehossa kuvan 5.3 esittämällä tavalla. Nopeassa degradaatiossa laserdiodin teho laskee nopeasti ja laserdiodin tyypillinen elinikä on vain alle 100 tuntia. Nopean degradaation aiheuttaa useimmiten niin kutsuttujen tummien kidevirheviivojen (engl. Dark Line Defect, DLD) syntyminen ja nopea laajentuminen laserdiodin aktiivisella alueella. DLD tarkoittaa pistevauriosta tai hilavirheestä kide-tason suuntaan viivamaisesti laajentunutta vaurioaluetta, jonka säteilytehokkuus on merkittävästi heikentynyt, jolloin vauriot erottuvat tummina viivoina tai pisteinä luminesenssikuvissa. Nämä vaurioalueet absorboivat valoa ja heikentävät laserdiodin emissiota. [37]

Hitaan degradaation tapauksessa laserdiodin suorituskyky heikentyy hitaasti ja vähitellen, ja laserdiodi voi olla toiminnassa jopa tuhansia tunteja ennen vaurioitumista. Jos laserdiodin kiderakenteessa ei ole virheitä aktiivisella alueella tai laserdiodia operoidaan matalalla teholla, hidas degradaatio on laserdiodin tavallisin vaurioitumistapa ja määrittää lopulta laserdiodin eliniän. Korkean tehon laserdiodien elinikää rajoittaa yleensä äkillinen degradaatio, kun taas matalan tehon laserdiodia rajoittaa hidas degradaatio. Hitaassa degradaatiossa aktiivisen alueen pistevauriot toimivat säteilemättömän rekombinaation keskuksina, ja säteilemättömän rekombinaatio tuottaa uusia pistevaurioita, jotka edelleen toimivat säteilemättömän rekombinaation keskuksina. Tämä kierre johtaa pistevaurioiden liikkumiseen ja tiivistymiseen ryppäiksi tai ketjuiksi, jotka heikentävät laserdiodin tehokkuutta. [37] Hidas degradaatio voi johtua myös fasetin hapettumisesta, kun oksidikerroksen ja puolijohdemateriaalin välille syntyy pistevaurioita, jotka toimivat säteilemättömän rekombinaation keskuksina heikentäen laserdiodin suorituskykyä. Oksidikerroksen paksuus kasvaa ajan kuluessa, ja fasetin hapettumista lisäävät rakenteen alumiinipitoisuus, ulostuloteho, lämpötila ja kosteus. [2] Äkillisen degradaation tapauksessa laserdiodin ulostuloteho putoaa odottamatta ja hyvin jyrkästi. Äkillinen degradaatio tarkoittaa useimmiten luvussa 5.2 käsiteltyä COD:ta, mutta voi tapahtua myös nopean degradaation tapaan hilavirhealueiden syntyminen kautta, tosin nopeammalla vaurion kasvunopeudella. [37]

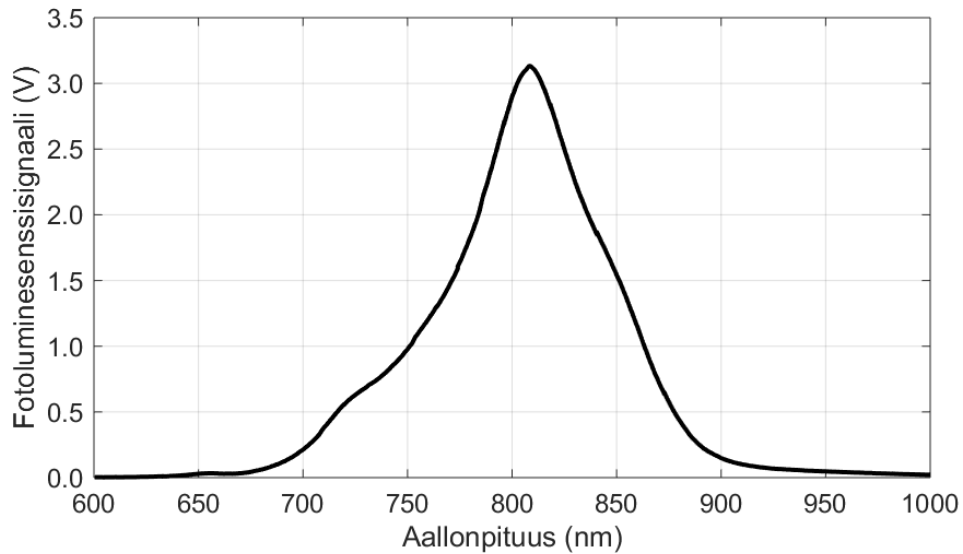
Elinikämittauksessa mitataan laserdiodin suorituskyvyn muuttumista ajan kuluessa operoimalla laserdiodia jatkuvasti, yleensä joko pitämällä virta vakiona (engl. Automated Current Control, ACC) tai pitämällä teho vakiona (engl. Automated Power Control, APC). Vakiovirralla operoitaessa seurataan ulostulotehoa, joka heikentyy laserdiodin suorituskyvyn heikentyessä, kun taas vakioteholla operoitaessa injektiovirta kasvaa suorituskyvyn heikentyessä, mikä nostaa laserdiodin lämpötilaa. [37] Mittausmoodista riippuen laserdiodin ulostuloteho mitataan tai injektiovirta tallennetaan säännöllisin väliajoin. Elinikä on tärkeä mitata todellisia operointiolosuhteita vastaavilla parametreilla. Matalalla operaatioteholla laserdiodin elinikä voi olla useita vuosia, jolloin mittauksessa voi olla tarpeen kiihdyttää laserdiodin ikääntymistä nostamalla lämpötilaa.

5.4 Fotoluminesenssimittaukset

Luminesenssiksi kutsutaan prosesseja, joissa materiaali emittoi spontaanisti valoa muiden mekanismien kuin materiaalin kuumentamisen seurauksena. Puolijohteet voivat emittoida valoa esimerkiksi syntyneiden elektroni-aukkoparien rekombinoituessa tai epäpuhtaustiloille virittyneiden varauksenkuljettajien palautuessa takaisin perustiloilleen. Luminesenssi voidaan jakaa muun muassa fotoluminesenssiin, katodoluminesenssiin ja elektroluminesenssiin sen mukaan, miten varauksenkuljettajien virittyminen tapahtuu. Fotoluminesenssissa virittymisen aiheuttaa fotonien absorptio, katodoluminesenssissa materiaalin elektronipommitus ja elektroluminesenssissa materiaaliin johdettu sähkövirta. Fotoluminesenssiprosessit voidaan edelleen jakaa fluoresenssiin ja fosforesenssiin sen mukaan, miten nopeasti prosessi materiaalissa tapahtuu. Nopeassa fluoresenssiprosessissa emissio pysähtyy melkein heti viritystilän purkautumisen jälkeen, kun taas fosforesenssiprosessissa materiaali voi jatkaa emittoimista jopa minuutteja viritystilän purkautumisen jälkeen. [12]

Fotoluminesenssispektrimittaus on puhtaasti optinen menetelmä, jolloin se on nopea ja herkkä, ei vaadi kontaktia näytteen kanssa eikä vaurioita näytettä. Mittauksessa näyte ensin viritetään laserilla. Virittävän laserin aallonpituus suodatetaan signaalista pois sopivalla suotimella, jotta signaali ei saturoidu. Tämän jälkeen signaali ohjataan monokromaattoriin, joka hajottaa signaalin eri aallonpituuskomponentteihin. Lopulta signaali ohjataan detektorille ja tuloksena saadaan kuvan 5.4 esimerkin mukainen fotoluminesenssispektri. Mittalaitteessa on yleensä useita eri vaihtoehtoja virittäväksi laseriksi, suotimeksi, monokromaattorin hilaksi ja detektoriksi. Korkeampi hilatiheys johtaa parempaan resoluutioon mutta matalampaan signaalitasoon. Tässä työssä fotoluminesenssimittauksiin käytettiin Accentin RPM2000-laitetta 532 nm:n Q-kytketyllä laserilla ja 570 nm:n ylipäästösuotimella. Fotoluminesenssinäytteet koostuivat AlGaAs-kvanttikaivosta, jonka päältä etsattiin pois 20 nm:n GaAs-kerros, jotta kvanttikaivo saatiin aivan näytteen pintaan viritettäväksi fotoluminesenssimittauksissa.

Fotoluminesenssimittauksia voidaan käyttää karakterisoimaan materiaalin koostumusta ja laatua kaksisuhteisesti. Puolijohdemateriaalin energia-aukon ja emissioaallonpituuden lisäksi fotoluminesenssispektrin avulla voidaan saada tietoa puolijohdemateriaalin



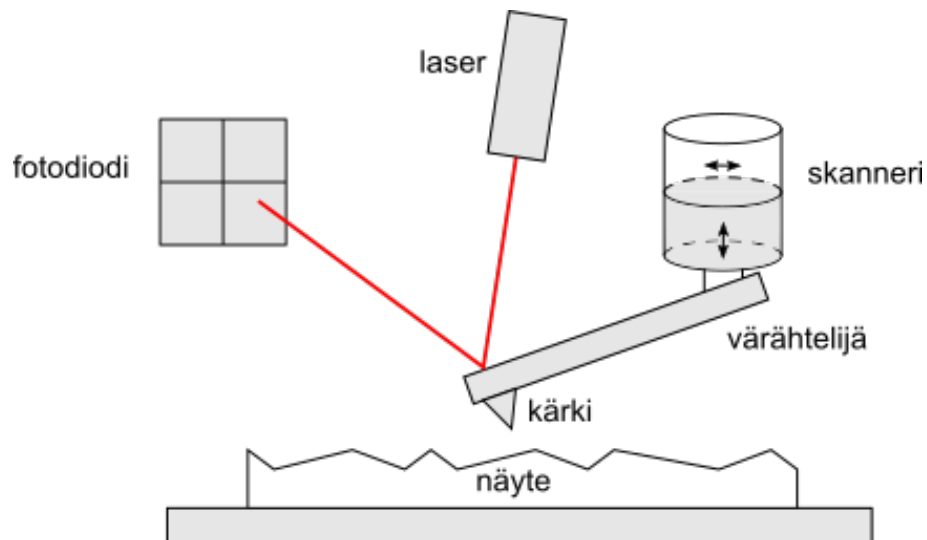
Kuva 5.4. Esimerkki fotoluminesenssispektristä.

kerrosrakenteesta ja signaalipiikin siirtymän perusteella kidehilan jännityksistä. Kartoittamalla fotoluminesenssispektri esimerkiksi koko puolijohdekiekkon alueelta saadaan tärkeää informaatiota puolijohdekiekkojen materiaalin uniformisuudesta ja hilavirheiden, vaurioiden ja epäpuhtauksien konsentraatiosta ja jakautumisesta materiaalissa. Niin seostusatomien kuin hilavirheiden epätasainen jakautuminen puolijohdemateriaalissa voi heikentää laserdiodien saantoa puolijohdekiekkosta. Fotoluminesenssimittauksen avulla voidaan myös määrittää rekombinaation nopeus puolijohdepinnalla [2] tai ohutkalvopinnoitteiden heijastavuus.

Tässä työssä fotoluminesenssinäytteitä käytettiin tutkimaan, vaurioittavatko testatut passivointikäsitellyt puolijohderakennetta. Fotoluminesenssilla on tutkittu muun muassa etsauksen ja ionisädepommituksen aiheuttamia vaurioita puolijohdemateriaalissa, sillä fotoluminesenssinäytteiden pinnan kvanttikaivon kiderakenteen tuhoutuminen ja hilavirheiden lisääntyminen lisää säteilemätöntä rekombinaatiota ja siten heikentää fotoluminesenssia [38]. Lisäksi joidenkin lähteiden mukaan fotoluminesenssispektrin intensiteetti kertoo suoraan pinnan passivoinnin onnistumisesta [5, 6]. Pinnan säteilemätön rekombinaatio aiheuttaa vuorovaikutusta pintatilojen ja pinnan läheisen kvanttikaivon energiatilojen välillä, jolloin kvanttikaivon fotoluminesenssitehokkuus pienenee [5].

5.5 Atomivoimamikroskopia

Atomivoimamikroskopia (engl. Atomic Force Microscopy, AFM) on koetinpyyhkäisymikroskopian (engl. Scanning Probe Microscopy, SPM) yksinkertaisin menetelmä, joka perustuu näytteen pinnan ja mikroskoopin koetinkärjen välisiin atomitasoisiin voimiin. AFM:llä voidaan kuvata kaikenlaisten materiaalien pinnanmuotoja tarkasti alle nanometrinen korkeusresoluutiolla, riippumatta esimerkiksi näytteen läpinäkyvyydestä tai johtavuudesta. AFM onkin tärkeä mikroskopiamenetelmä esimerkiksi materiaalitieteissä, nanoteknologiassa ja biologiassa. Yleensä näyte kuvataan ilmassa, mutta kuvaaminen on



Kuva 5.5. Atomivoimamikroskoopin toimintaperiaate.

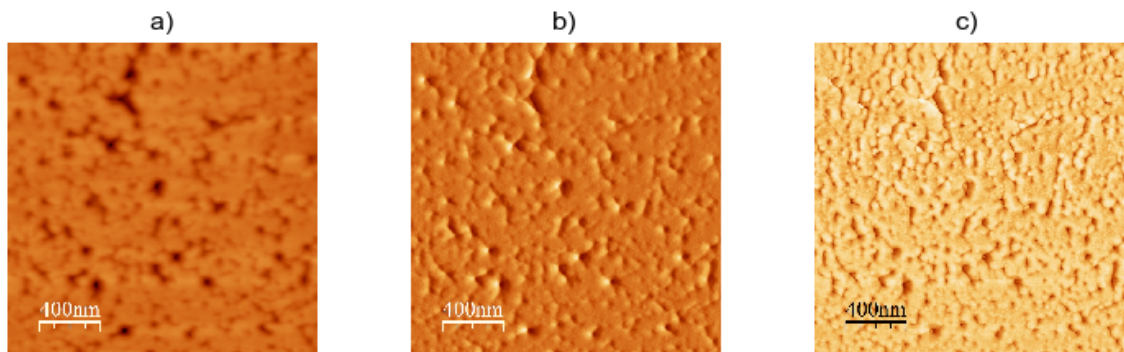
mahdollista myös nesteessä tai tyhjiössä. [39] Tässä työssä käytettiin Veeco Dimension 3100 -atomivoimamikroskooppia. Tulokset analysoitiin WSxM-ohjelmistolla [40].

AFM:llä kuvatessa koetinkärkeä liikutetaan näytteen yllä, tai vaihtoehtoisesti näytettä liikutetaan suhteessa paikallaan pysyvään kärkeen. AFM:llä on useita erilaisia kuvausmoodeja. Kontaktimoodissa koetinkärki on jatkuvassa kontaktissa pinnan kanssa liukuessaan pintaa pitkin, mikä saattaa vaurioittaa pintaa. Pinnan vaurioitumisen välttämiseksi AFM:llä kuvataankin usein dynaamisessa eli värähtelymoodissa, jossa kärki on asetettu värähtelemään siten, että kärki käy jaksottaisesti nopeassa kontaktissa pinnan kanssa liikuessaan pinnan yllä, tyypillisesti muutaman kerran yhtä pikseliä kohti [39]. Värähtelymoodissa on mahdollista kuvata myös kokonaan ilman kontaktia kärjen ja pinnan välillä, mutta tällöin kärjen ja pinnan väliset lyhyen kantaman voimat jäävät aistimatta [41].

AFM:n toimintaperiaate on esitetty kuvassa 5.5. AFM:n koetinosa koostuu kärjestä, joka on kiinnitetty värähtelijään. Värähtelijä on toisesta päästään kiinnitetty pietsosähköiseen pinnoon, joka saa värähtelijän värähtelemään lähellä resonanssitaajuuttaan. Värähtelijäosa käyttäytyy fysikaalisesti jousen tavoin taipuen kärjen ja näytteen pinnan välisten voimien vaikutuksesta, jolloin värähtelyn amplitudi muuttuu. Värähtelijän taipuminen havaitaan värähtelijään kohdistetulla lasersäteellä, joka heijastuu värähtelijästä fotodiodille. Lasersäde osuu eri kohtaan fotodiodia värähtelijän asennosta riippuen, jolloin värähtelyn amplitudi saadaan määritettyä fotodiodin signaalista. Kärjen liikuessa pinnan yllä skanneriosa säätää kärjen korkeutta siten, että värähtelijän värähtelyn amplitudi pysyy koko ajan vakiona. Näin skanneri tuottaa informaatiota näytteen pinnan korkeusvaihteluista. [39]

Pinnan korkeusvaihteluista saatavan topografiakuvan lisäksi AFM tuottaa amplitudikuvan koetinkärjen värähtelyn amplitudin perusteella sekä vaihekuvan koetinkärjen ja pietsosähköisen pinnon värähtelyjen välisen vaihe-eron perusteella. Topografiakuva kertoo pinnan muotojen korkeuden, mutta ei kuvaa muotojen ääri viivoja tarkasti. Amplitudikuvasta puolestaan ei saada selville korkeusinformaatiota, vaan ainoastaan ne pinnan kohdat, joissa

värähtelyn amplitudi on muuttunut, eli pinnan muotojen tarkat ääriiviivat. Vaihekuva kertoo lähinnä kärjen kunnosta ja skannauksen onnistumisesta, mutta sitä tulkitaan kirjallisuudessa usein virheellisesti. [39] Kuvassa 5.6 on esitetty esimerkit AFM:n skannauksen tuottamista topografia-, amplitudi- ja vaihekuvista. AFM:n tuottamasta datasta on pelkän kvalitatiivisen tulkitsemisen lisäksi mahdollista analysoida numeerisesti pinnan ominaisuuksia, kuten korkeusjakaumaa, karheutta ja jaksollisuutta. Keskeisiä virhelähteitä AFM-kuvissa ovat koetinkärjen muoto, likaantuminen ja kuluminen, jotka aiheuttavat kärkeä terävämpien pinnanmuotojen kuvautumisen todellista pyöreämpinä.



Kuva 5.6. Esimerkit atomivoimamikroskoopilla otetuista a) topografia-, b) amplitudi- ja c) vaihekuvista.

Ohutkalvopinnoitteiden tutkimuksessa AFM:ää käytetään hyödyksi kalvojen pinnan morfologian tutkimisessa, pinnan vaurioiden havaitsemisessa ja pinnankarheuden kvantitatiivisessa määrittämisessä. AFM:n avulla on esimerkiksi määritetty sputteroinnissa käytetyn typpikaasuvirtauksen vaikutusta SiN_x -passivointikerroksen karheuteen [6]. AFM:llä on onnistuneesti kuvattu myös laserdiodien fasetteja, ja fasetin pienistä pinnankorkeuksien vaihteluista on pystytty erottamaan jopa kvanttikaivorakenteen eri kerrokset [42].

6 TULOKSET JA ANALYYSI

Tässä työssä toteutettiin 11 erilaista passivointikäsittelyä laserdiodien etufaseteille ionisädesputterointilaitteella, joka mahdollistaa fasettien puhdistuksen ja pinnoituksen tyhjiössä samassa laitteessa, altistamatta fasetteja ilmalle kesken prosessin. Fasettien puhdistusta testattiin eri prosessiparametreilla, jonka jälkeen fasetit pinnoitettiin erilaisilla passivointikerroksilla. Passivoinnin onnistumista tutkittiin mittaamalla laserdiodeista vuotovirrat, eliniät ja COD-tasot. Passivoinnin vaikutusta puolijohteen kiderakenteeseen ja pinnankarheuteen tutkittiin fotoluminesenssispektrien ja atomivoimamikroskooppikuvien avulla. Lisäksi fasetit kuvattiin optisella mikroskoopilla prosessin eri vaiheissa.

6.1 Testatut passivointikäsittelyt

Laserdiodien etufasettien passivointiprosessia pyrittiin parantamaan toteuttamalla 11 erilaista passivointikäsittelyä, joissa laserbaarien etufasetit puhdistettiin ja pinnoitettiin passivointikerroksella IBS:n apuionilähdettä hyödyntäen. Aika baarien kliivaamisesta pinnoittamiseen oli käsittelyillä 5, 8, 10 ja 11 noin 5 tuntia ja muilla käsittelyillä 15-20 tuntia. Useimmat käsittelyt tehtiin sekä 2:n että 4 mm:n pituisille baareille, mutta materiaalin säästämiseksi muutama käsittely tehtiin vain 2 mm:n pituisille baareille. Testisarjan passivointikäsittelyissä käytetyt ionisädesputterointilaitteen parametrit on koottu taulukkoon 6.1. Ennen fasettien puhdistamista IBS:n piikohtio puhdistettiin sputteroimalla piitä shutteriin muissa käsittelyissä kuin käsittelyssä 3, jossa kohtio puhdistettiin vasta puhdistuskäsittelyn jälkeen ennen passivointikerroksen pinnoittamista.

Ensimmäisenä käsittelynä toteutettiin vertailukohdaksi käsittely, jossa laserbaareille ei tehty lainkaan puhdistusta eikä passivointikerrosta pinnoitettu. Käsittelyissä 2-6 laserbaarit puhdistettiin vetypuhdistuksella varioiden puhdistusaikaa sekä apuionilähteen positiivista jännitettä, joka vastaa lähes suoraan ionisäteiden ionien energiaa [3]. Koska ionilähteen plasma ei pysynyt päällä pelkällä vetyvirtauksella, työkaasuna käytettiin lisäksi argonia. Argonin virtaus pidettiin kuitenkin niin pienenä kuin mahdollista, jotta suurimassaisten argonionien vaikutus pintaan saatiin minimoitua. Ionien energia puhdistuksessa pyrittiin pitämään tarpeeksi matalana, jotta ionipommitus ei vaurioita fasettia [9], joten testattaviksi apuionilähteen positiivisiksi jännitteiksi valikoituivat 0 V, 40 V ja 80 V. Puhdistuksen jälkeen käsittelyjen 2-6 baarien fasetit pinnoitettiin $\text{SiN}_x\text{-H}$ -passivointikerroksella. Käsittelyssä 5 käytettiin samoja parametreja kuin käsittelyssä 4, jotta koko prosessin toistettavuutta saatiin tutkittua.

Taulukko 6.1. Ionisädesputterointilaitteen parametrit passivointikäsitteilyssä.

Prosessi	Parametri	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Puhdistus	Aika (s)	-	600	155	600	600	600	600	600	600	630	600	
	Apuionilähde												
	RF-teho (W)	-	128	128	128	128	128	128	128	128	128	128	
	Positiivinen jännite (V)	-	0	40	40	40	80	80	40	40	40	40	
	Negatiivinen jännite (V)	-	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	
	H ₂ -virtaus (sccm)	-	19	19	19	19	19	19	19	19	15	19	19
	Ar-virtaus (sccm)	-	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1
	N ₂ -virtaus (sccm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-
	Passivointikerros	-	SiN _x :H	SiN _x :H	SiN _x :H	SiN _x :H	SiN _x :H	SiN _x :H	SiN _x :H	SiN _x :H	SiN _x :H	α-Si	α-Si
	Aika (s)	-	155	155	155	155	155	155	-	250	155	30	30
Arvioitu paksuus (nm)	-	20	20	20	20	20	20	-	25	20	2	2	
Passivointikerroksen pinnoitus	Pääionilähde												
	RF-teho (W)	-	98	98	98	98	98	-	90	98	98	98	
	Positiivinen jännite (V)	-	1275	1275	1275	1275	1275	-	1100	1275	1275	1275	
	Negatiivinen jännite (V)	-	600	600	600	600	600	-	600	600	600	600	
	Ar-virtaus (sccm)	-	8	8	8	8	8	-	8	8	8	8	
	Apuionilähde												
	RF-teho (W)	-	128	128	128	128	128	-	128	128	-	-	-
	Positiivinen jännite (V)	-	100	100	100	100	100	-	100	100	-	-	-
	Negatiivinen jännite (V)	-	800	800	800	800	800	-	800	800	-	-	-
	N ₂ -virtaus (sccm)	-	19	19	19	19	19	-	19	15	19	-	-
H ₂ -virtaus (sccm)	-	1	1	1	1	1	-	5	1	-	-	-	
AR-pinnoitus	Arvioitu paksuus (nm)	119	95	95	95	95	95	119	95	95	106	106	

Käsittelyssä 7 laserbaarien etufasetit puhdistettiin käsittelyn 6 tapaan vedyllä ja argonilla, mutta SiN_x:H-kerros jätettiin pinnoittamatta, jolloin vertaamalla käsittelyjen 6 ja 7 tuloksia saadaan selville pelkän SiN_x:H-kerroksen vaikutus. Käsittelyssä 8 muutettiin useita SiN_x:H-passivointikerroksen pinnoitusprosessin parametreja kasvattamalla vedyn virtausta ja pienentämällä pääionilähteen tehoa sekä positiivista jännitettä. Vedyn määrän lisäämisen toivottiin sitovan fasetilta paremmin mahdollista jäännöshapetta, ja muuttamalla useita parametreja kerralla pyrittiin luomaan selkeämpää eroa tulosten välille ja testaamaan SiN_x:H-kerroksen laadun vaikutusta tuloksiin. Käsittelyssä 9 kokeiltiin korvata apuionilähteen plasman argon tyypellä siltä varalta, että argon osoittautuisi vaurioittavan fasetin pintaa. Käsittelyn parametrit pidettiin vertailtavuuden vuoksi muilta osin samoina kuin käsittelyissä 4-5, mutta tyypeä tarvittiin melko suuri 5 sccm:n virtaus, jotta apuionilähteen plasma pysyi päällä. Käsittelyissä 10-11 faseteille pinnoitettiin vetypuhdistuksen jälkeen passivointikerrokseksi SiN_x:H:n sijaan amorfista piitä (α -Si). Lisäksi käsittelyssä 10 vetypuhdistus jätettiin päälle myös piin pinnoituksen ajaksi, kun taas käsittelyssä 11 puhdistus lopetettiin ennen piin kasvatuksen aloittamista.

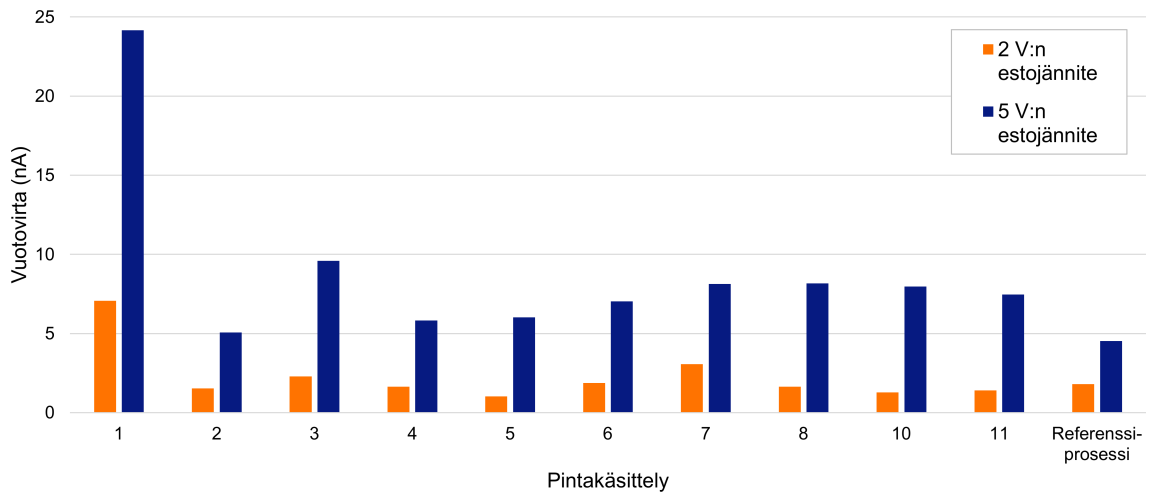
Pinnoitettuun SiN_x-kerrokseen on todennäköisesti sitoutunut pieni määrä vetyä, sillä kaikkiin SiN_x-kasvatuksiin jätettiin mukaan pieni vetykaasuvirtaus sitomaan IBS:n kammiosta mahdollista jäännöshapetta. Ennen varsinaista testisarjaa SiN_x:H-passivointikerrokselle etsittiin sopivat parametrit testaamalla pinnoitusta piikiekoille ja mittaamalla kerroksen paksuus ja taitekerroin ellipsometrillä. Taulukon 6.1 käsittelyjen 2-6 ja 9 parametreilla SiN_x:H-kerroksen taitekertoimeksi saatiin 2,00. Amorfisen piin pinnoitukseen käytettiin vertailtavuuden vuoksi samoja pääionilähteen parametreja kuin SiN_x-kerroksen kasvatukseen. Kerroksen paksuutta ei tutkimuksessa käytettävissä olevilla menetelmillä ollut mahdollista määrittää tarkasti, mutta SiN_x-kerroksen kasvunopeuden avulla arvioitiin aika, jolla piitä oletettiin kasvavan pinnalle noin 2 nm:n paksuinen kerros. Piillä on voimakas absorptio, joten passivointikerroksen paksuuden tulee olla vain muutaman nanometrin luokkaa fasetin kuumentumisen välttämiseksi [3].

Passivoinnin jälkeen kaikkien käsittelyjen laserbaarien etufasetit pinnoitettiin yhdestä Al₂O₃-kerroksesta koostuneella AR-pinnoituksella. AR-pinnoituksen heijastavuudeksi saatiin 4-5 %. Baarien takafasettien HR-pinnoitus koostui yhdestä Al₂O₃/TiO₂-parista ja neljästä SiO₂/TiO₂-parista. Fasettien pinnoituksen jälkeen laserbaareista mitattiin vuotovirrat luvussa 5.1 kuvatulla mittausjärjestelyllä. Tämän jälkeen laserbaarit pilkottiin siruiksi ja juotettiin alustoille p-puoli alaspäin. Virtapiiri suljettiin langoittamalla sirut n-puolelta toiseen alustan kontakteista. Lopuksi sirut karakterisoitiin ja jokaisesta passivointikäsittelystä mitattiin osalle siruista COD-tasot ja osalle siruista eliniät. Vuotovirrat, COD-tasot ja eliniät mitattiin vertailun vuoksi myös referenssiprosessilla passivoiduista siruista.

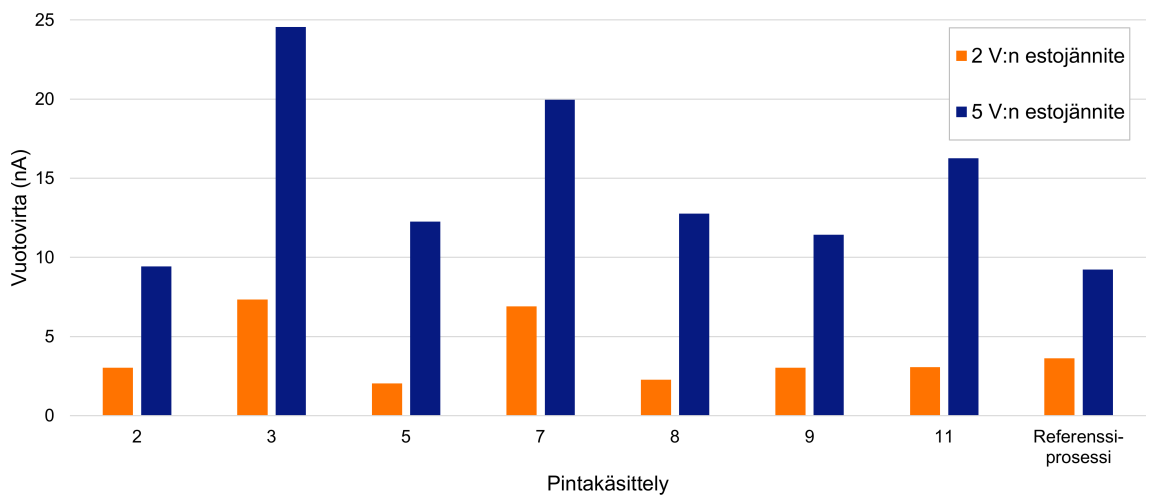
6.2 Passivointikäsittelyjen vaikutus laserdiodien kestävyteen

Passivoiduista laserbaareista mitatut vuotovirrat on esitetty kuvassa 6.1 2 mm:n pituisille baareille ja kuvassa 6.2 4 mm:n pituisille baareille. Laserbaareista valittiin satunnaisesti

kolme sirua, joista mitattiin vuotovirrat 2:n ja 5 V:n estojännitteillä. Kuvassa on esitetty näiden mittausten keskiarvot. Käsittelyissä 1, 4 ja 6 ei ollut mukana lainkaan 4 mm:n pituisia baareja, ja käsittelyiden 9 ja 10 saanto ei riittänyt sekä 2:n että 4 mm:n baarien vuotovirtojen mittaamiseen. Koska tulosten mukaan 4 mm:n pituisten baarien vuotovirrat ovat selkeästi suuremmat kuin 2 mm:n baareilla, suurin osa vuotovirrasta vaikuttaa kulkevan puolijohdemateriaalissa ja vain pieni osa fasetilla.



Kuva 6.1. 2 mm:n pituisista baareista mitattujen vuotovirtojen keskiarvot eri pintakäsittelyille 2:n ja 5 V:n estojännitteillä.

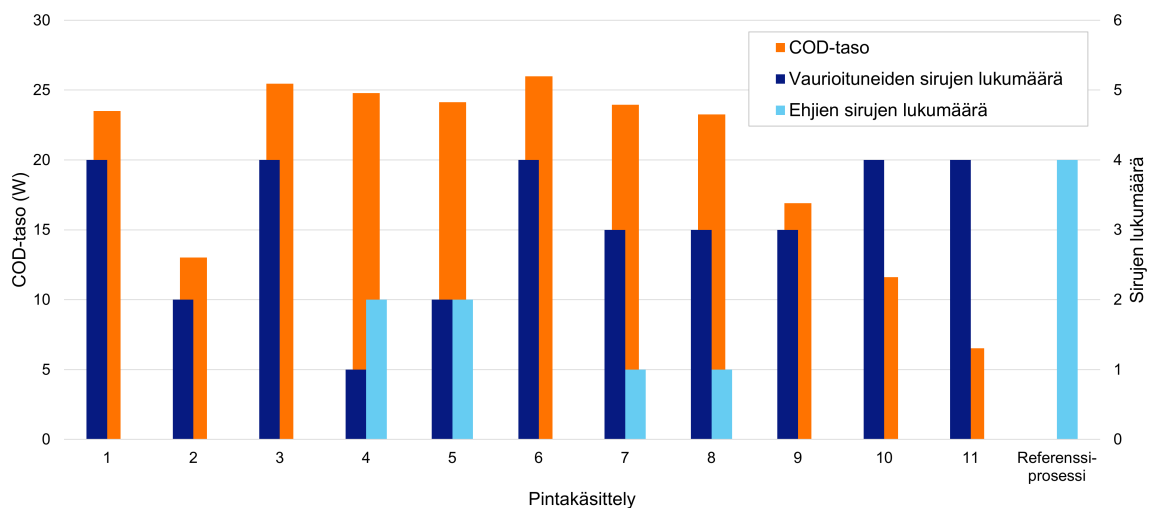


Kuva 6.2. 4 mm:n pituisista baareista mitattujen vuotovirtojen keskiarvot eri pintakäsittelyille 2:n ja 5 V:n estojännitteillä.

Vuotovirtatulosten perusteella sekä puhdistus että passivointikerroksen pinnoitus näyttävät vaikuttavan positiivisesti, sillä suurimmat vuotovirrat mitattiin käsittelyn 1 baareista, joille ei tehty puhdistusta eikä pinnoitettu passivointikerrosta. Pelkästään puhdistettujen eli käsittelyn 7 baarien vuotovirrat olivat pienemmät kuin puhdistamattomien baarien, mutta suuremmat kuin muiden baarien, jotka lisäksi pinnoitettiin passivointikerroksella. Myös käsittely 3 tuotti muihin käsittelyihin verrattuna suuremmat vuotovirrat. Tässä käsittelyssä puhdistusaika oli

vain 155 s, joka ei todennäköisesti riittänyt fasettien puhdistamiseen. Keskenään samanlaisten käsittelyjen 4 ja 5 vuotovirrat ovat mittaustarkkuuden rajoissa yhtä suuret, joten vuotovirtojen osalta passivointi- ja pinnoitusprosessi vaikuttaa toistettavalta. 5 V:n estojännitteellä pienimmät vuotovirrat mitattiin referenssiprosessilla valmistetuista baareista, mutta myös käsittelyt 2, 4 ja 5, joissa apuionilähteen positiivinen jännite oli matala, sekä käsittely 9, jossa argon korvattiin tyypellä, tuottivat matalat vuotovirrat. Erot useimpien käsittelyjen välillä ovat kuitenkin pieniä ja saattavat johtua myös mittaasepävarmuudesta.

Alustoille juottamisen ja langoittamisen jälkeen laserdiodeista mitattiin COD-tasot, jotka on esitetty kuvassa 6.3. COD-tasot mitattiin vain 2 mm:n pituisille siruille. Siruja operoitiin 1 μm :n pituisilla pulsseilla ja pulssisuhteella 1 $\%$. Virtaa kasvatettiin tasaisesti portaittain 50 A:iin asti. Kaikki sirut eivät vaurioituneet vielä 50 A:n virralla operoitaessa, joten kuvaajan toisella y-akselilla on esitetty vaurioituneiden ja mittauksen kestäneiden sirujen lukumäärät. Kuvaajassa esitetyt COD-tasot ovat keskiarvoja vaurioituneiden laserdiodeiden COD-tasoista.

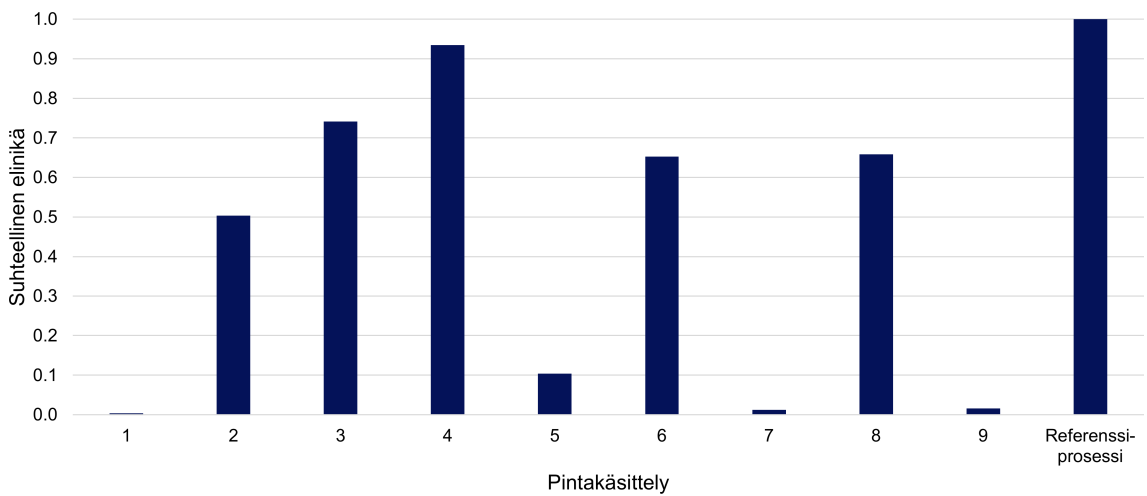


Kuva 6.3. Mitattujen COD-tasojen keskiarvot eri pintakäsittelyille. Toisella y-akselilla on esitetty mittauksissa vaurioituneiden ja mittaukset kestäneiden laserdiodeiden lukumäärät. COD-tasot mitattiin pulssitettuna 1 μm :n pituisilla pulsseilla ja pulssisuhteella 1 $\%$. Virtaa kasvatettiin portaittain 50 A:iin asti.

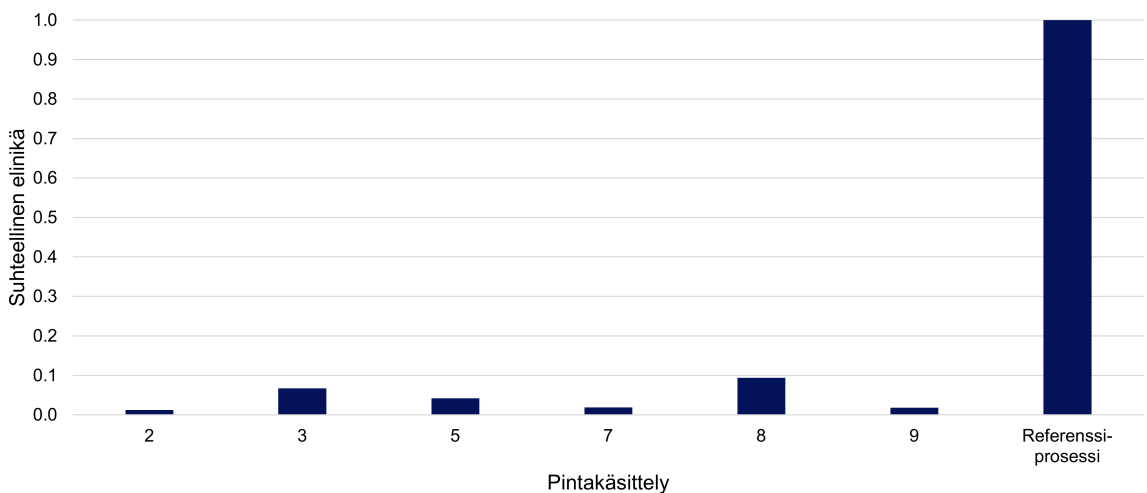
Heikoimmat COD-tasot mitattiin käsittelyjen 10 ja 11 siruille, jotka passivoitiin amorfisella piillä, joten SiN_x :H-kerros vaikuttaa olevan parempi valinta passivointiin. Käsittelyn 2 alhainen COD-taso voi selittyä sillä, että apuionilähteen 0 V:n positiivisen jännitteen takia ionien energia ei mahdollisesti riitä fasetin puhdistamiseen. Käsittelyn 9 perusteella typpi vaikuttaa toimivan argonia huonommin puhdistuskäsittelyssä. Toisaalta tyyppeä tarvittiin puhdistuksessa suurempi virtaus apuionilähteen plasman pitämiseksi päällä, mikä voi olla syynä heikkoihin COD-tuloksiin, jos fasetti on vaurioitunut käsittelyssä suuren typpivirtauksen seurauksena tai typpi on laimentanut vedyn vaikutusta. Referenssiprosessi osoittautui COD-tasojen perusteella passivoitinkäsittelyistä parhaaksi, sillä kaikki testatut laserdiodit kestivät 50 A:iin asti. Muiden passivoitinkäsittelyjen COD-tuloksissa ei ole merkittäviä eroja, mutta vaikuttaa siltä, että samanlaisten käsittelyjen 4 ja 5 melko matala apuionilähteen 40 V:n positiivinen jännite sekä käsittelyä 3 pidempi puhdistusaika tuottivat parhaan tuloksen,

kun sekä COD-tasot että mittauksen kestäneiden sirujen lukumäärä huomioidaan. Vuotovirtatulosten ohella myös COD-tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että samanlaiset käsittelyt 4 ja 5 osoittavat prosessin olevan hyvin toistettavissa.

Laserdiodien elinikätestien tulokset on esitetty kuvassa 6.4 2 mm:n pituisille siruille ja kuvassa 6.5 4 mm:n pituisille siruille. Eliniät on esitetty keskiarvoina ja suhteutettuna referenssiprosessilla passivoitujen laserdiodien elinikään. 2 mm:n pituisia siruja operoitiin 8 A:n virralla ja 4 mm:n siruja 13 A:n virralla. Huomattava ero testattujen 2 mm:n sirujen suhteellisessa eliniässä 4 mm:n siruihin verrattuna johtuu todennäköisesti pienemmästä virrantiheydestä fasetilla. Käsittelyille 10 ja 11, joissa fasetit passivoitiin amorfisella piillä, ei saatu elinikää mitattua, sillä sirut vaurioituivat jo elinikätesteissä käytettyä virtaa pienemmällä virralla operoitaessa.



Kuva 6.4. 2 mm:n pituisten sirujen suhteellinen elinikä referenssiprosessiin verrattuna. Siruja operoitiin 8 A:n virralla.



Kuva 6.5. 4 mm:n pituisten sirujen suhteellinen elinikä referenssiprosessiin verrattuna. Siruja operoitiin 13 A:n virralla.

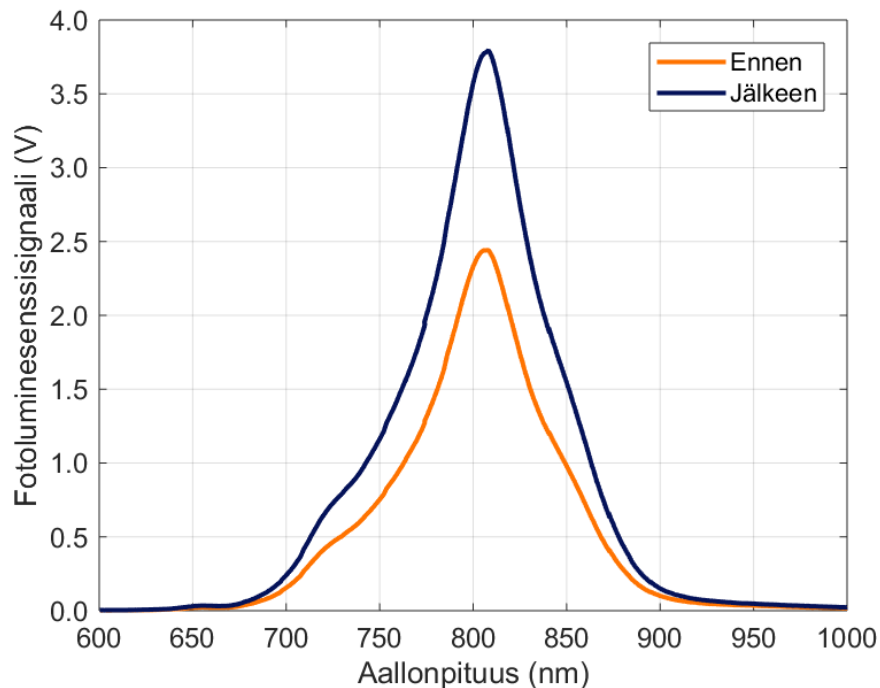
Referenssiprosessilla saavutettiin selkeästi pisimmät eliniät, mutta melko pitkä elinikä saavutettiin myös käsittelyllä 4, jossa apuionilähteen positiivinen jännite puhdistuksessa oli melko matala 40 V ja puhdistusaika oli käsittelyä 3 pidempi. Käsittelyssä 5 on käytetty samoja IBS:n parametreja kuin käsittelyssä 4, mutta sirujen elinikä oli kuitenkin merkittävästi käsittelyn 4 siruja huonompi. Näiden käsittelyjen COD-tasot olivat kuitenkin samaa luokkaa, mikä voi kertoa siitä, että fasetin puhdistaminen on onnistunut hyvin, mutta fasetti ei pysy pitkään passiivisena. Mahdollisesti $\text{SiN}_x\text{:H}$ -kerroksen laatu ei ole passivoineissa ollut riittävän hyvä, tai passivointiprosessi ei ole toistettava $\text{SiN}_x\text{:H}$ -kasvatuksen osalta. Lupaavan pitkät eliniät saavutettiin myös käsittelyllä 8, jossa SiN_x -kerroksen kasvatusparametreja muutettiin merkittävästi. Tämä voi viitata siihen, että vedyn määrän lisääminen tai pääionilähteen positiivisen jännitteen pienentäminen mahdollisesti paransi $\text{SiN}_x\text{:H}$ -passivointikerroksen laatua, mutta ei merkittävästi eikä välttämättä toistettavasti. Lyhyimmät eliniät mitattiin odotetusti käsittelyn 7 siruilta, joiden faseteille ei pinnoitettu passivointikerrosta lainkaan, ja käsittelyn 1 siruilta, joiden fasetteja ei lisäksi puhdistettu. COD-tasojen tavoin myös elinikätulokset paljastivat, että puhdistuksessa apuionilähteen positiivisen jännitteen pudottaminen 0 V:iin käsittelyssä 2 sekä argonin korvaaminen tyypellä käsittelyssä 9 eivät olleet toimivia ratkaisuja. Toisaalta käsittelyjen 2 ja 9 baareista mitattiin pienimmät vuotovirrat, mikä voi kertoa joko nA-suuruusluokan vuotovirtamittausten herkkyydestä häiriöille tai siitä, ettei vuotovirta korreloi odotetusti fasetin laadun kanssa.

Vuotovirtatulosten, COD-tasojen ja laserdiodien eliniän perusteella mikään tässä työssä testattu passivointikäsittely ei parantanut laserdiodien fasettien laatua verrattuna referenssiprosessiin. Tulosten perusteella fasettien passivoinnin huono laatu ei todennäköisesti johdu ionien liian suuresta energiasta, sillä vertaamalla käsittelyn 6 tuloksia käsittelyyn 7, joka eroaa käsittelystä 6 ainoastaan siten, että $\text{SiN}_x\text{:H}$ -passivointikerrosta ei ole pinnoitettu, nähdään, että $\text{SiN}_x\text{:H}$ -kerros parantaa tuloksia. $\text{SiN}_x\text{:H}$ -kerroksen pinnoittamisessa käytetyt apuionilähteen positiiviset jännitteet olivat hyvin suuria puhdistuskäsittelyihin verrattuna, mutta pinnoitus ei tulosten perusteella ole vaurioittanut fasettia, joten todennäköisesti myöskään puhdistuskäsittelyissä käytetyt ionienergiat eivät ole olleet liian suuria. Fasetin huono laatu voi todennäköisemmin selittyä $\text{SiN}_x\text{:H}$ -passivointikerroksen huonolla laadulla, kuten käsittelyjen 4 ja 5 COD-tasoista ja elinikätuloksista voidaan päätellä. Mahdollisesti IBS:n kammiossa fasetille pääsee passivointikäsittelyn aikana epäpuhtauksia, esimerkiksi sputterointikammioon jäänyttä jäännöshappia. Vetyvirtauksen kasvattaminen SiN_x -kasvatuksen aikana hapen sitomiseksi fasetilta sekä pääionilähteen ionienergioiden pienentäminen vaikutti parantavan $\text{SiN}_x\text{:H}$ -kerroksen laatua jonkin verran käsittelyjen 5 ja 8 tulosten perusteella.

6.3 Passivointikäsittelyjen vaikutus puolijohdepintaan

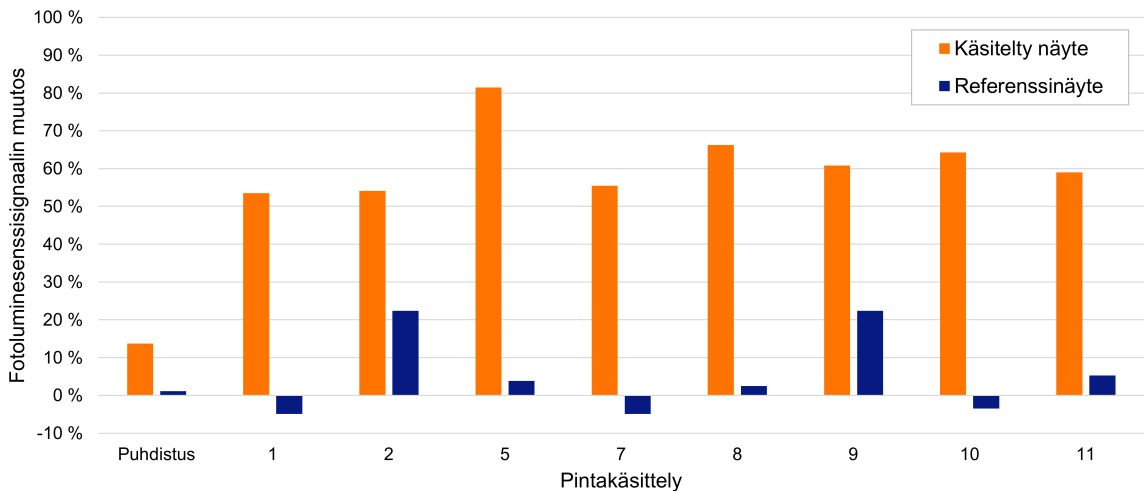
IBS:n substraattipidikkeeseen kiinnitettiin joihinkin käsittelyihin mukaan fotoluminesenssinäyte, josta mitattiin fotoluminesenssispektri ennen ja jälkeen käsittelyn. Fotoluminesenssinäytteessä oli AlGaAs-kvanttikaivo, jonka päältä etsattiin pois 20 nm:n paksuinen GaAs-kerros. Jokaisen mittauksen yhteydessä mitattiin fotoluminesenssispektri

myös referenssinäytteestä, jota ei käsitelty lainkaan, jotta voitiin arvioida mittalaitteen ja erityisesti näytteen virittävän laserin epästabiilisuuden osuutta signaalitason muutoksessa. Kuvassa 6.6 on esitetty esimerkkinä fotoluminesenssispektrit käsittelyssä 7 mukana olleista fotoluminesenssinäytteistä ennen ja jälkeen käsittelyn. Kun fotoluminesenssisignaalin maksimiarvoista ennen ja jälkeen käsittelyn laskettiin signaalitason suhteellinen muutos, saatiin kuvan 6.7 mukaiset tulokset. Kuvassa on esitetty myös samaan aikaan mitatun käsittelemättömän referenssinäytteen signaalitasossa tapahtunut muutos ennen ja jälkeen käsittelyä tehtyjen mittausten välillä.



Kuva 6.6. Fotoluminesenssispektrit käsittelyssä 7 mukana olleista fotoluminesenssinäytteistä ennen ja jälkeen käsittelyn. Fotoluminesenssisignaalin taso kasvoi huomattavasti puhdistuksen ja AR-pinnoituksen vaikutuksesta.

Kaikissa käsittelyissä, joissa fotoluminesenssinäyte oli mukana, käsittely kasvatti fotoluminesenssisignaalin tasoa. Yhdelle fotoluminesenssinäytteelle tehtiin pelkästään puhdistus IBS:llä käsittelyjen 6 ja 7 mukaisilla parametreilla, pinnoittamatta passivointikerrosta tai AR-pinnoitetta. Tulosten perusteella fotoluminesenssisignaalia kasvattaa eniten AR-pinnoite, mutta myös pelkkä puhdistus kasvattaa signaalitason jonkin verran. Fotoluminesenssinäytteen signaalitason kasvu puhdistuksen vaikutuksesta voi liittyä siihen, että näytteen pinnalta etsattua päällimmäistä GaAs-kerrosta on jäänyt jonkin verran näytteen pinnalle, ja käsittelyn vaikutuksesta tämä kerros on etsautunut kokonaan pois. Vaihtoehtoisesti puhdistus on voinut parantaa pinnan laatua poistaen pinnalta pintatiloja, erityisesti oksidia [33, 38]. Fotoluminesenssisignaali olisi heikentynyt, jos fotoluminesenssinäytteen kvanttikaivo olisi tuhoutunut kokonaan käsittelyn vaikutuksesta tai säteilemätön rekombinaatio olisi merkittävästi lisääntynyt hilavirheiden lisääntymisen vaikutuksesta [38]. Tulosten perusteella testatut puhdistuskäsittelyt ja passivointikerroksen pinnoitus eivät vaikuta vaurioittaneen baarien puolijohdemateriaalin kiderakennetta, tai

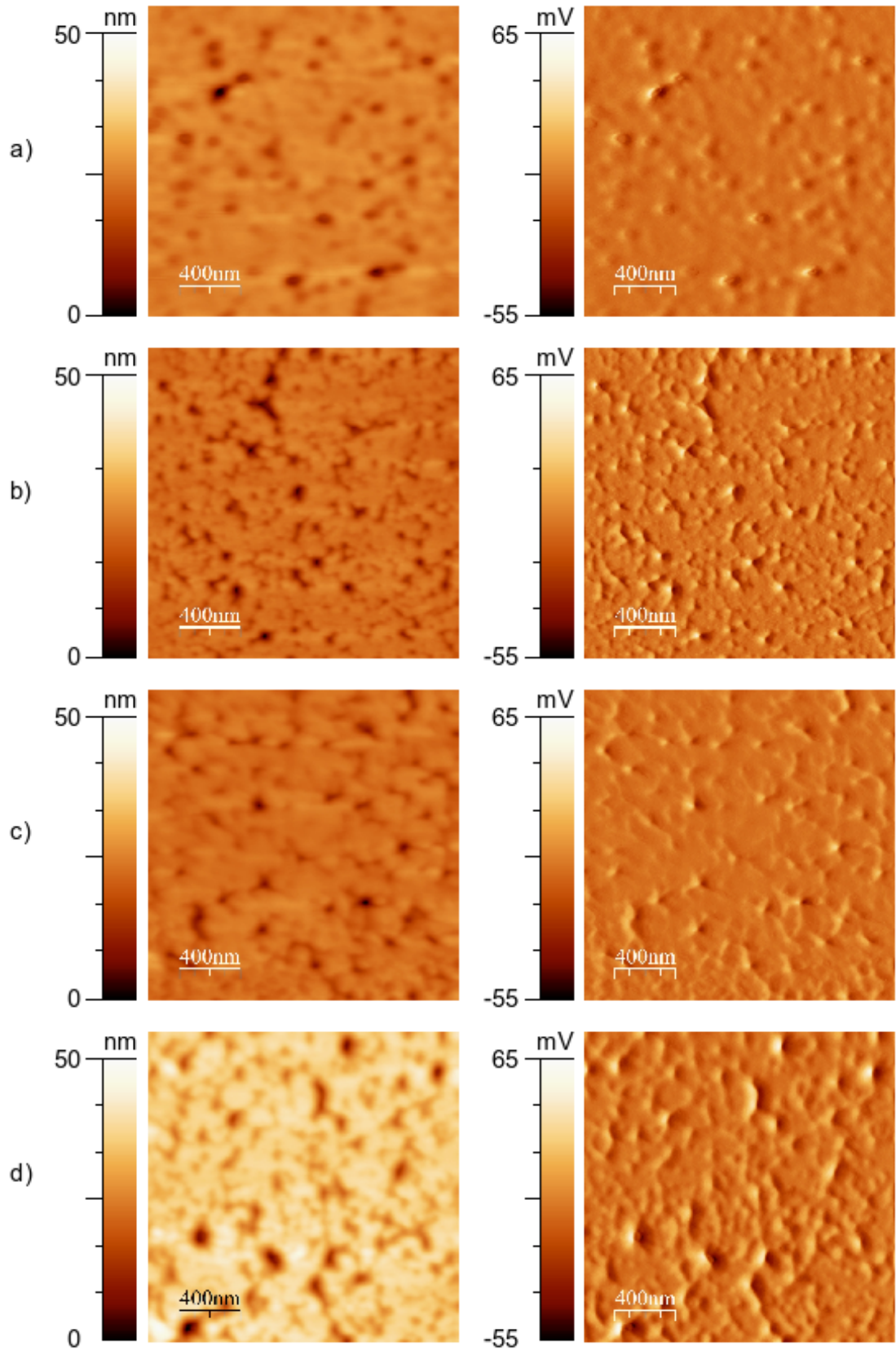


Kuva 6.7. Passivointikäsittelyissä mukana olleiden näytteiden fotoluminesenssisignaaleissa käsittelyn aikana tapahtunut suhteellinen muutos. Yhdelle fotoluminesenssinäytteelle tehtiin pelkkä puhdistus ilman passivointikerroksen tai AR-pinnoitteen kasvatusta. Jokaisen mittauksen yhteydessä mitattiin fotoluminesenssisignaali myös referenssinäytteestä, jota ei käsitelty lainkaan.

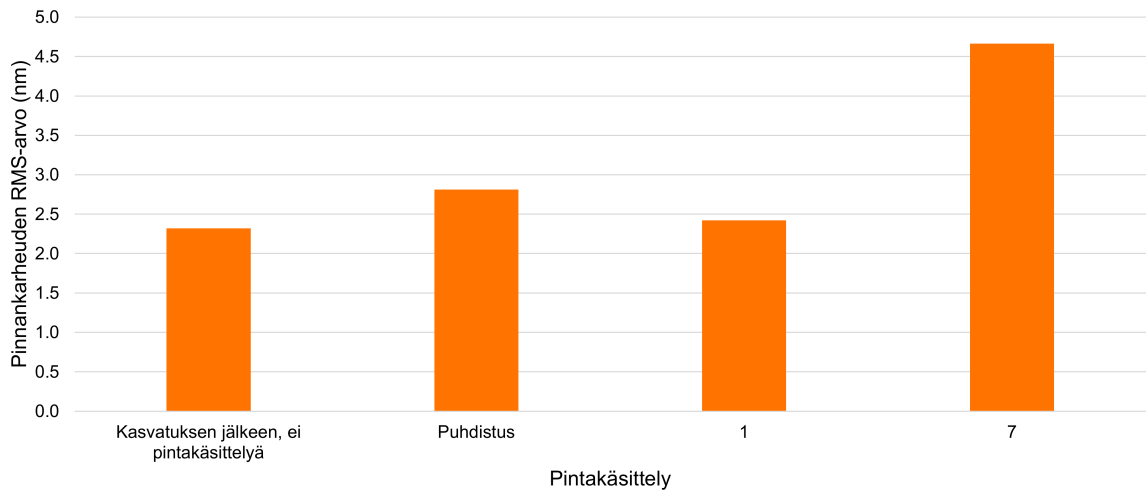
mahdollisesti syntyneiden vaurioiden aiheuttama rekombinaatio on jäänyt vähäisemmäksi kuin passivoinnin poistama rekombinaatio.

Fotoluminesenssinäytteet kuvattiin vielä atomivoimamikroskoopilla pinnan tutkimiseksi ja pinnankarheuden määrittämiseksi tarkemmin. Näytteiden keskeltä kuvattiin $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ -kokoinen alue satunnaisesti valitusta kohdasta. AFM:llä otetut topografia- ja amplitudikuvat on koottu kuvaan 6.8. Käsittelyiden 1 ja 7 lisäksi AFM:llä kuvattiin fotoluminesenssinäyte kasvatuksen jälkeen ilman mitään pintakäsittelyä sekä pelkän puhdistuksen jälkeen ilman pinnoituksia. AFM-kuvien tuottamasta datasta määritettiin vielä jokaiselle näytteelle laskennalliset pinnankarheuden RMS-arvot eli neliölliset keskiarvot, jotka on koottu kuvaan 6.9.

Saadut pinnankarheuden arvot ovat melko suuria, mikä suurelta osin johtuu siitä, että jo pelkkä fotoluminesenssinäyte, jonka päältä on etsattu GaAs-kerros pois, on tulosten perusteella hyvin karhea. Tuloksia vertailtaessa sekä pelkkä puhdistus ilman passivointi- tai AR-kerrosta sekä vastaavasti pelkkä AR-kerros ilman puhdistusta tai passivointia vaikuttavat karhentavan pintaa jonkin verran. Pinnankarheus kuitenkin kasvoi merkittävästi käsittelyn 7 vaikutuksesta, kun näyte sekä puhdistettiin että pinnoitettiin AR-kerroksella. Mahdollisesti sputterointi pinnoitustekniikkana voi aiheuttaa sen, että AR-kerroksen pinnoittaminen jo valmiiksi karheammalle pinnalle tuottaa vielä karheamman lopputuloksen, jos pinnoitus ei ole tasainen. Tutkimuksien mukaan karheampi pinta lisää sironta- ja absorptiohäviöitä [6, 43], mikä vähentää pinnan transmissiota. Lisäksi karheampi pinta lisää pinnan huokoisuutta ja kosteuden absorptiota. Tämä kaikki oletettavasti heikentää laserin ulostulotehoa ja päätypepien luotettavuutta. [43]



Kuva 6.8. Atomivoimamikroskopiakuvat fotoluminesenssinäytteistä a) kasvatuksen jälkeen ilman pintakäsittelyä, b) puhdistuksen jälkeen, c) käsittelyn 1 jälkeen ja d) käsittelyn 7 jälkeen. Vasemmalla topografiakuvat, oikealla amplitudikuvat.

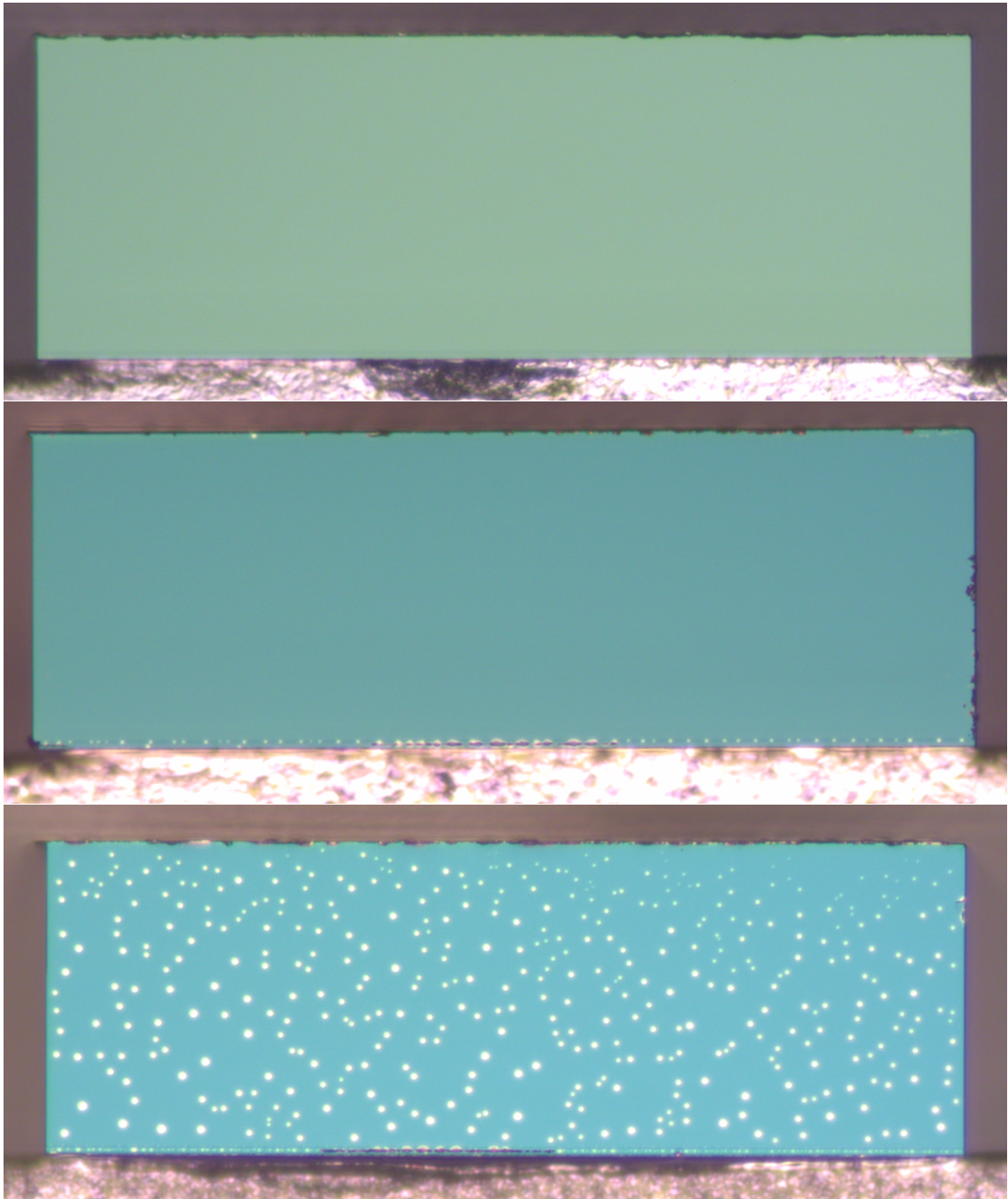


Kuva 6.9. Pinnankarheuden RMS-arvot eli neliölliset keskiarvot fotoluminesenssinäytteistä otetuista atomivoimamikroskooppikuvista määritettynä.

Laserdiodien fasetit lisäksi kuvattiin optisella mikroskoopilla puhdistuksen ja pinnoitusten sekä COD-testiajojen jälkeen. Kuten kuvan 6.10 ylimmästä kuvasta voi huomata, referenssiprosessilla passivoituilla faseteilla ei näkynyt lainkaan COD:ta tai muita vaurioita. SiN_x-kerroksella passivoitujen fasettien aktiivisella alueella näkyi poikkeuksetta COD:ta, ja lisäksi aktiiviselta alueelta kumpaankin suuntaan koko p-puolelle levittäytyi valkoisia pistemäisiä vaurioalueita, kuten kuvan 6.10 keskimäinen kuva osoittaa. Piikerroksella passivoituilla faseteilla näkyi puolestaan valkoisia vaurioalueita koko fasetin alueella, kuten kuvan 6.10 alimman kuvan fasetissa. Käsittelyn 1 faseteilla, joita ei passivoitu lainkaan, ei valkoisia vaurioalueita näkynyt. Valkoisia alueita ei kuitenkaan näkynyt lainkaan sellaisten sirujen faseteilla, joita ei oltu vielä juotettu alustoihin, joten valkoiset alueet syntyivät joko juottamisprosessissa tai ajettaessa laserdiodeja karakterisoinnin ja testauksen aikana.

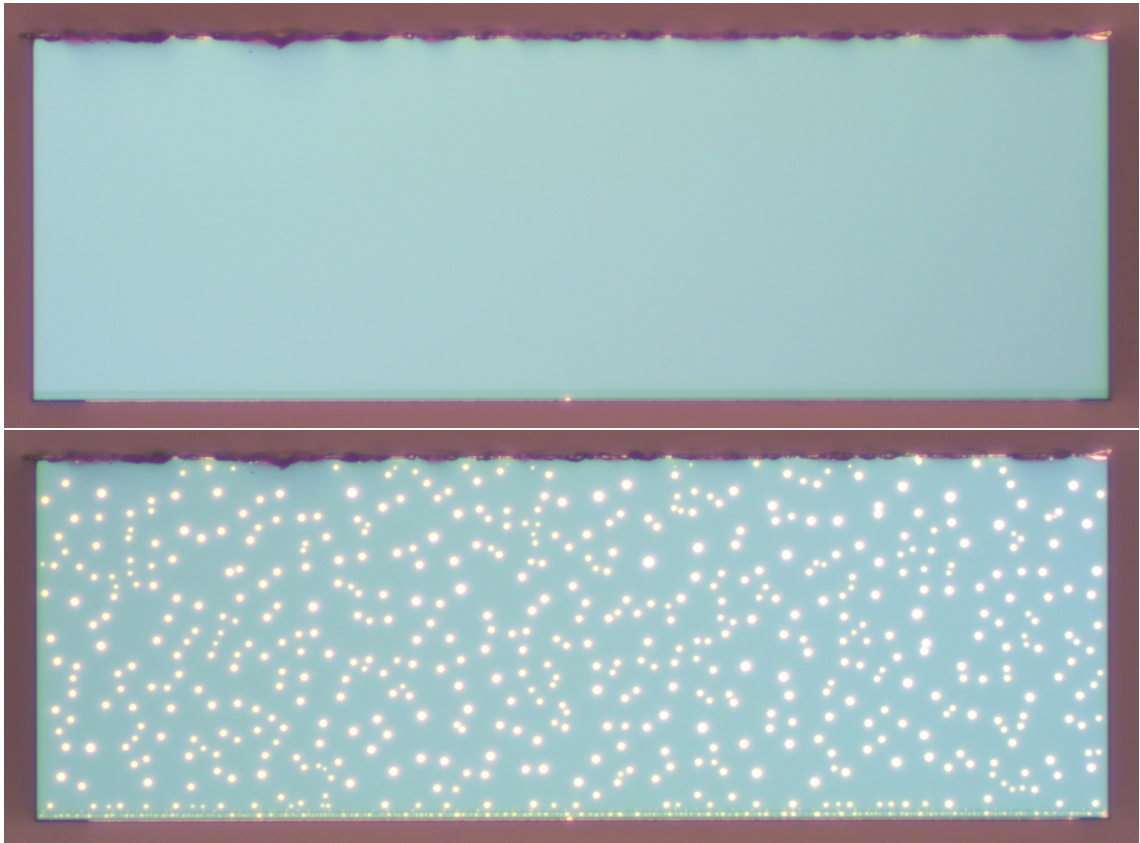
Valkoisten vaurioalueiden syntymisen syytä selvitettiin kuumentamalla lasersiruja juottamisprosessissa käytetyn lämpötilaprofiilin mukaisesti, mutta juottamatta siruja kiinni alustoihin. Kuvassa 6.11 on esitetty mikroskooppikuvat käsittelyn 11 mukaisesti amorfisella piillä passivoitun laserdiodin etufasetista ennen kuumentamista ja kuumentamisen jälkeen. Kuvien perusteella voidaan päätellä, että valkoiset vaurioalueet fasetilla syntyvät juottamisprosessin aikana nimenomaan kuumentamisen seurauksena. Referenssiprosessin laserdiodien faseteilla, joiden passivoinnissa ei käytetty muiden testattujen pintakäsittelyjen tavoin ionisädesputterointilaitetta, valkoisia vaurioalueita ei syntynyt faseteille lainkaan juottamisprosessissa tai testauksen aikana, vaikka laserdiodeja kuumennettiin juottamisen aikana saman lämpötilaprofiilin mukaisesti. Valkoisten vaurioalueiden syntyminen vaikuttaa siis kuumentamisen lisäksi liittyvän fasetin pinnoituksen laatuun. Mahdollisesti tämän työn prosesseissa käytetyllä ionisädesputterointilaitteella kasvatettu pinnoitus ei sovellu laadultaan laserdiodien fasettien passivoimiseen yhtä hyvin kuin referenssiprosessilla kasvatettu pinnoitus.

Passivointiprosessia voisi jatkossa kehittää yrittämällä parantaa SiN_x-kerroksen laatua. Sopivien parametrien löytäminen SiN_x-kerroksen kasvattamiseen sekä tarpeeksi suuren



Kuva 6.10. Laserdiodien etufasetit optisella mikroskoopilla kuvattuna alustalle juottamisen ja COD-mittausten jälkeen. Ylimmässä kuvassa on referenssiprosessilla passivoitu fasetti, jossa ei näy vaurioita lainkaan. Keskimmäisen kuvan fasetti on passivoitu ja pinnoitettu käsittelyn 9 mukaisesti SiN_x -kerroksella, alimman kuvan fasetti puolestaan käsittelyn 11 mukaisesti α -Si-kerroksella.

vetymäärän pitäminen kammiassa kasvatuksen aikana voisi parantaa passivoinnin laatua, mutta merkittävää parannusta on tuskin odotettavissa. Tämän työn tulosten perusteella amorfisen piin käyttäminen passivointikerroksena tai typen käyttäminen vedyn ohella puhdistuksessa eivät ole kannattavia suuntia jatkaa tutkimusta. Puhdistusta voisi olla kiinnostavaa kokeilla pelkällä vedyllä ilman raskasatomista argonia, mutta tässä työssä käytetyllä ionisädesputterointilaitteella se ei ollut mahdollista. Voisi olla kannattavaa jatkaa



Kuva 6.11. Käsittelyn 11 mukaisesti passivoidun ja pinnoitetun laserdiodin etufasetti ennen ja jälkeen kuumentamisen optisella mikroskoopilla kuvattuna. Laserdiodia ei juotettu alustaan, mutta sitä kuumennettiin juottamisprosessissa käytettävän lämpötilaprofiilin mukaisesti.

fasettien passivointi- ja pinnoitusprosessin kehittämistä muilla menetelmillä kuin ionisädesputteroinnilla, sillä sputterointi voi olla kasvatusmenetelmänä epäsovivampi fasettien passivointiin muihin menetelmiin verrattuna. Tätä ajatusta vahvistaa se, että tämän työn käsittelyissä käytetyllä ionisädesputteroinnilla pinnoitetut ohutkalvot eivät kestäneet juottamisprosessin lämpötiloja toisin kuin referenssiprosessilla passivoidut ja pinnoitetut fasetit. Piikerroksella passivoidut fasetit osoittautuivat kuumennuksen kestoaltaan vielä SiN_x -kerroksella passivoituja fasetteja heikommiksi. Mahdollisesti ionisädesputterointilaitteen kammiossa voi olla odotettua enemmän jäännöshappea, joka fasetille päästessään heikentää passivoinnin laatua, tai sputteroinnilla pinnoitettu ohutkalvo ei ole rakenteeltaan tarpeeksi laadukas.

7 YHTEENVETO

Laserdiodeilta vaaditaan eri sovelluksiin yhä suurempaa ulostulotehoa ja parempaa kestävyyttä. Tällä hetkellä yksi merkittävimpiä näitä ominaisuuksia rajoittavia tekijöitä on laserdiodien fasettien laatu. Lupaavia elinikätuloksia on saatu kliivaamalla laserbaarit tyhjiössä ja pinnoittamalla fasetit välittömästi kliivaamisen jälkeen. Tällainen prosessi on kuitenkin kallis ja monimutkainen. Fasetit onkin usein kätevämpää kliivata ilmassa, jolloin ne altistuvat ympäristön hapelle ja epäpuhtauksille. Fasettien hapettuminen on ongelma erityisesti alumiinia sisältävissä puolijohderakenteissa. Kliivauksen seurauksena puolijohteen pinnalle jääneet katkenneet ja saturoitumattomat sidokset, adsorboituneet epäpuhtaudet sekä pinnalle muodostunut oksidikerros muodostavat puolijohteen pinnalle pintatiloja, jotka toimivat säteilemättömän rekombinaation keskuksina. Fasetilla tapahtuva laserin valon absorptio, säteilemätön rekombinaatio ja pinnan suuret rekombinaatiovirrat johtavat fasetin lämpenemiseen ja itseään vahvistavaan kierteseen, joka voi lopulta johtaa kriittiseen optiseen vaurioon. Fasettien laatua voidaan parantaa ja laserdiodien COD-tasoa nostaa erilaisilla passivointikäsitteilyillä.

Fasettien passivointi koostuu tyypillisesti kolmesta vaiheesta. Ensin puolijohdepinta puhdistetaan epäpuhtauksista ja pinnalle muodostuneesta oksidikerroksesta. Heti puhdistuksen jälkeen pinnalle kasvatetaan passivoiva kerros pitämään puhdistettu pinta stabiilina ja toimimaan diffuusioesteenä. Lopuksi pinnoitetaan varsinaiset AR- ja HR-pinnoitteet. Tällainen fasettien passivointi- ja pinnoitusprosessi onnistuu kahden ionilähteen ionisädesputterointilaitteessa purkamatta tyhjiötä kesken prosessin, jolloin vältetään fasettien altistuminen ilmalle prosessin aikana.

Tässä työssä pyrittiin parantamaan laserdiodien kestävyyttä optimoimalla laserdiodien fasettien passivointiprosessi ionisädesputterointilaitteella. Työssä toteutettiin 11 erilaista passivointikäsitteilyä laserbaarien etufaseteille. Passivointikäsitteilylle pyrittiin löytämään parhaat prosessiparametrit, puhdistuskaasut ja passivointikerroksen materiaali. Fasettien puhdistuksen kehittämisessä keskityttiin vedyn käyttämiseen työkaasuna. Vetypuhdistusta pyrittiin parantamaan varioimalla apuionilähteen positiivista jännitettä, puhdistusaikaa ja puhdistuksessa käytettyä toista työkaasua. Pinnoitettavana passivointikerroksena kokeiltiin $\text{SiN}_x\text{:H}$ -kerrosta eri parametreilla sekä amorfista piitä. Johtavien pintatilojen poistumista passivointikäsitteilyllä tutkittiin mittaamalla laserbaareista vuotovirrat. Laserdiodien kestävyyttä tutkittiin mittaamalla laserdiodien COD-tasot ja eliniät. Ionisädesputteroinnilla passivoitujen laserdiodien tuloksia verrattiin passivoimattomien laserdiodien sekä referenssiprosessilla passivoitujen laserdiodien tuloksiin.

Testatuista vetypuhdistuksista parhaiten toimi argonin käyttäminen toisena työkaasuna. Typen käyttäminen puhdistuksessa toisena työkaasuna argonin sijaan heikensi tuloksia, mikä saattoi johtua siitä, että tyyppiä tarvittiin argonia suurempi virtaus plasman pitämiseksi päällä, tai vaihtoehtoisesti tyyppi laimensi vedyn vaikutusta. Parhaimmat tulokset puhdistuksista vedyllä ja argonilla saatiin apuionilähteen 40 V:n positiivisella jännitteellä ja 600 s:n puhdistusajalla. 80 V:n positiivinen jännite vaikutti olevan liian suuri, jolloin ionit mahdollisesti vaurioittivat fasettia, kun taas 0 V:n jännite tai lyhyempi 155 s:n puhdistusaika heikensivät tuloksia todennäköisesti siksi, että pinta ei puhdistunut tarpeeksi. Passivointikerroksen osalta parhaat tulokset saavutettiin $\text{SiN}_x\text{:H}$ -passivoinnilla, kun taas amorfisella piillä passivoituneet laseriodit kestivät COD-taso- ja elinikämittauksissa jopa heikommin kuin ne laseriodit, joiden fasetteja ei passivoitu lainkaan. Vedyn virtauksen kasvattaminen 1 sccm:stä 5 sccm:ään sekä pääionilähteen positiivisen jännitteen pienentäminen $\text{SiN}_x\text{:H}$ -kerroksen pinnoituksen aikana ei parantanut tuloksia merkittävästi.

Testisarjassa toistettiin parhaaksi osoittautunut käsittely 4 uudelleen samoilla parametreilla prosessin toistettavuuden tutkimiseksi. Tulosten perusteella prosessi vaikuttaa toistettavalta puhdistuksen osalta, sillä käsittelyillä prosessoitujen laseriodien COD-tasot olivat hyvin lähellä toisiaan. Sen sijaan eliniät käsittelyillä 4 ja 7 erosivat huomattavasti toisistaan, mikä viittaa siihen, että fasetit eivät pysyneet pitkään passiivisina. Tämä voi johtua $\text{SiN}_x\text{:H}$ -kerroksen heikosta laadusta tai laadun toistettavuudesta. Kun testisarjan tuloksia verrattiin referenssiprosessilla valmistettujen laseriodien tuloksiin, referenssiprosessilla passivoituneet laseriodit osoittautuivat kaikkia ionisädeputteroinnilla passivoituja laseriodeja kestävämmiksi. Tuloksista lisäksi huomattiin, että useiden käsittelyjen osalta vuotovirtamittausten tulokset olivat ristiriidassa COD-tasojen ja elinikätestien tulosten kanssa. Tämä voi kertoa joko siitä, että nA-suuruusluokan virtojen mittausta on altis häiriöille, tai siitä, ettei vuotovirta korreloikaan odotetusti fasetin laadun kanssa.

Passivointikäsittelyjen vaikutusta puolijohdemateriaalin kiderakenteeseen ja pintaan tutkittiin fotoluminesenssispektrien ja atomivoimamikroskooppikuvien avulla. Atomivoimamikroskooppikuvien ja kuvista laskettujen pinnankarheuden rms-arvojen perusteella testatut puhdistuskäsittelyt vaikuttavat karhentavan pintaa ja siten mahdollisesti heikentävän pinnan kestävyttä. Fotoluminesenssimittausten perusteella missään passivointikäsittelyssä ionien energia ei ollut niin suuri, että kiderakenne olisi vaurioitunut, sillä passivointikäsittelyt kasvattivat fotoluminesenssisignaalin tasoa. Fotoluminesenssisignaalin kasvu on toisaalta useissa lähteissä liitetty myös pinnan passivoinnin onnistumiseen, jolloin mahdollisten vaurioiden aiheuttama rekombinaatio voi vain olla vähäisempää kuin passivoinnin poistama rekombinaatio. Myöskään laseriodien mittaustulokset eivät viittaa siihen, että puhdistuksessa käytetyt ionien energiat olisivat olleet liian suuria, sillä $\text{SiN}_x\text{:H}$ -kerroksen pinnoituksessa käytettiin huomattavasti suurempia ionien energioita kuin vetypuhdistuksessa, ja silti $\text{SiN}_x\text{:H}$ -kerroksen pinnoitus paransi tuloksia verrattuna niihin laseriodeihin, joiden faseteille ei pinnoitettu passivointikerrosta. Mahdollinen syy sille, että testatut passivointikäsittelyt eivät onnistuneet parantamaan laseriodien kestävyttä merkittävästi voi olla se, että faseteille pääsee epäpuhtauksia jossain prosessin vaiheessa. Mahdollisesti IBS:n kammioon on esimerkiksi jäänyt

jäännöshappea prosessin ajaksi, tai paine IBS:n kammiossa ei ole riittävän alhainen fasettien passivointikäsittelylle.

Testisarjan laserdiodien fasetit lisäksi kuvattiin optisella mikroskoopilla pintakäsittelyn, alustoille juottamisen ja COD-testauksen jälkeen. Mikroskooppikuvissa kaikkien testisarjojen laserdiodien faseteilla näkyi pieniä valkoisia ja pistemäisiä vaurioalueita. Tarkempi tutkiminen paljasti vaurioiden syntyvän lämpötilan vaikutuksesta alustoille juottamisen aikana. Piikerroksella passivoiduille faseteille valkoisia alueita syntyi koko fasetin alueelle, kun taas SiN_x-kerroksella passivoiduille faseteille valkoisia alueita syntyi vain aivan fasetin reunaan aktiivisen alueen tasolle. Referenssi prosessilla valmistettujen laserdiodien fasetit kestivät juottamisprosessin lämpötilan, eikä valkoisia alueita syntynyt missään prosessin vaiheessa tai testauksen aikana. Mahdollisesti ionisädesputterointi kasvatusmenetelmänä aiheuttaa kasvatettuun kerrokseen jännitteitä, jotka purkautuvat materiaalin kuumentuessa aiheuttaen faseteilla näkyvät vauriot. Kasvatusmenetelmän lisäksi myös kasvatusmateriaali tai piin osuus kasvatusmateriaalissa vaikuttaa fasetin kestävyYTEEN kuumennettaessa.

Työtä voisi tulevaisuudessa jatkaa optimoimalla prosessiparametreja edelleen. Prosessin suurin ongelma vaikuttaa olevan IBS:llä saatavan SiN_x:H-kerroksen laatu ja laadun toistettavuus, joita voi olla mahdollista jatkossa jonkin verran parantaa jatkamalla prosessiparametrien optimointia. Typen käyttö vedyn ohella puhdistuksen työkaasuna tai amorfisen piin käyttäminen passivointikerroksena heikensi COD-tasoja ja laserdiodien elinikää niin paljon, että tämän työn tulokset eivät rohkaise niiden tutkimiseen enää tulevaisuudessa. Lisäksi jonkun muun laitteen kuin IBS:n testaaminen vastaavanlaisiin passivointiprosesseihin voisi tuoda lisätietoa siitä, onko laitteessa mahdollisesti kehitettävää, tarvitsisiko prosessi vielä tässä työssä käytettyä IBS:ää paremman tyhjiön, tai onko ionisädesputterointi pinnoitusmenetelmänä ylipäätään soveltuva fasettien passivointikerrosten pinnoittamiseen.

LÄHTEET

- [1] Welch, D. F. A brief history of high-power semiconductor lasers. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics* 6.6 (2000), 1470–1477. doi: 10.1109/2944.902203.
- [2] Epperlein, P. W. *Semiconductor laser engineering, reliability and diagnostics a practical approach to high power and single mode devices*. Chichester, West Sussex, U.K: John Wiley & Sons Inc., 2013.
- [3] Yanson, D., Levi, M., Shamay, M., Tesler, R., Rappaport, N., Don, Y., Karni, Y., Schnitzer, I. ja Sicron, N. Facet engineering of high power single emitters. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* 7918 (2011). doi: 10.1117/12.876261.
- [4] Lambert, R. W., Ayling, T., Hendry, A. F., Carson, J. M., Barrow, D. A., McHendry, S., Scott, C. J., McKee, A. ja Meredith, W. Facet-passivation processes for the improvement of Al-containing semiconductor laser diodes. *Journal of Lightwave Technology* 24.2 (2006), 956–961. doi: 10.1109/JLT.2005.861916.
- [5] Jaouad, A. ja Aimez, V. Passivation of air-exposed AlGaAs using low frequency plasma-enhanced chemical vapor deposition of silicon nitride. *Applied Physics Letters* 89.9 (2006), 1–4. doi: 10.1063/1.2345030.
- [6] Wang, Y., Qu, H., Wang, Y., Dong, F., Chen, Z. ja Zheng, W. Radio Frequency Plasma-Enhanced Reactive Magnetron Sputtering Deposition of α -SiN_x on Photonic Crystal-Laser Diodes for Facet Passivation. *ACS Omega* 4.23 (2019), 20205–20211. doi: 10.1021/acsomega.9b02452.
- [7] Ressel, P., Erbert, G., Zeimer, U., Häusler, K., Beister, G., Sumpf, B., Klehr, A. ja Concept, A. Novel Passivation Process for the Mirror Semiconductor Diode Lasers. *IEEE Photonics Technology Letters* 17.5 (2005), 962–964. doi: 10.1109/LPT.2005.846750.
- [8] Shu, X., Xu, C., Tian, Z. ja Shen, G. ZnSe by electron-beam evaporation used for facet passivation of high power laser diodes. *Solid-State Electronics* 49.12 (2005), 2016–2017. doi: 10.1016/j.sse.2005.09.007.
- [9] Horie, H., Ohta, H. ja Fujimori, T. Reliability Improvement of 980-nm Laser Diodes with a New Facet Passivation Process. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics* 5.3 (1999), 832–838. doi: 10.1109/2944.788457.
- [10] Fomin, E. V., Bondarev, A. D., Soshnikov, I. P., Bercu, N. B., Giraudet, L., Molinari, M., Maurer, T. ja Pikhtin, N. A. Using AlN Coatings to Protect the Surface of AlGaAs/GaAs System Heterostructures from Interaction with Atmospheric Oxygen. *Technical Physics Letters* 46.3 (2020), 268–271. doi: 10.1134/S1063785020030207.

- [11] Zhou, L., Gao, X., Wang, Y., Xu, L., Jia, B., Bai, D. ja Bo, B. Facet Passivation of GaAs based LDs by N₂ plasma pretreatment and RF sputtered AlxNy film coating. *Journal of Lightwave Technology* 31.13 (2013), 2279–2283. doi: 10.1109/JLT.2013.2265157.
- [12] Streetman, B. G. *Solid state electronic devices*. 7. painos. Boston: Pearson, 2015.
- [13] Svelto, O. *Principles of lasers*. 5. painos. New York, NY: Springer, 2010.
- [14] Leinonen, P. Techniques for semiconductor laser processing. Tampereen teknillinen yliopisto, Julkaisu 696 (2007).
- [15] Macleod, H. *Thin-film optical filters*. 4. painos. Baton Rouge: CRC Press, 2010. doi: 10.1201/9781420073034.
- [16] Yu, P. Y. ja Cardona, M. *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties*. 4. painos. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [17] Ebert, P. Atomic structure of point defects in compound semiconductor surfaces. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 5.2-3 (2001), 211–250. doi: 10.1016/S1359-0286(00)00046-2.
- [18] Cobley, R. J., Teng, K. S., Brown, M. R., Rees, P. ja Wilks, S. P. Surface defects in semiconductor lasers studied with cross-sectional scanning tunneling microscopy. *Applied Surface Science* 256.19 (2010), 5736–5739. doi: 10.1016/j.apsusc.2010.03.089.
- [19] Kaufman, H. R. ja Harper, J. M. Ion-assist applications of broad-beam ion sources. *Advances in Thin Film Coatings for Optical Applications* 5527 (2004), 50. doi: 10.1117/12.559785.
- [20] Beister, G., Maege, J., Sebastian, J., Ebert, G., Weixelbaum, L., Weyers, M., Würfl, J. ja Daga, O. P. Stability of sulfur-passivated facets of InGaAs-AlGaAs laser diodes. *IEEE Photonics Technology Letters* 8.9 (1996), 1124–1126. doi: 10.1109/68.531810.
- [21] Su, Y. K., Member, S., Wang, H. C., Lin, C. L., Chen, W. B. ja Chen, S. M. Improvement of AlGaInP Light Emitting Diode by Sulfide Passivation. *IEEE Photonics Technology Letters* 15.10 (2003), 1345–1347. doi: 10.1109/LPT.2003.818064.
- [22] Kerboeuf, S., Bettiati, M., Gentner, J. L., Belouet, C., Perrière, J., Jimenez, J. ja Martin, E. Passivation of the Facets of 980 nm GaAs Pump Lasers by a Pulsed UV Laser-Assisted Technique. *Journal of Electronic Materials* 28.2 (1999), 83–90. doi: 10.1007/s11664-999-0223-7.
- [23] Silfvenius, C., Blixt, P. ja Lindström, C. Native-nitride passivation eliminates facet failure. *Laser Focus World* 39.11 (2003), 69–73.
- [24] Ichikawa, H., Fukuda, C., Hamada, K. ja Nakabayashi, T. Facet Passivation of GaInAsP/InP Edge-Emitting Laser Diode by Aluminum Ultrathin Layer Insertion. *Japanese Journal of Applied Physics* 47.10 (2008), 7890–7895. doi: 10.1143/jjap.47.7890.
- [25] Tu, L. W., Schubert, E. F., Hong, M. ja Zydzik, G. J. In-vacuum cleaving and coating of semiconductor laser facets using thin silicon and a dielectric. *Journal of Applied Physics* 80.11 (1996), 6448–6451. doi: 10.1063/1.363664.
- [26] Zhao, T., Li, Z., Li, T., Li, H., Qu, Y., Yan, C., Bo, B., Liu, G., Ma, X., Du, W. ja Li, Y. The high vacuum cleaving facet coating passivation characteristic of laser diode. 2015

- International Conference on Optoelectronics and Microelectronics, ICOM 2015* (2016), 55–57. doi: 10.1109/ICoOM.2015.7398769.
- [27] Pawlik, S., Muller, J., Lichtenstein, N., Jaeggi, D. ja Schmidt, B. Reliable 808-nm high power laser diodes. *Conference Digest - IEEE International Semiconductor Laser Conference* (2004), 79–80.
- [28] Xiao, H. *Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology*. 2. painos. SPIE, 2012.
- [29] Bundesmann, C. ja Neumann, H. Tutorial: The systematics of ion beam sputtering for deposition of thin films with tailored properties. *Journal of Applied Physics* 124.23 (2018). doi: 10.1063/1.5054046.
- [30] Becker, M., Gies, M., Polity, A., Chatterjee, S. ja Klar, P. J. Materials processing using radio-frequency ion-sources: Ion-beam sputter-deposition and surface treatment. *Review of Scientific Instruments* 90.2 (2019). doi: 10.1063/1.5063976.
- [31] Franssila, S. *Introduction to microfabrication*. 2. painos. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2010.
- [32] Seshan, K. ja Schepis, D. *Handbook of Thin Film Deposition*. 4. painos. Elsevier, 2018.
- [33] Chevtchenko, S. A., Reshchikov, M. A., Fan, Q., Ni, X., Moon, Y. T., Baski, A. A. ja Morko, H. Study of SiNx and SiO₂ passivation of GaN surfaces. *Journal of Applied Physics* 101.11 (2007). doi: 10.1063/1.2740324.
- [34] Jeng, M.-J., Chang, Y.-H., Chang, L.-B., Huang, M.-J. ja Lin, J.-C. Effective Suppression of Surface Recombination of AlGaInP Light-Emitting Diodes by Sulfur Passivation. *Japanese Journal of Applied Physics* 46.4 (2007), L291–L293.
- [35] Hempel, M., Tomm, J. W., Ziegler, M., Elsaesser, T., Michel, N. ja Krakowski, M. Catastrophic optical damage at front and rear facets of diode lasers. *Applied Physics Letters* 97.23 (2010), 10–13. doi: 10.1063/1.3524235.
- [36] Ziegler, M., Tomm, J. W., Elsaesser, T., Matthiesen, C., Bou Sanayeh, M. ja Brick, P. Real-time thermal imaging of catastrophic optical damage in red-emitting high-power diode lasers. *Applied Physics Letters* 92.10 (2008), 10–13. doi: 10.1063/1.2898202.
- [37] Jiménez, J. *Laser diode reliability: Crystal defects and degradation modes*. 2003. doi: 10.1016/S1631-0705(03)00097-5.
- [38] Dienelt, J., Zimmer, K., Von Sonntag, J., Rauschenbach, B. ja Bundesmann, C. Roughness and damage of a GaAs surface after chemically assisted ion beam etching with Cl₂/Ar⁺. *Microelectronic Engineering* 78-79.1-4 (2005), 457–463. doi: 10.1016/j.mee.2004.12.059.
- [39] Haugstad, G. *Atomic force microscopy: understanding basic modes and advanced applications*. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2012.
- [40] Horcas, I., Fernández, R., Gómez-Rodríguez, J. M., Colchero, J., Gómez-Herrero, J. ja Baro, A. M. WSXM: A software for scanning probe microscopy and a tool for nanotechnology. *Review of Scientific Instruments* 78.1 (2007). doi: 10.1063/1.2432410.
- [41] García, R. ja Pérez, R. Dynamic atomic force microscopy methods. *Surface Science Reports* 47.6-8 (2002), 197–301. doi: 10.1016/s0167-5729(02)00077-8.

- [42] Smeeton, T. M., Bousquet, V., Hooper, S. E., Kauer, M. ja Heffernan, J. Atomic force microscopy analysis of cleaved facets in III-nitride laser diodes grown on free-standing GaN substrates. *Applied Physics Letters* 88.4 (2006), 1–3. doi: 10.1063/1.2167400.
- [43] Olvera, J., Martínez, O., Plaza, J. L. ja Diéguez, E. Luminescence effects of ion-beam bombardment of CdTe surfaces. *Journal of Luminescence* 129.9 (2009), 941–944. doi: 10.1016/j.jlumin.2009.04.004.