



Juoteviiksien synty ja ehkäisy optisissa komponenteissa

Laura Rjabova

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2025

Laboratoriotekniikan tutkinto-ohjelma

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Laboratoriotekniikan tutkinto-ohjelma

RJABOVA, LAURA:

Juoteviiksien synty ja ehkäisy optisissa komponenteissa

Opinnäytetyö 32 sivua, joista liitteitä 1 sivu
Toukokuu 2025

Opinnäytetyön aiheena oli tutkia kvalitatiivisesti paineen vaikutusta juoteviiksien syntyyn optisissa komponenteissa. Toimeksiantajana toimi Vexlum Oy. Aiheen valinta perustui sen tärkeyteen laserin eliniän kannalta. Työ liittyy prosessiin, joka on osa laajemman kokonaisuuden kriittistä komponenttia.

Työn tavoitteena oli tutkia paineen merkitystä juoteviiksien muodostumiselle ottamalla huomioon muita tekijöitä, kuten lämpökäsittelyä tai materiaalien ominaisuuksia. Tarkoituksena oli testata kokeellisesti testikappaleiden avulla eri paineiden vaikutuksia ja tarkkailla mikroskoopilla mahdollisia muutoksia kvalitatiivisesti.

Tutkimustulokset osoittivat, että paine vaikutti merkittävästi juoteviiksien muodostumiseen. Korkeapaineisissa testikappaleissa havaittiin enemmän juoteviiksiä, erityisesti huonommin puhdistetuilla pinnoilla, kun taas matalapaineisissa kappaleissa juoteviiksiä ei muodostunut.

Tutkimus vahvisti paineen merkityksen juoteviiksien muodostumiselle, vaikka tutkimuksen kesto oli lyhyt suhteessa juoteviiksien tavanomaiseen muodostumisaikaan. Tutkimuksessa ei otettu huomioon muita mahdollisia tekijöitä, kuten materiaalien ominaisuuksia tai juotteen määrää. Jatkotutkimuksissa olisi hyödyllistä tarkastella näiden tekijöiden sekä pitkäaikaisen painealtistuksen vaikutuksia. Käytännössä olisi tärkeää välttää liiallista painetta, koska se voi edistää juoteviiksien muodostumista.

Asiasanat: juoteviikset, paine, VECSEL

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Laboratory Engineering

RJABOVA, LAURA:
Formation and Prevention of Solder Whiskers on Optical Components

Bachelor's thesis 32 pages, appendices 1 page
May 2025

The aim of this thesis was to qualitatively investigate the impact of pressure on the formation of solder whiskers in optical components. Vexlum Oy acted as the commissioning company. The topic was chosen due to its importance in extending the lifetime of lasers and its relevance to a critical component within a larger process.

The goal of the study was to focus on the effect of pressure on solder whisker formation, excluding other factors such as heat treatment and material properties. The research involved experimentally testing the effects of different pressure levels on test samples and monitoring potential changes under a microscope qualitatively.

The results showed that pressure significantly affects the formation of solder whiskers. High-pressure test samples exhibited a greater number of whiskers, particularly on less thoroughly cleaned surfaces, while low-pressure samples showed no formation of whiskers.

While the study confirmed the importance of pressure in whisker formation, the relatively short duration of the experiment, compared to the typical whisker growth time, limits the conclusions. Other factors such as material properties and solder quantity were not considered this time. Future studies should explore the effects of these variables and the impact of long-term pressure exposure. Practically, it is crucial to avoid excessive pressure, as it can promote the formation of solder whiskers.

Key words: solder whiskers, pressure, VECSEL

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	JUOTEVIIKSET: OMINAISUUDET, SYNTY JA EHKÄISY	7
2.1	Juoteviikset	7
2.1.1	Paineen rooli	9
2.1.2	Muut vaikuttavat tekijät	10
2.2	Juoteviiksien ehkäisy	12
3	YRITYS	14
3.1	Vexlum Oy	14
3.2	VECSEL	15
4	JUOTEVIIKSIEN TUTKIMUSPROSESSI	21
4.1	Testikappaleiden valmistus	21
4.2	Prosessin seuraaminen	23
5	TULOKSET JA NIIDEN TULKINTA	25
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	28
	LÄHTEET	30
	LIITTEET	32
	Liite 1. Esimerkkikuva prosenttiosuuden laskentamallista	32

ERITYISSANASTO

BRF	Birefringence filter, kaksoistaittava filteri
DBR	Distributed Bragg reflector, Bragg-peili
IMC	Intermetallic compound, metalliyhdiste
IR	Infrared, infrapuna
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, valon vahvistaminen säteilyemission avulla
OPSL	Optically Pumped Semiconductor Laser, optisesti pumpattu puolijohdelaser
ORC	Optoelectronics Research Centre, Optoelektronikan tutkimuskeskus
PCB	Printed Circuit Board, piirilevy
QD	Quantum-dot, kvanttipistekerros
QW	Quantum-well, kvanttikaivokerros
SDL	Semiconductor Disc Laser, puolijohdekiekkolaser
SESAM	Semiconductor Saturable Absorber Mirror, saturatiivinen puolijohde-absorptiopelli
TEM	Transverse Electromagnetic Mode, Poikittainen sähkömagneettinen tila
VECSEL	Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser, Pystysuoraan emittoiva ulkoisen kaviteetin puolijohdelaser

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Vexlum Oy, ja sen tavoitteena on tutkia paineen vaikutusta juoteviiksien syntyyn optisissa komponenteissa. Tämä tutkimusaihe on tärkeä, sillä juoteviiksien muodostuminen voi vaikuttaa merkittävästi laserkomponenttien elinikään ja toimintavarmuuteen. Lisäksi tutkimusaihe liittyy prosessiin, joka on osa laajemman kokonaisuuden kriittistä komponenttia. Työssä keskitytään nimenomaan paineen vaikutuksen selvittämiseen. Muita mahdollisia tekijöitä, kuten lämpökäsittelyä, materiaalien ominaisuuksia tai prosessimuutoksia – esimerkiksi juotteen määrää tai komponenttien pieniä eroavaisuuksia tuotantoerien välillä ei tarkastella.

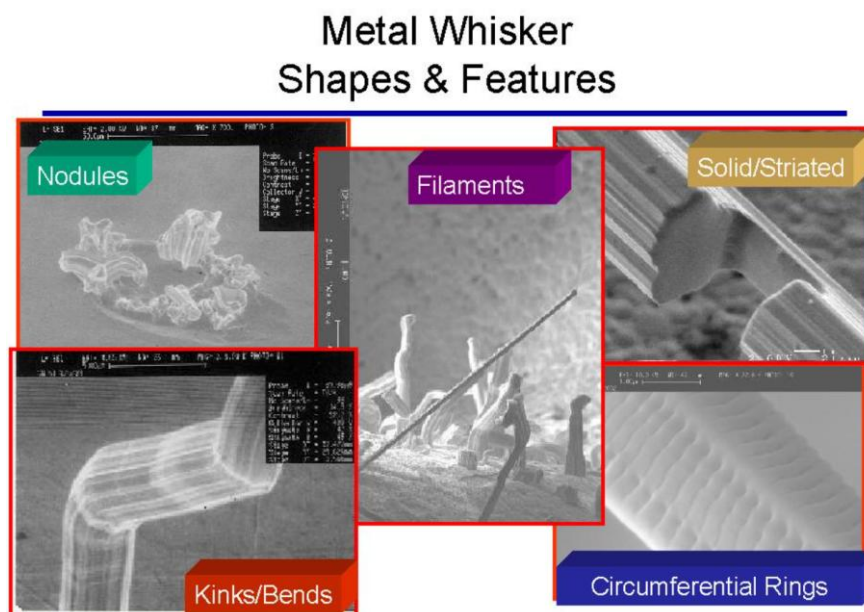
Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää paineen vaikutus juoteviiksien muodostumiseen. Tämä toteutetaan kokeellisesti valmistamalla testikappaleita ja seuraamalla niiden käyttäytymistä paineen eri arvoilla. Testikappaleita seurataan säännöllisesti ja muodostuneita juoteviiksiä analysoidaan kvalitatiivisesti mikroskooppilla. Tuloksia vertaillaan alku- ja loppuvaiheen kuvien perusteella. Tutkimuksen päähypoteesi on se, että paine on merkittävä tekijä juoteviiksien syntyyn, mutta myös muut prosessiin liittyvät tekijät voivat vaikuttaa. Paine todettiin tutkimuksen perusteella keskeiseksi syyksi ja tämä työ voi auttaa kehittämään keinoja sen aiheuttamien vaikutusten hallintaan.

Tutkimusaihe on relevantti ja tuottaa hyödyllistä tietoa, jonka avulla voidaan suunnitella jatkotoimia, kuten prosessin parannuksia tai tarkempia lisätutkimuksia.

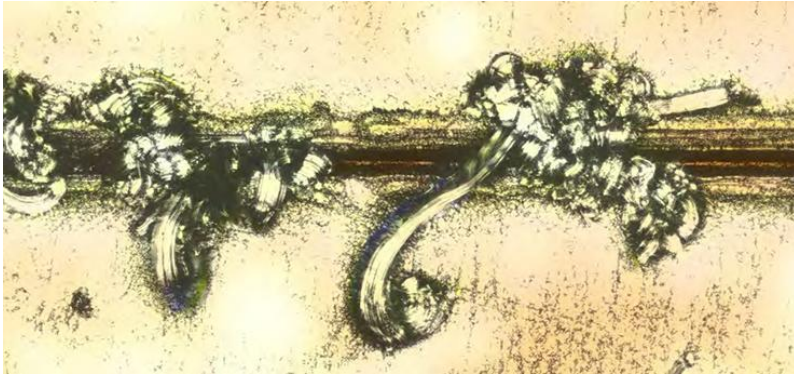
2 JUOTEVUIKSET: OMINAISUUDET, SYNTY JA EHKÄISY

2.1 Juoteviikset

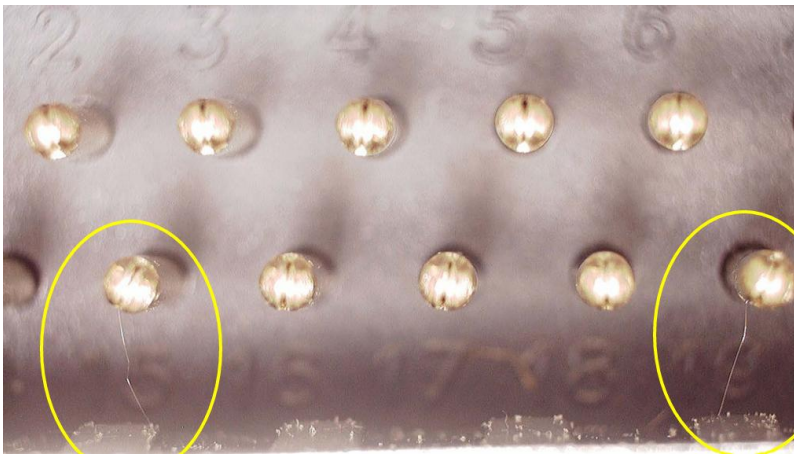
Juoteviikset ovat mikroskooppisia, sähköä johtavia ja kiteisiä rakenteita (kuva 1), jotka voivat kasvaa pinnoilta alhaalta ylöspäin, erityisesti elektrolyyttisesti pinnoitetuista pinnoista (kuva 2). Niiden muodostumisaika vaihtelee suuresti – niitä voi ilmestyä jo hyvin pian juottamisen jälkeen, mutta tavanomaisesti viiksien kehittyminen kestää kuukausia tai jopa vuosia, eikä muodostumista voida koskaan enustaa tarkasti etukäteen. Ne voivat kasvaa useiden millimetrien pituisiksi ja harvinaisissa tapauksissa jopa yli 10 millimetriin. Juoteviikset voivat aiheuttaa elektroniikassa oikosulkuja yhdistämällä lähekkäin olevia piirielementtejä, jotka pidetään eri jännitteillä (kuva 3). Juoteviiksien aiheuttamat ongelmat on tunnettu vuosikymmeniä, sillä niitä on havaittu jo 1940- ja 1950-luvuilla. Vaikka tina (Sn) on yleisesti tunnetuin metalli juoteviiksen suhteen, niin myös sinkki (Zn), kadmium (Cd), indium (In) ja hopea (Ag) voivat olla hyviä kasvualustoja viiksien muodostumiseen. On tiedossa, että juoteviiksien kasvu ei vaadi metallien liuottamista tai sähkömagneettista kenttää, mutta niiden tarkka kasvumekanismi on edelleen tuntematon, vaikka teorioita on monia erilaisia. (NASA 2019.)



KUVA 1. Erilaisia juoteviiksien muotoja: nystyrät, mutkat/taipumat, säikeet, kiinteät/juovaiset, ympyrämaiset renkaat (NASA 2019).



KUVA 2. Juoteviikset kasvavat vahingoittuneesta elektrolyyttisestä pinnasta (Schmidt ym. 2023, 5).

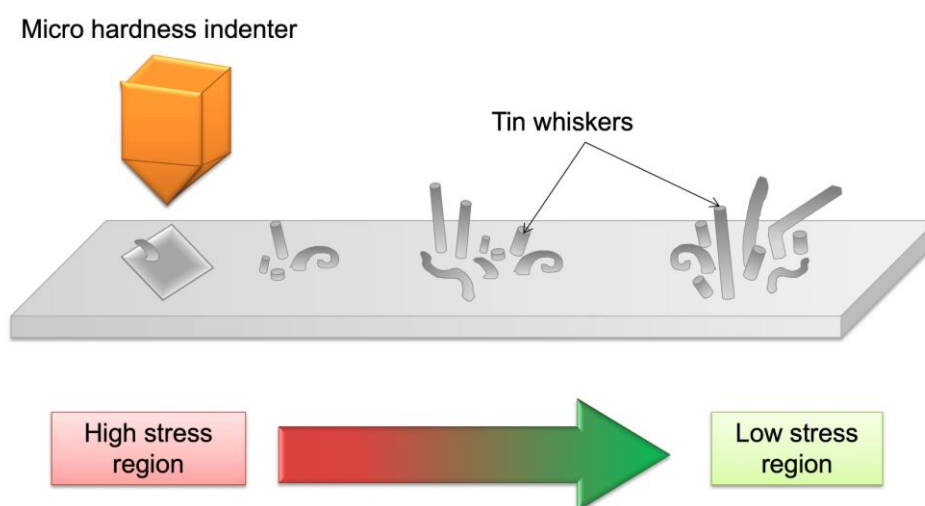


KUVA 3. Juoteviiksiä liittimessä (Panashchenko 2012, 44).

Juoteviikset kasvavat pääasiassa materiaalin perustasta, ei kärjestään. Ne ovat todella ohuita, minkä vuoksi niiden havaitseminen on vaikea jopa erittäin tarkkojen mittalaitteidenkin avulla. Viikset voivat muodostua myös elektrolyyttisesti pinnoitetuista tai höyrystetyistä tinapinnoista. Niiden kasvu liittyy usein jäännösjännityksiin, ja puristusjäännösjännitystä pidetään tärkeänä tekijänä niiden muodostumisessa. Jäännösjännitykset ovat materiaalin sisäisiä jännityksiä, jotka syntyvät materiaaliin esimerkiksi mekaanisessa muokkauksessa, kuten hitsauksen yhteydessä. Puristusvoima tarkoittaa taas jännitettä eli voimaa, joka syntyy puristaessa materiaalia. Lämpökäsittely ja juotteen sulaminen voivat vähentää juoteviiksien kasvua, mutta esimerkiksi myöhemmin tapahtuva komponenttien liitännätöiden taivutus voi palauttaa puristusjännityksen ja siten edistää viiksien kasvua. (Boettinger ym. 2005, 5033–5034.)

2.1.1 Paineen rooli

Paineella on merkittävä rooli juoteviiksien muodostumisessa, koska se aiheuttaa tinapinnoitteessa jännityksiä, jotka voivat edistää viiksien kasvua. Kun pintaan kohdistuu mekaanista kuormitusta, esimerkiksi taivutettaessa komponenttia tai käsiteltäessä pintaa naarmuuntumisen kautta, tinan sisällä syntyy puristusjännityksiä. Nämä jännitykset voivat siirtää tinan atomeja ja edistää viiksien kasvua. Paine saa aikaan monenlaisia jännityksiä, jotka jäävät tinan sisälle, vaikka paine poistettaisiinkin. (Horváth & Harsányi 2009, 389–390.) Erityisesti materiaalien kovuuden määrittämisessä käytetyn mikroindentaation aiheuttama paine luo jännityskeskittymiä, jotka vaikuttavat viiksien kasvuun (Fadil ym. 2021, 9–11). Kuviossa 1 on esitetty kaaviokuva juoteviiksien muodostumisesta upotustinan pintakäsittelylle tietyllä etäisyydellä painaumakohdasta.



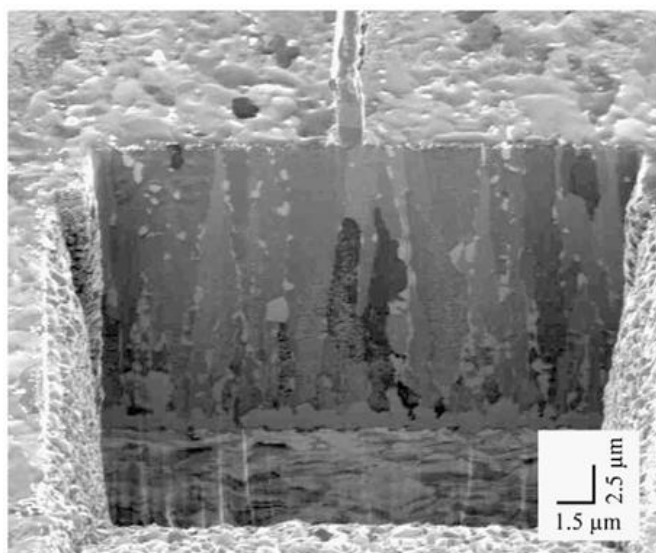
KUVIO 1. Kaaviokuva juoteviiksien muodostumisesta upotustinan pinnalle (Fadil ym. 2021).

Tutkimukset ovat osoittaneet, että juoteviiksien muodostuminen on vähäisempää painaumakohdassa. Niitä muodostuu enemmän alueilla, jotka ovat kauempana tästä kohdasta, koska tinan atomit pyrkivät siirtymään alhaisemman jännityksen alueille vapauttaakseen sisäisiä jännityksiä. Näin olleen viiksien kasvu suuntautu alueille, joissa jännityksen suuruus on matalampi, eli painaumakohdan ulkopuolelle. Paineen vaikutuksesta juoteviiksien kasvu voi myös keskeytyä, kun esimerkiksi kuparioksidin (CuO) muodostuminen tinapinnalle edistää jännityksen vapautumista. Kuparioksidia voi muodostua, kun kuparin ja tinapinnoitteen välille muodostuu metalliyhdisteitä (IMCs, intermetallic compounds), mitkä taas nostavat

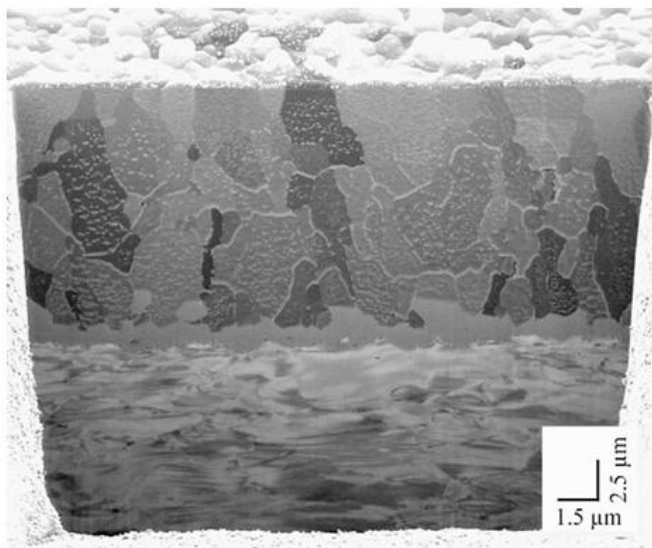
paikallisia ja sisäisiä jännityksiä. Kuparioksidi rajoittaa viiksien kasvua painauma-
kohdan ympäristössä ja tämän vuoksi sekä paine että sen aiheuttamat jännityk-
set voivat merkittävästi muokata juoteviiksien muodostumisen suuntaa ja kasvua.
(Fadil ym. 2021, 6–13.)

2.1.2 Muut vaikuttavat tekijät

Juoteviiksien muodostuminen johtuu useista toisiinsa liittyvistä fysikaalisista ja
kemiallisista tekijöistä. Yksi merkittävimmistä tekijöistä on materiaalien välille
muodostuvat metalliyhdisteet, joiden muodostuminen aiheuttaa paikallisia ja si-
säisiä puristusjännityksiä, jotka voivat edistää viiksien syntyä. Esimerkkinä tina
ja kuparin (Sn-Cu) yhdistelmä, jossa muodostuu Cu_6Sn_5 -rakenteita. Lisäksi juo-
teviiksien syntyyn vaikuttaa materiaalin kiderakenne. Viikset syntyvät todennä-
köisemmin pinnoitteista, joissa on kolonnimainen ja pystysuuntainen raerakenne
(kuva 4), koska se rajoittaa jännitysten tasaantumista. (Boettinger ym. 2005,
5033–5034.) Rakeet ovat pieniä kidealkioita. Kuvassa 5 esitetään vertailuna tina-
lyijyn (Sn-Pb) ei-kolonnimainen raerakenne.

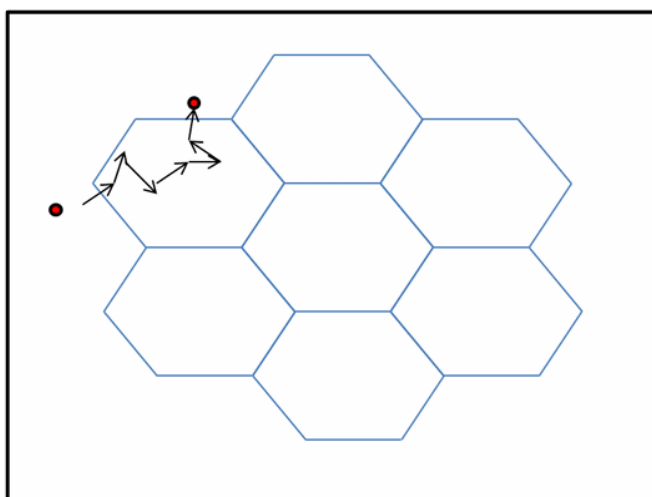


KUVA 4. Tina-kupari (Sn-Cu) kolonnimainen ja pystysuuntainen raerakenne,
jossa näkyy myös juoteviiksi kuvan yläosassa (Boettinger ym. 2005, 5038).

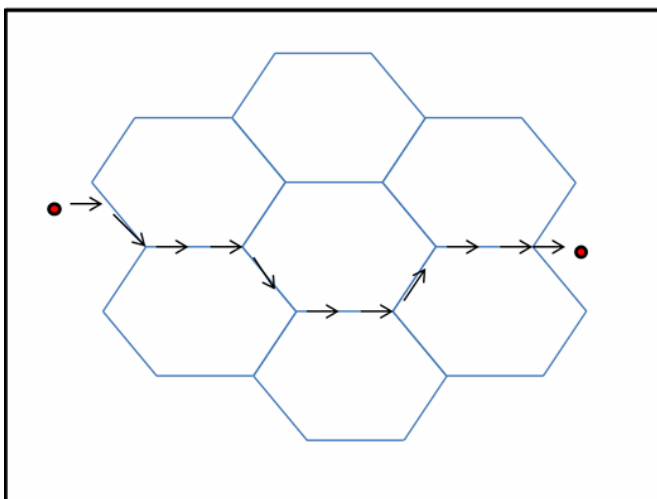


KUVA 5. Tina-Lyjy (Sn-Pb) ei-kolonnimainen raerakenne (Boettinger ym. 2005, 5039).

Juoteviiksien muodostuminen liittyy atomien diffuusion, eli atomien liikkeeseen materiaalin sisällä usein jännitysten tai pitoisuuserojen takia. Monikiteisessä aineessa atomit voivat liikkua kahdella eri tavalla: tilavuusdiffuusiona ja raerajadiffuusiona. Tilavuusdiffuusiolla (kuvio 2) atomit voivat kulkea suoraan kiteiden läpi, ja se on yleisempää korkeissa lämpötiloissa. Vaihtoehtoisesti raerajadiffuusiolla (kuvio 3) atomit voivat liikkua rakeiden välisten rajapintojen kautta, ja tämä tapahtuu helpommin alemmissä lämpötiloissa. (Panashchenko 2012, 19.)



KUVIO 2. Tilavuusdiffuusio (Panashchenko 2012, 19).



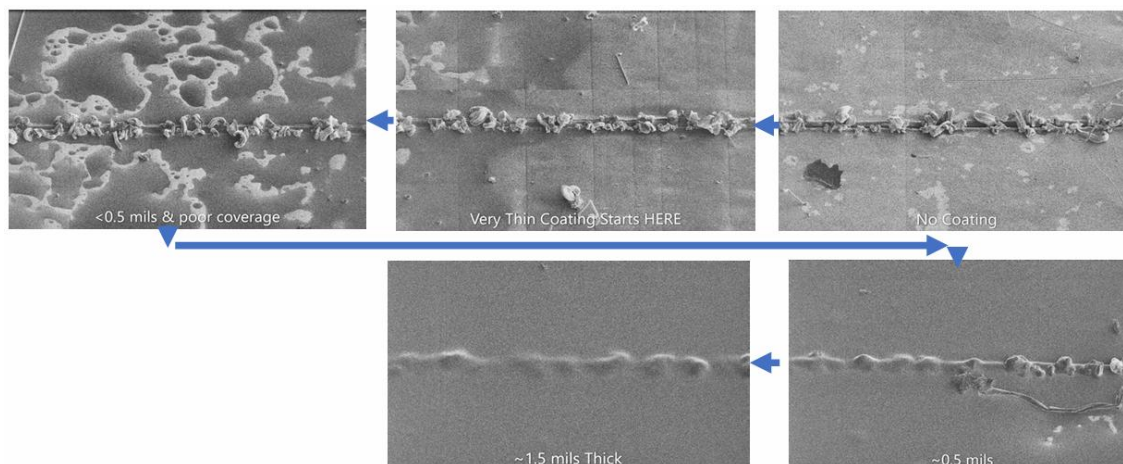
KUVIO 3. Raerajadiffuusio (Panashchenko 2012, 19).

2.2 Juoteviiksien ehkäisy

Juoteviiksien ehkäisyssä yksi yleisimmistä keinoista on ollut lyijyn lisääminen tina-seokseen. Perinteinen lyijyä (Pb) sisältävä tinajuote (Sn ja Pb) on vuosikymmenten ajan ollut erittäin tehokas juoteviiksien ehkäisijä. Noin 5 % lyijyä on todettu ehkäisemään lähes täysin juoteviiksien muodostumisen. Lyijyn lisääminen tinaan on hyvä viiksiä ehkäisevä ratkaisu, mutta erityisesti EU:ssa sen käyttö kielletään myrkyllisyyden vuoksi. (Woolley & Choi n.d., 1–2.) Lyijy on tunnettu terveydelle ja ympäristölle haitallisena raskasmetallina, minkä vuoksi sen käyttöä on rajoitettu RoHS-direktiivillä. Rajoituksen tavoitteena on suojella ihmisiä ja ympäristöä lyijyn pitkäaikaisilta vaikutuksilta. (EPNDir 2011/65/EU.) Tämän seurauksena monet yritykset ovat siirtyneet lyijyttömiin juotteisiin, mikä taas on lisännyt juoteviiksien riskiä (Woolley & Choi n.d., 1).

Toinen keskeinen juoteviiksien ehkäisykeino on suojapinnoitteiden käyttäminen. Sen avulla voi ehkäistä juoteviiksien haitallisuuden jopa kokonaan. Vaikka pinnoitteen alle voikin syntyä mahdollisesti pieniä juoteviiksistä aiheutuvia pinnan kohoumia, ne eivät läpäise suojakerrosta, eivätkä siten aiheuta sähköisiä häiriöitä. Pinnoitteen paksuudella (kuva 6) on ratkaiseva rooli, eli ohuemmillä pinnoitteilla juoteviikset pystyvät osittaisesti läpäisemään pinnoitekerroksen, kun taas riittävän paksu suojakerros voi estää ne erittäin tehokkaasti. Lisäksi pinnoite toimii myös suojana irtonaisilta hiukkasilta, kuten viiksien palasilta, jotka voisivat muuten kulkea muualle ja aiheuttaa oikosulkuja. Tämän takia suojapinnoite on

erinomainen ehkäisykeino, erityisesti silloin kun lyijyä ei voida käyttää. (Schmidt ym. 2023, 9, 14–16, 20.)



KUVA 6. Pinnoitteen paksuuden vaikutus juoteviiksien muodostumiseen. Kuvissa 1 mils tarkoittaa 0,0254 millimetriä. (Schmidt ym. 2023, 4.)

3 YRITYS

3.1 Vexlum Oy

Vexlum Oy on vuonna 2017 perustettu spin-off yritys, joka on lähtöisin Tampereen yliopiston Optoelektroniikan tutkimuskeskuksesta (ORC, Optoelectronics Research Centre). Yritys keskittyy edistyksellisiin optoelektroniikan ratkaisuihin. Vaikka Vexlum on nuori yritys, sen perustajatiimi on ollut johtava tutkimusryhmä VECSEL-tekniikan (Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser) alalla yli vuosikymmenen ajan. (Company n.d.)

Vexlum kehittää VECSEL-tekniikkaan perustuvia lasereita erityisesti kvanttitekniikan sovelluksiin. Yritys keskittyy optoelektroniikan käyttöön suunnattuihin puolijohdemateriaaleihin, kuten epitaksisiin rakenteisiin puolijohdekierroilla, jotka mahdollistavat uusien aallonpituuksien VECSEL-lasereiden valmistuksen. Lisäksi tekniikkayritys kehittää skaalautuvia valmistusprosesseja ja sovelluskohtaisia järjestelmäsuunnitteluja. Vexlum hyödyntää laajaa osaamistaan epitaksiaassa, optoelektronisissa prosesseissa ja laserjärjestelmissä, ja on tehnyt merkittäviä läpimurtoja VECSEL-tekniikan soveltamisessa kvanttitekniikkaan. Vexlumin visio on tuoda VECSEL-tekniikka korkean vaikuttavuuden sovelluksiin, joissa voidaan tarjota ainutlaatuisia etuja suorituskyvyn, kustannustehokkuuden ja käytettävyyden suhteen. (Technology n.d.)

Vexlum Oy tarjoaa VECSEL-tekniikan avulla valmistettuja laserjärjestelmiä korkean vaikutuksen sovelluksiin, kuten kvanttitekniikan, lääketieteen ja teollisuuden aloille. Heidän tuotevalikoimaansa kuuluu VALO (kuva 7) ja VXL (kuva 8) laserilustat, jotka tarjoavat korkean kirkkauden, sovelluskohtaisen aallonpituuden ja kapean spektriviivan kompaktissa paketissa. VALO-laserit ovat saatavilla suoraemittöivinä sekä intrakaviteettituplattuna arkkitehtuureina. Niiden erityisominaisuuksiin kuuluvat hyvä säteen laatu, korkea teho ja suhteellisen laaja katkeamaton laserin taajuuden tuunaus ilman moodihyppyjä. (Products n.d.)



KUVA 7. VALO-laseralusta (Valo Series Laser Datasheet 2025, 2).



KUVA 8. VXL-laseralusta (VXL Series Laser Datasheet 2025, 2).

Vexlum Oy:n asiakkaat ja markkina-alueet ovat laajasti keskittyneet laserteknologiaan ja erityisesti sen sovelluksiin kvanttioptiikan teknologiassa. Asiakaskuntaan kuuluu muun muassa yliopistoja, tutkimuskeskuksia ja kvanttioptiikan yrityksiä. (Home n.d.)

3.2 VECSEL

Laser on optinen laite, joka tuottaa kapean, kirkkaan ja tarkasti ohjatun valonsäteen (kuva 9). Sana laser on lyhenne englanninkielisestä ilmauksesta Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Se tarkoittaa valon vahvistamista säteilyn stimuloitun emission avulla, jossa viritetyt atomit tai ionit vapauttavat valoa tarkasti hallitulla tavalla. Laserin valo eroaa tavallisesta valosta useilla tavoilla. Se etenee yhtenäisenä ja suunnattuna säteenä, joka ei hajoa helposti. Lisäksi lasereilla on tarkasti määrätty aallonpituus eli sen valo on yleensä hyvin

kapeakaistaista. Laservalo voi olla joko jatkuvaa tai koostua erittäin lyhyistä pulseista, ja sen intensiteetti voi olla hyvin suuri. (Paschotta 2014.)

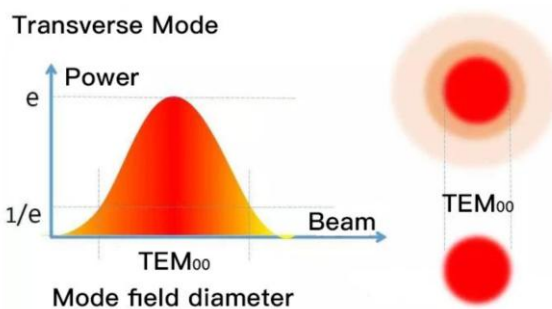


KUVA 9. Esimerkkikuva laserista (Valo Series Laser Datasheet 2025, 2).

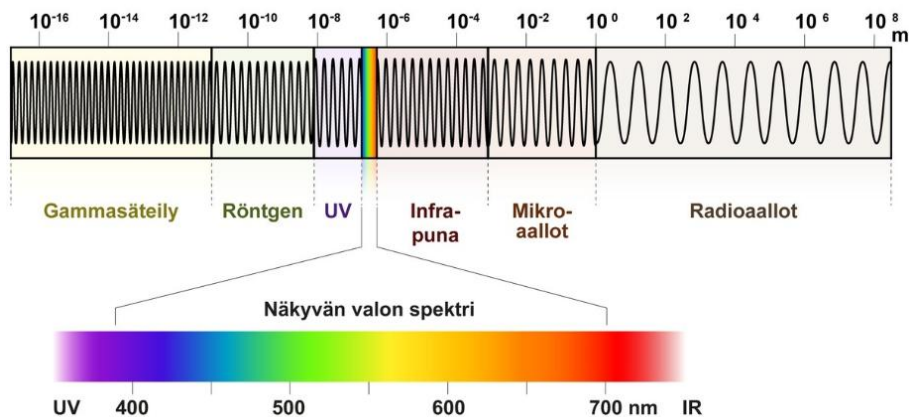
Lasereiden ominaisimmat piirteet ovat kaviteetti, vahvistinmateriaali ja ulkoisesti tuleva energia. Laserin kaviteetti, eli optinen resonaattori, on osa laserin rakennetta, jossa valo heijastuu edestakaisin yleensä kahden peilin välillä. Vahvistinmateriaalin ja ulkoisesti tulevan energian avulla muodostetaan laseriin populaatioinversio, eli tila, jossa enemmän hiukkasia on viritystilassa kuin perustilassa. Vahvistavana materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi puolijohdetta, kaasua tai kiinteää kideä. Se mahdollistaa sekä korkeat tehot että laserin toiminnan ylipäättään. Jotta laser säteilee valoa, siihen täytyy syöttää ulkoista energiaa optisen pumppauksen tai sähkövirran avulla. Näiden ominaisuuksien ansiosta lasereita käytetään laajalti lääketieteessä, teollisuudessa, tutkimuksessa ja monissa jokapäiväisissä laitteissa. (Paschotta 2014.) Lisäksi puolijohdesirujen tehokas lämmönhallinta on olennainen osa puolijohdelasereiden, kuten diodi- ja VECSEL-lasereiden, toiminnan ja luotettavuuden kannalta (Paschotta 2005).

Pystysuoraan emittoivat ulkoisen kaviteetin puolijohdelaserit (VECSELs) tunnetaan myös nimillä puolijohdekiekkolasarit (SDL, Semiconductor Disc Lasers) tai optisesti pumpatut puolijohdelaserit (OPSL, Optically Pumped Semiconductor Lasers) ja ne yhdistävät tärkeimmät puolijohde- ja ohut-kiekkolasereiden hyödyt. Puolijohdevahvistusrakenteiden aallonpituuden monipuolisuus, sekä ohutkiekon lämmönhallintakyky ja kaviteetin arkkitehtuuri muodostavat yhdessä monipuolisuuden laserteknologia-alustan. (Technology n.d.)

VECSELeiden tärkeimmät ominaisuudet ovat korkea teho, erittäin hyvä säteen laatu, räätälöitävä aallonpituus ja ulkoinen kaviteetti. Korkean tehon mahdollistaa pystysuora kaviteetti. Säteen erinomainen laatu perustuu siihen, että sen muoto on pyöreä ja noudattaa Gaussin jakaumaa – eli kyseessä on TEM₀₀-tila (TEM, Transverse Electromagnetic Mode) (kuvio 4). Aallonpituus on räätälöitävissä huolellisella puolijohderakenteiden suunnittelulla ja valitsemalla sopivat materiaalit jo kasvatusvaiheessa. Ulkoinen kaviteetti mahdollistaa infrapuna (IR, Infra-red) laservalon muuntamisen näkyväksi valoksi. (Guina ym. 2017, 1–2.) Kuviossa 5 esitetään säteilyn lajeja aallonpituuden mukaisessa järjestyksessä.



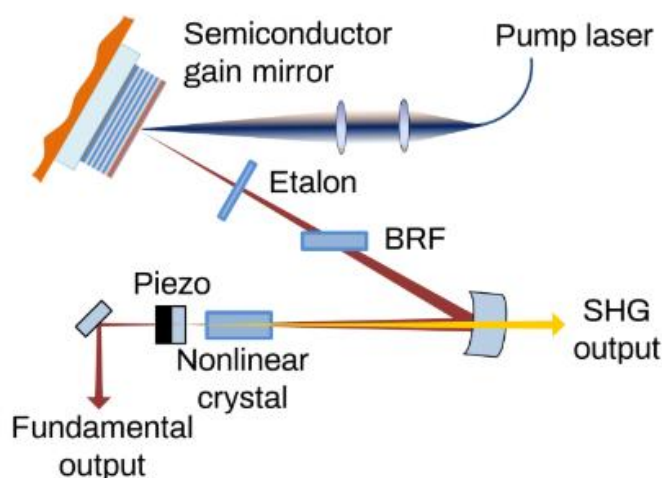
KUVIO 4. Kuvassa esitetään TEM₀₀-tilan ominaisuuksia: lasersäteen poikittainen tehojakauma on Gaussin jakauman mukainen, jolloin säde on pyöreä ja keskittynyt (Elite Optoelectronics 2020).



KUVIO 5. Sähkömagneettisen säteilyn spektrin aallonpituusalueet. Esimerkiksi näkyvän valon spektri on 380–750 nanometriä (Sähkömagneettinen säteily ja spektri n.d.).

VECSELin ulkoinen kaviteetti (kuvio 6) muodostuu kolmesta peilistä. Sirun puolijohdepeiliä (Semiconductor gain mirror) pumpataan ulkoisella laserilla, ja syntynyt säteily kulkee kaviteetin läpi, jonka kokonaispituus voi olla esimerkiksi noin

10–30 cm. Tämä mahdollistaa sen, että siihen voi lisätä tärkeitä aallonpituutta filteröiviä elementtejä, kuten etaloneita ja kaksoistaittavia filttereitä (BRF, Bi-refringence filter). Piezo on elementti, joka laajenee ja supistuu kun siihen johdetaan sähköjännitettä. Tämän liikkeen avulla pystytään tarkasti muuttamaan kaviteetin pituutta, kun yksi peileistä on laitettu piezon päälle. Kaviteetin pituuden hienosäätö mahdollistaa esimerkiksi aallonpituuden tarkan hallinnan. Rakenteellisesti VECSELin puolijohdepeili (Semiconductor gain mirror) koostuu erittäin heijastavasta peilistä ja puolijohde- vahvistusalueesta, jossa on useita kvanttikaivo- (QW, Quantum-well) tai kvanttipistekerroksia (QD, Quantum-dot). Tyypillisesti peilirakenteena käytetään puolijohde-Bragg-peilejä (DBR, Distributed Bragg reflector). VECSELeitä pumpataan korkeatehoisilla ja helposti saatavilla olevilla diodilasereilla, vaikka myös sähköistä pumppausta voidaan käyttää. Merkittävä etu VECSELeissä on mahdollisuus käyttää ulkoisen kaviteetin elementtejä, kuten epälineaarisia taajuusmuunnoskiteitä (Nonlinear crystal). Ne mahdollistavat tehokkaan taajuusmuunnoksen ja aallonpituusalueen laajentamisen UV-alueelle asti, tai jopa terahertsisäteilyn tuottamisen. Lisäksi ulkoisen kaviteetin arkkitehtuuri mahdollistaa puolijohdepohjaisten saturoituvien absorptiopeilien (SESAMs, semiconductor saturable absorber mirrors) (kuva 10) käytön, jota on käytetty erilaisten moodilukittujen VECSEL-lasereiden toiminnan osoittamiseen. Kaiken kaikkiaan nämä ominaisuudet mahdollistavat monia uusia käyttökohteita, jotka edistävät VECSEL-tekniikan kehitystä, erityisesti tehon kasvattamisessa, aallonpituuden muokkaamisessa ja ultralyhyiden pulssien tuottamisessa. (Guina, Rantamäki & Härkönen 2017, 3–6.)



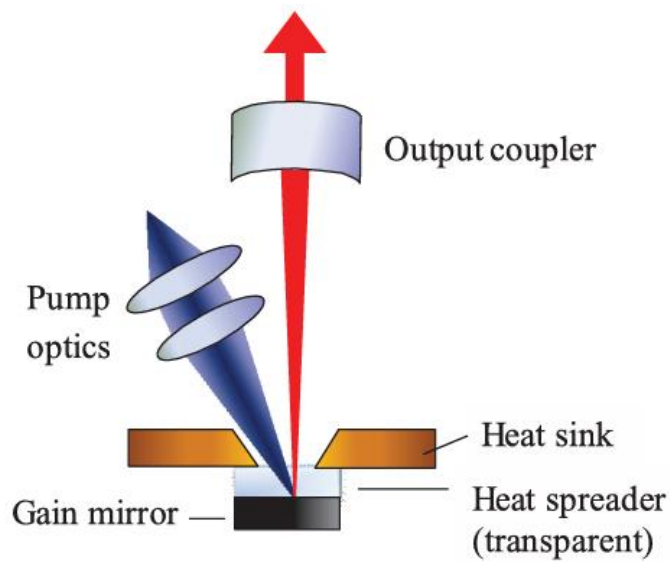
KUVIO 6. VECSEL-laserin kaviteetin arkkitehtuuri (Technology n.d.).



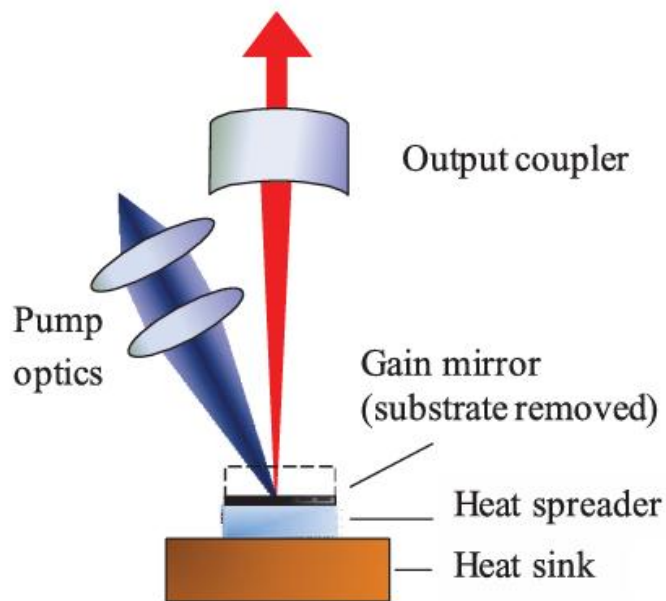
KUVA 10. SESAMs (Reflekron n.d.).

Valtaosa puolijohdepohjaisista lasereista emittoi säteilyä infrapuna-aallonpituus-alueella. Näkyvällä alueella toimivien suoraemittovien puolijohdelasereiden toteuttaminen on haastavampi, sillä sopivat materiaalit ovat usein rakenteellisesti hauraampia ja optisesti tehottomampia. Näkyvän valon saamiseksi infrapunala-sereista käytetään yleisesti aallonpituuden tuplausta, jossa epälineaarinen kide puolittaa alkuperäisen säteen aallonpituuden. Esimerkiksi 1000 nanometrin inf-rapunavalo muunnetaan 500 nm säteilyksi, joka sijoittuu näkyvän valon spektriin. Kun tämä muutos tehdään laserkaviteetin sisällä, puhutaan intrakaviteettituplauk-sesta, jonka VECSEL-lasereiden arkkitehtuuri mahdollistaa tehokkaasti. (Guina ym. 2017, 3–6.)

Laserin tehokas toiminta vaatii huolellista lämmönhallintaa, koska osa pumpun energiasta muuttuu lämmöksi sen sijaan, että se tuottaisi valoa. Tämä lämpö hei-kentää laitteen tehokkuutta ja voi jopa muuttaa säteilyn aallonpituutta ei-toivotulla tavalla. Sirun puolijohdepeilin kannalta tärkeintä on siirtää lämpöä pois mahdolli-simman tehokkaasti ja samalla vähentää itse lämmöntuottoa, jotta siru ei ylikuu-menisi eikä vaurioituisi. VECSEL-laitteissa käytetään kahta yleistä jäähdytys-muotoa. Molemmissa sijoitetaan hyvin lämpöä johtava lämmönsiirtoelementti (heat spreader) peilin (gain mirror) ja jäähdytyslevyn (heat sink) väliin. Yhdessä vaihtoehdossa läpinäkyvä lämmönsiirtoelementti asetetaan suoraan peilin päälle (kuvio 7) ja toisessa taas lämmönsiirtoelementti sijoitetaan peilin alle (kuvio 8). (Guina ym. 2017, 4–5.)



KUVIO 7. Jäähdytysmuoto, jossa läpinäkyvä lämmönsiirtoelementti asetetaan suoraan peilin päälle (Guina ym. 2017, 4).

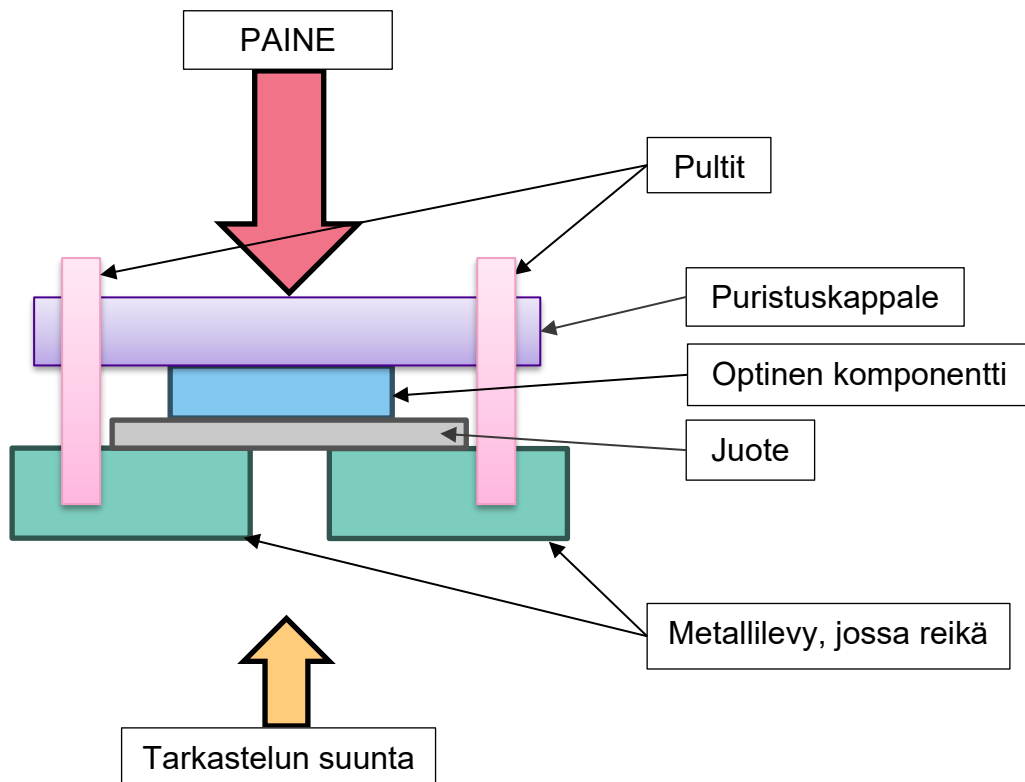


KUVIO 8. Jäähdytysmuoto, jossa lämmönsiirtoelementti sijoitetaan peilin alle (Guina ym. 2017, 4).

4 JUOTEVIAKSIEN TUTKIMUSPROSESSI

4.1 Testikappaleiden valmistus

Tutkimuksessa valmistettiin yhteensä 6 testikappaletta, joiden avulla tutkittiin paineen ja puhdistuksen vaikutusta juoteviiksien syntyyn. Testikappaleet koostuivat metallilevystä, optisesta komponentista, juotteesta ja pulttikiinnitteisestä puristuskappaleesta (kuvio 9). Metallilevyssä oli reikä, jonka kautta juotteen käyttäytymistä voitiin seurata koko prosessin ajan.



KUVIO 9. Visualisoitu testikappaleen rakenne.

Optinen komponentti kiinnitettiin metallilevyn pintaan juotteen avulla. Käsittelyjen jälkeen optisen komponentin päälle asetettiin puristuskappale, joka kiristettiin pulteilla aluslevyyn ja se jätettiin paikoilleen koko tutkimuksen ajaksi. Juotteeseen kohdistuva paine syntyi nimenomaan puristuksen kautta. Mitä suurempi momentti pultteihin asetettiin, sitä suurempi paine välittyi juotteeseen (taulukko 1). Painetta ei voitu mitata suoraan, sillä testirakenteessa ei ollut mahdollista käyttää

paineantureita ja sen takia käytettiin vääntömomenttia paineen säätelyyn. Vääntömomentin asettamiseen käytettiin säädettävää WERA 7430 ESD 10,0–34,0 Ncm:n momenttiavainta (kuva 11), joka mahdollisti tarkan puristusvoiman kohdistamisen juotteeseen. Käytetyt momenttiarvot valittiin siten, että ne vastasivat tuotantoprosessin kannalta olennaista paineskaalaa, jotta tutkimuksen tulokset olisivat paremmin hyödynnettävissä käytännön sovelluksissa.

TAULUKKO 1. Pultin vääntömomentti ja sitä vastaava paineen taso.

Testikappaleet	Momentti (Ncm)	Paineen taso
Testikappaleet 1 ja 2	31,0	Suuri paine
Testikappaleet 3 ja 4	20,5	Keskisuuri paine
Testikappaleet 5 ja 6	11,5	Pieni paine



KUVA 11. Työssä käytetty momenttiavain (Kuva: Laura Rjabova).

Jokaisesta paineen tasosta valmistettiin kaksi identtistä kappaletta. Näistä toinen puhdistettiin erittäin huolellisesti, ja toinen vähemmän perusteellisesti. Työssä käytettiin standardeja optiikan puhdistusmenetelmiä (Thorlabs n.d.). Tyypillisesti optiset pinnat puhdistetaan niin hyvin, ettei niihin jää mikroskoopilla havaittavia epäpuhtauksia, kuten pölyä. Normaalisti juoteviiksien muodostuminen on aikaa vievä ja voi kestää jopa useita vuosia, mutta tässä työssä haluttiin nopeuttaa ilmiötä. Tämän vuoksi osa testikappaleista puhdistettiin tarkoituksella vähemmän perusteellisesti, ja niiden pinnoille jätettiin enemmän epäpuhtauksia ja juotejäämiä esille. Näin pystyttiin tehostetusti havainnoimaan viiksien muodostumista lyhyemmässä ajassa.

Kaikki näytteet käsiteltiin puhdastilassa, koska laserkomponenttien tuotannossa puhtaus on erittäin tärkeä tekijä. Erityisesti korkeatehoisten lasereiden kohdalla epäpuhtaudet voivat aiheuttaa esimerkiksi säteen absorptiota tai vaurioita komponenttien pinnoilla.

4.2 Prosessin seuraaminen

Prosessin etenemistä seurattiin kolmen kuukauden ajan valmiilla testikappaleilla, joihin oli aiemmin juotettu optinen komponentti ja kohdistettu mekaaninen paine vääntömomentin avulla. Seurannan tavoitteena oli havaita mahdollisten juoteviik-sien muodostumista.

Seuranta toteutettiin säännöllisesti kahden viikon välein käyttäen Nikon Eclipse LV150 -mikroskooppia (kuva 12), jossa objektiivina käytettiin NIKON LU PLAN 5X/0.15 BD $\infty/0$ (kuva 13). Mikroskooppikuvat otettiin ja tallennettiin ImageFocusAlpha-ohjelmistolla. Jokaisella tarkistuskerralla dokumentoitiin tutkittava pinta, jotta voitiin seurata viiksien syntyä ja kasvua. Tarkastelukriteerinä oli viiksien näkyvyys. Samalla tarkistettiin myös, että puristuksesta johtuva paine säilyi halutulla tasolla. Tätä varten pulttien vääntömomentit tarkistettiin jokaisella seurantakerralla momenttiavaimella. Näin varmistettiin, että painetaso pysyi vakiona koko tutkimuksen ajan ja vertailukelpoisuus säilyi.



KUVA 12. Illustroiva kuva mikroskoopista (Microscope Central 2025).



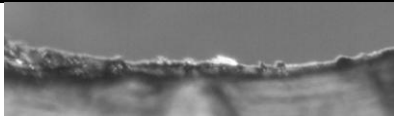
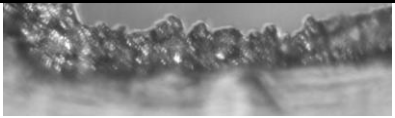
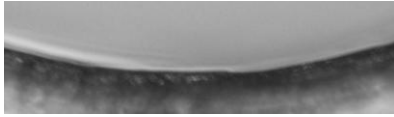
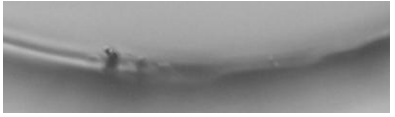
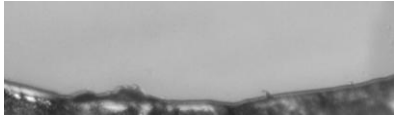

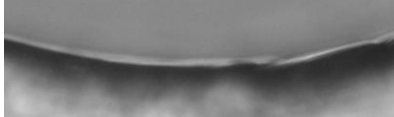




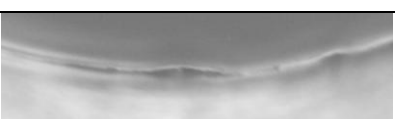
KUVA 13. Työssä käytetty objektiivi (Kuva: Laura Rjabova).

Testikappaleet säilytettiin koko seuranta-ajan puhdistilamaisessa ympäristössä, jossa olosuhteet pysyivät melko vakioina. Lämpötila oli keskimäärin noin 20 °C, vaihdellen päivän aikana välillä 19–23 °C. Ilmankosteus pysyi noin 22 prosentissa, ja ilman happipitoisuus oli noin 21 %vol:a. Happipitoisuus mitattiin Dräger PAC 6000 Oxygen -anturilla.

5 TULOKSET JA NIIDEN TULKINTA

Tutkimuksen tulokset analysoitiin kvalitatiivisesti, ja testikappaleiden kuvat tutkimuksen alku- ja loppuvaiheista esitetään taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Kuvat testikappaleista tutkimuksen alku- ja loppuvaiheista.

Testikappale	Alussa	Lopussa
Testikappale 1		
Testikappale 2		
Testikappale 3		
Testikappale 4		
Testikappale 5		
Testikappale 6		

Testikappaleet 1, 3 ja 5 jätettiin tarkoituksella likaisemmiksi loppupuhdistuksen jälkeen, kun taas testikappaleet 2, 4 ja 6 puhdistettiin huolellisesti tavanomaisen menetelmän mukaisesti. Eri puhtausasteet jätettiin nimenomaan samassa paineessa oleviin kappaleisiin, jotta voitiin tutkia, vaikuttaako pinnan likaisuus juoteviiksien nopeampaan muodostumiseen. Normaalisti juoteviiksien syntyminen kestää pitkään, ja tavoitteena oli nopeuttaa tätä prosessia. Tutkimustulokset osoittivat, että puhtausaste vaikutti juoteviiksien muodostumiseen. Testikappaleiden muutoksiin perustuvat tutkimustulokset ovat taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Kvalitatiiviset tutkimustulokset testikappaleiden muutoksista.

Testikappale	Tulos
Testikappale 1	Runsaasti juoteviiksiä
Testikappale 2	Vain muutamia juoteviiksiä
Testikappale 3	Ei muutoksia
Testikappale 4	Jonkin verran juoteviiksiä
Testikappale 5	Ei muutoksia
Testikappale 6	Ei muutoksia

Korkea paine ja huonompi puhdistusaste vaikuttivat testikappaleeseen 1 siten, että siihen muodostui runsaasti juoteviiksiä. Vaikka testikappaleet 2 ja 4 puhdistettiin huolellisesti, niihin muodostui silti juoteviiksiä, koska paine oli sen verran suuri, että se todennäköisesti vaikutti juoteviiksien syntyyn. Testikappaleissa 3, 5 ja 6 ei havaittu muutoksia, eli niihin ei muodostunut näkyviä viiksiä. On kuitenkin tärkeää huomioida, että tutkimuksen kesto oli lyhyt verrattuna tyypilliseen juoteviiksien muodostumisaikaan. Kappaleet 5 ja 6 olivat kiinnitetty pienimmällä paineella.

Alku- ja loppukuvien perusteella luotiin lisäksi mallikuvat kuvankäsittelyohjelman avulla. Esimerkki mallikuvasta löytyy liitteestä 1. Mallikuvien avulla laskettiin pinta-alan muutosten prosenttiosuudet kuvassa olevien pikseleiden avulla. Laskettiin, kuinka suuren prosenttiosuuden juoteviikset olivat muodostaneet alkukuvan pinta-alasta. Tulokset esitettiin taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Pinta-alan prosenttimuutos alku- ja loppukuvien perusteella.

Testikappale	Likimääräinen muutos (%)
Testikappale 1	~ 8,96
Testikappale 2	~ 0,04
Testikappale 3	ei muutoksia
Testikappale 4	~ 0,25
Testikappale 5	ei muutoksia
Testikappale 6	ei muutoksia

Prosenttitulokset olivat likimääräisiä, koska ne oli laskettu kuvien perusteella. Tuloksiin saattoivat vaikuttaa esimerkiksi kuvankäsittelyssä tai mikroskooppikuvan tarkentamisessa syntyneet virheet. Eniten juoteviiksiä, noin 9 %, muodostui huonimmin puhdistettuun ja korkeapaineeseen kappaleeseen. Tämä on merkittävä tulos, kun otetaan huomioon, että tutkimus kesti vain kolme kuukautta. Testikappaleisiin 2 ja 4 muodostui jonkin verran juoteviiksiä, ja ne olivat mikroskoopilla selvästi havaittavissa. Molempiin kohdistettiin suuri paine, mikä saattoi edistää viiksien kasvua. Testikappaleissa 3, 5 ja 6 ei havaittu muutoksia. Kappaleisiin 5 ja 6 kohdistettiin pieni paine, mikä vahvistaa, että paineella oli merkittävä vaikutus juoteviiksien muodostumiseen.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Tutkimuksessa käytetty menetelmä, jossa testikappaleet altistettiin kolmelle eri paineelle ja kahdelle eri puhdistusasteelle, tarjosi selkeän vertailupohjan. Tutkimuksessa juotteeseen kohdistuva paine syntyi puristuksesta, jonka suuruus määräytyi puristuskappaleen pulttien vääntömomentin mukaan. Koska paineanpureita ei ollut rakenteellisesta syystä mahdollista käyttää, painetta säädettiin vääntömomentin avulla. Tämä mahdollisti sen, että voitiin tarkastella puhdistuksen laadun ja paineen yhteisvaikutusta juoteviiksien muodostumiseen. Koska kaikki testikappaleet säilytettiin koko seuranta-ajan puhdistilamaisessa ympäristössä, jossa olosuhteet pysyivät melko vakioina ja paine tarkastettiin säännöllisesti, ulkoisten tekijöiden vaikutus voitiin minimoida, mikä paransi tulosten luotettavuutta.

Tutkimuksen tulokset osoittivat, että paine ja pinnan puhtausaste vaikuttivat juoteviiksien muodostumiseen. Erityisesti suuripaineisessa ja vähemmän huolellisesti puhdistetussa testikappaleessa havaittiin merkittävä määrä juoteviiksiä, mikä viittaa siihen, että epäpuhtauksilla voisi olla kasvua edistävä vaikutus. Myös huolellisesti puhdistetuissa korkeapaineisissa kappaleissa muodostui jonkin verran juoteviiksiä, mikä vahvisti paineen merkittävän vaikutuksen juoteviiksien syntyyn. Kyseinen prosessi oli kuitenkin hyvin spesifi, ja sen takia vastaavista menetelmistä ei löytynyt vertailukelpoista lähdemateriaalia.

Prosentuaaliset tulokset, jotka laskettiin kuvankäsittelyohjelman avulla, olivat likimääräisiä ja saattoivat sisältää virhelähteitä, kuten tarkennus- ja käsittelyvirheitä. Tämä oli otettava huomioon tulosten tarkkuuden arvioinnissa, sillä käytetty kvalitatiivinen menetelmä ei ollut täysin tarkka. Tutkimustulosten perusteella voitiin silti todeta, että paine oli merkittävä tekijä juoteviiksien muodostumisessa.

On kuitenkin huomioitava, että tutkimuksen kesto oli verrattain lyhyt suhteessa juoteviiksien tavanomaiseen muodostumisaikaan. Lisäksi tutkimuksen tavoitteena oli keskittyä nimenomaan paineen merkityksen selvittämiseen, eikä siinä otettu huomioon muita prosessiin liittyviä tekijöitä, kuten materiaalien ominai-

suuksia tai muita prosessimuutoksia. Esimerkiksi juotteen määrää ja sen vaikutuksia ei myöskään otettu huomioon, sillä joihinkin kappaleisiin saattoi päätyä hieman enemmän juotetta kuin toisiin.

Jatkotutkimuksissa olisi hyödyllistä tarkastella myös muita mahdollisia vaikuttavia tekijöitä, kuten juotteen määrää, materiaalien ominaisuuksia ja ympäristöolosuhteiden pitkäaikaisvaikutuksia. Lisäksi olisi hyvä tutkia, kuinka pitkäaikainen altistus paineelle vaikuttaa juoteviiksien muodostumiseen.

Jatkotoimenpiteenä voisi kokeilla laajempia painealueita ja mahdollisesti myös erilaisia juotevaihtoehtoja, jotta saataisi tarkempia tuloksia juoteviiksien syntyprosessin ymmärtämiseksi ja optimoimiseksi. Paineen määrään kannattaa kiinnittää erityistä huomiota, sillä liiallinen paine voi edistää ei-toivottujen viiksien muodostumista.

LÄHTEET

Boettinger, W. J., Johnson, C. E., Bendersky, L. A., Moon, K.-W., Williams, M. E. & Stafford, G. R. 2005. Whisker and Hillock formation on Sn, Sn-Cu and Sn-Pb electrodeposits. Pdf-dokumentti. Viitattu 20.3.2025.

https://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech_papers/2005-Boettinger-whiskers-n-hillocks.pdf

Company. n.d. Vexlum. Verkkosivu. Viitattu 19.3.2025. <https://vexlum.com/company/>

Elite Optoelectronics. 2020. What is Laser Mode? Verkkosivu. Viitattu 5.4.2025. <https://www.s-laser.com/info/what-is-laser-mode-51095802.html>

EPNDir 2011/65/EU tiettyjen vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa 8.6.2011 (RoHS-direktiivi). Viitattu 28.3.2025. <https://tu-kes.edilex.fi/fi/eu-lainsaadanto/32011L0065#eu32024L1416>

Fadil, N. A., Yusof, S. Z., Bakar, T. A. A., Ghazali, H., Yajid, M. A. M., Osman, S. A. & Ourdjini, A. 2021. Tin Whiskers' Behavior under Stress Load and the Mitigation Method for Immersion Tin Surface Finish. Artikkel. Viitattu 22.3.2025. <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/22/6817>

Guina, M., Rantamäki, A. & Härkönen, A. 2017. Optically pumped VECSELs: review of technology and progress. Pdf-dokumentti. Viitattu 29.3.2025. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/aa7bfd/pdf>

Home. n.d. Vexlum. Verkkosivu. Viitattu 19.3.2025. <https://vexlum.com/>

Horváth, B. & Harsányi, H. 2009. Mechanical Stress Induced Whiskers. Pdf-dokumentti. Viitattu 22.3.2025. https://www.researchgate.net/publication/251918823_Mechanical_stress_induced_whiskers

Microscope Central. 2025. Nikon LV150 Brightfield & Darkfield Reflected Light Microscope. Verkkosivu. Viitattu 5.4.2025. <https://microscopecentral.com/products/nikon-lv150-brightfield-darkfield-reflected-light-microscope>

NASA. 2019. Basic Info/FAQ. Verkkosivu. Viitattu 20.3.2025. <https://nepp.nasa.gov/whisker/background/>

Panashchenko, L. 2012. The Art of Metal Whisker Appreciation: A Practical Guide for Electronics Professionals. Pdf-dokumentti. Viitattu 20.3.2025. https://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech_papers/2012-Panashchenko-IPC-Art-of-Metal-Whisker-Appreciation.pdf

Paschotta, R. 2005. Vertical External-cavity Surface-emitting Lasers. Verkkosivu. Viitattu 13.4.2025. https://www.rp-photonics.com/vertical_external_cavity_surface_emitting_lasers.html

Paschotta, R. 2014. Lasers. Verkkosivu. Viitattu 4.4.2025. <https://www.rp-photonics.com/lasers.html>

Products. n.d. Vexlum. Verkkosivu. Viitattu 19.3.2025. <https://vexlum.com/products/>

Reflekron. n.d. Customized SESAM technology. Verkkosivu. Viitattu 5.4.2025. <https://reflekron.com/technology.html>

Schmidt, T. E., Brusse, J., Dr. Leidecker, H. & Ochs, L. 2023. Long-Term Tin Whisker Risk Mitigation using a Conformal Coating. Pdf-dokumentti. Viitattu 20.3.2025. https://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech_papers/2023-EppSchmidt-NASA-Tin-Whisker-Conformal-Coat-Study.pdf

Sähkömagneettinen säteily ja spektri. n.d. Peda.net-verkkosivusto. Viitattu 5.4.2025. <https://peda.net/oppimateriaalit/e-oppi/lu-kiot/j%C3%A4rvenp%C3%A4/C3%A4/j%C3%A4rvenp%C3%A4n-lukio/fysiikka/hurme/resonanssi-722/1ssjf/1-1-spektri>

Technology. n.d. Vexlum. Verkkosivu. Viitattu 19.3.2025. <https://vexlum.com/technology/>

Thorlabs. n.d. Optics Handling and Care Tutorial. Verkkosivu. Viitattu 3.5.2025. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9025

Valo Series Laser Datasheet. 2025. Vexlum. Pdf-dokumentti. Viitattu 19.3.2025. https://vexlum.com/wp-content/uploads/2025/01/VEXLUM_VALO_datasheet_2025-01-22_A4-1.pdf

VXL Series Laser Datasheet. 2025. Vexlum. Pdf-dokumentti. Viitattu 19.3.2025. https://vexlum.com/wp-content/uploads/2025/01/VEXLUM_VXL_datasheet_2025-01-22_A4.pdf

Woolley, M. & Choi, J. n.d. The Effects of Tin Whisker Testing on Solder Connections. Pdf-dokumentti. Viitattu 28.3.2025. https://www.ipc.org/system/files/technical_resource/E10%26S11_02.pdf

LIITTEET

Liite 1. Esimerkkikuva prosenttiosuuden laskentamallista

