



TIETO- JA SÄHKÖTEKNIIKAN TIEDEKUNTA
ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

LASERTUTKALÄHETTIMEN JA -VASTAANOTTIMEN SUUNNITTELU- JA TOTEUTUSVAIHEET

Tekijä Jari-Pekka Nousiainen
Ohjaaja Juha Kostamovaara

Kandidaatintyö
Joulukuu 2020

Nousiainen J-P S. (2020) Lasertutkalähettimen ja -vastaanottimen suunnittelu- ja toteutusvaiheet. Oulun yliopisto, Elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Kandidaatintyö, 59 s.

TIIVISTELMÄ

Työssä suunnitellaan ja toteutetaan piirilevyt kahteen eri lasertutkaan, joilla suoritettavat etäisyysmittaukset perustuvat optisten pulssien kulkuajojen mittaamiseen. Molemmissa lasertutkissa käytettävä puolijohdelaser ja CMOS-tekniikalla valmistettu SPAD-TDC-ilmaisempiiri ovat erityisesti kehitetyt pulssitettua etäisyysmittausta varten Oulun yliopiston ITEE-tiedekunnan CAS-tutkimusryhmässä. Työn ensimmäistä lasertutkaa kutsutaan viirututkaksi ja toista miniatyyritutkaksi.

Käytettävä puolijohdelaser on kvanttikaivotyyppinen ja perustuu kaksoisheterorakenteeseen, jonka aaltojohde on vahvasti epäsymmetrinen. Suhteellisen paksu ja useita kvanttikaivoja sisältävä aktiivinen kerros on sijoitettu epäsymmetrisesti laserdiodin aaltojohteeseen. Aktiivista kerrosta ympäröivä aaltojohde sisältää lisäksi kyllästysvaimentimen, joka mahdollistaa passiivisen Q-kytkentätekniikan hyödyntämisen ja auttaa pitämään laserin emittoimat optiset pulssit yksittäisinä ilman jälkioskillaatioita. Työssä käytettyjen laserdiodien muodostamat impulssimaiset laserpulssit ovat merkittävästi lyhytkestoisempia kuin laserdiodien läpi johdetut virtapulssit, minkä vuoksi toteutusta kutsutaan tehostetuksi vahvistuskytkentätekniikaksi.

Molempien lasertutkien vastaanottimissa käytettävä ilmaisempiiri mahdollistaa jopa yksittäisten fotoneiden havaitsemisen. Ilmaisempiiriin on sisäänrakennettu 9 x 9 kokoinen SPAD-matriisi sekä 10-kanavainen aika-digitaalimuunnin, joka suorittaa hyötyfotoneiden kulkuajan laskemisen mitattavaan kohteeseen. Fotoneiden aikavälimitausta varten ilmaisimesta valitaan haluttu 3 x 3 kokoinen alimatriisi, jonka sisältämät SPAD-diodit voidaan asettaa aktivoitumaan vasta halutun ajan kuluttua aloitusmerkkisignaaliin nähden. Jokaisen yhdeksän SPAD-diodin aktivointiviive voidaan asettaa erikseen tai halutut SPAD-diodit voidaan jättää kokonaan aktivoimatta.

Lasertutkien lähettimille suoritettiin aikatasomittaukset, joissa selvitettiin lähettimien virta- ja laserpulssien huippuarvot sekä puoliarvoveydet. Viirututkan tuottamat virtapulssit olivat puoliarvoveydeltaan keskimäärin noin 1,1 ns ja optiset pulssit vastaavasti noin 120 ps. Miniatyyritutkassa virtapulssien puoliarvoveydet olivat pienimmillään noin 990 ps ja optisten pulssien vastaavasti noin 103 ps.

Avainsanat: lasertutka, pulssitettu lentoaikamittaus, puolijohdelaser, SPAD-TDC-ilmaisempiiri.

Nousiainen J-P S. (2020) Stages of designing and developing a laser radar transceiver. University of Oulu, Degree Programme in Electronics and Communications Engineering. Bachelor's Thesis, 59 p.

ABSTRACT

In this thesis, printed circuit boards for two different laser radars are designed and implemented. Both laser radars are based on the principle of pulsed time-of-flight measurement. The semiconductor laser and the CMOS SPAD-TDC detector chip used in both laser radars have specifically been developed for pulsed laser time-of-flight ranging applications. The work has been carried out in the CAS research unit of the ITEE Faculty at University of Oulu. The first laser radar is referred to as a stripe radar and the second one as a miniature radar.

The semiconductor laser is based on a double heterostructure and its active layer consist of multiple quantum wells. The waveguide structure of the laser diode is strongly asymmetric to provide a very small optical confinement factor. Combined with a relatively thick active layer, the laser is capable of generating high-power single-optical pulses. The optical resonator includes a saturable absorber that both enables passive Q-switching operation and helps to keep the optical pulses trail-free. The generation of sharp, impulse-like optical spikes with a laser diode, utilizing drive current pulse with much longer width, is called enhanced gain switching.

The single-photon detection capability of both laser radar receivers is achieved with the use of a SPAD array that has been realized in CMOS technology. The detector chip includes an integrated 10-channel time-to-digital converter that measures the transit time of short laser pulses from the transmitter to the object. A sub-array of a size of 3 x 3 SPADs is freely chosen within a 9 x 9 SPAD array for time interval measurements. The SPADs can be set to be activated only after a desired period of time in relation to the arrival time of a start pulse from the transmitter. The activation delay for each SPAD can be set independently or the SPADs can be left completely unactivated.

The peak amplitudes and full width at half maximum values for the current and optical pulses were measured. The stripe radar generated current and optical pulses with a FWHM of about 1.1 ns and about 120 ps, respectively. The minimum FWHM values for the current and optical pulses generated by the miniature radar were about 990 ps and 103 ps, respectively.

Key words: laser radar, pulsed time-of-flight measurement, semiconductor laser, SPAD-TDC detector array.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT.....	3
SISÄLLYSLUETTELO.....	4
ALKULAUSE.....	5
LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET.....	6
1. JOHDANTO.....	7
2. TEORIA.....	9
2.1. Mittausperiaate.....	9
2.2. Säteen divergenssi ja laatu.....	10
2.3. Optisen pulssin paikkaepävarmuus.....	13
2.4. Fotoneiden Poisson-jakautuneisuus.....	16
2.5. Fotoni-ilmaisimen yksittäis- ja monifotonitila.....	19
2.6. Puolijohdelaser.....	20
2.6.1. Säteilyn ja aineen vuorovaikutus.....	21
2.6.2. Optinen resonaattori ja populaatioinversio.....	21
2.6.3. Reuna- ja pintaemittioivat laserit.....	22
2.6.4. Puolijohdelaserin rakenteet.....	23
2.6.5. Aktiivinen väliaine.....	24
2.6.6. Puolijohdelaserin aaltajohde.....	24
2.6.7. Vahvistus- ja taitekerroinohjausmenetelmä.....	25
2.6.8. Aktiivisen väliaineen ohentaminen.....	25
2.6.9. Optisen resonaattorin aaltotilat.....	26
2.6.10. Optiset rajauskerrokset.....	27
2.6.11. Sähkökenttien rajauskertoimet.....	28
2.6.12. Vahvistuskytkentäteknikka.....	29
2.6.13. Q-kytkentäteknikka.....	30
2.6.14. Kyllästysvaimentimet.....	33
2.7. SPAD-TDC-ilmaisimpiiri.....	33
3. LAITETASON KUVAUS.....	38
4. PIIRIKORTIT.....	41
4.1. Viirututka.....	43
4.2. Miniattyritutka.....	45
5. MITTAUSTULOKSET.....	48
6. YHTEENVETO.....	52
7. LÄHTEET.....	54
8. LIITTEET.....	55

ALKULAUSE

Tutka on sähkömagneettiseen säteilyyn perustuva menetelmä esineen paikan, liikkumisnopeuden ja -suunnan määrittämiseksi. Tutkalla tarkoitetaan järjestelmää silloin, kun järjestelmän ensisijainen tarkoitus on toteuttaa tutka-sanana mukainen menetelmä. Useisiin muihin kieliin on vakiintunut englannin kielen sana ”*radar*” (**r**adio **d**etection and **r**anging), joka viittaa tarkalleen ottaen ainoastaan radioaaltoihin perustuvaan tutkaan. Saksassa tutkasta käytettiin toisen maailmansodan aikaan nimitystä ”Funkmeß” (suora suom. radiomittaus), ennen kuin sana ”Radar” vakiintui sielläkin käyttöön.

Lasertutkan kannalta merkittävä kehitysaskel saavutettiin 1950-luvulla, kun koherenttia sähkömagneettista säteilyä tuottava maser kehitettiin. Ensimmäiset tutkat olivat hyödyntäneet 1900-luvun alusta lähtien yksinomaan radioaaltoja, kunnes 1960-luvun alussa, pian laserin keksimisen jälkeen, kehitettiin ensimmäiset lasertutkat (engl. lidar, ladar tai light radar).

Olen pyrkinyt käyttämään tekstissäni mahdollisimman paljon suomalaista alkupeirää olevaa sanastoa ja tarjonnut käännosehdotuksia vierasperäisille sanoille ja termeille silloin, kun suomalaista vastinetta ei ole ollut suoraan saatavilla. Tutka on suomen kielen sana suorastaan ainutlaatuinen lukuisten kömpelösti suomen kieleen taipuvien vierassanojen joukossa. Nykysuomen kieltä ei vahingoiteta ainoastaan käyttämällä vieraskielisiä sanoja tarpeettomasti suomalaisten sanojen sijasta (esimerkiksi toimittajien ja opettajien toimesta), vaan myös antamalla tutuille ilmaisuille ja sanoille toisenlaiset ja ristiriitaiset merkitykset. Osmo Leinosen mielipidekirjoitusta suoraan lainaten: ”Ei liene varaa tämän pienen pienen kansan ainutlaatuisen kielen vahingoittamiseen, sillä sitä uhkaa jo nyt vierasperäisten ilmaisujen tulva. Tällä menolla ehkä vielä joskus joudutaan tilanteeseen, jossa on päätettävä, onko Suomen virallinen kieli englanti, vaiko pahasti alkuperästään muuttunut suomen kieli.”

Halusin tuoda tutkielmassani esille enemmän asiaa kuin mitä siihen vaadittiin, kuten lyhyen katsauksen puolijohdelasereiden rakenteesta ja toimintaperiaatteesta sekä laserisäteiden ominaisuuksista, koska aiheita käsitteleviä suomenkielisiä tekstejä ei ollut vapaasti saatavilla ja koska uskon tiedon kiinnostavan myös muita samassa opiskeluvaiheessa olevia opiskelijoita tai muutoin tekniikasta ja tieteestä kiinnostuneita.

Haluan esittää suurimman kiitokseni työni ohjaajalle Juha Kostamovaaralle hänen kaikesta tarjoamastaan avusta ja hyväsydämyydestään. Kiitän myös kaikkia elektronikan laboratorion työntekijöitä mukavasta työilmapiiristä sekä heidän joukostaan Jaakko Huikaria hänen esimerkillisestä opastuksestaan ja hänen kanssaan käymistäni keskusteluista, joista olen oppinut ja saanut uutta näkökantaa asioihin. Lopuksi haluan kiittää äitiäni hänen kaikesta antamastaan tuesta.

Kajaanissa 27.12.2020

Jari-Pekka Nousiainen

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

APD	Vyöryvalodiodi (engl. Avalanche photodiode)
CMOS	Sulautettu p-n-metallioksidipuolijohde (engl. Complementary metal-oxide-semiconductor)
COMD	Tuhoisa peilivaurio (engl. Catastrophic optical mirror damage)
DBR	Bragg-peili (engl. Distributed Bragg reflector)
DCR	Pimeäliipaisutahti (engl. Dark count rate)
FOV	Kuvakenttä (engl. Field of view)
FPGA	Ohjelmoitava logiikkapiiri (engl. Field-programmable gate array)
FWHM	Puoliarvoveveys (engl. Full width at half maximum)
KH	Kaksoishetero(rakenne) (engl. Double-heterostructure, lyh. DH)
LA	Lentoaika (engl. Time of flight, lyh. TOF)
LD	Laserdiodi (engl. Laser diode)
LOC	Suuri aaltojohde-elementti (engl. Large optical cavity)
LVPECL	Positiivinen ja matalajännitteinen yhteisemitterilogiikka (engl. Low-voltage positive emitter-coupled logic)
MOSFET	Metallioksidipuolijohteinen kanavatransistori (engl. Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor)
OE	Optinen-sähkö(muunnin) (engl. Optical to electrical converter)
PDE	Fotonin ilmaisuhyötysuhde (engl. Photon detection efficiency)
QW	Kvanttikaivo (engl. Quantum well)
SCH	Erillisrajaava heterorakenne (engl. Separate confinement heterostructure)
SCL	Fotoneiden erilliset rajauskerrokset (engl. Separate confinement layers)
SEL	Pintaemittioiva laser (engl. Surface-emitting laser)
SPAD	Yksittäisten fotoneiden liipaisema vyöryvalodiodi (engl. Single-photon avalanche diode)
TDC	Aika-digitaalimuunnin (engl. Time to digital converter)
TEM	Poikittain värähtelevä sähkömagneettinen aaltomuoto (engl. Transverse electromagnetic mode)
USB	Yleissarjaväylä (engl. Universal serial bus)
VCSEL	Pystyresonaattorinen pintaemittioiva laser (engl. Vertical-cavity surface-emitting laser)

1. JOHDANTO

Työn aiheena on suunnitella ja toteuttaa sekä saattaa toimintakuntoon kaksi yksittäisfotoni-ilmaisuun perustuvaa lasertutkaa. Tavoitteena on perehtyä valmistettavien lasertutkien elektroniikkaan ja olla mukana mittauksissa. Työssä käydään läpi toteutettujen lasertutkien toimintaperiaate ja elektroniikka, minkä lisäksi tutkielmassa esitellään lyhyesti puolijohdelasereiden fyysistä rakennetta ja toimintaa sekä lasersäteiden ominaisuuksia. Molempien lasertutkien lähettimissä käytettävät puolijohdelaserit ja vastaanottimien SPAD-ilmaisipiirit ovat Oulun yliopiston Elektroniikan piirit ja järjestelmät (engl. Circuits and Systems, lyh. CAS) tutkimusryhmässä tarkoitusta varten kehitettyjä puolijohdekomponentteja. Lasertutkien käytönaikainen ohjaus ja seuranta toteutetaan kaupallisilla FPGA-kehitysalustoilla, jotka kytketään kiinni tietokoneeseen USB-liitännällä. Työssä toteuttavat lasertutkat ovat osa Elektroniikan piirit ja järjestelmät tutkimusyksikön hanketta.

Lasertutka on etäisyyden mittaamiseen kehitetty kaukomittauslaite, joka perustuu tyypillisesti jatkuva-aikaisen lasersäteen vaihevertailuun tai useiden lyhykestoisten laserpulssien kulkuajojen mittaamiseen. Optisten pulssien lentoajojen mittaamiseen pohjautuvaa etäisyysmittaustekniikkaa hyödynnetään esimerkiksi maanmittauksessa, tieliikenteen nopeudenvälvonnassa, maan pinnanmuotojen kuvauksessa sekä törmäyksenestoavustimissa. Perinteisten radioaaltoihin perustuvien tutkien tapaan lasertutkien toiminta perustuu sähkömagneettisten aaltojen (tutkasignaalien) lähettämiseen ennalta määritettyyn suuntaan ja kohteesta vastaanottimeen heijastuneiden säteiden havaitsemiseen. [1] Lasersäteiden helppo yhdensuuntaistaminen ulkoisten linssien avulla ja säteen vähäinen taipuminen pitkillä etäisyysväleillä mahdollistavat suuren avaruudellisen tarkkuuden ja pitkien etäisyyksien mittaamisen myös pieniin kohteisiin. [2]

Molemmat tässä työssä käsiteltävät lasertutkat perustuvat samanlaiseen elektroniikkasuunnitteluun, mutta niiden piirilevytoteutukset ja optomekaniikkarakenteet eroavat toisistaan. Työn ensimmäinen lasertutka muodostuu kahdesta erillisestä piirilevystä ja sen optinen keila on muodoltaan kapea viiru – vaakasuunnasta leveä ja pystysuunnasta kapea, minkä vuoksi tutkaan viitataan nimellä viirututka. Toisesta lasertutkasta käytetään nimitystä miniatyyritutka, koska sen suunnittelun yhtenä lähtökohtana oli integroida sekä lähettimen että vastaanottimen elektroniikka samalle piirilevylle. Miniatyyritutkan sädekeila on yksiakselinen ja muodoltaan pistemäinen. Viirututkan optomekaniikka on suunniteltu niin, että sen avulla voidaan mallintaa 19 kertaa leveämmän ilmaisimatriisin toimintaa.

Laserlähettimien suunnitteluun ja suorituskyvyn arviointiin hyödynnettiin analogisten sähköpiirien simulointiin kehitettyä LTspice-ohjelmaa. Lähetinsuunnittelun keskeinen osa on virtapulssitinpiiri, joka muodostuu n-tyypin MOSFET-kytkimestä, kondensaattorista, lataus- ja vaimennusvastuksesta, diodista sekä puolijohdelaserista. Virtapulssittimen piirisuunnittelussa kiinnitettiin erityistä huomiota kondensaattorista purettavan virtapulssin huippuarvoon ja puoliarvovevyyteen. Puolijohdelaserin läpi johdettavan virtapulssin

sin täytyy sisältää riittävän paljon energiaa mahdollisimman lyhyellä aikavälillä, jotta laserin aktiiviselle alueelle pääsisi muodostumaan varauksenkuljettajia vain sen verran, että laserointikynnys ylittyisi jokaisen pulssituksen yhteydessä ainoastaan kerran, jolloin tuloksena on yksi suuritehoinen ja ajallisesti kapea optinen pulssi. Mittaustuloksien käsittely, kuten kuvaajien piirtäminen tai yksittäisen laserpulssin energian laskeminen, suoritettiin Matlab-ohjelmistolla.

Piirilevyjen suunnittelu toteutettiin avoimen lähdekoodin piirilevysuunnitteluohjelmistolla KiCadilla, joka sisältää varsinaisten suunnittelu- ja piirto-ohjelmien lisäksi hyödyllisiä laskentatyökaluja piirilevyllä käytettävien komponenttiarvojen ja johtimien mitoittamiseen. Viirututkan lähetin- ja vastaanotinpiirilevyt toteutettiin kaksipuoleisina ja ne valmistettiin Oulun yliopiston pajalla. Miniaturitukka toteutettiin yhteistyönä oululaisen Noptel Oy:n kanssa. Kävin vierailmassa Noptelin toimistolla, jossa pääsin keskustelemaan projektissa mukana olleiden työntekijöiden kanssa piirilevyn mitoittuksesta ja suunnittelun yksityiskohdista. Palaverista on jäänyt mieleeni Noptelin työyhteisössä valinnut mukava ilmapiiri sekä asioiden huolellinen käsittely. Noptel vastasi miniaturitukalle sopivan optomekaniikan suunnittelusta ja valmistuksesta sekä optiikan kohdistamisesta piirilevyllä. Lisäksi projektissa käytettiin heidän toimittamaansa FPGA-levyä. Projektin nimen mukaisesti, miniaturitukasta oli tavoitteena valmistaa mahdollisimman pienikokoinen kokonaisuus, joten sen piirilevy toteutettiin kuusikerroksisena, jotta levyn johtimet oli mahdollista reitittää ilman levyypinta-alan tarpeetonta kasvattamista. Miniaturitutkan suorituskyky todettiin kaikissa suoritetuissa mittauksissa erinomaiseksi. Molempien lasertutkien piirilevyt juotettiin ja ladottiin käsin Oulun yliopistolla.

Työn toisessa luvussa käydään läpi teoriaa toteutettujen lasertutkien toimintaan ja rakenteeseen liittyen. Toisessa luvussa käsitellään optisen pulssin kuluaikamittaukseen perustuvan etäisyysmittausjärjestelmän toimintaperiaate, lasersäteen laatuominaisuuksia, optisen pulssin avaruudellinen erottelukyky, fotoneiden Poisson-jakautuneisuus lasersäteessä, SPAD-ilmaisimen yksittäis- ja monifotonitila, puolijohdelasereiden rakenne sekä työn molemmissa lasertutkissa käytettävän SPAD-ilmaisimpiirin ominaisuudet. Kolmannessa luvussa käsitellään lyhyesti sekä viiru- että miniaturitutkan rakennetta laiteasolla sekä niille asetettuja tavoitteita. Neljännessä luvussa käydään läpi työssä toteutettujen piirilevyjen suunnittelua ja elektroniikan simulointia. Viidennessä luvussa vertaillaan aikatasoesityksiä lasertutkien optisten pulssien hetkellisille tehoille ja lopuksi kuudennessä luvussa on pohdintaa sekä yhteenveto tutkielman sisällöstä.

2. TEORIA

Optisten pulssien lentoaikojen mittaamiseen perustuvat lasertutkat muodostuvat tyypillisesti sekä pulssittimesta että aikavälimittauksen suorittavasta vastaanottimesta. Tässä luvussa käydään läpi työn molemmissa lasertutkissa käytettävän puolijohdelaserin ja SPAD-TDC-ilmaisimpiirin rakennetta ja toimintaa, minkä lisäksi luvussa esitellään fotoneiden Poisson-jakautuneisuutta sekä lasersäteiden laatuominaisuuksia. Luvun sisältö toimii yhteenvetona käytettävän laserdiodin ja ilmaisimen tekniikalle sekä niiden toiminnan ja rakenteen kannalta keskeisille termeille. Luvun tarkoitus on auttaa aiheeseen perehtymätöntä lukijaa ymmärtämään käsiteltävien lasertutkien toimintaa syvällisemmin.

2.1. Mittausperiaate

Radioaallot (aallonpituudet noin 1 mm – 100 km) ovat sähkömagneettista säteilyä, samoin kuin infrapuna (noin 700 nm – 1 mm), mutta ne sijaitsevat eri aallonpituusalueissa. Riippumatta käytettävän sähkömagneettisen säteilyn taajuudesta, tutkien toiminta perustuu tutkasignaalien lähettämiseen ennalta määritettyihin suuntiin ja vastaanottimeen heijastuneiden signaalien havaitsemiseen. Tutkasignaalit ovat lentoaika- (lyh. LA-) etäisyysmittaukseen perustuvien lasertutkien tapauksessa lyhytkestoisia optisia pulsseja. [1] Valo siroaa sen kulkureitillä olevasta kohteesta yleensä hajaheijastuksena (engl. diffuse reflection) useisiin eri avaruuskulmiin ja useilla eri valovoimakkuuksilla. Pinnan epätasaisuuksien ollessa pienempiä kuin tulevan valon aallonpituus, valo heijastuu pinnasta siroamattomana säteilynä eli peiliheijastuksena (engl. specular reflection). Kohteen pinnan heijastuvuus ja asento vastaanottimeen nähden vaikuttavat oleellisesti mittausetäisyyden lisäksi kohteesta takaisin heijastuvan pulssin intensiteettiin. [3]

Tutkan ja kohteen välisen etäisyyden määrittäminen tapahtuu mittaamalla lyhytkestoisten signaalien kulkuaikaa kohteeseen ja takaisin vastaanottimeen. Tätä menetelmää kutsutaan pulssitetuksi aikavälimittaukseksi (engl. time-of-flight, lyh. TOF) tai LA-etäisyysmittaukseksi. [2] Etäisyys (d) mitattavaan kohteeseen saadaan laskettua seuraavasta kaavasta, jossa Δt on kohteeseen osuneen ja siitä vastaanottimeen heijastuneen optisen pulssin kulkuaika ja c on valonnopeus tyhjiössä: [1][3][4]

$$d = \frac{c \Delta t}{2} . \quad (1)$$

Mitattavan kohteen säilyminen lasertutkan optisten keilojen peittoalueella mahdollisimman pitkällä etäisyysvälillä edellyttää lähettimen ja vastaanottimen optisten akselien asettamista mahdollisimman lähelle toisiaan, jotta avaruuskulma lasertutkan lähetin-vastaanottimeen olisi mahdollisimman pieni kohteesta katsottuna. Käytetyn puolijohdela-

serin ja SPAD-ilmaisimen aktiivisten alueiden sijoittuminen riittävän lähelle toisiaan lo- pullisessa mittauskokoontenossa huomioitiin molempien lasertutkien piirilevy- ja optome- kaniikkasuunnittelussa.

Avaruuskulman mittayksikkö SI-järjestelmässä on steradiaani, lyhennettynä sr. Avaruuskulma vastaa yksikköpallon pintaosan alaa vastaavalla tavalla kuin tasokulma ra- diaaneina vastaa yksikköympyrän kaaren pituutta. Kohteen avaruuskulma (Ω) steradiaa- neina on yhtä suuri kuin se yksikköpallon pintaosan ala (A), jonka kohde peittää ollessaan keskitettynä kulman kärkipisteeseen (origoon, kuva 1).



Kuva 1: Avaruuskulman määritelmä.

2.2. Säteen divergenssi ja laatu

Lasertutkien tärkeimpiä etuja mikroaaltotutkiin verrattuna ovat niiden tuottama yhden- suuntainen eli kollimoitunut säteily sekä lasersäteiden huomattavasti lyhyempi aallonpi- tuus, minkä vuoksi lasereiden sädekeilat eivät hajaannu merkittävästi edes pitkällä mittaus- etäisyyksillä. [5] Laserkeilojen poikittaissuuntaista tarkkuutta niiden optisiin akseleihin nähden voidaan parantaa entisestään pitkällä mittausetäisyyksillä optisten kollimaattorei- den avulla. [3][5] Optisessa LA-etäisyysmittauksessa käytettävän laserpulsin korkea teho mahdollistaa pitkän mittausetäisyyden ja pulssin ajallisesti lyhyt puoliarvoveveys vastaa- vasti kohteen suuren erottelutarkkuuden. [2]

Valonsäteiden edetessä kauemmaksi säteilylähteestä tai valokeilaa tarkentavan op- tiikan polttopisteestä, säteet leviävät ja erkaantuvat diffraktion vaikutuksesta suhteessa op-

tisen keilan akseliin, jonka määrittää puolijohdelasereiden tapauksessa optisen resonaattorin suuntaus. Sähkömagnetiikassa divergenssi ilmaisee valokeilan taipumusta hajaantua ja sen yksikkönä käytetään yleensä tasokulmaa. Leviämisen seurauksena valokeilan poikkeileikkauspinta-ala kasvaa, jolloin keilan poikittaissuuntainen tehointensiteetti pienenee suhteessa keilan alkuperäiseen poikkipinta-alaan. Lasersäteet pysyvät likimain yhdensuuntaisina Gauss-keilaksi kutsutun valokeilan lähikenttäalueella, jonka pituus määritetään ns. Rayleigh-etäisyydellä:

$$z_R = \frac{\pi w^2}{\lambda} , \quad (2)$$

jossa w on lasersäteen lähtöhalkaisija ja λ on aallonpituus. Lähikenttäalueen nopeasti hajaantuvaa suuntaa, jossa divergenssi on suuri, kutsutaan suuren kulman suunnaksi (engl. fast axis) ja hitaasti hajaantuvaa suuntaa vastaavasti pienen kulman suunnaksi (engl. slow axis). Valokeila laajenee lähikenttäalueen jälkeisessä kaukokenttäalueessa tasaisesti vakio-kulmalla, josta käytetään nimitystä divergenssin täysikulma ja joka on Gaussin keilalle radiaaneina:

$$\theta = \frac{4\lambda}{\pi w} . \quad (3)$$

Yhtälöstä (3) huomataan, että valokeilan divergenssi (θ) on sitä suurempi, mitä pienempi keilan lähtöhalkaisija (w) on, minkä vuoksi radioaaltoihin perustuvien tutkien sädekeila ei voi olla muutamaa millimetriä leveä ja vähän hajaantuva, toisin kuin lasertutkien optiset sädekeilat. Lasersäteiden divergenssit ovat tyypillisesti milliradiaanien (mrad) luokkaa. [5] [6] Lähdemateriaalissa [5] divergenssin täysikulmalle on esitetty virheellisesti puolikulman laskukaava (sivu 66, kaava 3.16). Yhtälöllä 3 saadaan laskettua ideaalisen lasersäteen divergenssi, mutta monimuotoista sädekeilaa tarkentavan optiikan divergenssi lasketaan sen sijaan yksinkertaisesti jakamalla optiikan polttopisteen halkaisija (d_f) sen polttovälillä (F) [4][7]:

$$\theta_o = \frac{d_f}{F} . \quad (4)$$

Esimerkiksi suuritehoiset puolijohdelaserit tuottavat tyypillisesti useita optisia aaltotiloja (engl. optical modes) sisältävää monimuotoista lasersäteilyä. Ideaalisella lasersäteellä tarkoitetaan TEM₀₀-aaltomuotoista sädettä, jonka divergenssi on pienin mahdollinen. Ideaalista sädettä kutsutaan usein diffraktiorajoittuneeksi, koska se voidaan tarkentaa pienimpään mahdolliseen (diffraktion rajoittamaan) pistekokoon. Diffraktiorajoittuneen sädekeilan divergenssin ja pienimmän mahdollisen halkaisijan välistä tuloa (θw , yhtälöstä 3) kutsutaan diffraktiorajaksi (engl. diffraction limit). [5][8]

Mitä leveämpi optisen säteen lähtöhalkaisija on, sitä helpommin ja pienemmäksi säde voidaan optiikan avulla fokusoida. Fokusoidun valokeilan halkaisija (d_f) on suoraan verrannollinen valon aallonpituuteen ja optiikan polttoväliin, mutta kääntäen verrannollinen objektiivin numeeriseen aukkoon tai säteen lähtöhalkaisijaan, riippuen siitä kumpi halkaisijoista on pienempi [5]:

$$d_f = \frac{4 \lambda F}{\pi w} = \theta F \quad . \quad (5)$$

Riippumatta optisen järjestelmän valonlähteen tyypistä, yhtälössä (5) esiintyvää optiikan polttovälin (F) ja tehollisen aukon halkaisijan (w) välistä suhdetta, F/w , kutsutaan aukko-suhteeksi tai f -luvuksi. [5] Optisella järjestelmällä tarkoitetaan tässä tapauksessa kokonaisuutta, joka sisältää yksittäisen valonlähteen (puolijohdelaserin) lisäksi yhden tai useamman linssin sekä mahdollisesti myös optisia suodattimia ja peilejä.

Optisen säteen laatua arvioidaan vertaamalla sen ominaisuuksia ideaaliseen TEM₀₀-muotoiseen lasersäteeseen. Laadun arvioinnissa keskeisin tekijä on säteen fokusoitavuus, joka voidaan määritellä säteen pistekoon ja optiikan polttovälin avulla usealla eri tavalla. Yleisimmin lasersäteen fokusoitavuuden ja hajaantuvuuden, eli divergenssin voimakkuuden, arviointiin käytetään K -lukua tai M^2 -lukua:

$$K = \frac{4 \lambda}{\pi w \theta} = \frac{1}{M^2} \quad . \quad (6)$$

Laatulukujen lausekkeet ovat toistensa käänteislukuja ja ne molemmat antavat tulokseksi yksi ideaaliselle TEM₀₀-aaltomuodolle. Mitä heikkolaatuisempi tai epäideaalisempi säde on, sitä pienempi K -luku on (< 1), ja vastaavasti, sitä suurempi M^2 -luku on (> 1). K -luvun voidaan ajatella vastaavan kysymykseen, kuinka suurelta osin tutkittava säde vastaa ideaalista sädettä. M^2 -luku sen sijaan ilmaisee, kuinka moninkertaisesti tutkittavan säteen divergenssi on suurempi kuin ideaalisen säteen. K -lukua käytetään erityisesti Saksassa ja M^2 -lukua Yhdysvalloissa. [5]

TEM-aaltomuodot (engl. transverse electromagnetic modes) kuvaavat sähkömagneettisen säteilyn tehotiheyden eli irradianssin (W/m^2) paikkakohtaista vaihtelua tasossa, joka on kohtisuorassa säteen etenemissuuntaa vastaan. Lasersäteiden irradianssijakauma voi muodostua joko yksittäisestä TEM-aaltomuodosta tai usean eri poikittaistilan (engl. transverse mode) päällekkäisyydestä. TEM-aaltomuodot luokitellaan alaindeksillä, jotka ilmaisevat nollakohtien lukumäärän ja sijainnin säteen intensiteettikuviossa. Esimerkiksi sylinterisymmetrisen säteen poikkileikkauksen intensiteettikuvio on muodoltaan ympyräsymmetrinen, jonka TEM-aaltomuodon ensimmäinen alaindeksi ilmaisee nollakohtien lukumäärän ympyräsäteen suuntaisesti ja toinen alaindeksi vastaavasti ympyräkehää pitkin. Riippumatta säteen symmetriasta, perusmuotoinen TEM₀₀-aaltomuoto tarkoittaa sädettä,

jonka poikkileikkauksen intensiteettijakauma on normaalijakautunut, minkä vuoksi aaltomuotoa nimitetään myös Gauss-keilaksi. [5]

Sähkömagneettisen sädekeilan hajaantuvuusetaisyys (F) on suoraan verrannollinen säteen lähtöhalkaisijaan (w), mutta kääntäen verrannollinen aallonpituuteen (λ); sädekeilan hajaantumaton etenemismatka on sitä pidempi, mitä suurempi säteen lähtöhalkaisija on ja mitä pienempi sen aallonpituus on. Esimerkiksi TEM_{00} -aaltomuotoinen mikroaaltokeila, jonka aallonpituus on 1 mm ja lähtöhalkaisija 3 mm, säilyy hajaantumatta noin 7 mm:n verran, kun taas lähi-infrapuna-alueen diffraktiorajoittunut sädekeila, joka on yhtä leveä ja jonka aallonpituus on 870 nm, etenee hajaantumatta yli tuhat kertaa pidemmän etäisyyden, noin 8 metriä. Säteilyjen välisestä hajaantuvuuserosta huomataan, että sähkömagneettisen säteilyn divergenssi (yhtälö 3) on suoraan verrannollinen sen aallonpituuteen.

Seuraavassa esimerkissä lasketaan edellisessä kappaleessa esitetyt pienimmät hajaantuvuusetaisyydet kahdelle eri aallonpituudelle; ratkaistaan ensimmäiseksi pisin mahdollinen etäisyys, jonka TEM_{00} -aaltomuotoinen mikroaaltokeila ($\lambda = 1$ mm) pystyy eteneeseen hajaantumatta, kun säteen lähtöhalkaisija on 3 mm. Hajaantuvuusetaisyys (F) saadaan ratkaistua yhtälön 5 avulla, kun säteen fokuoitu halkaisija (d_f) asetetaan yhtä suureksi kuin sen lähtöhalkaisija (w):

$$\lambda = 1 \text{ mm}, w = 3 \text{ mm}, d_f = 3 \text{ mm}, F = ?$$

$$F = \frac{\pi w d_f}{4 \lambda} = \frac{\pi \cdot (3 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2}{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 7,069... \text{ mm} \approx 7,1 \text{ mm} \quad (7)$$

Lähtöhalkaisijaltaan yhtä suuren (3 mm) lähi-infrapuna-keilan ($\lambda = 870$ nm) hajaantumaton etenemismatka saadaan ratkaistua vastaavalla tavalla:

$$\lambda = 870 \text{ nm}, w = 3 \text{ mm}, d_f = 3 \text{ mm}, F = ?$$

$$F = \frac{\pi w d_f}{4 \lambda} = \frac{\pi \cdot (3 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2}{4 \cdot 870 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 8,125... \text{ m} \approx 8,1 \text{ m} \quad (8)$$

2.3. Optisen pulssin paikkaepävarmuus

Käytettävän puolijohdelaserin optisen pulssin tehojakauman muoto muodostuu yksittäisestä korkeasta tehopiikistä ja sen jälkeen esiintyvistä pienemmistä emissiopiikeistä, joita kutsutaan pulssin optiseksi hännäksi (engl. optical tail). Ensisijaisen emissiopiikin jälkeinen häntäosa pyritään poistamaan kokonaan, koska se heikentää etäisyysmittausjärjestelmän erottelukykyä. Optinen häntä on oletettavasti seurasta laseriodin aaltojohteesta (engl. waveguide) esiintyvistä useista aaltotiloista, jotka voimistuvat ja ylittävät optisen resonaattorin vahvistuskynnyksen eri aikoihin. [7] Optista häntää saadaan pienennettyä puo-

lijohdelaserin erikoisrakenteellisella optisella resonaattorilla sekä optimaalisen suuruisella ja kestoisella virtapulssilla.

Käytettävän puolijohdelaserin tuottaman optisen pulssin tehojakauman muoto aikatasossa muistuttaa normaalijakaumaa, kun pulssin optista häntää ei huomioida. Pulssin tehojakauman muoto on siis Gaussinen, joten sen ajallista puoliarvovevyyden puolikasta (FWHM / 2) on mahdollista käyttää aikavälimittauksen keskihajonnan (σ) arvioimiseen. Esimerkiksi käytettäessä optista pulssia, jonka puoliarvoveveys on 100 ps, etäisyysmittauksen aikaepävarmuus kohteeseen olisi enintään noin ± 50 ps fotonii-ilmaisuksen histogrammin keskiarvosta noin 70 %:n todennäköisyydellä. Optisten laserpulssien kulkuajien mittaamiseen perustuvassa etäisyysmittauksessa pulssin ajallinen puoliarvoveveys on sen aikaepävarmuuden mitta. Se on pulssin ajallinen erottelukyky, eli aikaresoluutio, joka määrittää pienimmän mitattavissa olevan aikavälin kahden eri kohdetason välillä, eli käytännössä, kuinka tarkasti kohteen muoto ja paikka voidaan mitata.

Optisen pulssin avaruudellisella erottelukyvylä (engl. spatial resolution) tarkoitetaan pienintä askelman syvyyttä, joka pulssilla voidaan luotettavasti mitata, ja se saadaan laskettua vastaavalla tavalla kuin optisen pulssin kulkuajan avulla laskettava kohteen etäisyys (yhtälö 1):

$$\Delta x = \frac{c \Delta t_p}{2} , \quad (9)$$

jossa Δx on optisen pulssin paikkaepävarmuus, Δt_p on pulssin ajallinen puoliarvoveveys ja c on valonnopeus tyhjiössä.

Optisen pulssin paikkaepävarmuuden yhtälö (9) saadaan johdettua ajattelemalla tilanne, jossa yksitasoiseen kohteeseen muodostetaan kaksi yhtä syvää askelmaa vastakkaisiin suuntiin, jolloin ne kuvaavat paikkaepävarmuuden ääripäitä (kuva 2). Askelmien yhteenlaskettu syvyys vastaa siten etäisyysmittauksen kokonaisepävarmuutta suhteessa alkuperäiseen kohdetasoon. Tasojen etäisyyserojen mittaaminen suoritetaan yhtälöä johdettaessa kuvitteellisella ja äärettömän lyhytkestoisella ja siten äärettömän pienen aikaepävarmuuden omaavalla optisella pulssilla. Yhtälön johtaminen aloitetaan kuvittelemalla ideaalisen lasertutkan eteen yksitasoinen kohde etäisyydelle x_{keski} ja merkitsemällä lentoaika, joka hyötöpulssilla kuluu kohteen saavuttamiseen, muuttujalla t_{keski} . Seuraavaksi alkuperäisen kohteen taakse muodostetaan etäisyydelle x_{taka} uusi taso, joka sijaitsee etäisyyseron Δx ($x_{taka} - x_{keski}$) verran kauempana ideaalisesta lasertutkasta. Ratkaisemalla suhteellinen lentoaikaero Δt_{taka} , joka hyötöpulssilla kuluu taemman tason saavuttamiseen alkuperäiseen tasoon verrattuna, saadaan:

$$\Delta t_{taka} = \left(t_{keski} + \frac{\Delta x}{c} \right) - t_{keski} = \frac{\Delta x}{c} . \quad (10)$$

Kolmas taso muodostetaan alkuperäisen kohteen eteen yhtä suurelle etäisyydelle keskim-

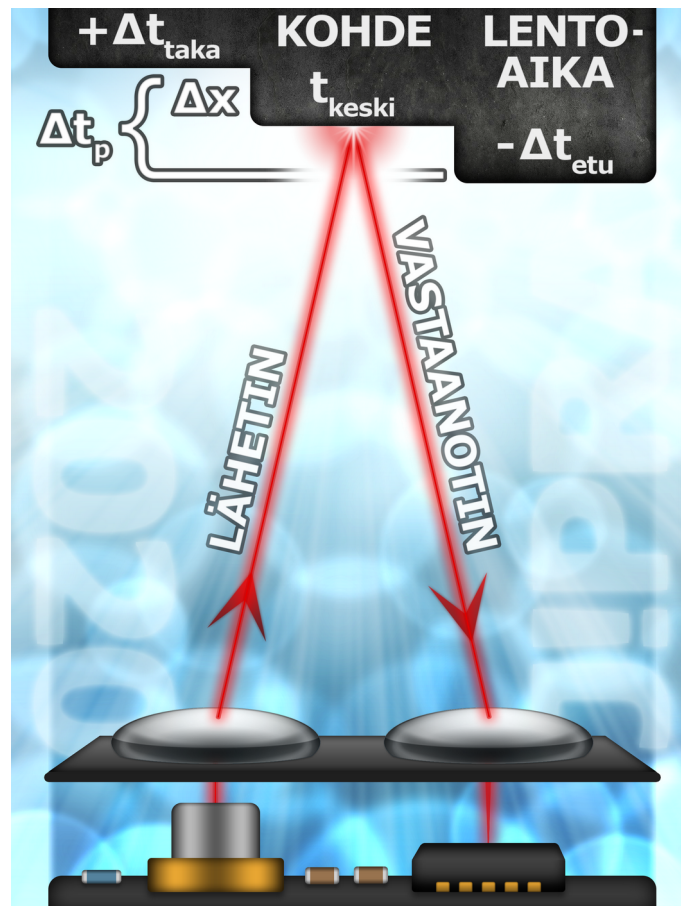
mäisestä tasosta kuin takimmainen taso, jolloin uusi etutaso sijaitsee etäisyyseron Δx ($x_{keski} - x_{etu}$) verran lähempänä ideaalista lasertutkaa. Ratkaisemalla etummaisten tasojen välinen suhteellinen lentoaikaero Δt_{etu} keskimmäiseen tasoon nähden, saadaan:

$$\Delta t_{etu} = \left(t_{etu} - \frac{\Delta x}{c} \right) - t_{keski} = -\frac{\Delta x}{c} . \quad (11)$$

Muodostetun kolmitasoisien kohteen takimmaisen ja etummaisen tason väliseksi kokonaislentoaikaeroksi Δt_p saadaan siten:

$$\Delta t_p = \Delta t_{taka} - \Delta t_{etu} = \frac{\Delta x}{c} - \left(-\frac{\Delta x}{c} \right) = \frac{2\Delta x}{c} . \quad (12)$$

Asettamalla kokonaislentoaikaero (Δt_p) yhtä suureksi kuin hyötypulssin puoliarvoveveys ja ratkaisemalla etäisyysero (Δx) kohteen keskitasosta sen ääripäihin, saadaan tulokseksi pienin mahdollinen syvyys askeleelle, joka on erotettavissa käytettävällä hyötypulssilla (yhtälö 9). Tuloksesta huomataan, että optisen pulssin erottelukyky on suoraan verrannollinen sen puoliarvovevyyteen ja on siksi sitä parempi, mitä lyhytkestoisempi pulssi on.



Kuva 2: Lasertutkan havainnekuva.

2.4. Fotoneiden Poisson-jakautuneisuus

Yksittäisten fotoneiden ilmaisu, esimerkiksi SPAD-diodien avulla, on yksi tärkeimmistä menetelmistä, joilla voidaan osoittaa valon kvanttimekaaninen luonne. Kohdistettaessa SPAD-ilmaisimeen valoa eri voimakkuuksilla ja laskettaessa SPAD-diodien tuottamia jännitepulsseja elektronisen laskurin avulla, voidaan huomata, että fotoneiden keskimääräinen ilmaisutahti on suoraan verrannollinen ilmaisimeen kohdistettuun valotehoon nähden. Tulos on vastaavanlainen kuin tutkittaessa radioaktiivista säteilyä Geiger-mittarilla, jonka ilmaisutahdin vaihtelu jonkin keskiarvon ympärillä on seurausta radioaktiivisen hajoamisprosessin satunnaisesta luonteesta. Fotoneiden satunnaisuutta kuvaa myös se, että havaittujen fotoneiden lukumäärä jonkin aikavälin sisällä vaihtelee eri mittauskertojen välillä, vaikka ilmaisimeen kohdistettu säteily määrä pidettäisiin vakiona. [9]

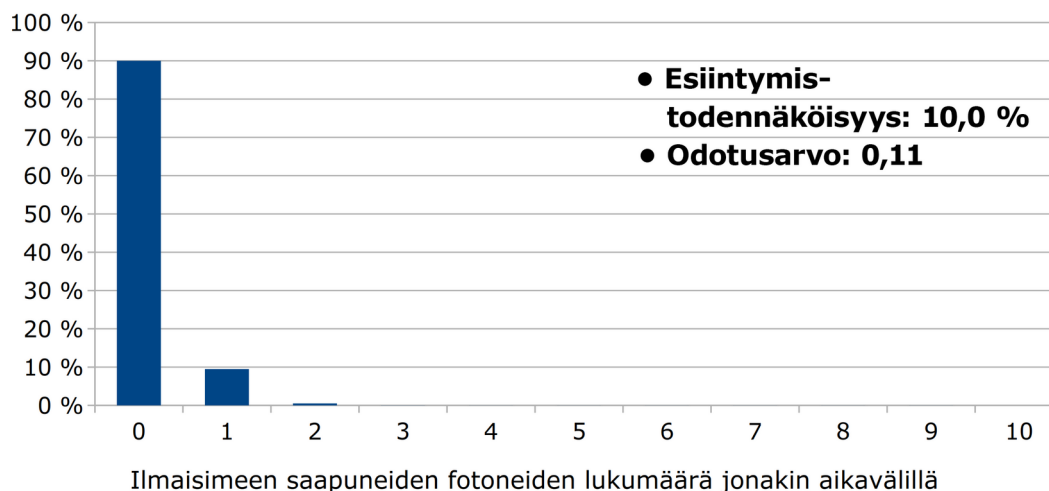
Lyhyen aikavälin sisällä havaittujen fotoneiden lukumäärät vaihtelevat satunnaisesti tietyn keskiarvon ympärillä, vaikka fotoneiden keskimääräinen virtaustahti olisi täysin tasainen. Voidaan osoittaa, että koherentin ja intensiteetiltään (W/sr) vakion valonlähteen tuottama fotonijakauma noudattaa millä tahansa aikavälillä diskreettistä Poisson-todennäköisyysjakaumaa [9]:

$$P(n) = \frac{\bar{n}^n}{n!} e^{-\bar{n}}, \text{ jossa } n = 0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

Fotoneiden lukumäärien vaihtelu useissa yhtä lyhytkestoisissa sädesegmenteissä on seurausta siitä, ettei fotoneiden tarkkoja sijainteja säteessä tiedetä, minkä vuoksi on tehtävä oletus, että fotonit voivat sijaita säteen jokaisessa kohdassa yhtä todennäköisesti. Fotoneiden keskimääräinen lukumäärä (\bar{n}) jonakin aikavälillä tai jonkin pituisessa sädesegmentissä on muodoltaan murtoluku, joka määräytyy valonlähteen intensiteetin ja käytetyn aikavälin mukaan. Radioaktiivista säteilyä tutkittaessa havaittujen fotoneiden keskimääräiseen lukumäärään vaikuttaa myös tutkittavan radioaktiivisen aineen määrä. Jakauman odotusarvo \bar{n} saadaan ratkaistua tunnettaessa esiintymistodennäköisyys jollekin fotonimäärälle. Fotoneiden esiintymistodennäköisyyden ollessa esimerkiksi 10 %, todennäköisyys ettei jonakin aikavälillä esiinny ainuttakaan fonia ($P(0)$) on oltava 90 %, jolloin jakauman odotusarvoksi (\bar{n}) saadaan viiden desimaalin tarkkuudella 0,10536. Poisson-todennäköisyysjakauman satunnaismuuttuja n on kokonaisluku, joka ilmaisee havaittujen fotoneiden tai ilmaisimeen saapuneiden yksittäisten fotoneiden lukumäärän jonakin aikavälillä ja jonka arvo vaihtelee satunnaisesti fotoneiden keskimääräisen lukumäärän molemmiin puolin. [9]

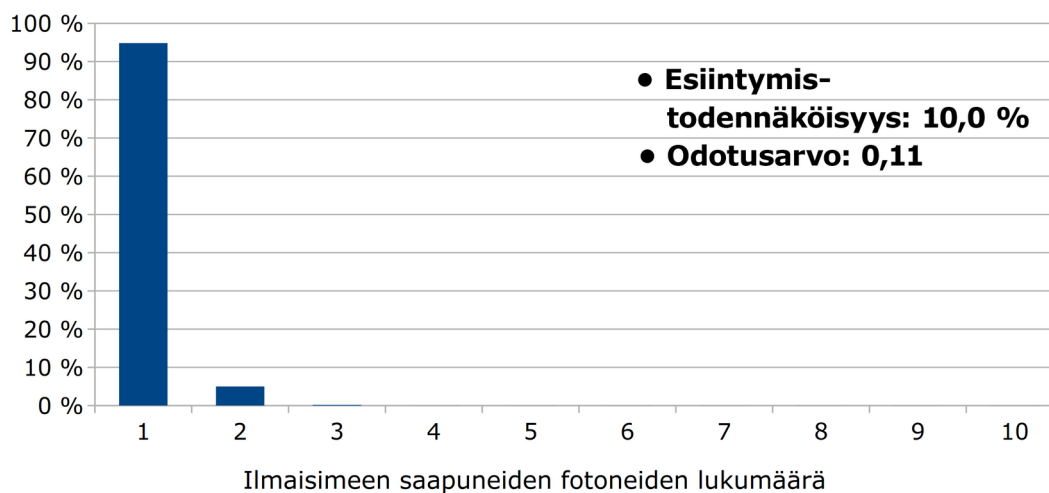
Seuraavista Poisson-jakaumista huomataan, että jakaumat saavuttavat huippuarvonsa odotusarvon \bar{n} kohdalla ja ne ovat sitä leveämpiä, mitä suurempi \bar{n} on. Poisson-jakauman erityispiirteenä on, että sen varianssi on yhtä suuri kuin odotusarvo, mikä tarkoittaa, että jakauman satunnaismuuttujan n arvot vaihtelevat odotusarvon \bar{n} ympärillä keskimäärin odotusarvon itsensä verran. [9]

Fotoneiden Poisson-todennäköisyysjakauma



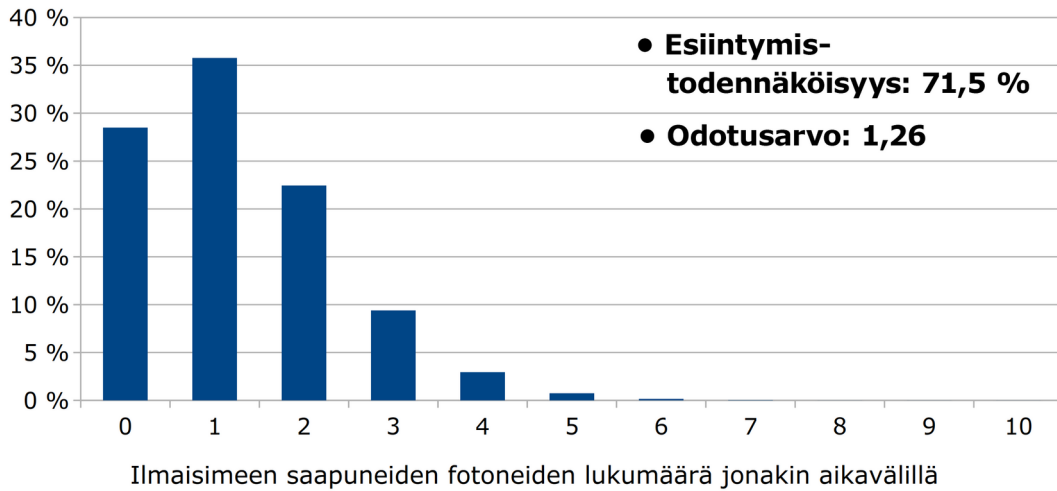
Kuva 3: Poisson-jakautuneen säteilyn todennäköisyysjakauma fotoneiden esiintymistodennäköisyyden ollessa 10 % jonakin aikavälillä. Kahden fotonin esiintymistodennäköisyys tarkasteltavassa sädesegmentissä on alle puoli prosenttia (0,4995 %). Lasertutkan ilmaisimen ajatellaan toimivan yksittäisfotonitilassa, kun kohteesta heijastuneista fotoneista alle 10 % saapuu ilmaisimpiirille. Kuvassa esitettyä fotoneiden Poisson-todennäköisyysjakaumaa voidaan siten pitää raja-arvona ilmaisimen yksittäisfotonitilalle.

Saapuneiden fotoneiden todennäköisyysjakauma



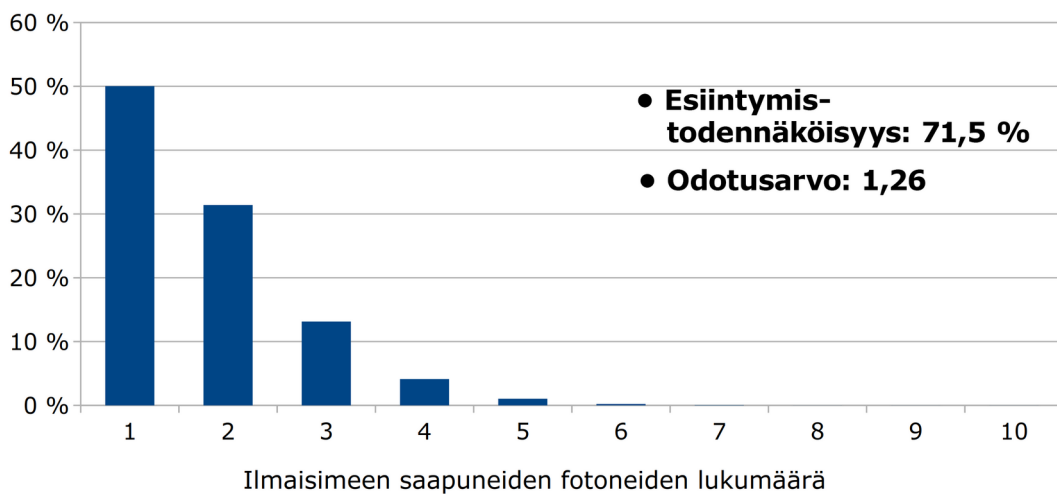
Kuva 4: Ilmaisimeen saapuneiden fotoneiden Poisson-jakauma, kun fotoneiden esiintymistodennäköisyys on 10 %. Jakaumasta on jätetty pois tyhjet sädesegmentit ($n = 0$), jolloin yksittäisten fotoneiden osuus kaikista ilmaisimeen saapuneista fotoneista on tuhannesosan tarkkuudella 94,825 %. Kahden fotonin esiintymistodennäköisyys on samalla tarkkuudella 4,995 %.

Fotoneiden Poisson-todennäköisyysjakauma



Kuva 5: Poisson-jakautuneen säteilyn todennäköisyysjakauma fotoneiden esiintymistodennäköisyyden ollessa 71,5 % jonakin aikavälillä. Tärkeää on huomioida, että kuvassa esitetyn jakauman pysty akselin arvoasteikko päättyy 40 %:iin.

Saapuneiden fotoneiden todennäköisyysjakauma



Kuva 6: Ilmaisimeen saapuneiden fotoneiden Poisson-jakauma, kun fotoneiden esiintymistodennäköisyys on 71,5 %. Yksittäisten fotoneiden osuus kaikista ilmaisimeen saapuneista fotoneista on kolmen desimaalin tarkkuudella 50,035 %.

2.5. Fotoni-ilmaisimen yksittäis- ja monifotonitila

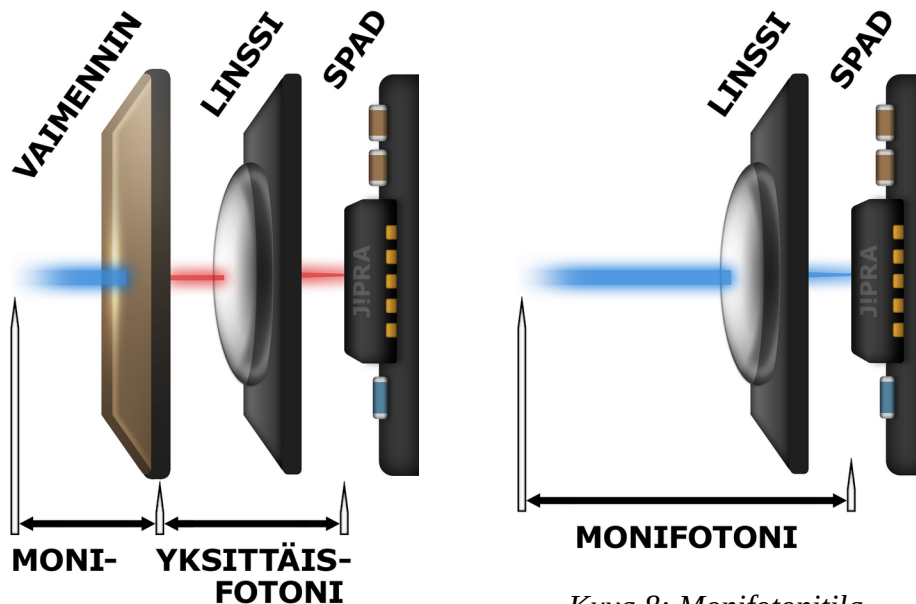
Lähetinvastaanottimen ajatellaan toimivan yksittäisfotonitilassa (engl. single photon mode) fotonivuon ollessa niin heikko, että ainoastaan alle 10 % kohteesta heijastuneista fotoneista saapuu ilmaisimpiirille, jolloin todennäköisyys kahden fotonin saapumiselle ilmaimeen yhtä aikaa on alle puoli prosenttia. Todennäköisyydet perustuvat Poisson-jakaumaan. Ilmaisimen toimiessa monifotonitilassa (engl. multi photon mode), siihen saapuu samalla ajanhetkellä useita fotoneita, jotka kasvattavat vastaanotettua optista tehoa ja nopeuttavat sekä vyöryläpilyöntien muodostumista SPAD-diodeissa että ilmaisimen liipaistumisaikaa. Samanaikaisesti saapuvat fotonit myös lisäävät SPAD-diodien liipaistumistodennäköisyyttä, minkä seurauksena diodit saattavat liipaistua jo ennen kuin optinen hyötypulssi on ehtinyt saapumaan kokonaisuudessaan vastaanottimeen. Ilmaisujen tapahtuessa ainoastaan optisen pulssin etureunassa (kuva 10), etäisyysmittauksen tulos vääristyy ja kohde ilmenee fotoni-ilmaisujen aikataason kuvaajassa todellisuutta lähempänä, minkä lisäksi pulssin kirkkain huippukohta ja loppuosa voivat jäädä täysin näkymättömiksi.

Kuvassa 7 on esitetty tilanne, jossa lasertutkan vastaanottimeen saapuva säteily on vaimentunut niin paljon, että ilmaisimpiiri toimii yksittäisfotonitilassa. Kohteesta takaisin heijastuvan pulssin intensiteettiin vaikuttaa mittausetäisyyden lisäksi kohdepinnan heijastuvuus ja asento vastaanottimeen nähden. [3] Ilmaimeen heijastunutta laserpulsia voidaan tarvittaessa vaimentaa entisestään vastaanottimen optiikan eteen asetettavien optisten vaimentimien avulla. Puhtaassa yksittäisfotonitilassa fotoneiden ilmaisutapahtumat ovat keskenään identtisiä, koska silloin ilmaimeen ei pääse saapumaan yhtä aikaa useita fotoneita kerralla, jolloin ainoastaan yksittäiset fotonit pystyvät käynnistämään vyöryläpilyöntejä SPAD-diodien aktiivisilla alueilla. [4]

Kuvassa 8 esitetään tilanne, jossa lasertutkaan kohdistuu voimakasta säteilyä ja ilmaimeen pääsee saapumaan useita fotoneita kerralla samalla ajanhetkellä. Optista hyötypulsia ei ole vaimennettu riittävästi, jos fotoni-ilmaisuja tapahtuu enemmän pulssin etureunassa kuin sen todellisen intensiteettihipun kohdalla. Useat samalla ajanhetkellä saapuvat fotonit oletettavasti kiihdyttävät SPAD-diodien vyöryläpilyöntien muodostumista, minkä seurauksena valodiodi alkaa johtaa nopeammin ja muodostuvan virtapulssin etureuna on huomattavasti jyrkempi kuin yksittäisfotonitilassa tapahtuneessa fotoni-ilmaisussa. [4]

Vyöryläpilyönnin seurauksena muodostuva virtapulssi vahvistetaan ja muunnetaan jännitemuotoon ilmaisimpiirin sisältämällä vastaanotkanavan transimpedanssivahvistimella, minkä jälkeen jännitepulssi ohjataan eri ajoituskomparaattoreihin, joilla pulssista muodostetaan logiikkatason ajoitussignaaleja ilmaisimen TDC-osalle. Monifotonitilassa muodostuneen jännitepulssin jyrkkä etureuna ylittää vakiosuuruisen jänniterajan ajoituskomparaattoreiden sisääntuloissa merkittävästi nopeammin kuin yksittäisfotonitilassa muodostunut jännitepulssi, jolloin tuloksena on aikaistunut ajoitussignaali aika-digitaali-

muuntimelle ja lopulta lyhyempi etäisyysmittauksen tulos. [3] Kohteesta heijastunut laserpulssi voi jäädä aikavälimittauksessa kokonaan ilmaisematta, jos ympäristöstä peräisin oleva taustasäteily on liian voimakasta. Vastaanottimien ilmaisimpiiri on toteutettu niin, että SPAD-diodit pystyvät liipaistumaan ainoastaan kerran jokaisen mittauskerran yhteydessä, koska niiden aktivointi suoritetaan aina tahdistettuna lähettimeltä saapuvaan aloitusmerkkisignaaliin nähden, jotta uudelleenvirittymiset eivät tapahtuisi sattumanvaraisesti ja hallitsemattomasti.



Kuva 7: Yksittäisfotonitila.

Kuva 8: Monifotonitila.

Liipaistuneiden SPAD-TDC-ilmaisimen valodiodien sammumiset ovat toteutetut tapahtumaan passiivisesti (engl. self-quench), mikä tarkoittaa, että vyöryläpilyöntien käynnistämät virtapiikit pääsevät sammumaan itsestään. [2] Vyöryläpilyöntin seurauksena käynnistyvä virta kasvaa nopeasti huippuarvoonsa diodin tyhjennysalueella esiintyvän liitoskapasitanssin ja katodin puoleisissa johtimissa esiintyvän hajakapasitanssin purkautuessa diodin läpi. Todennäköisyys virtapiikin sammumiselle on huomattava, kun diodin katodille asetetun etuvastuksen resistanssi on niin suuri, että virran arvo pääsee laskemaan alle $100 \mu\text{A}$:n. Virran laskiessa erittäin pieneksi, diodin tyhjennysalueen ylittäviä varauksenkuljettajia on niin vähän, että todennäköisyys uusien elektroneiden virittymiselle materiaalin johtavuuskaistalle varauksenkuljettajien välisissä törmäyksissä on erittäin pieni. [10]

2.6. Puolijohdelaser

Lasereiden toiminta perustuu stimuloituun emissioon, jossa emissiofotoneilla on sama aallonpituus ja vaihe kuin emission käynnistäneillä fotoneilla. Tapahtumaan liittyvät fotonit

ovat siis vastavuoroisesti koherentteja. [1][5][8][9] Sähkömagneettista säteilyä voidaan mallintaa harmonisen värähtelijän avulla siten, että säteilyn aallonpituus (taajuus) kuvaa fotoneiden jonkin ominaisuuden jaksollista vaihtelua ajan suhteen, energia muutosnopeutta ja vaihe muutoksen edistymistä. Koherentissa säteilyssä fotoneiden jokin jaksollinen ominaisuus siis vaihtelee samalla nopeudella ja samanaikaisesti ajan suhteen. Stimuloitu emissio ja absorptio ovat toistensa vastailmiöitä, joiden todennäköisyydet ovat suoraan verrannolliset ulkoisen sähkömagneettisen kentän energiatihyteen ja siten fotoneiden lukumäärään; vastaavalla tavalla kuin spontaanissa emissiossa ylemmälle energiatasolle virittyneen atomin todennäköisyys siirtyä spontaanisti alemmalle energiatasolle on suoraan verrannollinen virittyneiden atomeiden lukumäärään. [8]

2.6.1. Säteilyn ja aineen vuorovaikutus

Elektronin siirtyessä korkeammalta energiatilalta pienemmälle, se luovuttaa energiaeroa vastaavan määrän energiaa sähkömagneettisena säteilynä, jonka aallonpituus on kääntäen verrannollinen luovutettuun energiaan nähden. Elektroneiden energiatilat ovat diskreettisiä, mikä tarkoittaa, että elektroneilla voi olla ainoastaan tiettyjä energiamääriä vastaavat kiertoradat atomiydinten ympärillä. Diskreettisten energiatilojen seurauksena elektronit voivat luovuttaa ainoastaan tietynkokoisia energiamääriä, joita nimitetään säteilykvanteiksi tai fotoneiksi. Atomin uloimmalla elektronikuorella sijaitsevat elektronit saadaan virittymään korkeammalle energiatilalle, kun niihin kohdistetaan riittävän suuri energiamäärä sähkövirran, sähkömagneettisen säteilyn tai hiukkasten törmäysten muodossa. [8]

Sähkömagneettisen säteilyn ja atomin keskinäistä vuorovaikutusta voidaan mallintaa klassisesti harmonisella värähtelijällä, jossa elektroni toimii värähtelijän massana. Näkyvän valon aallonpituuksilla vuorovaikutuksen voidaan olettaa tapahtuvan kokonaan valon sähkökentän ja atomin kevyimpien hiukkasten eli elektroneiden välillä. Elektronin siirtyminen energiatilalta toiselle vastaa poikkeamaa värähtelijän tasapainoasemasta, mikä saa elektronin ja atomin (positiivisen) ytimen muodostaman dipolin värähtelemään poikkeamaa vastaavalla ominaistaajuudella, jota kutsutaan siirtymätaajuudeksi (engl. transition frequency). Samalla ominaistaajuudella värähtelevä ulkoinen sähkömagneettinen kenttä on resonanssissa siirtymätaajuuden kanssa ja lisää suuresti elektronin todennäköisyyttä siirtyä alemmalle energiatilalle. Ulkoinen kenttä siis muuttaa atomin kvanttimekaanista tilaa ilman fotonin tuhoutumista eli absorptiota. [5][8][9]

2.6.2. Optinen resonaattori ja populaatioinversio

Puolijohdelasereiden optisen vahvistuksen (engl. optical gain) edellytyksenä on, että stimuloituja emissioita tapahtuu aktiivisella alueella enemmän kuin fotoneiden absorptioita, mikä puolestaan edellyttää varauksenkuljettajien käänteistä miehitystilaa eli populaatioin-

versiota, jossa virittyneitä atomeita on enemmän kuin perustilassa olevia. Optinen vahvistus on siten suoraan verrannollinen populaatioinversioon, jonka saavuttamiseksi puolijohdelaser asetetaan myötäsuntaiseen etujännitteeseen ja sen läpi johdetaan virtaa aktiiviselle alueelle. Kaksipeilisen puolijohdelaserin optinen resonaattori mahdollistaa, että stimuloitujen emissioiden lukumäärä pääsee ylittämään spontaanisten emissioiden lukumäärän, mikä yhdessä käänteisen miehitystilan kanssa saa aikaan fotoneiden vyöryilmiön, josta seuraa valon huomattava vahvistuminen ja laserointikynnyksen (engl. lasing threshold) ylittyminen. [5][8][9]

Kuten kaikissa jaksollisesti värähtelevissä järjestelmissä, niin myös lasereissa kokonaisvahvistuksen on oltava tasapainotilassa yhtä suuri kuin kokonaishäviöiden. Lasemalla laserin optiset häviöt yhteen, saadaan tuloksena laserointi- tai vahvistuskynnys (engl. threshold gain), jonka ylittämiseksi laserin aktiivisella alueella on tapahduttava enemmän stimuloituja emissioita kuin spontaaneja. Nettovahvistuksen muuttuessa positiiviseksi, optisessa resonaattorissa kiertävä valoteho kerää yhden kierroksen aikana enemmän vahvistusta kuin sen aikana tapahtuu häviöitä. [6][8]

Aktiivisen väliaineen atomeiden virittämistä ylemmille energiatasoille ulkoisella energialähteellä kutsutaan pumppaamiseksi, joka kuvaa energian tilapäistä kertymistä aktiiviseen väliaineeseen johde-elektroneiden liike-energian (eV) muodossa. Energian syöttämisen tavoitteena on saada väliaineen ylemmälle laserointitasolle enemmän atomeita kuin alemmalle ja kasvattaa siten väliaineen optista vahvistusta. Useimmissa lasereissa ulkoisen energian syöttäminen aktiiviseen väliaineeseen toteutetaan joko sähköisesti (jännitteellä) tai optisesti (valolla), mutta virittäminen voidaan toteuttaa myös esimerkiksi termisesti (lämmöllä), kemiallisesti tai radioaktiivisen säteilyn avulla. [8]

2.6.3. Reuna- ja pintaemittioivat laserit

Molempien lasertutkien lähetinpiireissä käytettävä erikoisrakenteinen ja kvanttikaivotyyppinen (engl. quantum well, lyh. QW) puolijohdelaser hyödyntää optista takaisinkytkentää, joka mahdollistaa mm. aaltojohteen sisäisten sähkökenttien resonanssivärähtelyiden ylläpitämisen, optisesti vahvistavan väliaineen tehollisen pituuden kasvattamisen sekä säteen divergenssin pienentämisen. [6][8][11] Optinen takaisinkytkentä saavutetaan aaltojohteen valoa heijastavilla päädyillä, ns. Fabry-Pérot resonaattorirakenteella, joka saa aikaan valon kiertoliikkeen ja interferenssi-ilmiöt aaltojohteessa. [8] Rakenne on saanut nimensä vuonna 1899 kehitetystä Fabry-Pérot interferometristä. [12] Valoa heijastavien päätyjen välistä osaa kutsutaan optiseksi onteloksi tai optiseksi resonaattoriksi (engl. optical cavity, optical resonator). Korkeatehoisten ja reunaemittioivien Fabry-Pérot puolijohdelasereiden pituudet vaihtelevat optisen akselin suuntaisesti tyypillisesti 1 - 3 mm:n välillä. [6]

Reunaemittioivien laseriodien tuottama valo poistuu niiden päätyjen kautta optisen resonaattorin pituusakselin suuntaisesti. Fabry-Pérot interferometrirakenteeseen perustu-

vien reunaemittovien laserdiodien peilit valmistetaan lohkaisemalla puolijohdekiteen päädyt kohtisuorasti kiteiden optisiin akseleihin nähden. Ilman ja puolijohdemateriaalin taitekertoimien eroon perustuvan peilipinnan heijastuvuus on tyypillisesti noin 30 %, joka on riittävä optisen resonaattorin toiminnan kannalta. Pintojen heijastuvuutta voidaan kasvattaa tai heikentää entisestään kerrostamalla päätyihin puolijohteita, joiden taitekertoimet vuorottelevat pienistä isoihin. Valmistusmenetelmällä tuotettuja peilipintoja kutsutaan Bragg-peileiksi (engl. distributed Bragg reflector, lyh. DBR) ja niiden heijastuvuudet voivat olla yli 99,9 % tietyillä aallonpituuksilla. [8]

Sijoittamalla peilit puolijohdekiteen päätyjen sijasta aktiivisen kerroksen ylä- ja alapuolelle, saadaan tuloksena pystyresonaattorinen pintaemittova laser (engl. vertical-cavity surface-emitting laser, lyh. VCSEL), niin kutsuttu vekseli. Nimensä mukaisesti pintaemittovien lasereiden (engl. surface-emitting lasers, lyh. SELs) optiset akselit ovat kohtisuorassa niiden optisesti vahvistavaan puolijohdekerrokseen nähden. Reunaemittoviin lasereihin verrattuna vekseleiden pystysuuntaisten resonaattoreiden pituudet ovat äärimmäisen lyhyitä, minkä vuoksi niihin ei pääse muodostumaan kuin yksi pitkittäinen aaltotila eli emissioaallonpituus. Vekseleillä on siten mahdollista tuottaa yksittäistä aallonpituutta sisältävää säteilyä. Vekseleiden säteet ovat ympyränmuotoisia ja vähän hajaantuvia, minkä lisäksi niiden kynnysvirrat ovat pieniä. [8]

2.6.4. Puolijohdelaserin rakenteet

Homogeeniset puolijohdeliitokset muodostuvat yhdestä puolijohdemateriaalista, joka on jaettu kahteen eri tavoin seostettuun puolikkaaseen, joten rakenteen energiarako on kauttaaltaan samanlainen. Energiakaistojen vähäisestä taipumisesta seuraa liitosalueen lähes yhtenäinen taitekerroin, minkä vuoksi rakenteesta puuttuu rajausominaisuudet sekä varauksenkuljettajille että fotoneille. Homogeenisten laserdiodien aktiivisen alueen koko ei rajoitu tyhjennysalueen kokoon rakenteen liitoskohdassa, vaan huomattavasti laaja-alaisempaan varauksenkuljettajien diffuusioetäisyyteen. Homogeeniset rakenteet tuottavat merkittävästi enemmän lämpöä ja optisia häviöitä sekä vaativat enemmän virtaa kuin kaksoisheterorakenteelliset laseriodit. [8]

Tässä työssä käytetyn laseriodin rakenne perustuu puolijohteiden heteroliitoksiin, jotka muodostuvat liitettäessä toisiinsa kaksi eri materiaalia, joiden kiderakenteet ja energiarat ovat erilaiset. Toisistaan poikkeavat energiarat muodostavat eri puolijohteiden välille energiavalleja, mikä mahdollistaa varauksenkuljettajien loukuttamisen toisilla puolijohteilla rajattuun alueeseen, jossa energiakaistat sijaitsevat ulompia kerroksia alemmilla energiatasoilla. Kaksoisheterorakenne (lyh. KH-rakenne, engl. double heterostructure) muodostuu nimensä mukaisesti kahdesta eri heteroliitoksesta sijoittamalla jokin puolijohdemateriaali yhden toisen, tyypillisesti p- ja n-tyyppiseksi seostetun, puolijohteen väliin. [1][6][8]

2.6.5. Aktiivinen väliaine

KH-rakenteellisten laserdiodien säteilyä tuottava väliaine sijoitetaan p- ja n-tyyppisten puolijohteiden väliin, jotta väliaineen yli saadaan muodostettua potentiaaliero kytkettäessä uloimpiin pintakerrokseen myötäsuntainen etujännite. Aktiivisena väliaineena käytettävien puolijohteiden energiaraot ovat suoria, jotta säteilyn muodostuminen materiaalissa olisi mahdollisimman tehokasta. Seostamattomat itseisjohtavat puolijohteet soveltuvat säteilyn tuottamiseen parhaiten, koska niihin ei ole seostettu epäpuhtausatomeja, joihin ulkoisella energialla viritetyt varauksenkuljettajat pääsisivät välittömästi rekombinoitumaan. Aktiivinen alue on KH-rakenteessa se osa, jossa elektronit pääsevät virittymään johtavuuskaistalle ja jossa varauksenkuljettajien rekombinaatiot saavat aikaan fotoneiden emission. Aktiivisen alueen synonyyminä tai sen sijasta käytetään usein nimitystä vahvistusalue (engl. gain region), jolla voidaan painottaa valon vahvistumista alueella stimuloitun emission seurauksena. [6][8] Tämän työn molemmissa lasertutkissa käytettävän kvanttikaivo-tyyppisen ja reunaemittävän laserdiodin aktiivinen alue on 30 μm leveä ja 3 mm pitkä.

Nimestään huolimatta laserdiodien vahvistava väliaine ei kuitenkaan ole lähtökohdaisesti optisesti vahvistavaa materiaalin ollessa termisessä tasapainotilassa. Lasereiden aktiiviset väliaineet ovat tyypillisesti materiaaleja, jotka vaimentavat säteilyä absorboimalla fotoneita väliaineelle ominaisella aallonpituusalueella. Väliaine saadaan vahvistamaan samoja aallonpituuksia syöttämällä siihen ulkoista energiaa ja viritämällä väliaineen elektronit tilapäisesti korkeammille energiatasoille, jolloin väliaineessa kiertävät fotonit pääsevät stimuloimaan lisää fotoneita absorboitumisen sijaan. [8]

2.6.6. Puolijohdelaserin aaltojohde

KH-rakenteen yksi suurimmista eduista on sekä valon että virran yhtäaikainen keskittäminen aktiiviseen väliaineeseen. Aktiivista kerrosta ympäröivät puolijohdekerrokset toimivat optisen aaltojohteen tavoin, sillä puolijohteiden taitekertoimet muuttuvat yleensä kääntäen verrannollisesti niiden energiarakoihin verrattuna. Puolijohdekerrosten taitekertoimien eroilla voidaan vaikuttaa oleellisesti lopullisen lasersäteiden ominaisuuksiin, kuten intensiteettiin, kokoon ja divergenssiin. Ympäröimällä aktiivinen väliaine suuremman energiaraon omaavilla materiaaleilla, pienessä energiaraossa muodostuneilla fotoneilla ei ole riittävästi energiaa ($E = hf$) absorboitumaan uloimpiin puolijohdekerrokseen, jolloin laserin säteilyintensiteetti ei pääse heikkenemään. Lisäksi varauksenkuljettajien rajaaminen KH-rakenteella vahvistavaan väliaineeseen tehostaa väliaineen stimuloitua emissiota eli fotoneiden aiheuttamia elektroneiden viritystilojen purkautumisia (rekombinaatioita). [8]

2.6.7. Vahvistus- ja taitekerroinohjausmenetelmä

Aktiiviseen kerrokseen muodostetaan vaakasuuntaisesti kapea (tyypillisesti 10 - 50 μm leveä) vahvistusalue (ns. kaistale, engl. stripe) yleensä joko vahvistuksenohjaus- (engl. gain-guiding) tai taitekerroinohjausmenetelmän (engl. index-guiding) avulla. Rajoittamalla pinta-alaa, jonka lävitse sähkövaraus pääsee virtaamaan aktiiviseen väliaineeseen, saadaan tiettyyn optiseen vahvistukseen vaaditun virran määrää vähennettyä. Vahvistuksenohjauksessa virran pinnansuuntaista ulottuvuutta rajoitetaan esimerkiksi pienentämällä laserdiodin pinnalle kytkettävän elektrodin kokoa tai eristämällä elektrodin ja uloimman p-tyyppin puolijohteen välinen kontaktipinta kaikkialta muualta paitsi halutun kaistaleen kohdalta. Menetelmän heikkoutena on, että jännitteen vaikutusalueen ulkopuolelle jäävät aktiivisen kerroksen alueet absorboivat voimakkaasti muodostuvaa säteilyä, minkä lisäksi sähkövirran kasvattaminen laajentaa sekä aktiivisen alueen että säteilykentän kokoa. Taitekerroinohjauksessa varauksenkuljettajien ja fotonien vaakasuuntaista leviämistä rajoitetaan ympäröimällä aktiivinen väliainekerros pienemmän taitekertoimen omaavilla materiaaleilla, jolloin väliaineen säteilyä tuottavan alueen koko ei enää riipu laserdiodin läpi johdettavan jännitteen suuruudesta. [6][8]

2.6.8. Aktiivisen väliaineen ohentaminen

Varauksenkuljettajien sallittujen energiatilojen lukumäärää aktiivisen kerroksen energia- raon ympäristössä, eli valenssi- ja johtavuuskaistoilla, voidaan vähentää merkittävästi kvanttikaivorakenteella, jossa aktiivinen väliainekerros ohennetaan alle 20 nm ohueksi, jolloin emissiofotoneiden aallonpituuksien vaihteluväli pienenee eli laserin spektriviivojen leveydet (engl. spectral linewidths) kaventuvat. Toisaalta rekombinaatioiden energiavälit kasvavat valenssi- ja johtavuusvöiden energiatasojen kvantittumisen seurauksena, mikä saattaa olla riittävästi, jotta materiaali alkaa tuottaa säteilyä näkyvällä aallonpituusalueella. Energiakaistojen keskinäisistä energiaeroista eri materiaalien välisissä rajapinnoissa muodostuu potentiaalikynnyksiä varauksenkuljettajille; energiaerot siis määrittävät materiaali- rajapintojen välille muodostuvan potentiaalikuopan (engl. potential well) syvyyden. Vastaavasti rajapintojen välinen etäisyys, eli välimateriaalin paksuus, vastaa potentiaalikuopan leveyttä varauksenkuljettajille, joiden liikkeet ovat yhdessä suunnassa rajatut. [8]

Vahvistusalueen ohentuessa elektroneiden ja aukkojen de Broglien aallonpituuden kokoluokkaan (5 - 20 nm), kvanttikaivorakenteen potentiaalikuoppaan jääneiden varauksenkuljettajien tilatiheysfunktioit muuttuvat askelfunktioiksi eli tilatiheydet kasvavat ainoastaan tietyillä energiatasoilla; toisin sanoen varauksenkuljettajien sallitut energiatilat harvenevat tietyille energiatasoille. Energiatilojen kvantittuminen tapahtuu ainoastaan siinä suunnassa, jossa aktiivisen väliaineen tilavuutta pienennetään riittävästi. Aktiivisen väliaineen mittojen ollessa riittävän suuret suhteessa varauksenkuljettajien aallonpituuteen, materiaalin ominaisuudet, kuten varauksenkuljettajien tilatiheysfunktioit, eivät enää eroa

suurempien ainemäärien ominaisuuksista, minkä vuoksi tämän tyyppisiä lasereita nimitetään massiivilasereiksi (engl. bulk laser). [8]

Aktiivisen väliaineen ohentaminen 10 nm:n luokkaan tai sen alapuolelle kasvattaa laserdiodin ylemmän laserointitason tilatiheyttä eli sallittujen energiatilojen lukumäärää virittyneille elektroneille johtavuuskaistan alimmalla energiatasolla, mikä puolestaan pienentää laserointikynnyksen ylittämiseen vaadittavaa virtaa. Laserdiodien tuottamasta lämmöstä suurin osa muodostuu niiden aktiivisella alueella. Lämpeneminen on seurausta laserdiodiin johdetun ulkoisen energian häviöistä, joita ovat hilavärähtely- ja säteilykvanttien (fononeiden ja fotoneiden) absorptiot, säteilyä tuottamattomat rekombinaatiot sekä diodiin kytketyn jännitteen ja diodin sisäisen sarjaresistanssin yhteisvaikutuksesta tapahtuva materiaalin resistiivinen lämpeneminen. Kvanttikaivolasereiden aktiiviset väliaineet tuottavat massiivilasereita vähemmän lämpöä, koska ne ovat ohuempia, minkä lisäksi niiden liitoskohtiin myötäsuuntaisessa etujännitteessä muodostuvat tyhjennysalueet ovat lyhyempiä ja siksi vähemmän sähkövirtaa vastustavia. [8]

2.6.9. Optisen resonattorin aaltotilat

Optisen resonattorin valoa heijastavien päätyjen väliin muodostuu seisovia aaltoja, joiden aallonpituudet riippuvat resonattorin pituudesta ja joita voidaan pitää resonattorissa vastakkaisiin suuntiin etenevien optisten tasoaaltojen summa-aaltoina. Resonattorin tukemien sähkömagneettisten aaltojen funktiot ovat riippumattomia sekä ajasta että resonattoriin johdetun ulkoisen energian jaksollisuudesta. Sähkömagneettisen teorian mukaan seisovien värähtelytilojen ylläpitäminen kaksipeilisessä resonattorissa edellyttää, että sähkökentät saavat arvokseen nolla resonattorin molemmissa sähköä johtavissa peileissä. Toisistaan etäisyydellä L sijaitsevien valoa heijastavien seinämien väliin muodostuva optinen aalto voi sisältää positiivisen (> 0) kokonaisluvun m verran aallonpituuden puolikkaita ($\lambda/2$), eli värähtelykupuja, seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$L = m \frac{\lambda}{2} = m \frac{\lambda_0}{2n} , \quad (14)$$

jossa λ on säteilyn aallonpituus aktiivisessa väliaineessa, λ_0 on säteilyn aallonpituus tyhjiössä ja muuttuja n on aktiivisen väliaineen taitekerroin. Yhtälö voidaan tulkita myös ehtona seisovan aallon muodostumiselle siten, että resonattorin pituuden (L) on oltava säteilyn aallonpituuden puolikkaan ($\lambda/2$) monikerta (m). Sijoittamalla yhtälöön monikerran m arvoksi yksi ja aallonpituuden λ_0 arvoksi osamäärä $c/\Delta f$, jossa c on valonnopeus tyhjiössä, ja ratkaisemalla sitten Δf , saadaan lopputuloksena perusaallon (engl. fundamental mode) taajuus, jonka välein rinnakkaiset aaltotilat muodostuvat optiseen resonattoriin. [8]

Resonattorin pituusakselin suuntaisia optisia värähtelytiloja (yhtälön 14 mukaisia aallonpituuksia) nimitetään pitkittäisiksi aaltotiloiksi (engl. longitudinal modes). Aktiivi-

sen kerroksen ylä- ja alapuolella sijaitsevien heteroliitoksien väliin muodostuvat optiset resonanssitaajuudet ovat pystysuoraan poikittaisia aaltotiloja (engl. transverse vertical modes), kun taas vaakasuoraan poikittaiset aaltotilat (engl. transverse lateral modes) muodostuvat yhdensuuntaisesti aktiiviseen kerrokseen nähden ja kohtisuoraan sen pituusakselia vastaan. Esimerkiksi vahvistuskytkennässä aktiivisen alueen heikosti vaakasuuntaan rajoittunut tehollinen leveys (engl. effective width) on suoraan verrannollinen ulkoisen sähkövirran (ts. jännitteen) voimakkuuteen. Vaakasuuntaiset aaltotilat saadaan rajattua hyvin tietylle etäisyysvälille kaventamalla aktiivista väliainekerrosta ja hautaamalla väliaine taitekertoimiltaan pienempien puolijohdekerrosten väliin. Aktiivisen väliaineen ja sitä pystysuunnassa ympäröivien p- ja n-puolijohdekerrosten sivuille sijoitettavat eristekerrokset estävät sekä varauksenkuljettajien että fotoneiden leviämistä aktiivisen kerroksen ulkopuolelle, minkä lisäksi ne myös kohdistavat sähkövirtaa aktiiviselle alueelle. Vaakasuuntaisten aaltotilojen rajaaminen perustuu niiden kokonaisuheijastumisiin aktiivisen väliaineen ja eristekerroksien välisistä rajapinnoista. Optiset aaltotilat pyritään rajaamaan jokaisessa kolmessa tilaulottuvuudessa siten, että ainoastaan monikerraltaan pienin ($m = 1$) perustajuinen aaltotila pääsee muodostumaan jokaiseen rajattuun suuntaan aaltojohteessa. [8] Perustajuisista aaltotiloista muodostuvan TEM_{00} -muotoisen lasersäteen divergenssi ja pistekoko ovat pienimmät mahdolliset ja sen aaltorintama on täysin tasainen säteen vyötärössä. [5]

2.6.10. Optiset rajauskerrokset

Kvanttikaivolaserissa käytetään yleensä erillisiä fotoneiden rajauskerroksia (engl. separate confinement layers, lyh. SCL) pystysuuntaisten aaltotilojen rajaamiseen, koska toisin kuin massiivilaserissa, kvanttikaivolaserien erittäin ohuiden aktiivikerroksien aaltojohdeominaisuudet ovat erittäin huonot. Optiset rajauskerrokset ovat aktiivista väliainetta fyysisesti paksumpia ja optisesti harvempia eli niiden taitekertoimet ovat pienemmät ja energiarat vastaavasti suuremmat, jotta vahvistusalueen energiakaistojen huipuissa muodostuva säteily pääsisi laajenemaan niihin ilman häviöitä. [6]

Mitä useammassa tilaulottuvuudessa laseriodin aktiivista väliainetta ohennetaan ja varauksenkuljettajien liikettä rajoitetaan elektroneiden de Broglien aallonpituuden koluokkaan, sitä vähemmän väliaineessa on diskreettisiä energiatasoja ja sitä voimakkaammin varauksenkuljettajat ovat pakotetut rekombinoitumaan lähellä väliaineen energiarakoa. Aktiivisen tilavuuden pienentyessä myös varauksenkuljettajien määrä pienenee, jolloin populaatioinversion saavuttaminen kaikkialla väliaineessa vaatii vähemmän virtaa ja laseriodin kynnysvirta pienenee. Kynnysvirran pienentyminen parantaa laserin hyötysuhdetta, koska kaikki kynnysvirtaa suuremmalla virralla viritettävät elektronit rekombinoituvat väliaineessa stimuloitujen emissioiden seurauksena ja kasvattavat siten laserin valotehoa. Kynnysvirran ylittyessä, emissiofotoneiden määrä kasvaa eksponentiaalisesti, koska virittyneiden varauksenkuljettajien rekombinoitumisaika on kääntäen verrannollinen stimuloitujen emissioiden (ts. fotoneiden) lukumäärään nähden. [6][8]

Aktiivisen väliaineen tilavuuden pienentäminen parantaa laseriodin hyötysuhdetta kuitenkin vain tiettyyn rajaan asti. Mitä enemmän aktiivista väliainetta ohennetaan, sitä heikommin optinen vahvistus pääsee siirtymään säteilyyn. Väliaineen pienentyessä liikaa, sen vahvistus ei enää riitä kompensoimaan säteilyn imeytymistä ympäröiviin puolijohdekerroksiin, vaikka laserin läpi johdettaisiin enemmän virtaa, jolloin väliaineen ohentamisella saavutettu kynnysvirran alenemisen hyöty menetetään. Optisen rajauskerroimen heikkenemisen lisäksi myös väliaineen vahvistus saturoituu, joka on seurausta varauksenkuljettajien energiatasojen vähenemisestä niissä suunnissa, joissa aktiivista väliainetta ohennetaan. Optinen vahvistus saavuttaa huippuarvonsa ohennetussa väliaineessa välittömästi silloin, kun johtavuuskaistan alin energiataso pääsee täyttymään virittyneistä elektroneista. Sen sijaan massiivilasereissa optisen vahvistuksen kasvaessa myös emissiofotoneiden energiat kasvavat, minkä vuoksi massiivilasereiden vahvistusta ei ole mahdollista kohdistaa suoraan energiaraon ympäristöön. Optiset rajauskerrokset mahdollistavat laseriodien erittäin alhaisten kynnysvirtojen saavuttamisen ja säteilytehon kasvattamisen, koska ne toimivat lähes häviöttöminä vyöhykkeinä optisille aaltotiloille. Ilman optisia rajauskerroksia, aktiivisessa väliaineessa muodostuvat fotonit olisivat rajoittuneena samaan pieneen tilavuuteen varauksenkuljettajien kanssa, jolloin säteilyn tehotehiys voisi helposti ylittää materiaalin vaurioitumiskynnyksen johdettaessa laserin läpi suuria virtamääriä. [6]

Aktiivisen kerroksen rinnalle voidaan sijoittaa yksi iso aaltojohde-elementti (engl. large optical cavity, lyh. LOC) tai kaksi erillistä rajauskerrosta molemmin puolin aktiivista väliainetta (kuten tässä työssä käytettävässä laseriodissa), jolloin rakenteesta käytetään nimitystä erillisrajaava heterorakenne (engl. separate confinement heterostructure, lyh. SCH). [6]

2.6.11. Sähkökenttien rajauskerroimet

Kvanttikaivolaserien vahvistusalueet ovat niin ohuita, että ainoastaan murto-osa optiseen resonaattoriin rajoittuneiden sähkömagneettisten kenttien tehosta kokee vahvistuksen. Vahvistusalueen ja aaltojohteeseen (parhaiten) rajoittuneen optisen kentän (eli elektroneiden ja fotonien) välinen päällekkäisyys ilmaistaan rajauskerroimella Γ (engl. confinement factor), jonka arvo voi vaihdella nollan ja yhden välillä. Rajauskerroin siis ilmaisee, kuinka suuri osa optisen kentän kokonaistehosta kytkeytyy vahvistusalueeseen ja kokee vahvistuksen. Pystysuoraan (transversaalisesti) poikittaisen sähkökentän rajauskerroin ilmaisee vahvistusalueen paksuuden rajaaman sähkökentän tehon suhteessa koko sähkökentän tehoon, eli TE-aaltomuodon kokonaisleveyyteen, seuraavan yhtälön mukaisesti: [6]

$$\Gamma = \frac{\int_{-d/2}^{d/2} E^2(z) dz}{\int_{-\infty}^{+\infty} E^2(z) dz} . \quad (15)$$

Yhtälössä (15) funktio $E^2(z)$ on sähkökentän teho z -suunnassa, joka on kohtisuorassa aktiiviseen kerrokseen (xy -tasoon) nähden. Osoittajan integrointiraja d on aktiivisen väliaineen paksuus eli z -suuntainen mitta. Vaakasuoraan (lateraalisesti) poikittaisen sähkökentän rajauskerroin lasketaan muutoin vastaavalla tavalla, mutta siinä integrointi suoritetaan aaltojohteen leveyden suuntaisesti. Rajauskerroin on oleellinen tekijä aaltojohteen tehollisen vahvistuksen arvioinnissa. [6]

Sähkökenttien rajauskertoimien avulla saadaan laskettua optiseen resonaattoriin muodostuvan optisen säteen pistekoko, ns. ekvivalenttinen pistekoko tai muotopistekoko (engl. *equivalent spot size, modal spot size*), d/Γ . Aktiivisen kerroksen ohentaminen erittäin ohueksi leventää TE-aaltomuotoa aktiivisen alueen rajojen ulkopuolelle, mikä puolestaan pienentää aaltomuodon rajauskerrointa huomattavasti suhteessa aktiivisen kerroksen paksuuteen, jolloin optisen lähikentän pistekoko kasvaa pystysuunnassa ja vastaavan suunnan kaukokentän divergenssikulma pienenee. Optisen rajauskertoimen pienentäminen suhteessa aktiivisen kerroksen paksuuteen on yksi niistä rakenteellisista menetelmistä, esimerkiksi Q-kytkennän ja sähkövirran vaakasuuntaisen rajaamisen ohella, joilla voidaan suoraan vaikuttaa siihen, kuinka helposti laserdiodilla saadaan tuotettua yksittäisiä ja suuritehoisia laserpulsseja; mitä pienempi optinen rajauskerroin on, sitä enemmän termisen tasapainotilan ylittäviä (ns. ylimääräisiä) varauksenkuljettajia (engl. *excess carriers*) vaaditaan, jotta stimuloitujen emissioiden lukumäärä ylittäisi spontaanien emissioiden lukumäärän. Fotoneiden levittyessä laaja-alaisesti aktiivisen kerroksen ympärille, optisen pulssin muodostuminen viivästyy ja aktiiviseen väliaineeseen pääsee kertymään runsaasti virittyneitä atomeita ennen optisen vahvistuskynnyksen ylittymistä. Tuloksena on lyhytkestoinen ja suuritehoinen laserpulssi, kun atomeiden energia pääsee lopulta purkautumaan fotoneiden muodossa vahvistuskynnyksen ylittyessä. Laaja-alainen pistekoko myös pienentää optisen säteen tehotiheyttä aaltojohteen valoa heijastavissa päädyissä, jolloin laserdiodin läpi voidaan johtaa enemmän virtaa ennen optisen kynnystehon ylittymistä tuhoisaan peilivaurioon (engl. *catastrophic optical mirror damage, lyh. COMD*); ekvivalenttisen pistekoon kasvattaminen lisää siten myös laserin enimmäislähtötehoa. [6]

2.6.12. Vahvistuskytkentäteknikka

Tasapainotilassa olevan laserin optinen vahvistus ei pääse koskaan ylittämään aktiivisen väliaineen häviöiden tasoa; ulkoisella energialla viritetyt elektronit palautuvat välittömästi takaisin alemmalle energiatasolle spontaanin ja stimuloitun emission seurauksena. Optista vahvistusta voidaan kuitenkin kasvattaa tiettyjen lasereiden tapauksessa ulkoisella energialla (sähköisellä, optisella tai termisellä) niin nopeasti, että virittyneitä elektroneita pääsee muodostumaan aktiiviseen väliaineeseen huomattavasti nopeammin kuin fotoneita. Aktiiviselle alueelle muodostetaan laserointikynnyksen reilusti ylittävä populaatioinversio tehokkaalla ja nopealla ulkoisella energiapulssilla, joka saa aikaan fotoneiden määrän eksponentiaalisen kasvun erittäin lyhyessä ajassa. Lyhytkestoisten laserpulssien tuottamista

laserin vahvistusta muuttamalla kutsutaan vahvistuskytkentäteknikaksi (engl. gain switching). [6][8]

Suurin osa puolijohdelasereiden lämpöhäviöistä muodostuu niiden aktiivisissa väliaineissa, kun lasereiden läpi johdetaan virtaa. Lämpöenergia pystyy poistumaan väliaineesta ainoastaan tietyllä muutosnopeudella, minkä vuoksi virran tehollinen arvo on pidettävä riittävän pienenä, jotta puolijohde ei vaurioituisi liiallisen lämpenemisen seurauksena. Materiaalista poistuva lämpöenergia jollakin aikavälillä on lämmön keskimääräinen poistumisnopeus, joka voidaan saavuttaa joko vakiosuuruisella ja jatkuvalla lämpöenergian virtauksella tai erittäin lyhytkestoisella, mutta vastaavasti hyvin suurella lämmön (ts. sähkövirran) hetkellisellä muutoksella. Vahvistuskytkentäteknikka soveltuu siten erityisen hyvin äärimmäisen lyhytkestoisten laserpulssien tuottamiseen puolijohdelasereilla. [8]

Tässä työssä käytettävä puolijohdelaser on suunniteltu tuottamaan erityisen lyhytkestoisia ja suurienergisiä laserpulseja vahvistuskytkennällä, joka voidaan toteuttaa piipohjaisella elektroniikalla. Toteutustapaa kutsutaan tehostetuksi vahvistuskytkentäteknikaksi (engl. enhanced gain switching) erityisesti siksi, koska laserdiodin tuottamat optiset pulssit ovat merkittävästi lyhytkestoisempia kuin laserin läpi johdettavat virtapulssit. Käytettävän laserdiodin aktiivinen kerros sijaitsee epäsymmetrisesti sen aaltojohteessa, minkä lisäksi taitekerroinmuutokset aaltojohteen ja sitä pystysuunnassa ympäröivien p- ja n-puolijohdekerroksien välisissä rajapinnoissa poikkeavat suuresti toisistaan. Epäsymmetrisesti sijoitettu aktiivinen väliaine on syrjässä sekä aaltojohteen keskeltä että aaltojohteeseen muodostuvan optisen tehojakauman huippuarvosta, minkä vuoksi väliaineen optinen rajauskerroin (Γ) on merkittävästi pienempi suhteessa sen paksuuteen (d). Aktiivisen kerroksen ja optisen kentän päällekkäisyyttä on saatu pienennettyä entisestään puolijohdekerroksien välisillä taitekerroinmuutoksilla. Pystysuuntaan poikittaisen aaltotilan tehojakauma ($E^2(z)$) muodostuu lähes täysin aktiivisen väliaineen ja laserdiodin n-tyyppisen puolijohdekerroksen väliseen laajaan aaltojohdekerrokseen, jonka paksuus on erityisesti mitoitettu tukemaan perustaajuista aaltotilaa. Aktiivisen väliaineen ja p-tyyppisen puolijohdekerroksen välinen aaltojohdekerros on sitä vastoin erittäin ohut, minkä lisäksi aaltojohteen ja p-puolijohdekerroksen välinen taitekerroinero on hyvin suuri, jotta sähkömagneettisen kentän leviäminen optisesti häviölliseen p-tyypin puolijohdekerrokseen olisi mahdollisimman vähäistä. Aaltojohteen epäsymmetrisen rakenteen tavoitteena on pitää laserin emittoimat korkeatehoiset optiset pulssit yksittäisinä ja ilman ylimääräisiä jälkipulseja (engl. trail-free). [6][13]

2.6.13. Q-kytkentäteknikka

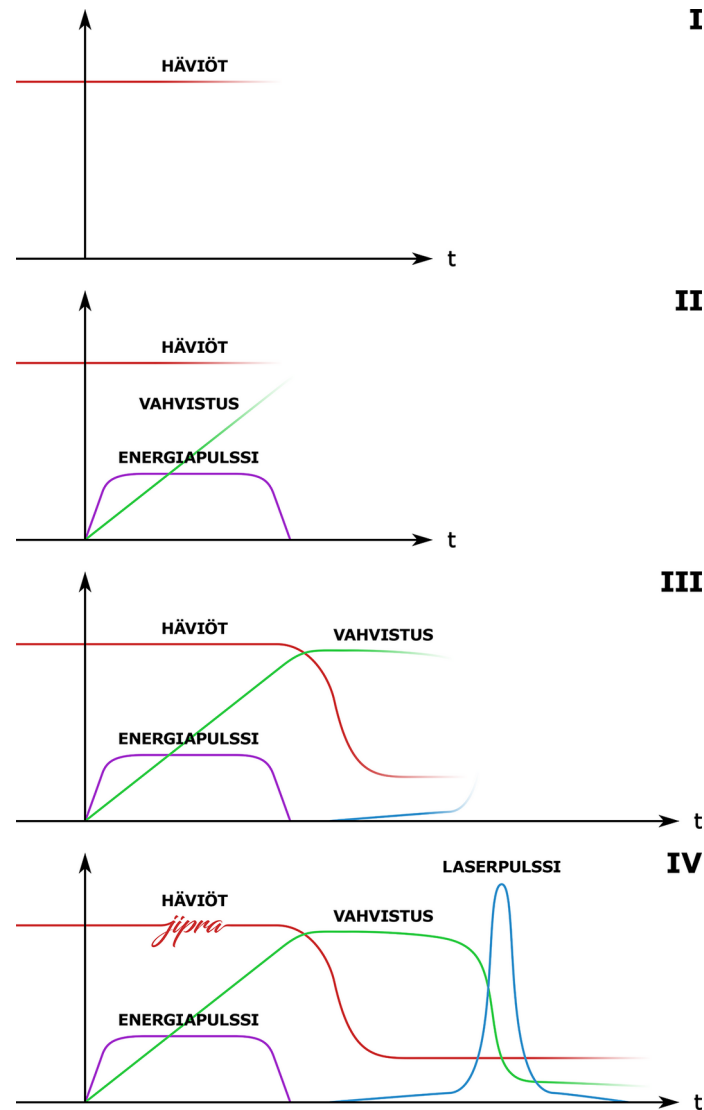
Toisin kuin vahvistuskytkentäteknikassa, jossa puolijohdelaserin optista vahvistusta eli varauksenkuljettajien stimuloitua rekombinaatiota säädellään virtapulssilla, Q-kytkentäteknikassa lyhytkestoisten ja tehokkaiden virtapulssien tuottaminen tapahtuu optisen resonaattorin häviöitä eli Q-hyvyyslukua muuttamalla. Optisen resonaattorin hyvyysluku Q

kuvaa resonaattorissa muodostuvien optisten aaltojen (taajuuskomponenttien) vaimennusta, tai vastaavasti, resonaattorin kykyä säilöä sähkömagneettista energiaa eli ylläpitää tiettyä resonanssitaajuutta (seisovaa aaltoa). Mitä suurempi hyvyysluku Q on, sitä pienemmät resonaattorin häviöt (taajuuskomponenttien vaimennukset) ovat ja sitä vähemmän resonaattorissa esiintyy aaltokomponentteja (kapeampi resonanssialue). Energialla tarkoitetaan tässä yhteydessä joko optisessa resonaattorissa esiintyvää säteilytehoa (J/s) tai elektroneiden kineettistä energiaa (eV) aktiivisessa väliaineessa. [6][8]

Q-kytkentätekniiikan edellytyksenä on, että varauksenkuljettajien käänteistä miehitystä saadaan kasvatettua huomattavasti korkeammaksi kuin mihin optinen vahvistus normaalisti satureituisi ilman Q-kytkentää. Seuraavan neljän ehdon on toteuduttava, jotta Q-kytkennän toteuttaminen olisi mahdollista:

1. Varauksenkuljettajien rekombinaatioaika aktiivisen alueen ylemmällä laserointitasolla (engl. upper-state lifetime) on oltava riittävän pitkä, jotta ylemmälle tasolle (ulkoisella energialla, esimerkiksi virtapulssilla) viritetyt elektronit eivät siirtyisi spontaanisti alemmalle energiatasolle ennen kuin resonaattorin toiminta on palautunut ja stimuloitun emission seurauksena muodostuva säteilytehon piikki on saavutettu.
2. Laseriin syötettävän energiapulssin kesto on oltava pidempi kuin se aika, joka optisella pulssilla kestää optisen huipputehon saavuttamiseen siitä hetkestä, kun Q-kytkentä on tapahtunut, resonaattorin toiminta palautunut ja stimuloitu emissio käynnistynyt.
3. Optisen resonaattorin toiminta, ja siten myös siinä kiertävän sähkömagneettisen kentän oskillointi, on saatava väliaikaisesti estettyä syötettäessä ulkoista energiapulssia aktiiviseen väliaineeseen, Q-kytkennän alkuvaiheessa.
4. Resonaattorihäviöiden on pudottava lähes välittömästi Q-kytkennän tapahduttua, jotta resonaattorin toiminta palautuisi ja spontaanin emission seurauksena käynnistyvä optisen pulssin vahvistuminen (stimuloitu emissio) saisi vapautettua ylemmälle energiatasolle varastoituneen energian. [8]

Kuvassa 9 on havainnollistettu Q-kytkennän toimintaperiaatetta ja menetelmän avulla muodostetun optisen pulssin kehittymistä. Kuvan ensimmäisessä osassa optisen resonaattorin ja fotonien takaisinkykytyminen on estetty, jolloin häviöiden taso on korkea. Toisessa vaiheessa laserin aktiivisen alueen varauksenkuljettajia viritetään ylemmälle laserointitasolle ulkoisella energiapulssilla, jolloin optinen vahvistus pääsee kasvamaan poikkeuksellisen korkealle tasolle. Kolmannessa vaiheessa optisen resonaattorin toiminta palautetaan, jolloin häviöiden taso laskee nopeasti alas ja spontaanin emission seurauksena muodostuneet fotonit pääsevät kiertämään resonaattorissa vapaasti. Optisen vahvistuksen purkauduttua, kohdassa neljä, tuloksena on korkeatehoinen ja lyhytkestoinen laserpulssi. [8]



Kuva 9: Lasereiden Q-kytkentäperiaate.

Q-kytkennän ensimmäisessä vaiheessa optisen resonattorin häviöitä kasvatetaan (ja hyvyyslukua pienennetään) resonattoriin sijoitettavalla Q-kytkimellä, jotta aktiivisessa väliaineessa ei pääsisi tapahtumaan stimuloitua emissiota, kun siihen kohdistetaan ulkoinen (esimerkiksi sähköinen) energiapulssi. Kaksipeilisessä resonattorissa riittävä häviöiden taso saavutetaan estämällä toisen peilin toiminta, esimerkiksi passiivisella kyllästysvaimentimella (engl. saturable absorber). Aktiivisen väliaineen käänteinen miehitystila kasvaa nopeasti ulkoisen energiapulssin vaikutuksesta, kunnes väliaineen optinen nettovahvistus (ts. vahvistus häviöiden jälkeen) lopulta tasaantuu spontaanien emissioiden seurauksena. Q-kytkentä (ja hyvyysluvun nostaminen) suoritetaan ihanteellisesti tässä vaiheessa, jolloin resonattorin häviöt laskevat merkittävästi optista vahvistusta (populaatioinversiota) alemmaksi ja muodostuva sähkömagneettinen kenttä pääsee kiertämään ja vahvistumaan resonattorissa vapaasti. Optisen tehon kasvaessa eksponentiaalisesti, vahvistus alkaa saturoitua ja laskea jyrkästi alaspäin. Samaan aikaan osa kiertävästä valotehosta

poistuu resonaattorista laserin ulostulopeilin kautta. Vahvistus jatkaa laskuaan optisen tehon kasvaessa, saavuttaen ja ohittaen lopulta tason, johon se olisi saturoitunut ilman Q-kytkentää ja johon häviöt ovat laskeneet Q-kytkennän tapahtumisen jälkeen. Optinen pulssi saavuttaa huippuarvonsa samalla hetkellä, kun vahvistuksen taso risteää häviöiden tason kanssa. Aktiivisen alueen populaatioinversio jatkaa kuitenkin laskuaan, koska resonaattorissa kiertää vielä runsaasti fotoneita optisen pulssin saavutettua huipputasonsa. Laserissa kiertävä ja siitä poistuva valoteho jatkavat kasvuaan niin kauan, kunnes vahvistus laskee resonaattorihäviöiden alapuolelle, jolloin valon voimistuminen pysähtyy ja sen teho alkaa heiketä. [8]

Optisten resonaattoreiden Q-kytkentämenetelmiä on kehitetty useita erilaisia, joista yleisimpiä ovat mekaaniset, sähköoptiset, akusto-optiset ja kyllästysvaimentimet. Menetelmät jaetaan aktiivisiin ja passiivisiin niiden ohjaustavan mukaan. Aktiiviset Q-kytkimet vaativat toimiakseen ulkoista ohjausta, yleensä jännitteen muodossa. Passiiviset Q-kytkimet toimivat itsenäisesti ja muuttavat resonaattorin häviöitä epälineaarisesti. [8]

2.6.14. Kyllästysvaimentimet

Kyllästysvaimentimet ovat passiivisia Q-kytkimiä, joiden toiminta perustuu foneiden (stimuloituun) absorptioon laserin aallonpituusalueella. Käynnistettäessä ulkoisen energian syöttäminen laseriin, kyllästysvaimentimessa on enemmän atomeita alemmalla laserointitasolla kuin ylemmällä, jolloin vaimentimeen kohdistuva valo ei pysty läpäisemään sitä. Vaimentimen laserointitasoilla on oltava yhtä paljon virittyneitä atomeita, jotta se saavuttaisi kyllästymistasonsa ja olisi optisesti läpinäkyvä eli valkaistunut (engl. bleach through). Säteilyn voimistuessa riittävästi aktiivisessa väliaineessa sekä spontaanin että stimuloitun emission seurauksena, passiivinen vaimennin saavuttaa lopulta kyllästymistasonsa, jolloin vaimentimen läpäisevyys kasvaa ja valo pääsee kulkemaan sen läpi vaimentumatta. [8]

2.7. SPAD-TDC-ilmaisimpiiri

Molempien lasertutkien vastaanottimissa hyödynnetään Oulun yliopiston CAS-tutkimusyksikössä kehitettyä ilmaisimpiiriä, johon on integroitu SPAD-diodimatriisin lisäksi monikanavainen aika-digitaalimuunnin. Ilmaisimpiiri muodostuu 9 x 9 kokoisesta (330 μm x 330 μm) SPAD-matriisista sekä 10-kanavaisesta ja 10 ps:n tarkkuudella toimivasta TDC-piiristä, joka mittaa aikaeroja yhden aloitusmerkkisignaalin ja yhdeksän SPAD-diodin (3 x 3) pysäytysmerkkisignaalin välillä. Mikropiiri on kooltaan 2,47 mm x 4,01 mm ja se on valmistettu 350 nm:n korkeajännite CMOS-tekniikalla, joka mahdollistaa SPAD-diodien käytön korkealla estosuuntaisella etujännitteellä (noin 20 V). Ilmaisimpiirin tehonkulutus on noin 150 mW ja se on koteloitu 7 mm x 7 mm kokoiseen QFN48-muovikoteloon.

Ilmaisimpiirin integroitu aika-digitaalimuunnin suorittaa varsinaisen aikavälimitauksen ja määrittää optisen hyötypulssin lentoajan sen lopetus- ja aloitusmerkkisignaalien etureunojen välisestä aikaerosta ($t_{\text{stop}} - t_{\text{start}}$). [2][3] Optisen pulssin lentoajan laskenta suoritetaan kaikista yhdeksästä SPAD-diodista samanaikaisesti 10 ps:n tarkkuudella aikavälimitauksen käynnistävään aloitusmerkkisignaaliin nähden. Ilmaisimpiirillä suoritettavan aikavälimitauksen kesto voi olla enimmillään 533,5 ns, joka vastaa noin 80 metrin ensimmäisyyttä kohteeseen. Kaksiulotteisen ilmaisimatriisin etuna on, ettei kohteen tarvitse olla täysin paikallaan, minkä lisäksi se myös sallii pienen epätarkkuuden tutkan optomekaniikan säätämisessä. Tässä työssä toteutettujen lasertutkien ominaisuudet eivät ole riittäviä muodostamaan tarkkaa kokonaiskuvaa mitattavan kohteen pinnasta, mutta riittävän suurikokoisella SPAD-matriisilla olisi mahdollista muodostaa yhdessä laaja-alaisen ja tehokkaan laserkeilan kanssa sekä kaksi- että kolmiulotteinen kuva kohteesta. Rinnakkaismittausta varten täysikokoisesta (9 x 9) SPAD-matriisista voidaan valita erikseen haluttu 3 x 3 kokoinen (100 μm x 100 μm) alimatriisi, jossa yksittäisen SPAD-diodin aktiivinen alue on kooltaan 24 μm x 24 μm . Valintavaihtoehtoja on yhteensä 49 kappaletta (kuva 11). Valittua alimatriisia voidaan myös joustavasti vaihtaa kesken mittauksen, esimerkiksi tilanteessa, jossa ilmaisimen pinnalle heijastunutta kohdekuvaa halutaan seurata. Integroidun 10-kanavaisen TDC-piirin yhdeksän kanavaa on varattu valitun alimatriisin jokaiselle yksittäisefotonivyörydiodille (SPAD) ja viimeinen vapaa kanava impulssilähettimen muodostamalle aloitusmerkkisignaaliin. Jokainen mittaustapahtuma tuottaa 18-tavun kokoisen datamäärän, joka siirretään ilmaisimpiiristä ensin kaksisuuntaista ja kahdeksan bitin levyistä tiedonsiirtoväylää pitkin FPGA-kehitysalustalle ja sen jälkeen USB-väylän kautta tietokoneelle. [2][4]

Yksittäisiä fotoneita ilmaisevat valodiodit ovat vyöryvalodiodeja (engl. avalanche photodiodes, lyh. APDs), jotka ovat erityisesti suunnitellut toimimaan niiden läpilyöntijännitettä suuremmalla estosuuntaisella jännitealueella. Jännitealuetta kutsutaan Geiger-tilaksi, koska siinä toimiessaan SPAD-diodit ovat viritettävät uudelleen erillisellä sammutuspiirillä jokaisen ilmaisun päätteeksi ja koska fotoneiden laukaisemat vyöryläpilyönnit eivät pääse voimistumaan sammutuspiirillä rajoitettua enimmäistasoa korkeammaksi, riippumatta saapuneiden fotoneiden määrästä eli säteilyn intensiteetistä. Vastaavalla tavalla kuin Geiger-hiukkasilmäyksillä, SPAD-valodiodien avulla voidaan ainoastaan havaita mittauksen kohteena olevaa säteilyä, mutta niillä ei voida mitata säteilykvanttien energiaa tai niiden aallonpituutta. SPAD-ilmaisimpiiri viritetään uudelleen alentamalla enintään yhdeksän SPAD-valodiodin estosuuntaiset etujännitteet ensin läpilyöntijännitteiden alapuolelle, jolloin diodien vyöryläpilyönneissä käynnistyneet sähkövirrat pääsevät sammumaan, minkä jälkeen sammutettujen diodien etujännitteet palautetaan takaisin läpilyöntijännitteiden yläpuolelle. [2][10] Sammutuspiirit toimivat itsenäisesti ja SPAD-diodien vyöryläpilyönnit katkaistaan automaattisesti ilman erillistä ohjausta jokaisen ilmaisun päätteeksi. [2] Alimatriisien SPAD-diodit aktivoitetaan kuitenkin aina vain kerran ja tahdistettuna lähettimeltä saapuvaan aloitusmerkkisignaaliin nähden jokaisen mittauskerran aikana. Toteutuksella estetään SPAD-diodien sattumanvaraiset ja hallitsemattomat uudelleenviritykset.

Idealisesti jokainen SPAD-ilmaisimeen saapunut ja sen p-n-liitoksen tyhjennysalueelle osunut fotonin virittää yhden valenssielektronin materiaalin johtavuuskaistalle, jolloin ionisoituneen atomin elektronikuorelle jää vakanssi, eli elektroniaukko, joka toimii positiivisen varauksenkuljettajan tavoin materiaalin kidehilassa. Voimakkaasti estosuuntaan esijännitetyn valodiodin tyhjennysalueella vaikuttava sähkökenttä kiihdyttää muodostuneen elektroni-aukko-parin, joka törmätessään muihin kidehilan atomeihin käynnistää varauksenkuljettajien ja siten myös sähkövirran eksponentiaalisen kasvun valodiodin läpi, niin sanotun vyöryläpilyönnin. Todellisuudessa kaikki fotonit eivät aiheuta läpilyöntiä, jolloin osa fotoneista jää havaitsematta. Tässä työssä käytetyn SPAD-TDC-ilmaisimen ilmaisutodennäköisyys on noin 5 - 2 %, kun vastaanottimeen saapuneen säteilyn aallonpituus on 800 - 900 nm. [4] Käytettyjen laserdiodien keskiaallonpituudet ovat noin 817 nm. Fotoneiden ilmaisutodennäköisyyttä voidaan parantaa kasvattamalla valodiodin estosuuntaista etujännitettä, jolloin puolijohdeliitoksen tyhjennysalue ja sähkökenttä laajenevat. [10]

SPAD-diodien ilmaisutodennäköisyys paranee merkittävästi laserdiodin toiminta-aallonpituutta lyhyemmillä aallonpituuksilla, minkä vuoksi optisen hyötysignaalin havaitsemiseen käytetään aikaportitusmenetelmää sellaisissa olosuhteissa, joissa hyötysignaalia olisi muutoin vaikea tai mahdotonta erottaa ympäristöstä peräisin olevasta säteilystä. Valodiodien aikaportituksella tarkoitetaan ilmaisimen virittämistä ilmaisuvalmiuteen sopivan aikavälin ajaksi halutulla ajanhetkellä, idealisesti juuri ennen kuin kohteesta heijastuneet kaikkifotonit ovat saapuneet ilmaisimen aktiiviselle alueelle. Muunneltavan kestoisen aikavälillä SPAD-diodien aktivoimiseksi voi olla pienimmillään noin 5 ns:n mittainen ja sen sijainti voidaan asettaa noin 4 ns:n tarkkuudella aikavälimittauksen käynnistävän aloitusmerkkisignaalin (start-pulssin) jälkeen. [2] Menetelmä mahdollistaa hyötyfotoneiden havaitsemisen myös ensimmäistä kohdepintaa kauempana olevista kohteista, mikä on erityisen hyödyllinen ominaisuus monitasoisten kohteiden kuvaamisen kannalta, minkä lisäksi aikaportituksella saadaan suljettua tehokkaasti pois ei-toivottua taustasäteilyä. Esimerkiksi auringon tai sisätilojen keinovalaistuksen, kuten hehkulamppujen, tuottama säteily on hyötypulssin havaitsemisen kannalta haitallista taustakohinaa, jota voidaan vähentää aikaportituksen lisäksi kuvakentän (engl. field of view, lyh. FOV) säätelyllä tai valosuotimilla, jotka läpäisevät säteilyä ainoastaan tietyillä aallonpituuksilla. Ympäristöstä peräisin olevan valon lisäksi toinen merkittävä kohinalähde on pimeäliipaisu, jossa SPAD-diodin tyhjennysalueessa tapahtuu vyöryläpilyönti ilman fotoneiden vaikutusta tai läsnäoloa. Pimeäliipaisu on seurasta termisestä virittymisestä (engl. thermal excitation), jossa valodiodin valenssikaistan elektronit saavat riittävästi energiaa kidehilan lämpövärähtelystä virittyäkseen energiaraon yli johtavuuskaistalle. SPAD-diodin estosuuntaisen etujännitteen kasvattaminen nostaa haitallista pimeäliipaisuutta (engl. dark count rate, lyh. DCR). [4][10]

Vastaanottimissa käytettävä SPAD-TDC-ilmaisimen pystyy toimimaan enimmillään 1 MHz pulssitustaajuudella ja siirtämään miljoona yksittäistä (18 tavun kokoista) mittaustulosta sekunnissa ulkoiselle FPGA-piirille käyttäen kahdeksaa rinnakkaista datalinjaa. [4] Lasertutkien mittaukset suoritettiin kuitenkin maltillisemmalla 100 kHz:n pulssitustaajuudella.

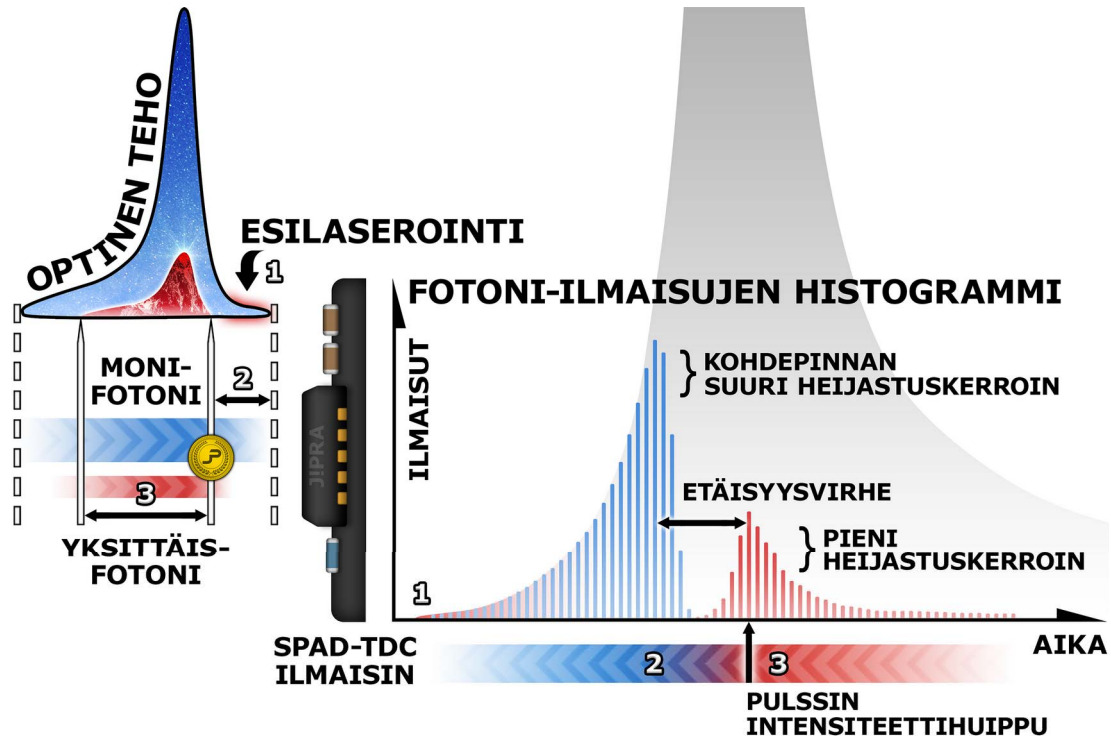
della, jotta lähettimien virtapulssikomponentit eivät lämmenneet liikaa. Komponenttien jäädyttämiseen ei käytetty erillisiä jäädytyslementtejä.

SPAD-ilmaisimpiirissä on suorituskykyinen vastaanottokanava (engl. receiver channel), joka tuottaa tarkkoja digitaalimuotoisia (logiikkatasoisia) ajoitusignaaleja ilmaisimen TDC-osalle aikavälimittausta ja optisen pulssin voimakkuudesta riippuvan ajoitusvirheen kompensointia varten. Vastaanottokanavan ajoituskomparaattorin ulostulosignaaliin esiintyvää optisen hyötypulssin ilmaisuajanhetken poikkeamaa kutsutaan vaellus- tai walk-virheeksi (engl. walk-error), joka on seurausta vastaanottimeen saapuvan hyötypulssin intensiteetin vaihtelusta. [3] Jo yhden nanosekunnin ajoitusvirhe optisen hyötypulssin lopetusmerkkisignaaliin (stop-pulssissa) vastaa noin 15 cm:n virhettä etäisyysmittauksessa. SPAD-diodien vyöryläpilyöntien voimistuminen on sitä nopeampaa, mitä enemmän valodiodien aktiivisille alueille saapuu fotoneita samalla ajanhetkellä. Käytettäessä lasertutkaa esimerkiksi ajoneuvojen havaitsemiseen liikenteessä, ajoneuvosta heijastuneen ja lasertutkan ilmaisimeen saapuvan optisen pulssin dynaaminen alue saattaa olla jopa 1:100 000. [3] Dynaamisen alueen suhdeluku kuvaa mitattavan signaalin pienintä ja suurinta arvoa, jotka ovat erotettavissa mittauksissa esiintyvän taustakohinan seasta. Kohteeseen mitattujen etäisyyksien väliset poikkeamat ovat mahdollisimman pienet, kun etäisyysmittaukset suoritetaan yksittäisfotonitilassa, jolloin ilmaisimeen saapuneiden fotoneiden käynnistämät vyöryläpilyönnit ovat aina yksittäisten fotoneiden aiheuttamia, riippumatta siitä missä kohtaa optista pulssia ilmaisimella havaitsee fotonin. [4]

SPAD-ilmaisimen huojuntavirheellä (ns. jitterillä) tarkoitetaan fotoneiden ilmaisuajankohdan epätarkkuutta, joka on käytettävällä piirillä noin 50 - 100 ps. [4][7] Huojuntavirhe ilmaistaan yleensä tarkasteltavan mittasuureen vaihteluvälin puoliarvoväytenä (engl. full width at half maximum, lyh. FWHM). Ilmaisimen huojuntavirhe määrittää sen aikaresoluution, jota käytetään arvioimaan ilmaisimen tarkkuutta, vastaavalla tavalla kuin laserin erottelukykyä arvioidaan sen optisen pulssin ajallisella puoliarvoväydydellä. Asetettaessa pulssitusjännitteeksi 100V, työn molemmat impulssilähettimet tuottavat laserpulsseja, joiden puoliarvoväydydet ovat noin 150 ps. Vastaanottimien SPAD-ilmaisimet asettavat siten teoreettisen ylärajan molempien lasertutkien parhaalle mahdolliselle erottelukyvylle (1,5 - 3 cm). [4] Puolijohdelaserin ja ilmaisimpiirin huojuntavirheet ovat kuitenkin hyvin lähellä toisiaan, minkä lisäksi niiden toiminalliset suorituskyvyt vastaavat hyvin toisiaan.

Aktiiviseksi valitun SPAD-matriisin (3 x 3) aikavälimittauksen liipaisuut talletetaan asetetun aikaportin kestoiselta aikaväliltä ja mittauksessa käytetyn pulssitustaajuuden määräämällä tahdilla, joka voi olla enimmillään 1 MHz. Tallennettuja liipaisuja kerrytetään aikatasoon 65 ps:n kestoisissa aikaväleissä, jotka vastaavat luokitellun satunnaismuuttujan (liipaisuajanhetken) luokkavälejä (engl. bin) jatkuvassa todennäköisyysjakaumassa. Aikaväleihin kertyvät liipaisumäärät kasvattavat aika-akselille arvopylväitä, joista muodostuu liipaisukertymien histogrammikuvaaja (kuva 10). Ilmaisimen TDC-osan rajoittama histogrammin aikaresoluutio vastaa noin 2 cm:n erottelukykyä, kun aikavälimittaus suoritetaan yksittäisfotonitilassa, jossa ilmaisimeen saapuvan säteilyn intensiteetti on niin matala-

la, ettei ilmaisin pääse liipaistumaan ennen optisen hyötypulssin kirkkainta huippukohtaa, eikä säteilystä aiheudu poikkeamaa mitattavaan etäisyyteen, ns. vaellusvirhettä. Fotoni-ilmaisujen histogrammikuvaajassa yhdistyvät sekä lähettimen että vastaanottimen epäideaalisuuksien (kuten ajoitusvirheiden) summa, minkä vuoksi sitä käytetään arvioimaan laseritutkan kokonaissuorituskykyä.



Kuva 10: Havainnekuva fotoni-ilmaisujen histogrammikuvaajasta. SPAD-TDC-ilmaisimen liipaisutiedot tallennetaan aikatasoon reaaliajassa ja tuloksena saadaan kuva optisesta hyötysignaalista. Kohdassa 1 näkyy esilaserointisäteilyn sijainti optisessa pulssissa. Kohtaan 2 on merkitty tyypillinen monifotonitilan mittaustulos, jossa fotoni-ilmaisut tapahtuvat ennen kohtaan 3 merkittyä pulssin intensiteettiä.

										Ch.5	Ch.7	Ch.2	Ch.5	Ch.7	Ch.2	Ch.5	Ch.7	Ch.2
	0	7	14	21	28	35	42			Ch.6	Ch.3	Ch.9	Ch.6	Ch.3	Ch.9	Ch.6	Ch.3	Ch.9
	1	8	15	22	29	36	43			Ch.4	Ch.8	Ch.1	Ch.4	Ch.8	Ch.1	Ch.4	Ch.8	Ch.1
	2	9	16	23	30	37	44			Ch.5	Ch.7	Ch.2	Ch.5	Ch.7	Ch.2	Ch.5	Ch.7	Ch.2
	3	10	17	24	31	38	45			Ch.6	Ch.3	Ch.9	Ch.6	Ch.3	Ch.9	Ch.6	Ch.3	Ch.9
	4	11	18	25	32	39	46			Ch.4	Ch.8	Ch.1	Ch.4	Ch.8	Ch.1	Ch.4	Ch.8	Ch.1
	5	12	19	26	33	40	47			Ch.5	Ch.7	Ch.2	Ch.5	Ch.7	Ch.2	Ch.5	Ch.7	Ch.2
	6	13	20	27	34	41	48			Ch.6	Ch.3	Ch.9	Ch.6	Ch.3	Ch.9	Ch.6	Ch.3	Ch.9
										Ch.4	Ch.8	Ch.1	Ch.4	Ch.8	Ch.1	Ch.4	Ch.8	Ch.1

Kuva 11: Vasemmalla puolella on esitetty SPAD-ilmaisimen valittavissa olevat alimatriisit ja oikealla puolella jokaisen SPAD-diodin TDC-piirille reititetty pysäytyskanava.

3. LAITETASON KUVAUS

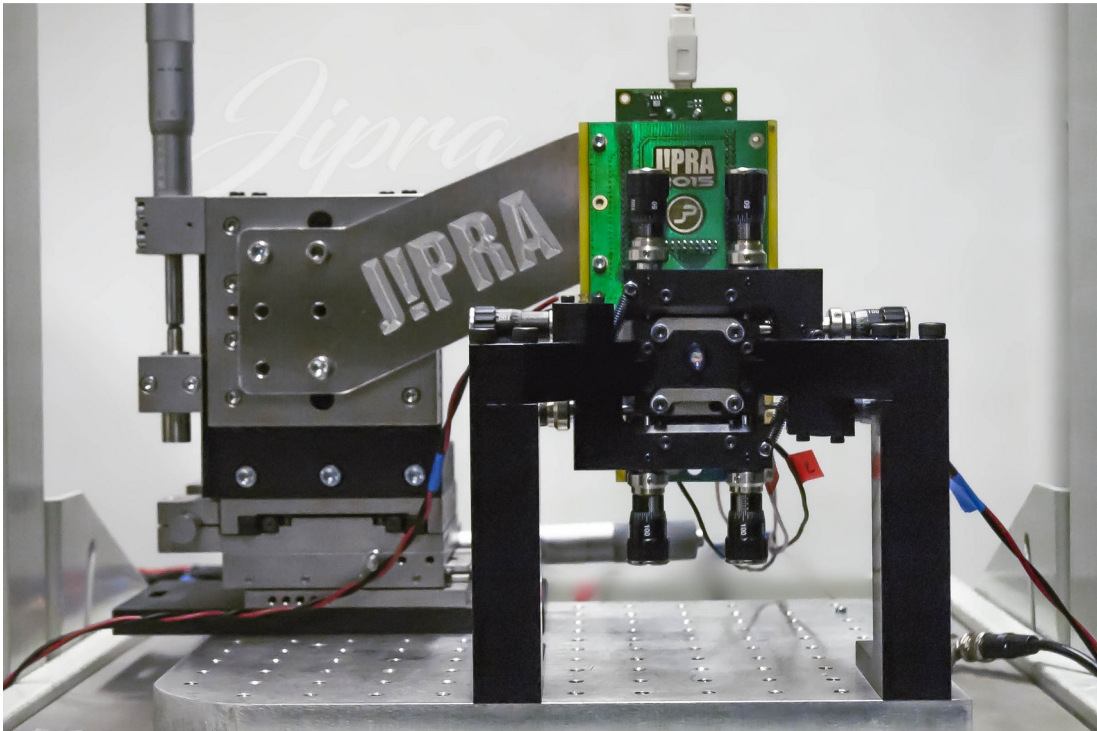
Tässä työssä käsiteltävien lasertutkien lähettimet ja vastaanottimet hyödyntävät samanlaisia elektroniikkasuunnittelua, mutta lasertutkien piirilevytoteutukset ja optomekaniikkarakenteet eroavat toisistaan. Optisen tutkasignaalin tuottamiseen käytetään epäsymmetriseen aaltojohderakenteeseen pohjautuvaa kvanttikaivolaserdiodia ja kaikufotoneiden havaitsemiseen CMOS-tekniikalla valmistettua SPAD-TDC-ilmaisimpiiriä, jotka molemmat ovat kehitetyt Oulun yliopiston CAS-tutkimusyksikössä erityisesti pulssitettua aikavälimittaus- ta ajatellen.

Lasertutkien optomekaniikat ovat erityisesti suunnitellut ja valmistetut Oulun yliopiston tutkimuskäyttöä varten. Molemmat mekaniikat sisältävät optiikat sekä lähettimelle että vastaanottimelle. Miniatyyritutkan optiikka kokoa laserdiodin sädekeilan pistemäiseen ja yksiakseliseen (1D) muotoon, kun taas viirututkassa sädekeilasta muodostetaan kahden sylinterilinssin avulla vaakasuunnasta leveä ja pystysuunnasta kapea viiru (2D).

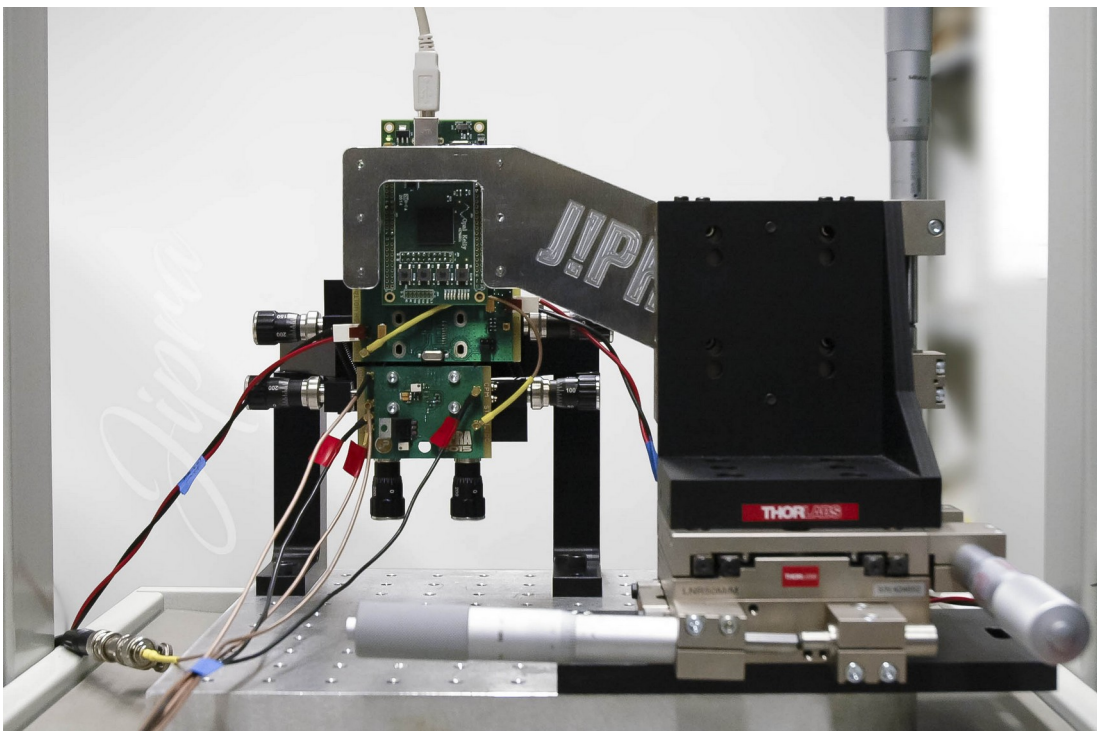
Viirututkan (kuva 12 ja 13) käyttötarkoituksena on havainnollistaa, millaista lopputulosta ja suorituskykyä olisi odotettavissa vastaavanlaiselta lasertutkalta, jossa käytettäisiin 19 kertaa leveämpää SPAD-matriisia ja viirumaista laserkeilaa. Leveämmän SPAD-matriisiin jäljittelemistä varten viirututkan optomekaniikka on suunniteltu niin, että siihen kiinnitettäviä piirilevyjä on mahdollista liikuttaa sekä pysty- että syvyysuunnassa optiikan suhteen. Liikuteltava rakenne osoittautui kuitenkin ongelmalliseksi, joten viirututkan vastaanotinpiirilevy päätettiin kiinnittää erilliseen XYZ-liikuttelijaan alumiinisella jatko- varrella. Viirututkan piirilevyt olivat mahdollisia toteuttaa kaksipuoleisina, koska niiden elektroniikkaa ei ollut tarkoituksenmukaista sovittaa samalle piirilevyille. Viirututkan optomekaniikan suunnittelusta ja valmistuksesta vastasi Macutec.

Miniatyyritutkan (kuva 14 ja 15) toteuttamisen motivaationa on halu tutkia ja havainnollistaa pienikokoisen LA-etäisyysmittaukseen perustuvan lasertutkan toteutuskelpoisuutta ja suorituskykyä. Miniatyyritutkan optomekaniikan suunnittelusta ja toteutuksesta vastasi oululainen Noptel Oy, joka myös suoritti optiikan kohdistamisen ja tarkennuksen lasertutkan piirilevyille. Yritys oli mukana seuraamassa miniatyyritutkan tuloksia pienikokoisten lasertutkien jatkokehitystä ja kaupallista valmistusta varten. Miniatyyritutkan piirilevy toteutettiin kuusikerroksisena, jotta puolijohdelaserin ja SPAD-ilmaisimen aktiivisten alueiden keskipisteet olivat mahdollisia asettaa 20 mm:n etäisyydelle toisistaan ja saada sekä lähettimen että vastaanottimen elektroniikka yhdistettyä samalle pienikokoiselle piirilevyille.

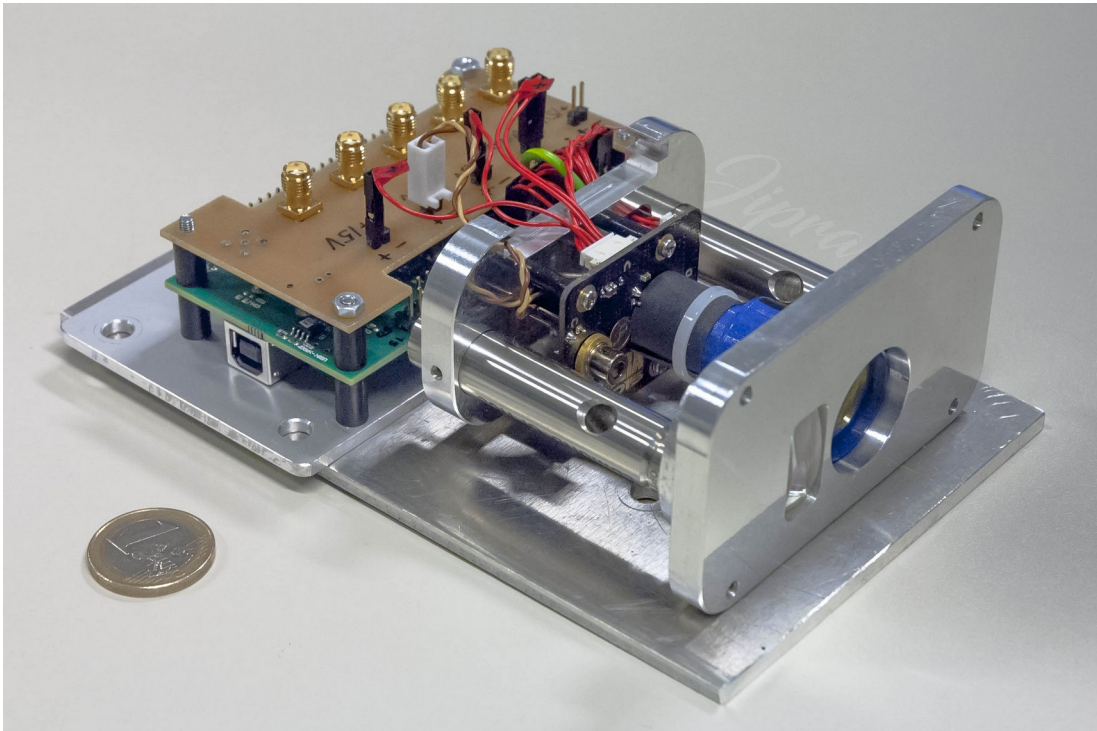
Molemmissa lasertutkissa SPAD-TDC-ilmaisimpiiri on reititetty suoraan erilliseen FPGA-kehitysalustaan, jonka avulla piirin toimintaa voidaan ohjata ja seurata reaaliajassa tietokoneella USB-yhteyden kautta.



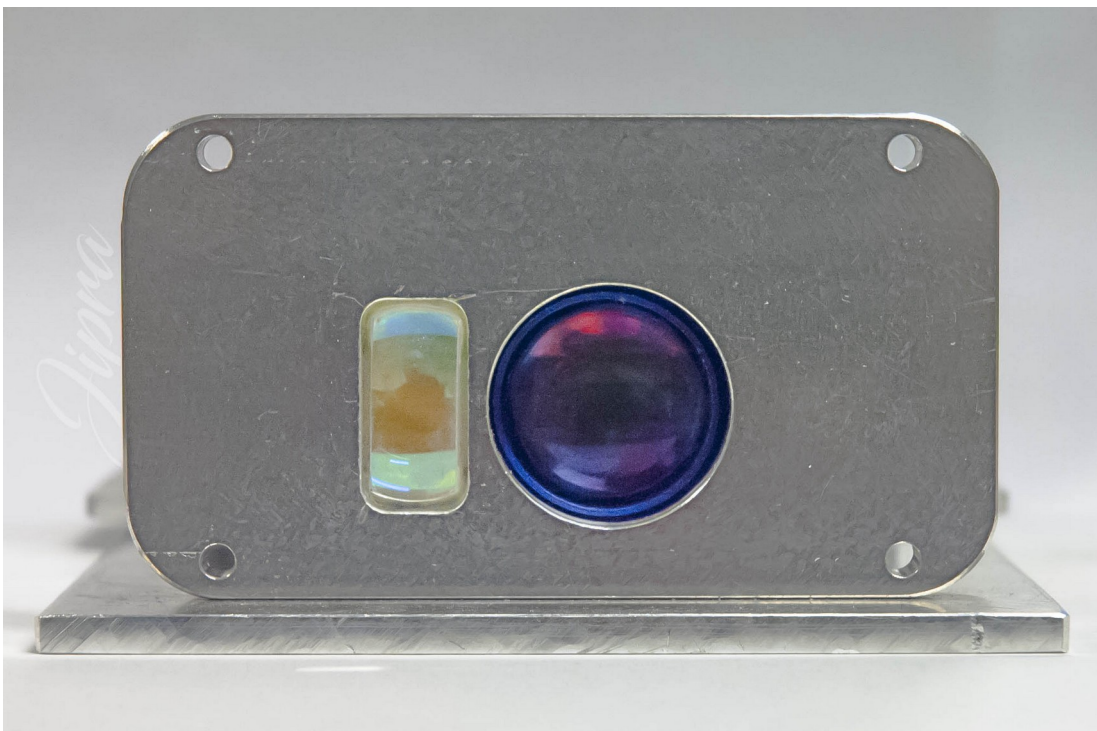
Kuva 12: Viirututka kuvattuna edestäpäin. Kuvan vasemmalla puolella ovat XYZ-liikuttelija ja alumiininen jatkovarsi, johon lasertutkan vastaanotinpiirilevy ja FPGA-kehitysalusta ovat kiinnitetyt. Liikuttelijan oikealla puolella ovat optiikan sisältävä mekaniikka ja siihen kiinnitetty lähetinpiirilevy.



Kuva 13: Viirututka takaapäin. Vasemmalla ovat säädettävä optomekaniikka ja piirilevyt. Mekaniikan oikealla puolella ovat alumiininen jatkovarsi ja XYZ-liikuttelija.



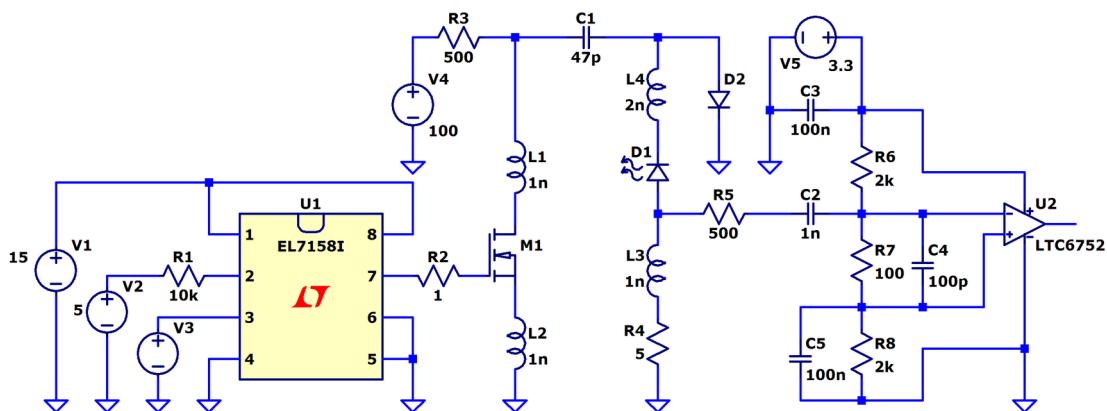
Kuva 14: Miniatyuritutka kokonaisuudessaan.



Kuva 15: Miniatyuritutkan optomekaniikka edestäpäin. Molemmat linssit ovat halkaisijoiltaan 20 mm, mutta vasemman puoleinen lähettimen linssi on hiottu 9 mm leveäksi, jotta linssien keskipisteet ovat saadut asetettua 20 mm:n etäisyydelle toisistaan.

4. PIIRIKORTIT

Työn molemmissa lasertutkissa hyödynnetään pulssitettuun aikavälimittaukseen erityisesti kehitettyä puolijohdelasera, jonka emittoiman pulssin korkea teho mahdollistaa pitkän mittausetäisyyden ja pulssin ajallisesti lyhyt puoliarvoveveys vastaavasti kohteen suuren erottelutarkkuuden. Korkeatehoisen ja ajallisesti kapean optisen pulssin tuottaminen edellyttää laserdiodin läpi johdettavalta virtapulssilta riittävän korkeaa huippuarvoa ja pientä puoliarvovevyyttä, jotta laserdiodin aktiiviseen väliaineeseen viritettyjen elektroneiden lukumäärä ei pääsisi ylittämään laserointikynnystä enää ensimmäisen laserpulssin jälkeen. Lasertutkien lähettimissä käytettyjen pulssituspiirien toiminta perustuu kondensaattoriin varatun sähköenergian purkamiseen laserdiodin läpi nopealla N-tyypin MOSFET-transistorilla. Pulssituspiirin toimintaa mallinnettiin LTspice-ohjelmalla kuvan 16 mukaisella piirikaaviolla, jossa näkyy myös miniatyyritutkassa käytetty aloituspulssin muodostava komparaattorikytkentä.



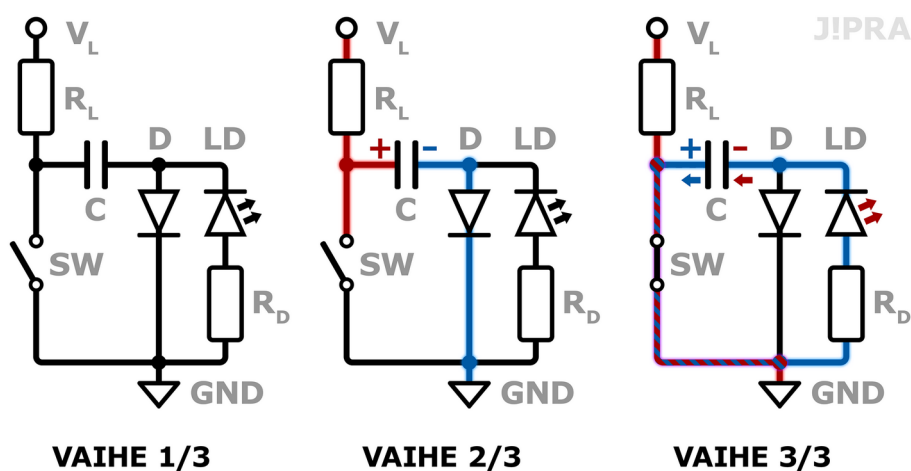
Kuva 16: Simulointikytkentä miniatyyritutkan virtasilukkarakenteelle ja aikavälimittauksen käynnistävän aloituspulssin muodostavalle komparaattorikytkennälle.

Viiru- ja miniatyyritutkassa käytetyn pulssitusrakenteen toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 17. Toimintajakson alussa kondensaattori C varataan jännitteeseen V_L vastuksen R_L ja diodin D kautta. Laserdiodin LD ja vaimennusvastuksen R_D kanssa rinnankytketty diodi D muodostaa maareitin kondensaattorin latausjännitteelle V_L , mutta se myös suojaa laserdiodia liian suurelta vastajännitteeltä kytkimen SW sulkeutuessa ja jännitteen värähdellessä virtapulssin sammumisen jälkeen. Vaimennusvastuksella R_D vaimennetaan todellisessa sähköpiirissä ilmenevää sähköenergian edestakaista liikettä (ts. värähelyä) kondensaattorin ja kytkennässä esiintyvän loisinduktanssin välillä.

Todellisten virtapiirien johtimet ja sähköä johtavat osat sisältävät loisinduktanssia, joihin varautuu energiaa magneettikentän muodossa kytkettäessä sähköjohtimiin jännite. Virtajohtimiin indusoitunut magneettikenttä pääsee purkautumaan, kun virtapiirin jännite katkeaa. Magneettikenttään varastoitunut sähkövaraus ilmenee virtapiirissä jännösjännit-

teenä (ylivärähtelynä), joka ylläpitää piirin sammunutta virtaa siihen asti, kunnes magneetikentän energia on kokonaan purkautunut. Virtapiirin loisinduktanssin kokonaisarvoa mallinnettiin sijoittamalla yksittäiset nH-luokan sarjainduktanssit (L1, L2, L3 ja L4) MOSFET-kytkimen M1 nielulle ja lähteelle, vaimennusvastukselle R4 sekä laserdiodille D1 (kuva 16).

Virtasilmukan NMOS-kytkintä (ON Semiconductor FDMC86244) ohjataan erillisellä ajuripiirillä (Renesas EL7158) ja ulkoisella liipaisujännitteellä. Kytkimen (SW) sulkeutuessa (kuva 17), kondensaattorin (C) aiemmin latausjännitteeseen $+V_L$ varautunut puoli pakotetaan maapotentiaaliin, jolloin vastakkaisen puolen potentiaali muuttuu nollassa arvoon $-V_L$, koska eri puolten välinen varausero ei pysty nollautumaan välittömästi; kondensaattorin yhdelle elektrodille tuodun sähkövarauksen on ensin siirryttävä johtimia pitkin vastakkaiselle puolelle. Kytkimen ollessa suljettuna, kondensaattorin molemmat puolet yhdistyvät maareitin kautta toisiinsa, jolloin elektrodien välille muodostettu potentiaaliero pääsee tasaantumaan. Potentiaalieron äkillinen poistuminen ilmenee virtapiirissä terävänä virtapulssina, joka saa aikaan laserdiodin aktiivisessa väliaineessa varauksenkuljettajien käänteisen miehitystilän, jolloin laserin toiminnan edellyttämä stimuloitu emissio pääsee käynnistymään.



Kuva 17: Viiru- ja miniatyyrituksessa käytetyn virtasilmukkarakenteen toimintaperiaate.

Aikavälimittauksen aloitusmerkkisignaali (start-pulssi) luodaan molemmissa laseritutkissa hyödyntämällä lähettimien virtasilmukkarakennetta. Laserdiodin (D1, kuva 16) läpi johdettava virtapulssi haaroitetaan ja muutetaan vaimennetuksi jännitepulssiksi muodostamalla laserdiodin ja vaimennusvastuksen (R4) väliin uusi solmupiste virranmittausvastuksella (R5). Virtapulssi vaimennetaan riittävän pieneksi jännitteeksi, jotta se voisi liipaista aloitusmerkkisignaalin muodostavan komparaattoriin. Virranmittausvastuksen ja 50 ohmin koaksiaalikaapelin muodostamaa siirtolinjaa oskilloskoopin sisääntuloon kutsutaan virranmittauskanavaksi, koska vaimennettua jännitepulssia hyödynnetään myös laserdiodin läpi johdetun virtapulssin amplitudin määrittämiseen. Virranmittausvastuksen yli

oleva jännite mitataan oskilloskoopilla, jonka jälkeen virtasilmukassa kiertävän virran amplitudi saadaan ratkaistua tunnettaessa virtasilmukan vaimennusvastuksen (R_4) arvo ja virranmittauskanavan vaimennuskerroin.

Oskilloskoopin sisääntuloresistanssi kytkeytyy sarjaan virranmittausvastuksen kanssa, kun virranmittauskanava liitetään oskilloskoopin 50 ohmin sisääntuloon käyttäen 50 ohmin koaksiaalikaapelia. Oskilloskooppi mittaa jännitettä sen sisääntuloresistanssin yli, jolloin virranmittauskanavan vaimennuskerroin saadaan johdettua jännitteenjaon laskukaavasta:

$$M_V = \frac{1}{A_V} = \frac{1}{\left(\frac{R_O}{R_C + R_O}\right)} = \frac{R_C + R_O}{R_O}, \quad (16)$$

jossa M_V on virranmittauskanavan vaimennuskerroin (> 1), A_V on vaimennetun jännitteen suhdeluku (jännitteenjakokaavan siirtofunktio, < 1), R_O on oskilloskoopin sisääntulon resistanssi (50 ohmia) ja R_C on virranmittausvastuksen resistanssi (> 0). Esimerkiksi viirutukan lähettimessä käytetyn virranmittausvastuksen arvoksi mitattiin 905,6 ohmia, joten virranmittauskanavan vaimennuskertoimeksi saatiin 19,112.

Viirututkassa aloitusmerkkisignaali muodostetaan muuntamalla virranmittausvastuksen yli oleva jännite ensin LVPECL-logiikkatason signaaliksi komparaattoripiirillä (Analog Devices ADCMP551), jonka jälkeen se muunnetaan lopulliseen 3,3 V:n CMOS-logiikkatason signaalimuotoon translaattorilla (ON Semiconductor MC100EPT-21). Miniaturitutkassa aloituspulssi muodostetaan yhdellä komparaattoripiirillä (Analog Devices LTC6752), jonka ulostulosignaali on valmiiksi 3,3 V:n CMOS-tasoisessa muodossa. Vaihtoehtoinen ja toteutukseltaan hieman monimutkaisempi menetelmä aloitusmerkkisignaalin muodostamiselle olisi hyödyntää optisen pulssin ilmaisua myös laserlähettimessä.

4.1. Viirututka

Viirututkan vastaanottimen elektroniikka muodostuu varsinaisen SPAD-TDC-ilmaisimen lisäksi ohituskondensaattoreista, 20 MHz taajuudella värähtelevästä kiteestä sekä liittimistä. SPAD-TDC-piirin käyttöjännitealue on 3,0 - 3,6 V, joten siihen on mahdollista kytkeä sama ulkoinen jännitelähde kuin vastaanotinpiirilevylle asennettavaan Opal Kelly XEM-6001 FPGA-kehitysalustaan, jonka käyttöjännite on 3,3 V. Ilmaisimen käyttöjännitteen lisäksi myös sen kaikki ulos- ja sisääntulosignaalit ovat LVCMOS-tasoisia. Viirututkan kaksipuoleinen vastaanotinpiirilevy on 82 mm leveä ja 102 mm korkea (kuva 21).

Ilmaisimpiirin TDC-osa tahdistaa itsensä automaattisesti ulkoisen vertailukellosignaalin (20 MHz) jaksonaikaan. Vastaanottimen piirilevylle asennetun pintaliitoskiteen lisäksi levylle on toteutettu mahdollisuus kytkeä SPAD-TDC-ilmaisimpiirille ulkoinen kello-

signaali SMA-liittimien kautta tai käyttää vaihtoehtoisesti FPGA-levyn tuottamaa kellopulssia. Käytettävä vertailukellopulssi valitaan kahden hyppyliittimen (engl. jumper) avulla.

Viirututkan vastaanottimessa käytetään FPGA-levyn kolmen liitinkannan lisäksi kahta MMCX-liitintä ilmaisimen aloitusmerkkisignaaliin ja ulkoiselle vertailukellosignaaliin sekä kahta virtaliitintä levyn käyttöjännitteelle ja SPAD-diodien estosuuntaiselle etujännitteelle. Levylle kytketty FPGA-levy sekä varsinainen SPAD-TDC-piiri toimivat samalla 3,3 V:n käyttöjännitteellä. SPAD-ilmaisimen fotonilmaisutodennäköisyys on suoraan verrannollinen SPAD-diodien estosuuntaiseen etujännitteeseen, joka voidaan asettaa ulkoisella jännitelähteellä turvallisesti välille 3,3 - 21,5 V. Mittauksien aikana SPAD-diodien jännite asetettiin hieman enimmäisjännitettä korkeammaksi arvoon 22,4 V piirin suorituskäytön parantamiseksi.

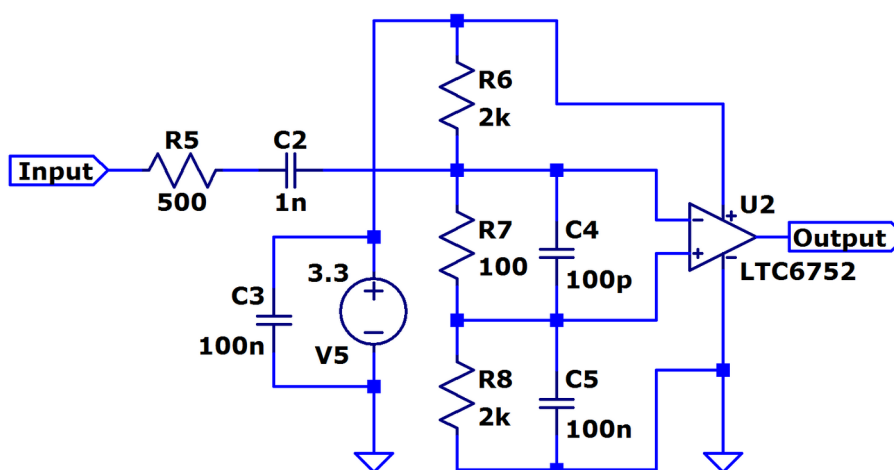
Vastaanottimelle siirrettävä aloitusmerkkisignaali luodaan viirututkan lähettimessä komparaattoripiirillä, jonka sisääntulojen (-INA ja +INA) jännite voi olla enintään 1,3 V. Komparaattorin ulostulo tarjoaa riittävästi virtaa kytkettäväksi suoraan siirtolinjaan, joka on päätetty 50 ohmin vastukseen ja 1,3 V:n jännitetasoon. Komparaattorin kääntävä ulostulo (\overline{QA}) vaihtaa tilaansa loogiseksi ykköseksi, kun negatiivisen sisääntulon jännite alittaa positiivisen sisääntulon jännitteen. Molemmissa sisääntuloissa käytetään jännitteenjakokytkentöjä, joilla jännitetasot asetetaan halutuiksi. Positiiviseen sisääntuloon on toteutettu jännitteenjako säätövastuksella, jolla jännitetaso saadaan asetettua välille 0 - 1,2 V, koska toiseen sisääntuloon syötettävän jännitepulssin negatiivinen amplitudi riippuu käytettävästä pulssitusjännitteestä. Negatiivisen sisääntulon kiinteä jännitejako on suunniteltu asettamaan jännitetaso noin 1,3 V:iin, minkä lisäksi jännitejako toimii virtasilinukasta syötettävälle vaihtojännitteelle (virtapulssille) 50 ohmin päätevastuksena. Toteutuksen ei kuitenkaan tarvitsisi toimia siirtolinjan terminointina, koska käytettävä komparaattori ei sellaista vaadi, eikä sisääntulon johdinta ole sovitettu 50 ohmiseksi. Lisäksi kytkentä on sijoitettu negatiivisen sisääntulon eteen, vaikka terminointia ajatellen se kuuluisi sijoittaa sisääntulon jälkeen, jolloin siirtolinja säilyisi sovitettuna piirin sisääntuloon asti.

Lähetinpiirilevy sisältää yhteensä kuusi MMCX-liitintä, joista puolet ovat virtaliittimiä ja puolet vaihtojännitteiden sisään- ja ulostuloliittimiä. Virtaliittimet muodostuvat virtasilinukan pulssitusjännitteestä, MOSFET-kytkimen ajuripiirin käyttöjännitteestä sekä lineaarisen jänniteregulaattorin syöttöjännitteestä. Virtasilinukassa käytettävä MOSFET-transistori kestää enimmillään 150 V:n jännite-eroa nielun ja lähteen välillä. Transistoria ohjaavan pinniajurin käyttöjännitteeksi on asetettu 15 V, joka on hieman enemmän kuin valmistajan suosittama 12 V:n käyttöjännite, mutta kuitenkin vähemmän kuin sen suurin mahdollinen 18 V:n enimmäisjännite. Komparaattori- ja translaattoripiirien käyttöjännitteet ovat muodostetut levyn lineaarisella regulaattorilla, joka on asetettu alentamaan 5 V:n syöttöjännite 3,3 V:n tasolle säätövastuksella. Yksi levyn kolmesta signaaliliitimestä on transistorin pinniajurin liipaisusignaali, jonka avulla levyn pulssitustaajuus on säädettävissä enimmillään 1 MHz:n suuruiseksi, mutta mittauksien aikana pulssitustaajuutena on käy-

tetty 100 kHz. Aikavälimittauksen käynnistävä aloituspulssi siirtyy vastaanottimelle, SPAD-TDC-ilmaisimen tuloon, levyn toisen signaaliliittimen kautta. Virtapulssista muodostettava vaimennettu jännitepulssi ohjautuu 50 ohmin siirtolinjaksi sovitettua johdinta pitkin levyn viimeiseen signaaliliittimeen, joka on virranmittauskanavan ulostuloliitin. Vii-rututkan lähettimen piirilevy on kaksipuoleinen ja kooltaan 45 mm leveä ja 65,4 mm kor-kea (kuva 20).

4.2. Miniattyritutka

Miniattyritutkan piirikaavio muodostuu virtapulseja tuottavan virtasilmukan lisäksi aloi-tusmerkkisignaalien komparaattorikytkennästä (kuva 18) sekä SPAD-TDC-piiristä. Levyn virtasilmukkarakenne tuottaa virtapulseja, jotka ovat 100 V:n pulssitusjännitteellä lähes 6,5 ampeerin suuruisia ja noin 1 ns:n kestoisia (kuva 25). Jännitemuotoon vaimennetut vir-tapulssit muunnetaan komparaattoripiirillä CMOS-logiikkatason pulsseiksi, jotka ohjataan suoraan SPAD-piirin sisääntuloon. Virtasilmukan pulssitusjännite tuodaan levyllä tilan säästämiseksi hyppyliittimellä. Myös lähettimen virranmittauskanavan ja komparaattori-kytkennän ulostulot ovat kaksipinnisiä hyppyliittimiä. Levyn kaksi muuta liitintä ovat mo-nipinnisiä pintaliitosliittimiä, jotka sisältävät levyn käyttöjännitteiden lisäksi ilmaisimpiirin datalinjat sekä ulkoisen liipaisusignaalin transistorin ajuripiirille. Levyn loput komponentit muodostuvat jännitelinjojen ohituskondenssaattoreista sekä ilmaisimen pintaliitoskitekistä. Miniattyritutkan kuusikerroksinen piirilevy on 40,5 mm leveä ja 35 mm korkea (kuva 22).

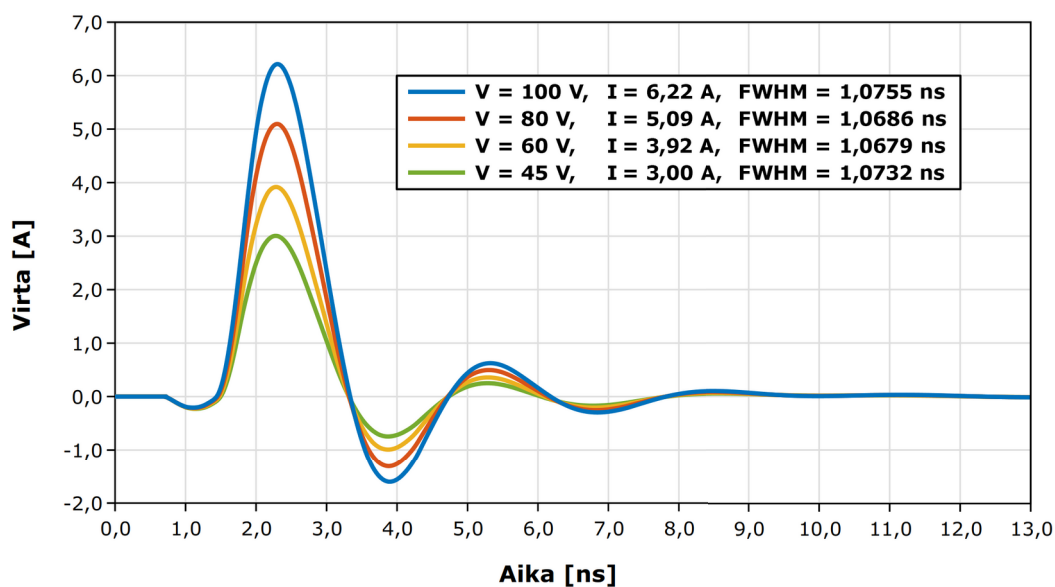


Kuva 18: Miniattyritutkan komparaattorikytkentä aloitusmerkkipulssin muodostamiseen.

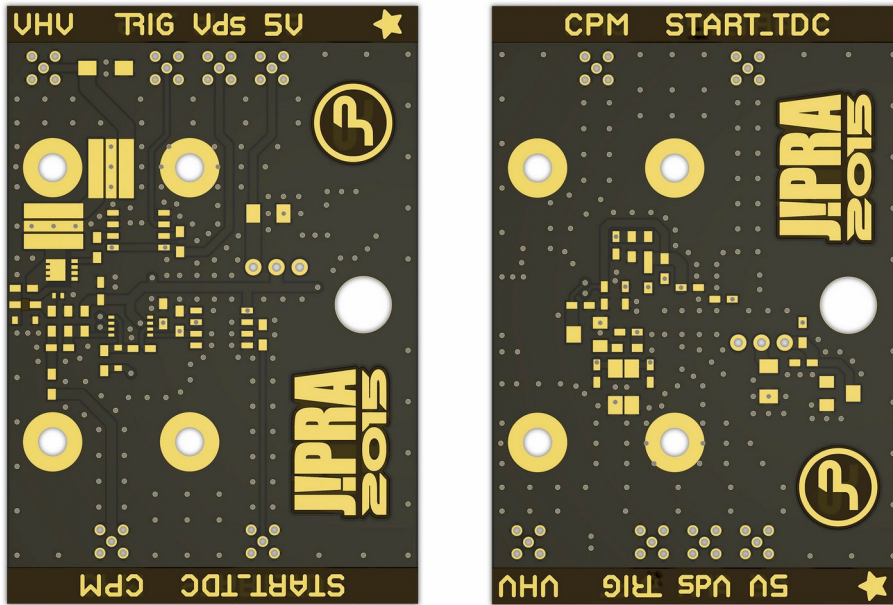
Levyn komparaattorikytkennän (kuva 18) kytkentäkondenssaattorilla (engl. coupling capacitor) C2 estetään, ettei tasajännite V5 pääse vaikuttamaan virtapulssipiiriin ja virranmittauskanavan puolelle. Virtapulssista aiheutuva jännitteenvaihtelu ilmenee kuitenkin kondenssaattorin molemmissa johdelevyissä. Jännitelähteen V5 rinnalle kytketyn ohitus-

kondensaattorin C3 merkityksenä on varastoida sähkövarausta ja luovuttaa sitä tarvittaessa komparaattoripiirille (U2) sen vaihtelevan virrantarpeen mukaan. Vastuksien R6, R7 ja R8 avulla saadaan muodostettua sopivat jännitetasot komparaattorin sisääntuloihin niin, että positiivisen sisääntulon jännitetaso asettuu hieman negatiivista sisääntuloa alemmaksi. Vastaavalla tavalla kuin viirututkan lähettimessä, komparaattori vaihtaa tilaansa loogiseksi ykköseksi, kun negatiivisen sisääntulon jännite alittaa positiivisen sisääntulon jännitteen. Komparaattorin sisääntulojen väliin sijoitettu C4 muodostaa yhdessä vastuksen R7 kanssa RC-piirin, jolla kasvatetaan virranmittauskanavasta saapuvan jännitepulsstin kestoa niin paljon, että komparaattorin negatiivisen sisääntulon kynnysjännite pysyy alittuneena riittävän pitkän aikaa. Kondensaattori C5 varautuu vastuksien R6, R7 ja R8 kautta samaan jännitteeseen kuin komparaattorin positiivinen sisääntulo, jonka jälkeen se pystyy pitämään positiivisen sisääntulon jännitetason käytännössä muuttumattomana, kun virtapulssipiiriltä saapuva jännitepulssi laskee negatiivista sisääntuloa reilusti alaspäin.

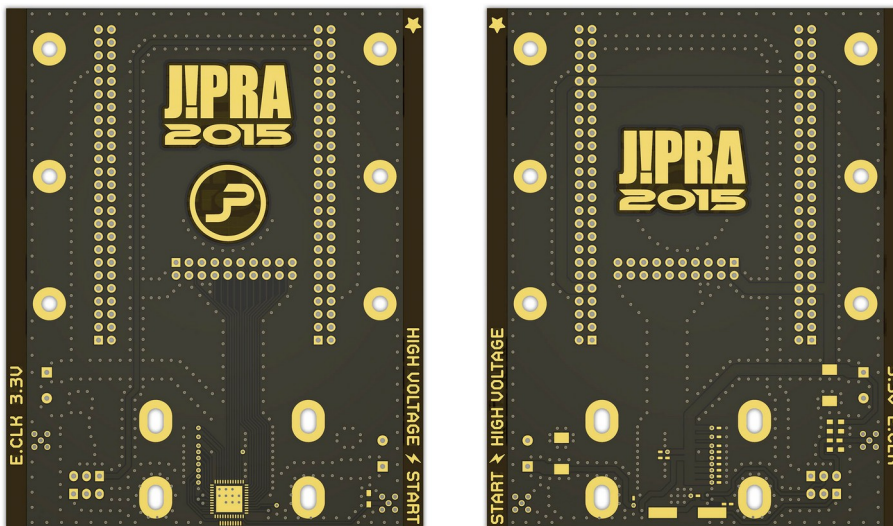
Virtapulssittimen simuloinnin tavoitteena oli löytää mahdollisimman hyvät komponenttiarvot puoliarvoleveydeltään yhden nanosekunnin kestoisen virtapulssin muodostamiseen. Simulointien perusteella virtapulssin amplitudiin ja ajalliseen keston voidaan vaikuttaa merkittävästi pelkästään varauskondensaattorin, latausvastuksen ja latausjännitteen arvoja muuttamalla. Piirilevysuunnittelussa on tärkeää pyrkiä pienentämään komponenttien välisiä etäisyyksiä ja johdinvetojen pituuksia, jotka lisäävät virtapiirissä esiintyvää loisinduktanssia. Virtasilmukassa esiintyvä haitallinen loisinduktanssi pienentää virtapulssin huippuarvoa ja kasvattaa pulssin puoliarvoleveyttä, mikä on havaittavissa myös piirin toimintaa simuloimalla. Kuvassa 19 on esitetty virtapulssin simulointitulokset molempien lasertutkien lähettimissä käytetyille virtasilmukkarakenteelle.



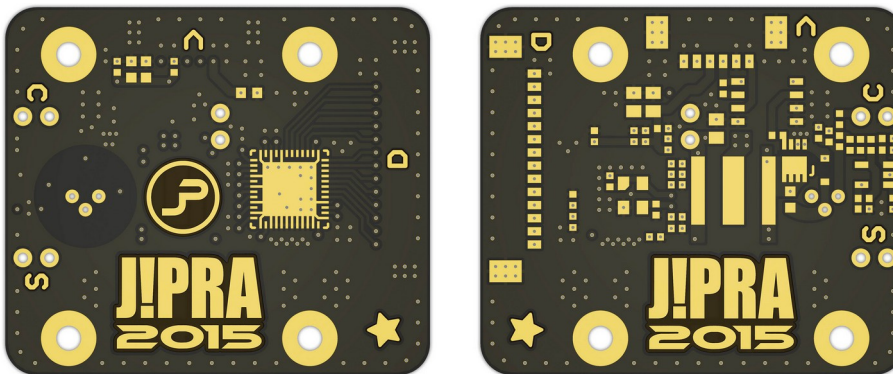
Kuva 19: Virtapulssin simulointitulokset eri latausjännitteen arvoilla, kun virtasilmukassa ladattavan kondensaattorin kapasitanssiarvo on 47 pF.



Kuva 20: Viirututkan lähetinpiirilevy etu- ja takapuolelta.



Kuva 21: Viirututkan vastaanotinpiirilevy.



Kuva 22: Miniaturisoidun piirilevyn, johon on integroitu sekä lähetin että vastaanotin.

5. MITTAUSTULOKSET

Laserpulssittimien suorituskykyä arvioitiin aikatasomittauksilla, joissa selvitettiin lähettimien virta- ja laserpulssien huippuarvot sekä puoliarvoveydet. Ennen oskilloskoopilla suoritettavia mittauksia lasertutkien lähettimistä irrotettiin kytkentäkondensaattorit komparaattoriin sisääntuloista, jotta kondensaattorit eivät aiheuttaneet häiriöitä virranmittauskanavaan ja mitattavaan jännitepulssiin. Käytetyt laserdiodeit olivat rakenteiltaan kvanttikaivotyypisiä ja niiden aktiiviset alueet olivat 30 μm leveitä ja 3 mm pitkiä. Virtapulssit muodostettiin pintaliitoskondensaattoreilla, joiden kapasitanssiarvot olivat 47 pF. Käytettyjen laserdiodein keskiaallonpituudet olivat noin 817 nm ja ne mitattiin käyttäen Hamamatsu C5680 pyyhkäisykameraa (engl. streak camera).

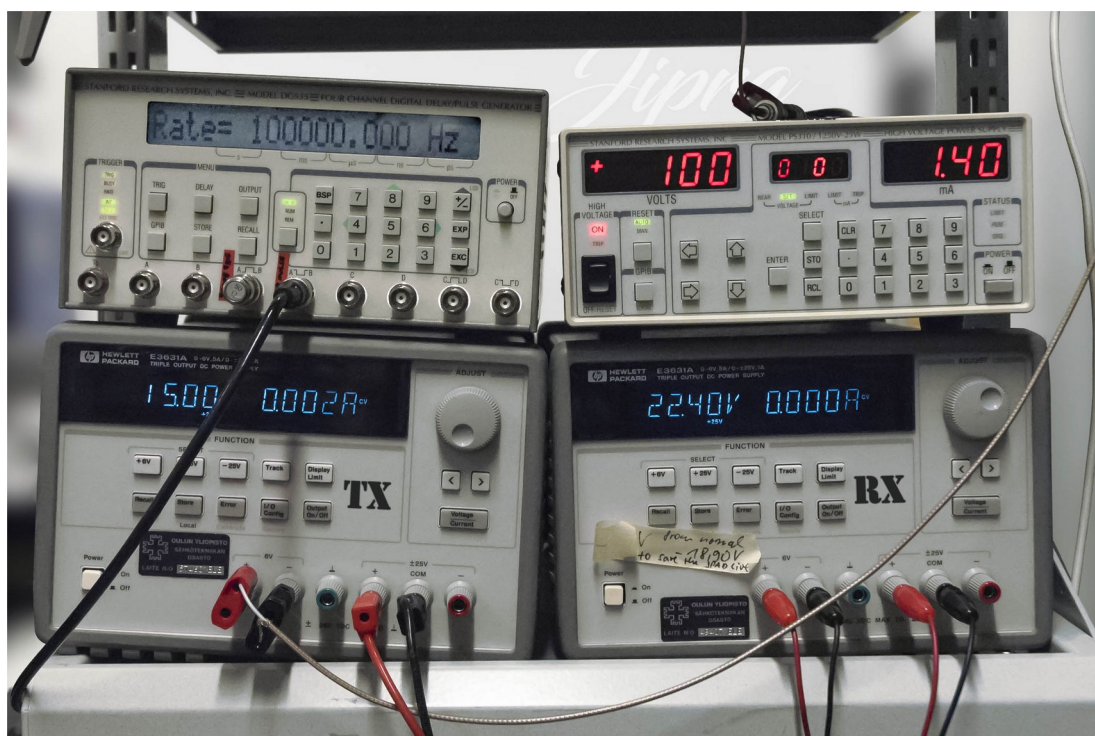
Laserlähettimien aikatasomittaukset suoritettiin muuntamalla lasereiden optinen energia jännitemuotoon käyttäen optinen-sähkömuunninta (engl. optical-to-electrical converter, lyh. OE) ja kytkemällä signaali sitten oskilloskoopin mittauskanavaan. Lasereiden valokeilat kohdistettiin ensin pienikokoiseen linssipariin (Thorlabs C230220P-B) säteilyn keräämiseksi optiseen kuituun, jonka toiseen päähän kytkettiin kollimaattori (Thorlabs F220FC-B). Lasersäde siirtyi ensimmäisen kollimaattorin perään sijoitetun optisen vaimentimen läpi toiseen kollimaattoriin ja lopulta takaisin kuituun. Vaimennettu optinen pulssi muunnettiin jännitemuotoiseksi OE-muuntimella (New Focus 1434), jonka ulostulo kytkettiin oskilloskoopin (Agilent Infiniium DSO-91204A 12 GHz) sisääntuloon.

Aikatasomittauksen jälkeen laserdiodein emittoiman säteilyn keskimääräinen teho mitattiin valodiodein ilmaisimen ja valoilmainsinvahvistimen avulla. Mittauksessa käytettiin samaa pulssitusjännitettä ja -taajuutta kuin aikatasomittauksessa, jotta mittaukset täydensivät toisiaan. Valoilmainsinvahvistimen ulostulojännite mitattiin digitaalisella yleismitarilla ja tulos muunnettiin tehoksi erityisen muunnoskaavan avulla. Säteilyn keskimääräisestä tehosta laskettiin yksittäisen pulssin keskimääräinen teho jakamalla mitattu tulos käytetyllä pulssitustaajuudella. Aikatasomittauksien tulokset siirrettiin tietokoneelle, jonka jälkeen optisen pulssin jännitemuotoon muutetulle intensiteettijakaumalle saatiin laskettua pinta-ala aikatasossa Matlab-ohjelmistolla. Laskettu pinta-ala asetettiin yhtä suureksi kuin optisen pulssin keskimääräinen teho, jolloin tuloksena oli yksittäisen laserpulssin keskimääräinen teho aikatasossa.

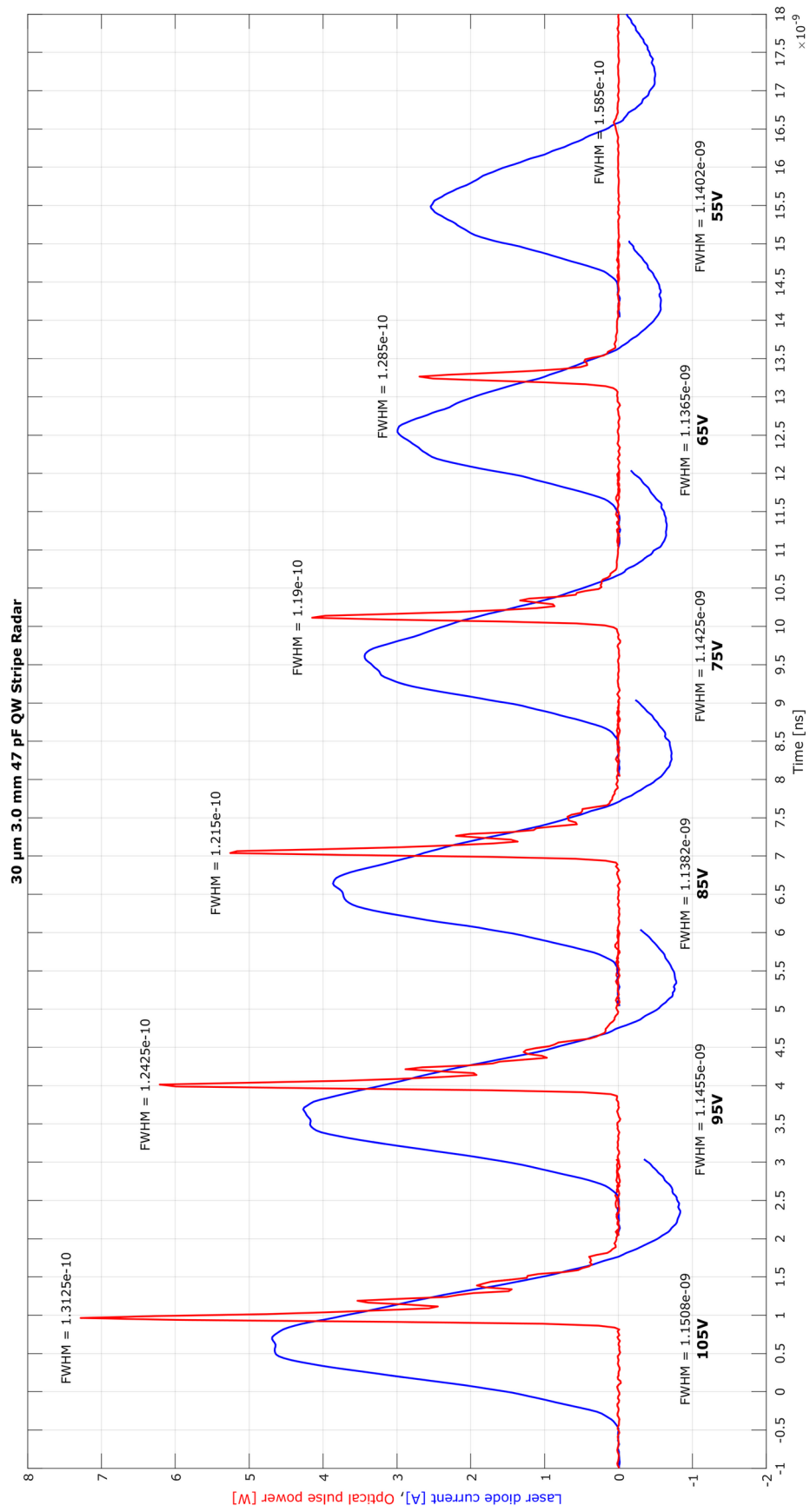
Viirututkan aikatasomittauksissa pulssitustaajuudeksi asetettiin 10 kHz. Virtapulssien keskimääräiseksi puoliarvoveydeksi mitattiin noin 1,1 ns ja optisten pulssien vastavasti noin 120 ps (kuva 24). Esimerkiksi 85 V:n pulssitusjännitteellä virtapulssin huippuarvoksi saatiin laskennallisesti vajaa 4 A ja optisen pulssin huipputehoksi reilu 5 W. Mittaustuloksien perusteella lähettimen virtasilmuksien rakenteessa esiintyi hieman enemmän haitallista loisinduktanssia kuin mihin piirilevysuunnittelussa pyrittiin. Kytkennän suurempi induktanssimäärä näkyi paitsi optisen pulssin ylimääräisenä jälkioskillaationa (optisena häntänä) niin myös virtapulssin pienempänä amplitudina ja kasvaneena leveytenä.

Viirututkan puolijohdelaser oli kiinnitetty pieneen keraamiseen alustaan sähköä johtavalla liimalla ja kulturalankaliitoksilla. Keraaminen alusta ja siihen liimattu laseriodi kiinnitettiin viirututkan lähettimeen käyttäen samaa sähköä johtavaa liimaa. Miniattyritutkassa puolijohdelaser oli sitä vastoin asennettu TO-tyyppiseen (engl. transistor outline package) koteloon, jossa haitallista loisinduktanssia esiintyi luultavasti hieman enemmän kuin viirututkassa käytetyssä laserin kiinnitysratkaisussa. Miniattyritutkan aikatasomittauksien tulokset (kuva 25) olivat kuitenkin erinomaiset ja sen tuottamat virtapulssit olivat muodoiltaan huomattavasti parempia kuin sille etukäteen simuloiduissa tuloksissa (kuva 19). Miniattyritutkassa sekä virta- että laserpulssien puoliarvoveveydet olivat pienimmillään 60 V:n pulssitusjännitteellä, jolloin virtapulssien puoliarvoveveydet olivat noin 990 ps ja optisten pulssien vastaavasti noin 103 ps. Miniattyritutkan kapeimmat virtapulssit olivat amplitudiltaan noin 4 A ja laserpulssit vastaavasti huipputehoiltaan noin 4,5 W.

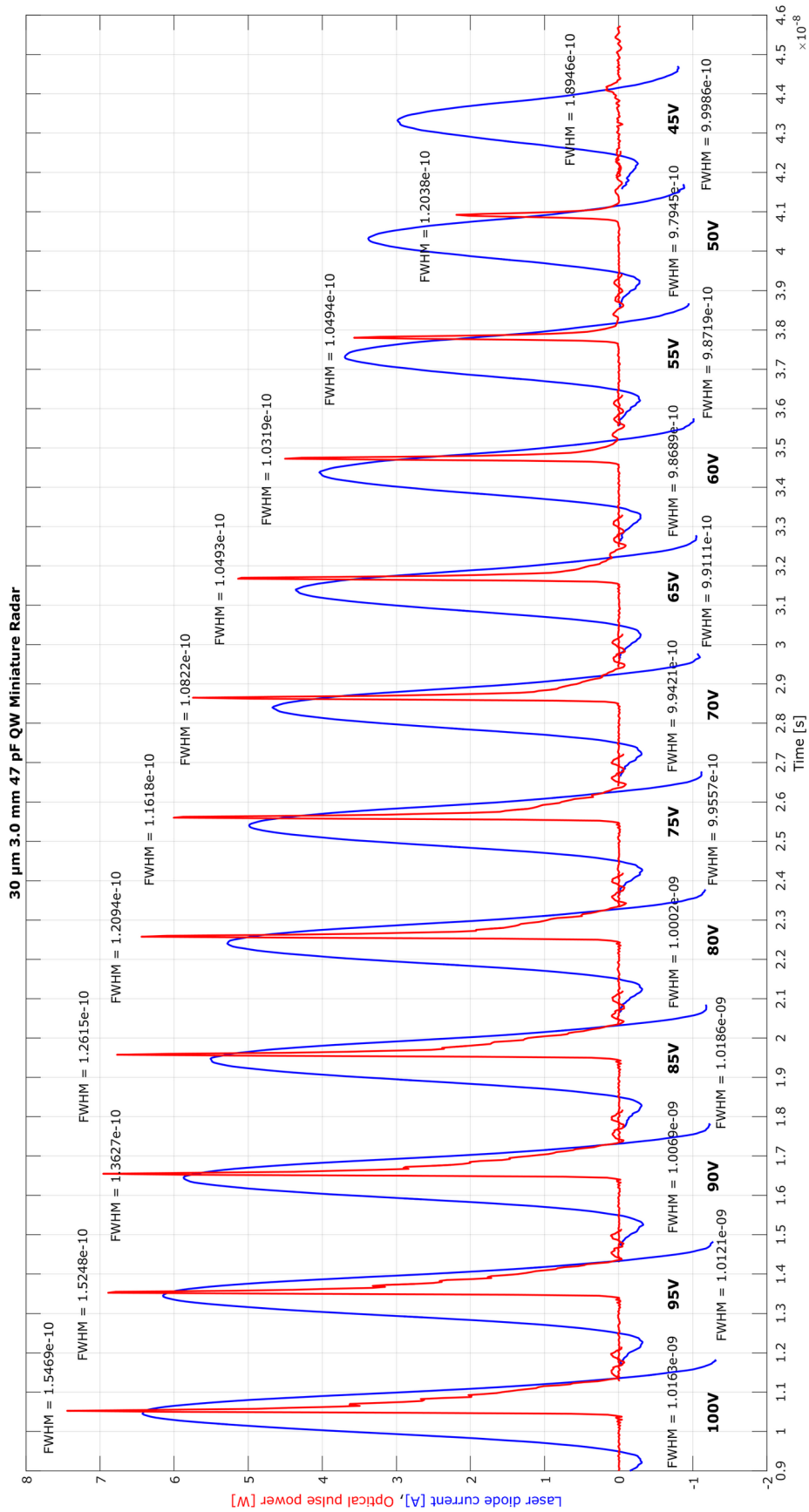
Lasertutkien korkeintaan 25 V korkeiden käyttöjännitteiden muodostamiseen käytettiin Hewlett-Packard E3631A 80 W:n jännitelähdettä. Virtasilmukkakytkennän kondensaattori varattiin enintään 150 V:n jännitteeseen Stanford Research Systems PS310 jännitelähteellä. MOSFET-transistoria ohjaavan pinniajurin liipaisupulssi muodostettiin Stanford Research Systems DG535 digitaalisella viive-/ pulssigeneraattorilla. Kuvassa 23 näkyvät molempien lasertutkien mittauksissa käytetyt jännitelähteet sekä pulssigeneraattori.



Kuva 23: Laserlähettimien pulssitustahdit asetettiin kuvan vasemmassa yläkulmassa näkyvällä pulssigeneraattorilla. Lasertutkien kaikki käyttöjännitteet muodostettiin kuvan alarivillä ja oikeassa yläkulmassa näkyvillä jännitelähteillä.



Kuva 24: Viirutukan lähettimelle mitatut arvot virtapulssin amplitudille ja optisen pulssin keskimääräiselle teholle eri pulssitusjännitteen arvoilla.



Kuva 25: Miniatyiritutkalle mitatut arvot virtapulssin amplitudille ja optisen pulssin keskimääräiselle teholle eri pulssitusjännitteen arvoilla.

6. YHTEENVETO

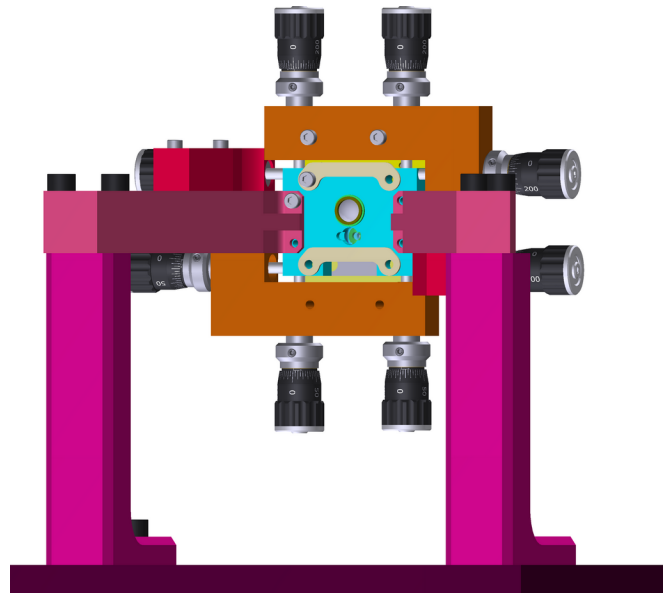
Työn tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa piirilevyt kahteen lasertutkaan, jotka olivat käytössä Oulun yliopiston ITEE-tiedekunnan CAS-tutkimusryhmän hankkeessa. Työssä esiteltiin lasertutkien toimintaan liittyviä käsitteitä ja ilmiöitä, kuten fotonilmaisimen yksittäis- ja monifotonitila sekä fotoneiden Poisson-jakautuneisuus. Lisäksi työssä käytiin lyhyesti läpi puolijohdelasereiden rakennetta ja toimintaperiaatetta, koska toiveenani oli saada tutkielmaani keräämäni tieto vapaasti saataville suomenkielisessä muodossa. Puolijohdelasereiden tekniikkaa käsitteleviä tekstejä löytyy runsaasti englanninkielellä, mutta suomenkielistä materiaalia on tarjolla hyvin niukasti. Työn lasertutkissa käytetyn puolijohdelaserin ja SPAD-TDC-ilmaisimen toiminnan esittelemisen jälkeen työssä käytiin läpi piirilevyjen kytkentäkaaviot ja virtapulssittimen simulointitulokset. Työn lopussa esiteltiin mitaustulokset valmiiden lasertutkien lähettimille.

Viirututka suunniteltiin ja toteutettiin sellaiseksi, että sen avulla pystyttiin havainnollistamaan toteutuskelpoisuutta lasertutkalle, jossa käytettäisiin 19 kertaa leveämpää SPAD-matriisia ja viirumaista laserkeilaa. Leveämmän ilmaisimen simulointi edellytti, että viirututkan vastaanotinta pystyttiin liikuttamaan sivuttaissuunnassa sen optiikkaan nähden, minkä vuoksi lasertutkaan toteutettiin erilliset piirilevyt lähettimelle ja vastaanottimelle. Viirututkan optomekaniikka (kuva 26) sisälsi yhteensä kahdeksan eri mikrometri-ruuvia, joiden avulla mekaniikkaa oli mahdollista säätää useaan eri suuntaan. Vastaanottimen piirilevyille päätettiin kuitenkin suunnitella ja toteuttaa erillinen alumiininen jatkovarsi, jonka avulla vastaanotin saatiin kiinnitettyä XYZ-liikuttelijaan. Optomekaniikan ja erillisen liikuttelijan yhdistelmä osoittautui hyvin toimivaksi ratkaisuksi lasertutkan testaamisen kannalta. Viirututkan lähettimelle suoritetuissa aikatasomittauksissa virtapulssien keskimääräiseksi puoliarvovevyydeksi mitattiin noin 1,1 ns ja optisten pulssien vastaavasti noin 120 ps, kun pulssitusjännitteenä käytettiin 55 - 105 V.

Miniatyyritutkan avulla havainnollistettiin mahdollisimman pienikokoisen puolijohdetekniikkaan perustuvan lasertutkan toteutuskelpoisuutta. Projektin lähtökohtana oli saada yhdistettyä sekä lähetin että vastaanotin samalle piirilevyille. Miniatyyritutkan suunnittelu ja toteutus tehtiin yhteistyössä paikallisen Noptel Oy:n kanssa. Toisin kuin viirututkassa, jossa piirilevyt suunniteltiin yhteensopiviksi aiemmin valmistetun optomekaniikan kanssa, miniatyyritutkan lähetinvastaanotin suunniteltiin ja toteutettiin yhtä aikaa sen optomekaniikan kanssa. Noptel Oy oli myös vastuussa järjestelmän lopullisesta kasaamisesta ja optiikan fokuosoinnista. Miniatyyritutkalle suoritetuissa aikatasomittauksissa sekä virtaetta laserpulssien puoliarvovevyydet olivat pienimmillään 60 V:n pulssitusjännitteellä, jolloin virtapulssien puoliarvovevyydet olivat noin 990 ps ja optisten pulssien vastaavasti noin 103 ps.

Molempien lasertutkien piirilevyt sekä viirututkan alumiininen jatkovarsi olivat niiden suunnittelun ja valmistukseen vaadittujen piirustusten osalta valmiita alle puolessa

vuodessa. Työssä toteutettujen piirilevyjen suunnittelu onnistui hyvin eikä levyjen rakenteesta paljastunut suurempia ongelmia. Viirututkan piirilevytoteutus sen lähettimen virtasilmukkarakenteen osalta olisi voinut olla hieman parempi, koska rakenteessa esiintyi hieman liikaa loisinduktanssia, joka olisi ollut mahdollista saada poistettua virtasilmukan tiiviimmällä osasijoittelulla. Viirututkan jälkeen toteutetun miniatyyritutkan suorituskyky sitä vastoin vastasi sille asetettuja odotuksia. Miniatyyritutkan aikatasomittauksissa lasketujen virtapulssien puoliarvoveydet ja amplitudit (kuva 25) jopa ylittivät niille etukäteen simuloidut arviot (kuva 19).



Kuva 26: Kolmiulotteinen mallipiirros viirututkan optomekaniikasta.

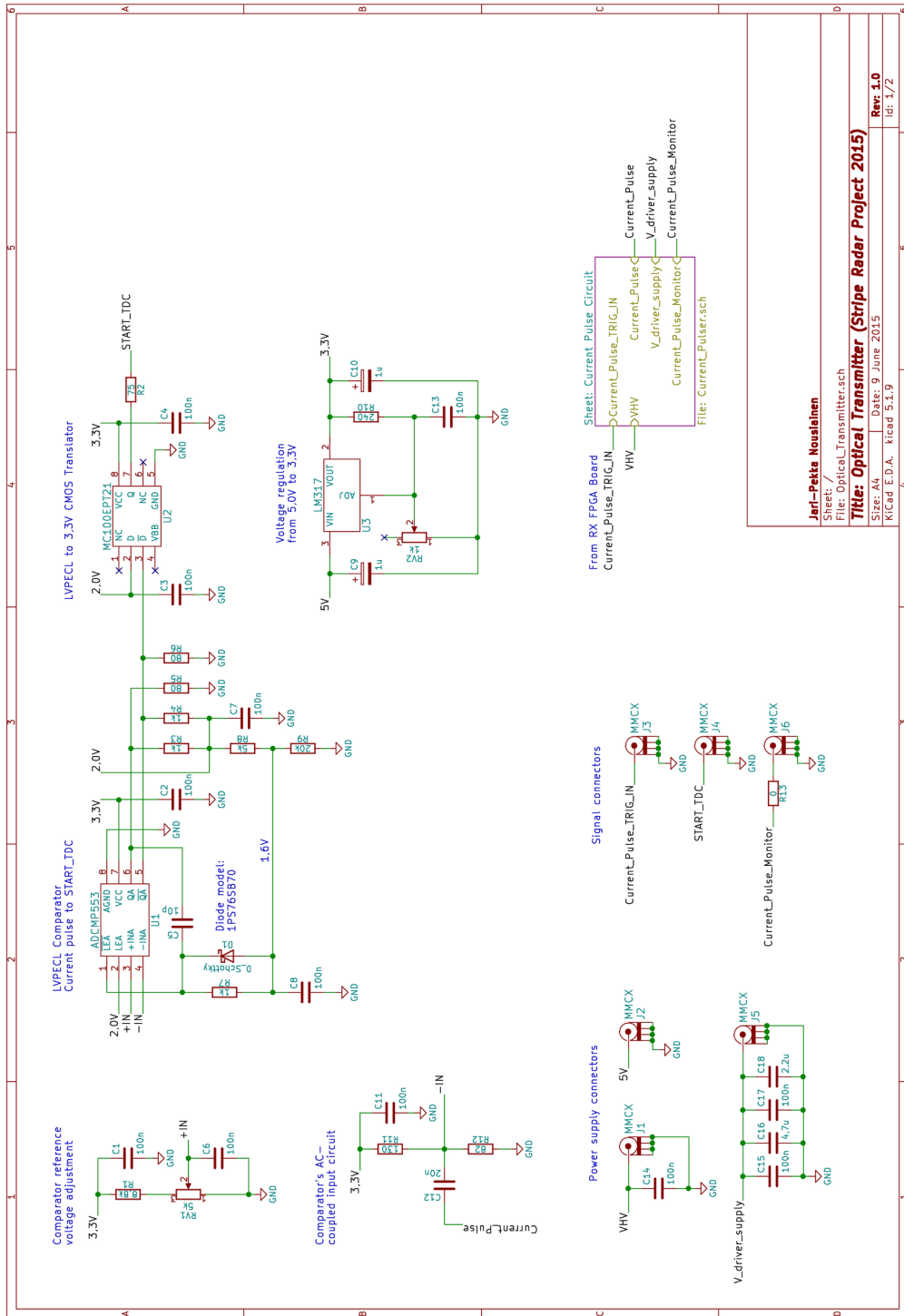
7. LÄHTEET

- [1] Rieger J. M. (1996) *Electronic Distance Measurement*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [2] Jahromi S., Jansson J-P, Nissinen I., Nissinen J., Kostamovaara J. (2015) A Single Chip Laser Radar Receiver with a 9x9 SPAD Detector Array and a 10-Channel TDC. University of Oulu, Department of Electrical Engineering, Electronics Laboratory, Oulu, Finland
- [3] Kurtti S., Kostamovaara J. (2014) CMOS receiver for a pulsed TOF laser rangefinder utilizing the time domain walk compensation scheme.
- [4] Jahromi S., Jansson J-P, Kostamovaara J. (2015) Pulsed TOF Laser Ranging with a 2D SPAD-TDC Receiver. University of Oulu, Department of Electrical Engineering, Electronics Laboratory, Oulu, Finland
- [5] Ion J. C. (2005) *Laser Processing of Engineering Materials*. Elsevier Butterworth-Heinemann
- [6] Tournié E., Baranov A. (2013) *Semiconductor lasers: Fundamentals and applications*. Woodhead Publishing Limited
- [7] Hallman L., Huikari J., Kostamovaara J. (2014) A High-Speed/Power Laser Transmitter for Single Photon Imaging Applications. Department of Electrical Engineering, University of Oulu
- [8] Silfvast W. T. (2004) *Laser Fundamentals*. Cambridge University Press
- [9] Fox M. (2006) *Quantum Optics: An Introduction*. Oxford University Press
- [10] Cova S., Ghioni M., Lacaita A., Samori C. ja Zappa F. (1996) Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection. OSA Publishing
- [11] Ryvkin B. S., Avrutin E. A., Kostamovaara J. T. (2009) Asymmetric-Waveguide Laser Diode for High-Power Optical Pulse Generation by Gain Switching. *Journal of Lightwave Technology*
- [12] Pérot A., Fabry C. (1899) On the Application of Interference Phenomena to the Solution of Various Problems of Spectroscopy and Metrology. *Astrophysical Journal*
- [13] Ryvkin B. S., Avrutin E. A., Lanz B., Kostamovaara J. T. (2014) Strongly Asymmetric Waveguide Semiconductor Lasers for Picosecond Pulse Generation by Gain- and Q-Switching.

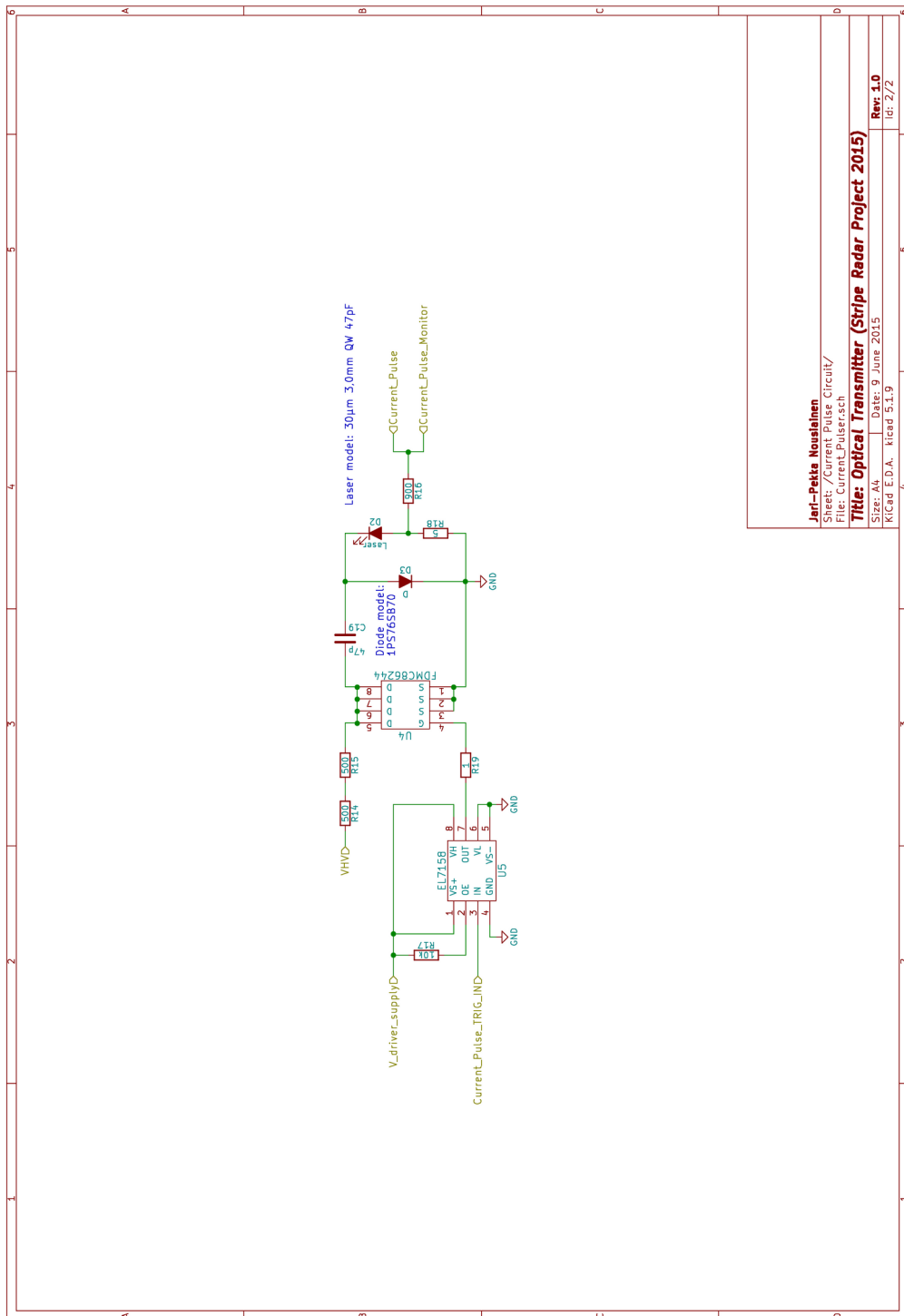
8. LIITTEET

- Liite 1 Viirututkan lähettimen kytkentäkaavio (osa 1/2)
- Liite 2 Viirututkan lähettimen kytkentäkaavio (osa 2/2)
- Liite 3 Viirututkan vastaanottimen kytkentäkaavio
- Liite 4 Miniatyyritutkan kytkentäkaavio

Liite 1 Viirutuskan lähettimen kytkentäkaavio (osa 1/2)

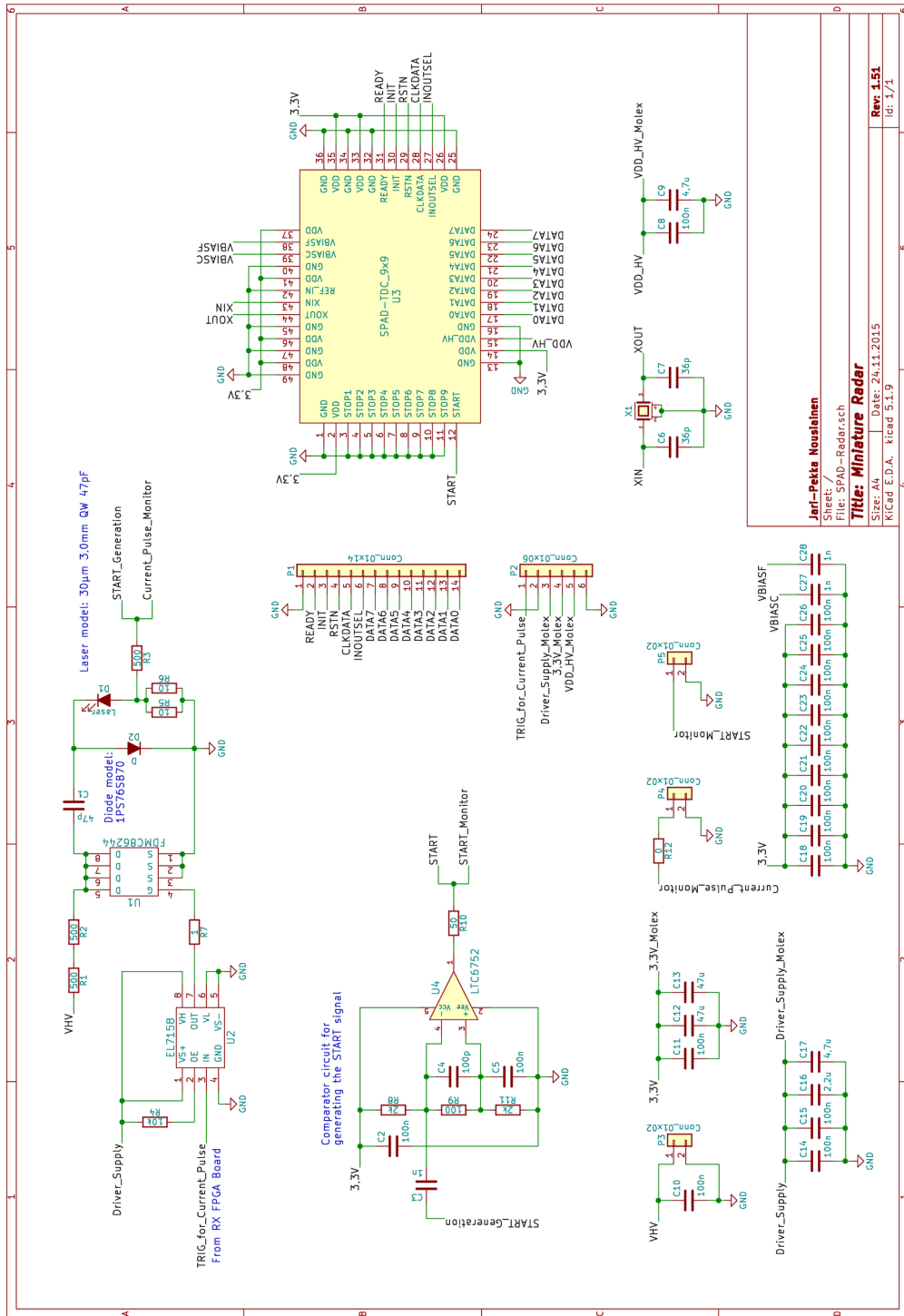


Liite 2 Viirututkan lähettimen kytkentäkaavio (osa 2/2)



Jari-Pekka Nousiainen
 Sheet: /Current Pulse Circuit/
 File: Current_Pulser.sch
Title: Optical Transmitter (Stripe Radar Project 2015)
 Size: A1 Date: 9 June 2015 Rev: 1.0
 Kicad E.D.A. Kicad 3.1.9 Id: 272

Liite 4 Miniatyiritutkan kytkentäkaavio



Jari-Pekka Nouslainen
 Sheet: / Radarsch
 File: SPAD--Radarsch
Title: Miniature Radar
 Size: A4 Date: 2/11.2015
 Kicad E.D.A. Kicad 3.1.9
Rev: 1.51
 Id: 474