

Kokeellisen pulssilaserjärjestelmän toimitus asiakkaalle

Leevi Kinnunen

OPINNÄYTETYÖ
Maaliskuu 2024

Tietotekniikan tutkinto-ohjelma
Sulautetut järjestelmät ja elektroniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma
Sulautetut järjestelmät ja elektroniikka

KINNUNEN, LEEVI:
Kokeellisen pulssilaserjärjestelmän toimitus asiakkaalle

Opinnäytetyö 28 sivua, joista liitteitä 2 sivua
Toukokuu 2024

Laserteknologiaa alana voidaan kuvata kasvusuuntaiseksi, ja ala tarjoaa erilaisia ratkaisuja aina kuluttajaelektronikasta valokuituviestintään asti. Laserlaitteiden sovellutusala ulottuu myös lääketieteeseen, jossa laitteita hyödynnetään esimerkiksi kirurgiassa ja lääketieteellisessä tutkimuskäytössä.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli toimittaa kokeellinen pulssilaserlaite asiakaskäyttöön. Pulssilaser lasertyyppinä tuottaa suuren lasertehon hetkellisesti, mutta keskiarvoteho jää kuitenkin verrattain melko pieneksi. Yleisellä tasolla lasereiden pulssikäyttö viittaa optisen tehon esiintymiseen pulssina määrätyn periodin aikana tietyn toistotaajuuden mukaisesti. Pulssilasereita on mahdollista hyödyntää erilaisissa käytännön sovellutuksissa, kuten materiaalikäsittelyssä ja puolustus-tekniologiassa.

Työ aloitettiin perehtymällä erilaisiin olemassa oleviin laserpaketteihin sekä niiden lasersiruihin. Tämän vaiheen jälkeen työ eteni erilaisiin mittauksiin ja asiakasspesifikaation tarkasteluun. Seuraavissa työvaiheissa keskityttiin pulssilaserlaitteen rakentamiseen sekä valmiin laitteen verifikaatiomittauksiin. Tutkimustyö päättyi laitteen toimitukseen asiakkaalle onnistuneesti.

Työ täytti tavoitteensa, sillä tehty tutkimustyö mahdollisti tarkoituksenmukaisten valintojen tekemisen lopulliseen tuotteeseen. Kiinnostava havainto kuitenkin oli, että työvaiheissa tunnistettiin myös jokseenkin odottamattomia ilmiöitä laserin käyttäytymisessä, joita olisi syytä tutkia jatkossa lisää. Jatkotutkimusta tarvitaan myös laajemmin laserteknologian sovellutuksista, kun ottaa huomioon sen tarjoamat laajat mahdollisuudet.

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in ICT Engineering
Embedded Systems and Electronics

KINNUNEN, LEEVI:

Experimental Pulsed Laser System Delivery for a Customer

Bachelor's thesis 28 pages, appendices 2 pages
May 2024

Laser technology industry is growing fast, and it offers different solutions from consumer electronics to optical fiber communications. Laser devices are also useful on medical applications where they can be utilized in surgery and medical research.

The purpose of this thesis is to deliver an experimental pulse laser system to a customer. Pulse laser as a laser type can produce a large amount of optical power momentarily, while the average power stays relatively low. On a general level, the pulse operation of lasers refers to the occurrence of optical power as a pulse during a specified period according to a specified repetition frequency. Pulse lasers can be used in many practical applications, such as material handling and in defense technology.

In this case example research started by looking at different existing laser packages and their laser chips. After that the case proceeded to various measurements and review of the customer specification. In the next stages the focus was on building of the pulse laser system and verification measurements of the finished device. Research concluded on successful delivery of the device to the customer.

This thesis met its goal successfully, because the conducted research enabled appropriate decisions for the finished product. During the research, an unexpected and intriguing phenomenon was observed in the behavior of the laser, warranting further investigation. Further investigation is also needed on the broader applications of laser technology, considering the wide range of possibilities it offers.

Key words: laser technology, laser device, pulse laser

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	SPESIFIKAATIO JA TUTKIMUSTYÖN ALOITUS	8
2.1	Tutkimustyö.....	8
2.1.1	Laitteisto	9
2.1.2	Mittaukset	9
2.2	Mittaustulokset	10
2.2.1	Keskikokoinen 1550nm laseripaketti kytkettynä ajuriin viiden senttimetrin pituisilla johdoilla.....	11
2.2.2	Keskikokoinen 1550nm laseripaketti kytkettynä suoraan ajuriin	12
2.2.3	Keskikokoisen 980nm paketin lasersiru kytkettynä suoraan ajuriin	13
2.2.4	Keskikokoisen 1550nm paketin lasersiru kytkettynä suoraan ajuriin	14
3	LASERLAITTEEN RAKENTAMINEN.....	15
3.1	Elektroniikka.....	16
3.1.1	Laseripaketti ja oheislaitteet	17
3.1.2	Liitännät.....	17
3.1.3	Mekaniikka	18
4	LASERIN OHJAUS	19
4.1	Pulssiajurin toiminta	20
4.2	Mikrokontrolleri.....	20
5	VERIFIKAATION TULOKSET JA NIIDEN ANALYYSI.....	22
5.1	Pulssi	22
5.2	Aallonpituus	23
6	YHTEENVETO JA POHDINTA.....	24
	LÄHTEET.....	26
	LIITTEET	27
	Liite 1. Tehon- ja pulssituksen verifikaatiomittaukset	27
	Liite 2. Aallonpituuden mittaukset	28

ERITYISSANASTO

Fotodiodi	Valolle herkkä puolijohde, joka muuntaa valon sähköiseksi signaaliksi.
Mikrokontrolleri	Mikroprosessorin sisältävä mikro-ohjain, jota käytetään sulautetuissa järjestelmissä.
Oskilloskooppi	Mittalaite, jota käytetään elektroniikassa ja sähkötekniikassa kuvaamaan esimerkiksi signaalia.
Peltier-elementti	Lämpösähköinen puolijohde-elementti, jota käytetään lämpökontaktissa olevan kohteen lämmittämiseen tai jäähdyttämiseen.
Funktiogeneraattori	Elektroninen laite, jolla voidaan tuottaa esimerkiksi analogiseen ohjaukseen sähkösignaalia.
ADC muunnos	Engl. Analog to Digital Conversion. Muunnos, jossa analoginen signaali muutetaan digitaaliseksi lukuarvoksi.
OSA	Engl. Optical Spectrum Analyzer. Laite, jota käytetään optisen aallonpituuden määrittämiseen.

1 JOHDANTO

Laserteknologia alana on alkanut kehittyä 1960-luvulta lähtien ja kehitystyö on jatkuvasti kasvusuuntaista (McFadden 2018). Kyseisen teknologian ominaispiirteisiin sisältyy esimerkiksi kyky luoda puhdasta ja kohdistettua valoa hyvinkin pienelle alueelle. Laserteknologiaeollisuutta voidaan pitää vastauksena moninaiisiin käyttötarpeisiin, kuten materiaaliprosessoinnissa tapahtuvaan leikkaukseen, poraukseen ja hitsaukseen. (esim. Hitz, Ewing & Hecht 2012).

Laserteknologian sovellutuksina erilaisten *laserlaitteiden* käyttö on monipuolista, sillä käytännön sovellutukset ulottuvat niin viestintään, signaalikäsittelyyn, kuvantamiseen kuten tiedon tallennukseenkin (Guo & Singh 2021, 6). Eräs laserlaitteiden merkittävä sovellusala on myös lääketiede, johon sisältyy esimerkiksi laserlaitteiden hyödyntäminen tutkimuskäytössä sekä konkreettisissa toimenpiteissä, kuten kirurgiassa.

Laserlaitteina *pulssilaserit* tarjoavat hyödyllisiä ominaisuuksia useisiin käyttökohteisiin. Pulssilaserin lyhyt altistus aika mahdollistaa hyvin pienen lämpövaikutusalueen, mikä taas tekee mahdolliseksi esimerkiksi materiaalin käsittelyn ilman sen sulamista. Tämän lisäksi pulssilasereiden epälineaarinen absorptio tekee mahdolliseksi lähestulkoon minkä tahansa materiaalin käsittelyn aina teräksestä ja kuparista esimerkiksi muovin käsittelyyn. Pulssilasereilla voidaan myös merkitä erilaisia materiaaleja ilman lisäaineiden tarvetta. (Breitung 2024)

Tämän opinnäytteen tarkoitus rajautuu kokeellisen pulssilaserjärjestelmään, jolla on tarkoitus vastata asiakkaan tarpeeseen. Pulssilaserjärjestelmän käyttötarkoituksena toimii tässä tapausesimerkissä tieteellinen tutkimuskäyttö. Työ on toteutettu keskisuuren teknologia-alan yrityksen kontekstissa, jossa tutkielman tekijä itse työskentelee.

Tutkielma syventyy erityisesti pulssilaserjärjestelmän rakentamiseen ja mittaukseen, jolloin esimerkiksi laserin toiminnan teoria on rajautunut tutkielman ulkopuolelle. Valintaan on päädytty, sillä rajaus todettiin olevan tarpeen aiheen laajuuden näkökulmasta. Aihetta on tärkeää tutkia, sillä markkinoiden kiinnostus pulssilasereita kohtaan vaikuttaisi olevan kasvusuuntaista. Tärkeä näkökulma on

myös se, että pulssilaserit voivat tarjota ominaisuuksia, joita jatkuva-aaltoisilla lasereilla ei ole mahdollista toteuttaa.

Tutkielma alkaa erilaisten laseripakettien mittauksesta ja siirtyy asiakasspesifikaation tarkasteluun. Seuraavaksi syvennyttään laserlaitteen rakentamiseen mekaniikan, lasereiden ja elektroniikan näkökulmasta sekä syvennyttään niihin liittyviin työvaiheisiin. Lopussa sivutaan vielä lyhyesti asiakasspesifikaation täyttymistä.

2 SPESIFIKAATIO JA TUTKIMUSTYÖN ALOITUS

Työn tekemisen lähtökohtana on ollut perehtyminen asiakkaan spesifikaatioon, joita on havainnollistettu tarkemmin alla olevassa taulukossa:

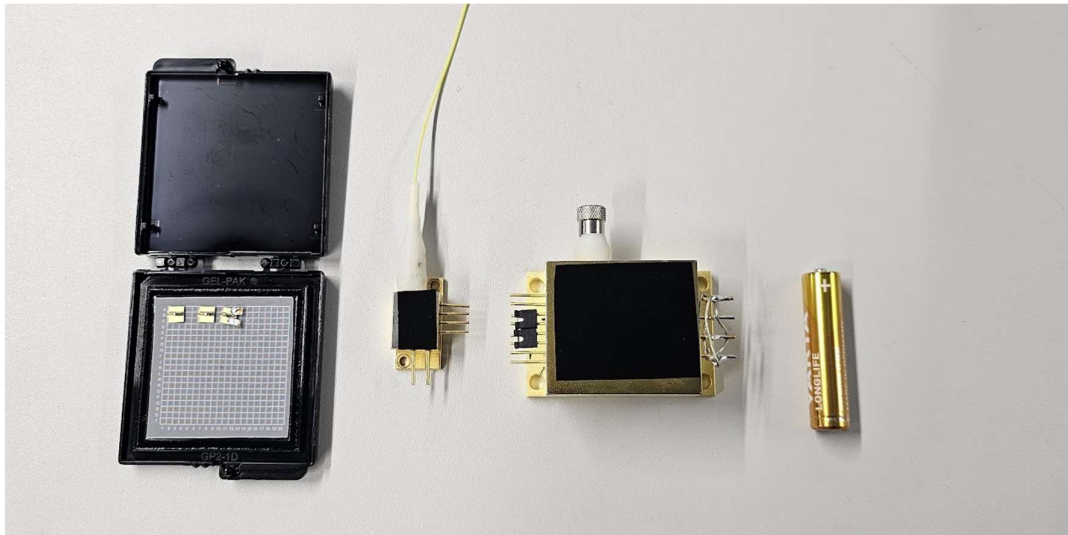
Vaatus	Yksikkö	Arvo
Pulssin maksimiteho	Wattia (W)	4
Pulssin kesto	Nanosekunti (ns)	100–200
Operointitaajuus	Kilohertsi (kHz)	0–20
Tehon säätö	Prosentti (%)	20–100
Pulssin nousuaika	Nanosekunti (ns)	25
Pulssin laskuaika	Nanosekunti (ns)	25
Keskiaallonpituus	Nanometri (nm)	1550±15

TAULUKKO 1. Asiakasspesifikaatio

2.1 Tutkimustyö

Tutkimustyö aloitettiin tutustumalla yrityksen sisällä olemassa oleviin erilaisiin laserpaketteihin. Pakettien erilaisuus johtuu niiden erilaisista sisäisestä konfiguraatiosta. Tällöin jotkut paketeista ovat suurempia ja ne sisältävät enemmän laser siruja sekä muita oheislaitteita. Lähtökohtaisesti suurempi paketti myös tarjoaa enemmän ulostulotehoa ja ominaisuuksia verrattuna pienempään pakettiin. Huomionarvoista on kuitenkin se, että suurempi paketti on pulssissa pienempää pakettia hitaampi ainakin tämän tutkielman tapausesimerkeissä. Tässä työssä eräät tärkeimmistä tekijöistä olivat pulssin nousu- ja laskuajat, joihin asiakas oli tehnyt tarkan määrittelyn.

Mittauksia tehtiin yhteensä kolmella eri laserpaketilla ja kahdella erilaisella lasersirulla. Kolme neljästä paketista piti sisällään saman lasersirun, mutta näiden pakettien erona kuitenkin oli, että paketeissa oli eri määrä siruja ja/tai erilaiset oheislaitteet. Mittauksia toteutettiin myös täysin ilman pakettia, jolloin lasersiru oli kytkettynä suoraan laserin ajuriin.



KUVA 1, Kuvassa vasemmalta oikealle: kolme kappaletta lasersiruja, pieni laserpaketti, keskikokoinen laserpaketti ja komponenttien kokoa kuvastava AA paristo

Laserin nopeuden kannalta oli erityisen tärkeää, että virran kulkeutuessa sirulle, sen kulkema matka olisi mahdollisimman lyhyt, sillä mitä lyhyempi matka on, sitä nopeampi pulssi on mahdollista saavuttaa.

2.1.1 Laitteisto

Mittaukset suoritettiin käyttäen kaupallista pulssiajuria laserin ajoon. Lisäksi käytössä oli oskilloskooppi, funktiogeneraattori, ja jännitelähde. Optista pulssia taas mitattiin fotodiodilla.

Työssä käytössä ollut pulssiajuri mahdollisti korkean virran ja hyvinkin nopean pulssiajon. Ajurin ulostulon virtaa ohjattiin jännitteellä ja pulssin kestoa ja toistonepeutta moduloitiin funktiogeneraattorilla. Ajuriin oli myös sisäänrakennettu virran monitorointi toiminto, joka mahdollisti ulostuloon ajettun virran seuraamisen.

2.1.2 Mittaukset

Alkuun mittaukset toteutettiin niin, että oskilloskoopissa oli käytössä kolme kanavaa. Ensimmäiseen kanavaan syötettiin funktiogeneraattorilta pulssiajurille syötetty signaali. Toiseen kanavaan taas oli kytketty pulssiajurin virtamonitorointi ja

kolmanteen kanavaan laserin valoenergiaa mittaava fotodiodi. Myöhemmissä mittauksissa funktiogeneraattorin signaalia ja/tai virtamonitorointia ei enää otettu mukaan.

Mittauksien tarkoitus oli selvittää ja todeta pulssin nopeuteen vaikuttavia tekijöitä, sekä selvittää, hyötyisikö kyseinen toimitus nopeammasta laserpaketista. Suurimman huomion testeissä sai johtimien pituus lasersirulle, jota testattiin monella eri yhdistelmällä. Testin toinen ääripää oli, että lasersirut sisältävä laserpaketti yhdistettiin ajuriin viiden senttimetrin pituisilla johdoilla, kun taas toisena ääripäänä paljas lasersiru juotettiin suoraan pulssiajuriin kiinni.

Suurin osa mittauksista toteutettiin siten, että laseriin oli kytketty kuitu, josta valo ohjattiin fotodiodille. Suoraan sirulta mitatessa tämä ei ole kuitenkaan ollut mahdollista, jonka takia sirulta otettujen mittauksien tarkkuus oli huomattavasti muita mittauksia huonompi.

Mittausvaiheessa oskilloskoopista ei otettu dataa laisinkaan taulukkomuodossa, joka johtui siitä, että suorituskyvyn arviointi kuvien perusteella todettiin täysin riittäväksi. Valmista laitetta verifioidessa dataa kuitenkin käsiteltiin laajasti myös taulukkomuodossa.

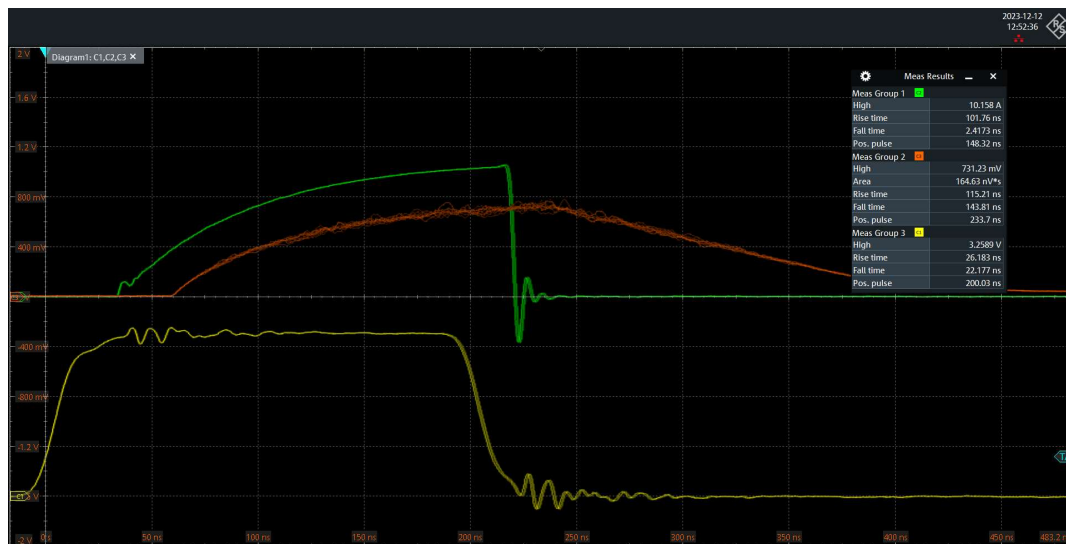
2.2 Mittaustulokset

Tuloksien läpikäynti alkoi hitaimmasta optisesta laserpulssista ja siirtyi nopeampiin pulsseihin. Mittauksia otettiin useilla eri parametreilla, joihin lukeutui paketin koko, sen aallonpituus ja pulssissa käytetty virta. Tuloksissa käsiteltävät pulssit mitattiin vaihtelevilla ohjauspulssilla.

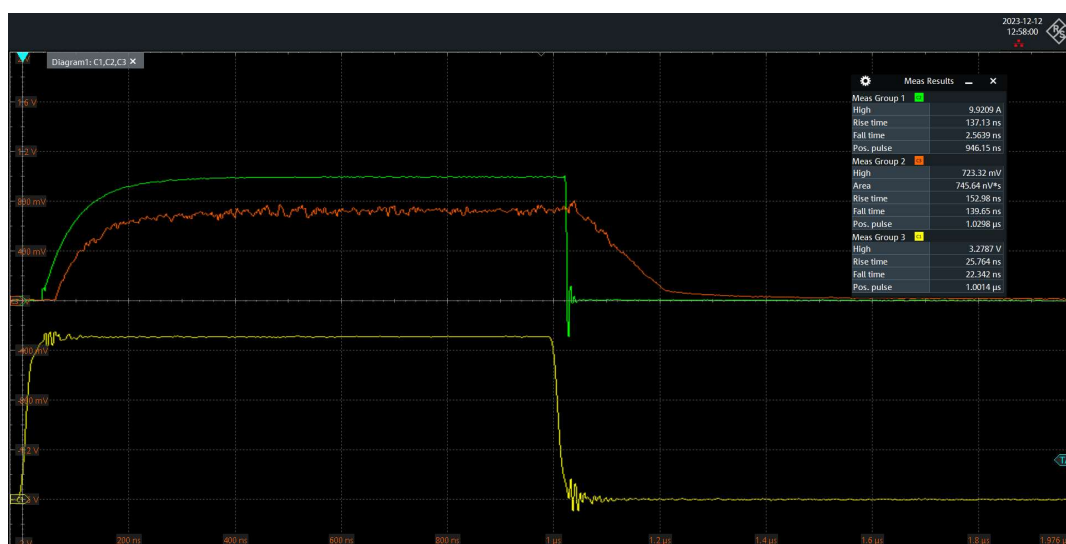
Kuvat koostuvat ruudunkaappauksista oskilloskoopilta, jossa keltainen viiva kuvaa ohjaussignaalia, vihreä viiva kuvaa ajurin virtamonitorointia ja punainen viiva kuvaa fotodiodin vastetta. Lisäksi kuvissa oikealla sijaitsevissa taulukoissa on nähtävissä oskilloskoopin suorittamia mittauksia. Mittaustuloksia tarkastellessa on tärkeää huomata datan vaihtelevat skaalat. Skaala muuttuu muun muassa pulssin keston ja sisään syötetyn virran eroista.

2.2.1 Keskokokoinen 1550nm laserpaketti kytkettynä ajuriin viiden senttimetrin pituisilla johdoilla

Tässä mittauksessa ajettiin laseria, joka oli kytketty ajuriin viiden senttimetrin mittaisilla johdoilla. Vaiheesta voidaan havaita, että laserin pulssi on noussut suhteellisen nopeasti virtaan nähden. Huomionarvoista kuitenkin on, että kun virtapulssi on loppunut, kestää laserin valoenergialla huomattavan kauan laskeutua takaisin nollatasoon.



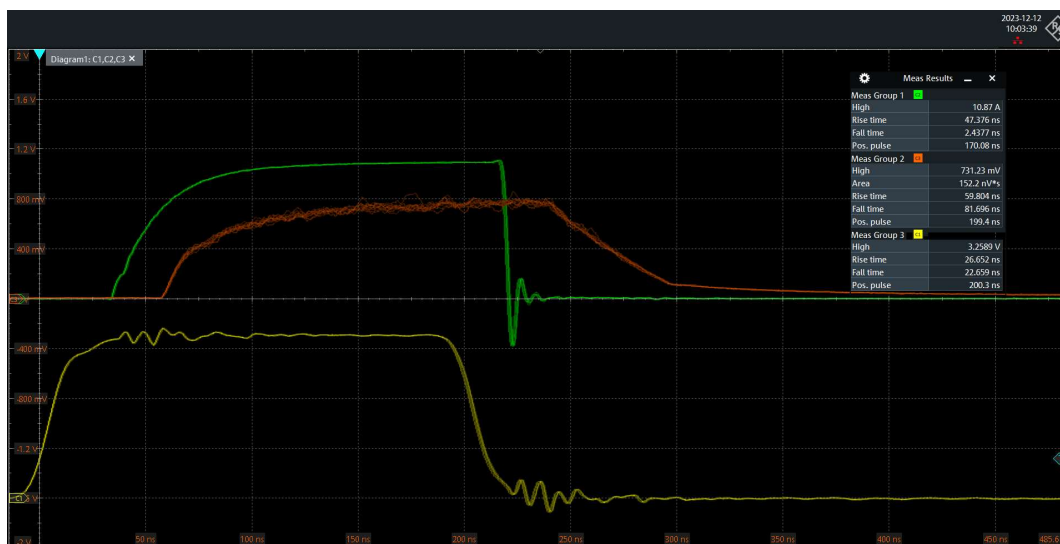
KUVA 2, 200 nanosekunnin kestoinen kymmenen ampeerin pulssi, jossa koko ruutu kuvaa noin 480 nanosekunnin aikaa



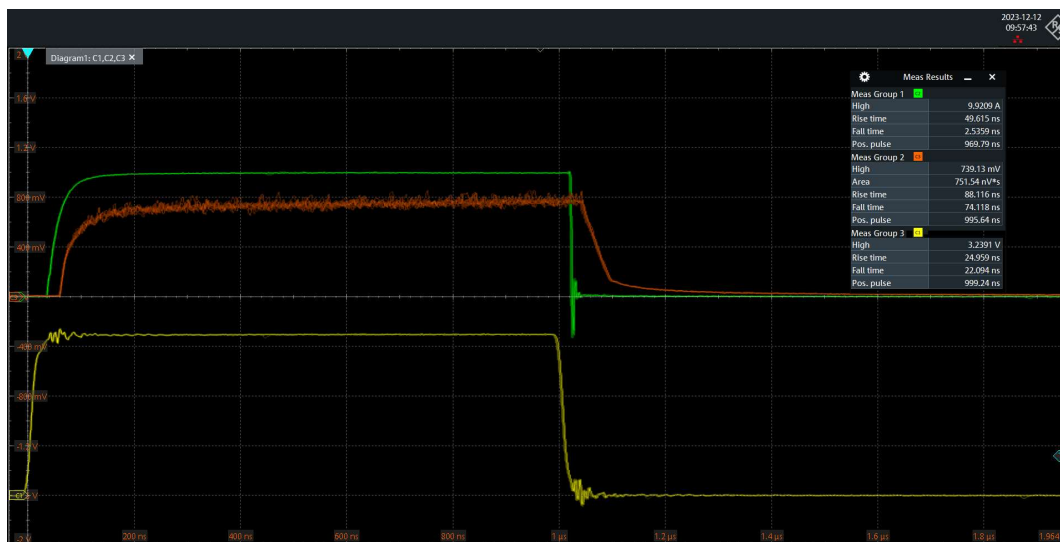
KUVA 3, 1000 nanosekunnin kestoinen kymmenen ampeerin pulssi, jossa koko ruutu kuvaa noin 2000 nanosekunnin aikaa

2.2.2 Keskikokoinen 1550nm laserpaketti kytkettynä suoraan ajuriin

Tässä tapauksessa laser oli kytketty ajuriin mahdollisimman lyhyillä johtimilla. Ai-kaisempaan tulokseen vertaamalla voidaan todeta, että laserin pulssin lasku on tapauksessa huomattavasti nopeampi.



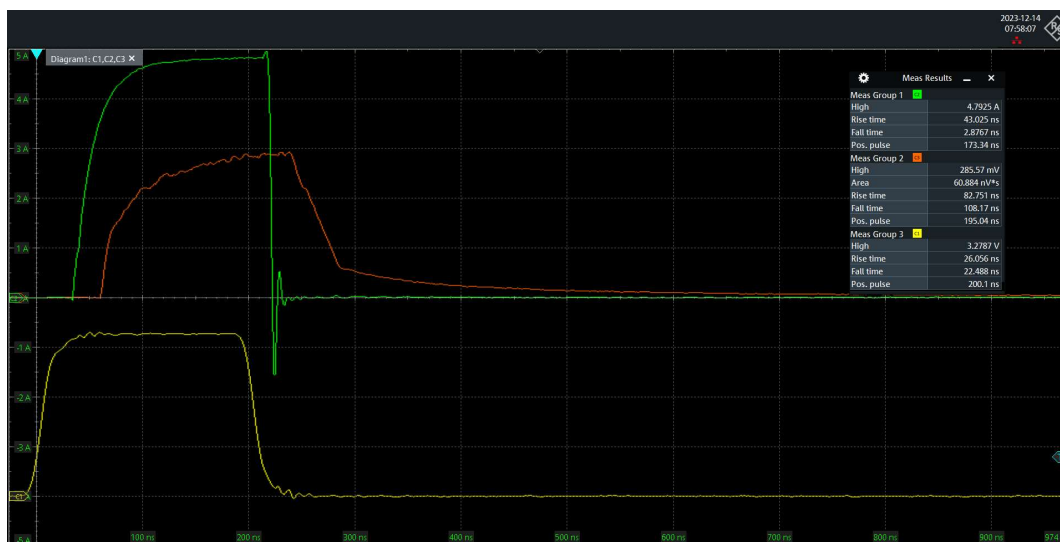
KUVA 4, 200 nanosekunnin kestoinen kymmenen ampeerin pulssi, jossa koko ruutu kuvaa noin 480 nanosekunnin aikaa



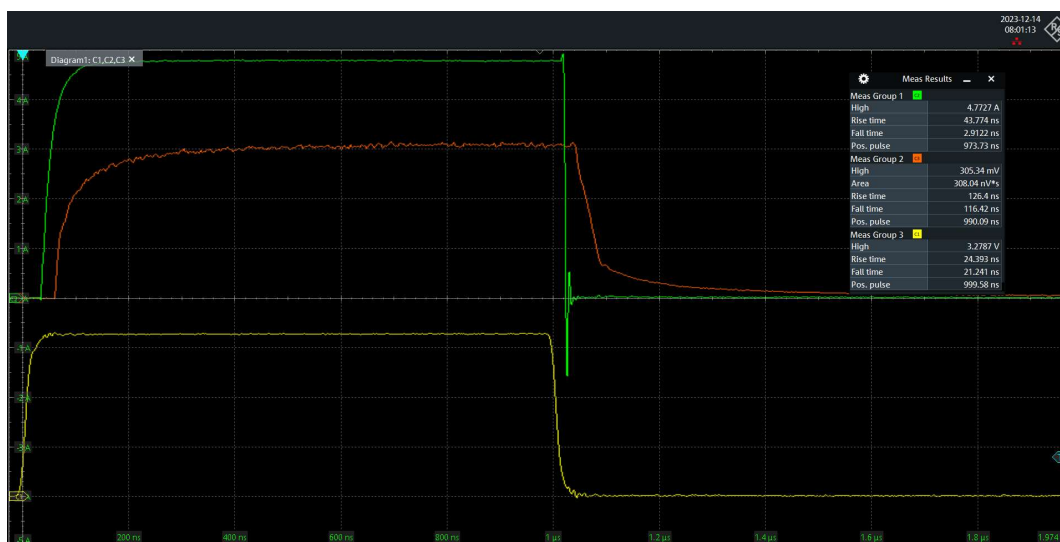
KUVA 5, 1000 nanosekunnin kestoinen kymmenen ampeerin pulssi, jossa koko ruutu kuvaa noin 2000 nanosekunnin aikaa

2.2.3 Keskikokoisen 980nm paketin lasersiru kytkettynä suoraan ajuriin

Mittauksissa testattiin myös sirutyypiltään erilaista laserpakettia. Tämä testi ha-
luttiin suorittaa, jotta tuloksia voitaisiin verrata toisen sirutyypin käyttäytymiseen.
Tuloksista voidaan havaita se, että paketin käyttäytyminen on hyvin samanlaista
molemmista tapauksissa.



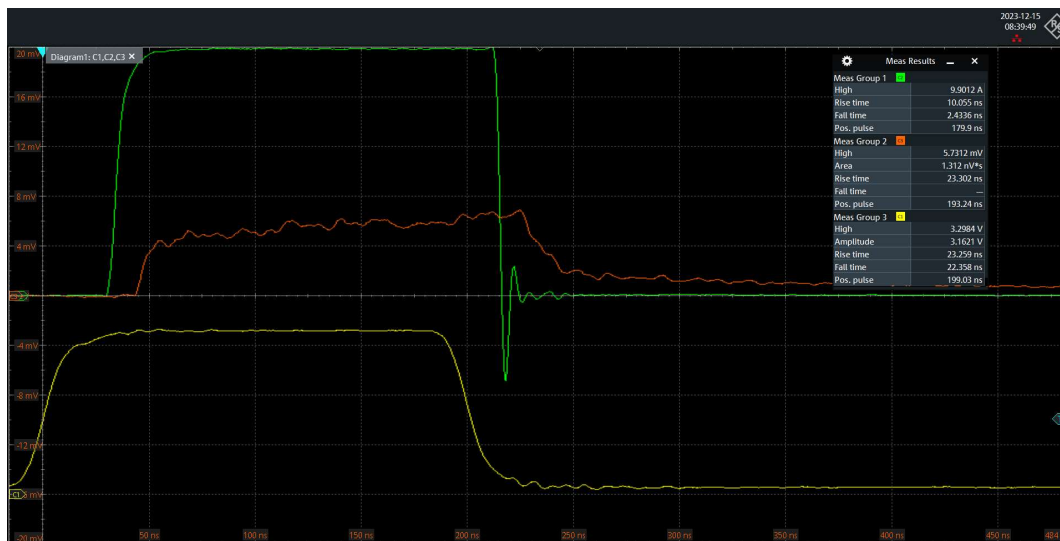
KUVA 6, 200 nanosekunnin kestoisen viiden ampeerin pulssi, jossa koko ruutu
kuvaa noin 1000 nanosekunnin aikaa



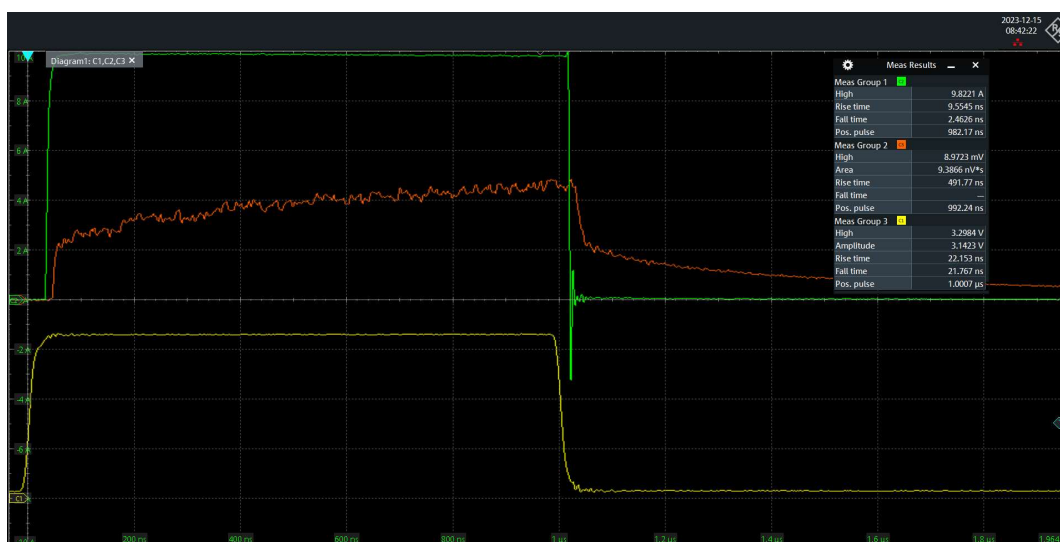
KUVA 7, 1000 nanosekunnin kestoisen viiden ampeerin pulssi, jossa koko ruutu
kuvaa noin 2000 nanosekunnin aikaa

2.2.4 Keskikokoisen 1550nm paketin lasersiru kytkettynä suoraan ajuriin

Kyseisissä mittauksissa keskikokoisen paketin yksittäinen laser-siru oli kytketty suoraan ajuriin. Muihin pulsseihin vertaamalla voidaan todeta, että pulssin lasku-aika nopeutuu tässä tapauksessa merkittävästi. Laserisirulla mittauksia tehdessä kohdattiin kuitenkin yksi ongelma, sillä fotodiodin vaste oli todella heikko, joka johtui siitä, että laserin tuottaman valon kohdistus osoittautui hyvin haastavaksi.



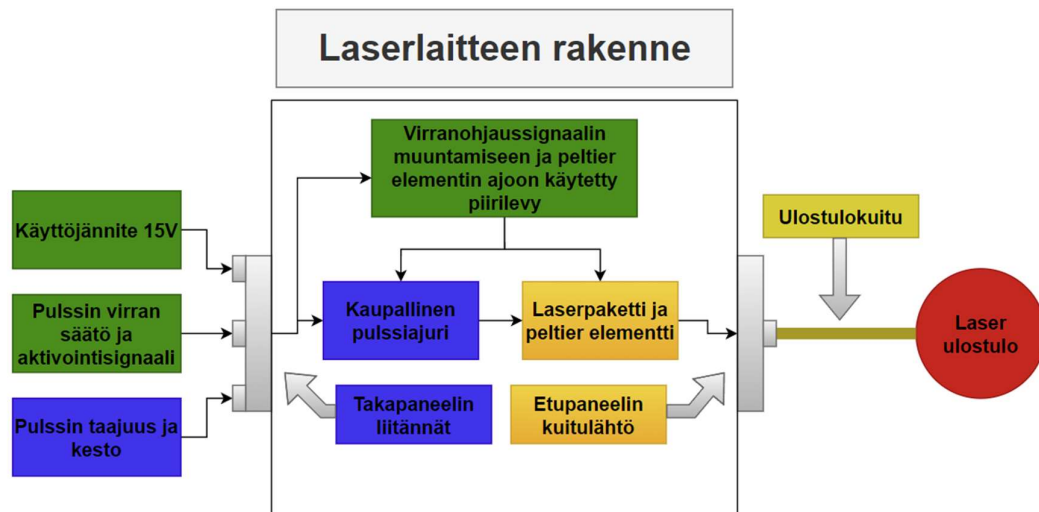
KUVA 8, 200 nanosekunnin kestoinen kymmenen ampeerin pulssi, jossa koko ruutu kuvaa noin 480 nanosekunnin aikaa



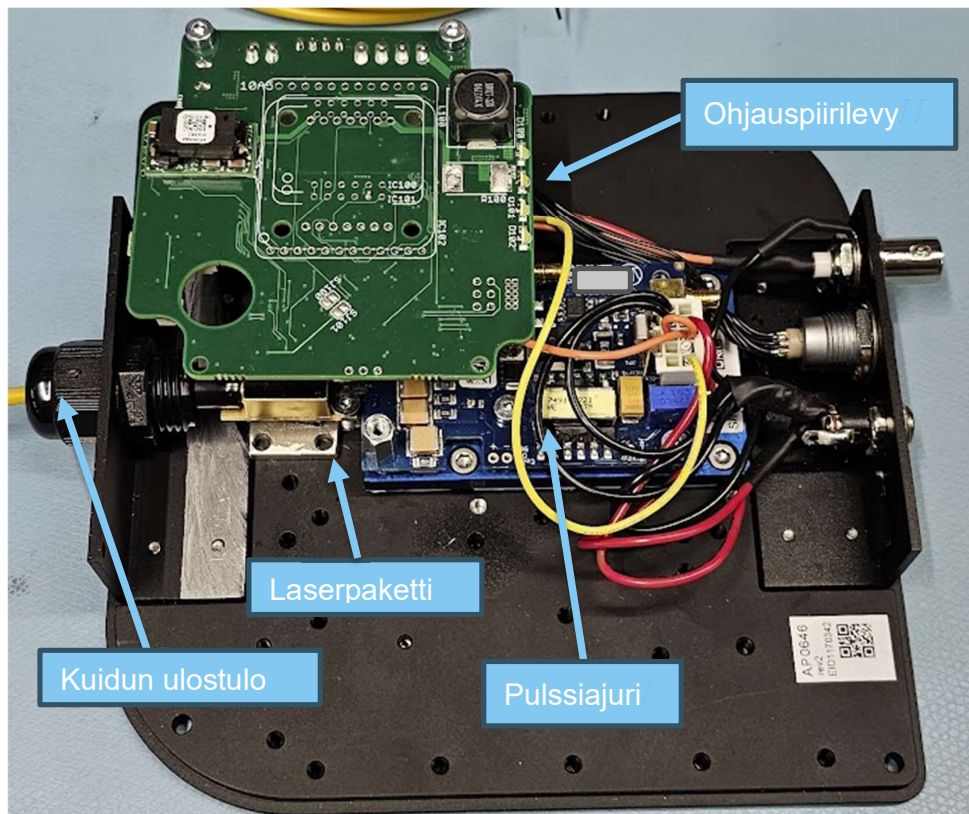
KUVA 9, 1000 nanosekunnin kestoinen kymmenen ampeerin pulssi, jossa koko ruutu kuvaa noin 2000 nanosekunnin aikaa

3 LASERLAITTEEN RAKENTAMINEN

Työssä rakennettu laserjärjestelmä voidaan jakaa mekaniikkaan, elektroniikkaan ja laserpakettiin, sekä siihen sisältyvään optiseen kuituun. Laite rakennettiin pohjautuen olemassa oleviin tuoteperheisiin, sekä niiden osiin. Jotkut osista eivät olleet kuitenkaan keskenään yhteensopivia ja tästä syystä osia muokattiin sekä sovitettiin yhteen erilaisin tavoin, kuten reikiä poraamalla, kierteitä tekemällä, kapaleita leikkaamalla sekä suhteellisen runsaalla juotustyöllä.



KUVA 10, Laserlaitteen toimintaa kuvaava lohkokkaavio



KUVA 11, Laserlaitteen sisäinen rakenne

3.1 Elektroniikka

Koko järjestelmän keskipisteenä oli piirilevy, joka sisälsi ATmega328P mikrokontrollerin. Laserin ohjauksen lisäksi piirilevyn tehtävä oli tulkita oheislaitteiden dataa, sekä ohjata niitä. Piirilevy tuotti edellä mainitun ohella myös statusvalon, joka ilmaisi sen, milloin laite on kytketty käyttöjännitteeseen.

Laserpakettia ajoi kaupallinen pulssiajuri, jonka sisääntuloon syötettiin kontrolleerilta analoginen signaali. Tällä signaalilla voitiin ohjata pulssiajurin ulostulon virtaa. Ajuri tuotti päällä ollessaan myös lämpöenergiaa, jonka takia se oli kiinnitetty pohjalevyyn pulteilla. Ajuriin lisättiin myös lämpötahnaa lämmönjohtavuuden parantamiseksi.

Koko järjestelmän käyttöjännite oli 15 voltia, eli sama jännite ajettiin kontrollerin ja pulssiajurin piirilevyille. Lyhyistä pulsseista takia laite kulutti virtaa maksimitaholla alle ampeerin verran.

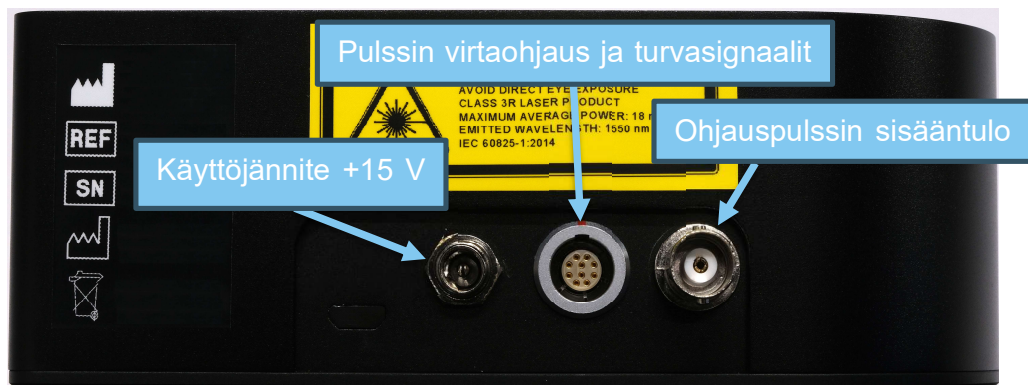
3.1.1 Laserpaketti ja oheislaitteet

Laitteessa käytettiin yrityksen sisäistä laserpakettia, joka tarjosi pienen koon sekä tällöin myös mahdollisimman lyhyen matkan johtimilta sirulle. Laserin pakettiin sisältyi termistori, joka mahdollisti laserin reaaliaikaisen lämpötilan monitoroinnin. Termistorin lukemaa vastaanotettiin jatkuvasti mikrokontrollerilla, joka muunsi analogisen signaalin digitaalseksi ADC muunnoksella. Näin laitteen kehitysvaiheessa moduulin lämpötilaa voitiin monitoroida suoraan USB yhteyden välityksellä käyttämällä pohjana muissa laitteissa käytettyjä yrityksen sisäisiä ohjelmistoja.

Laserpaketti ei sisältänyt sisäänrakennettua peltier-elementtiä, jonka takia laserin lämpötilaohjauksessa käytettiin ulkoista elementtiä. Laserlaitteen mekaniikan vuoksi sekä itse elementtiä että laserpakettia jouduttiin korottamaan pohjalevystä oikeaan kokoon leikatulla alumiinikappaleella. Kappaleiden välinen terminen kontakti varmistettiin lämpötahnalla, jonka tehtävä oli toimia lämmönjohtimena eri komponenttien välillä. Laserpaketti sisälsi kiinteästi viiden metrin pituisen kuidun, jonka valoa johtava alue, eli ydin, oli kooltaan 105 mikrometriä. Lisäksi kuidun päähän oli liitetty SMA-liitin, joka oli valittu asiakkaan käyttötarpeen perusteella.

3.1.2 Liitännät

Laitteen takapuolella oli kolme kappaletta liittimiä. Vasemmanpuoleisin liitin oli laitteen virtaliitin, josta käyttöjännite syötettiin kaikille laitteen sisäisille komponenteille. Keskellä laitetta sijaitsi liitin, johon syötettiin laserin virtaohjaussignaali. Lisäksi liittimessä oli signaalit, joista toinen oli kytkettävä maahan ja toinen 3.3 voltin jännitteeseen. Nämä signaalit toimivat laserlaitteen turvaominaisuutena ja estivät laitteen tahattoman käytön. Oikeainpuoleisin liitin taas oli tarkoitettu ohjauspulssin sisääntulolle.



KUVA 12, Laserlaitteen takapaneeli

3.1.3 Mekaniikka

Laitteen mekaniikka koostui viidestä eri kappaleesta, jotka oli lopputuotteessa kiinnitetty toisiinsa. Nämä kappaleet olivat: pohjalevy, kuitulähdön kulmarauta, liitäntöjen kulmarauta, kansi sekä jäähdytysyksikkö.

Kappaleita muokattiin, jotta normaalista poikkeava konfiguraatio olisi mahdollinen. Pohjalevyyn porattiin tällöin lukuisia reikiä, jotta komponentin saataisiin halutulle paikalle laitteessa. Poratut reiät kierteitettiin lopulta M3 kokoon ja lisäksi kuitulähdön kulmaraudan ulostuloreikää kasvatettiin merkittävästi poraamalla, koska ulostulevalle kuidulle haluttiin asentaa vedonpoisto.



KUVA 13, Laserlaitteen mekaniikkaosia

4 LASERIN OHJAUS

Tämän tutkielman kohteena oleva laserlaite toimi analogi- ja pulssiohjauksella. Analogiohjauksella säädettiin laserin ulostulotehoa, kun taas pulssia käytettiin laserservalon ulostulopulssin säätelyyn. Sekä analogisen jänniteohjauksen että pulssin oli oltava ennalta määritetyllä alueella, jotta lasersäteily oli mahdollista. Laserin ohjauslogiikkaa on havainnollistettu seuraavalla taulukolla:

Pinni	Nimi	Kuvaus
1	-	Ei kytketty
2	+3V3	+3,3 V ulostulo
3	SETPOINT	0,5–2,5 V, Analoginen asetusarvo ulostuloteholle
4	-	Ei kytketty
5	-	Ei kytketty
6	LASER-ENABLE	Laserin toiminnan salliminen, kytkettävä +3,3 V jännitteeseen
7	-	Ei kytketty
8	GND	Maadoitus
9	-	Ei kytketty
10	-	Ei kytketty

TAULUKKO 2. Laserlaitteen ohjauslogiikka



KUVA 14, Laserlaitteen ohjaukseen käytetty liitin

4.1 Pulssiajurin toiminta

Tutkielman laitteessa käytetty kaupallinen pulssiajuri toimi 15 voltin käyttöjännitteellä. Sen tärkeimpiin ominaisuuksiin lukeutuivat kyky ajaa korkeaa virtaa ja jännitettä nopeilla pulsseilla. Ajurin ulostulovirtaa ohjattiin jännitteellä, jonka mikrokontrolleri tuotti ajurille. Ajurin ulostulopulssia ohjattiin suoraan funktiogeneraattorilla ja se noudatti seuraavanlaista logiikkaa:

Logiikkataso	Jännitetaso	Laserlaitteen ulostulo
Ylhäällä	5 V	Päällä
Alhaalla	0 V	Pois päältä

TAULUKKO 3. Pulssiajurin ohjauslogiikka

Parametri	Minimi	Maksimi	Yksikkö
Toistotaajuus	-	20 000	Hz
Pulssin kesto	100	200	ns

TAULUKKO 4. Sallitut pulssiparametrit

4.2 Mikrokontrolleri

Laseria ohjasi mikrokontrolleri, joka muunsi sisääntulon jännitearvot matalampaan jännitearvoon amplitudimuunnoksella. Tämä muunnos tehtiin, jotta sisääntulojännitteeseen saatiin suurempi skaala, joka taas helpotti käyttäjäkokemusta. Mikrokontrolleria ohjaa kalibrointitaulukko, joka oli syötetty mikrokontrollerille piirilevyssä sijaitsevan USB-väylän kautta.

Calibration data

Curr, Ext set, Driver set, Power, I read, PD read

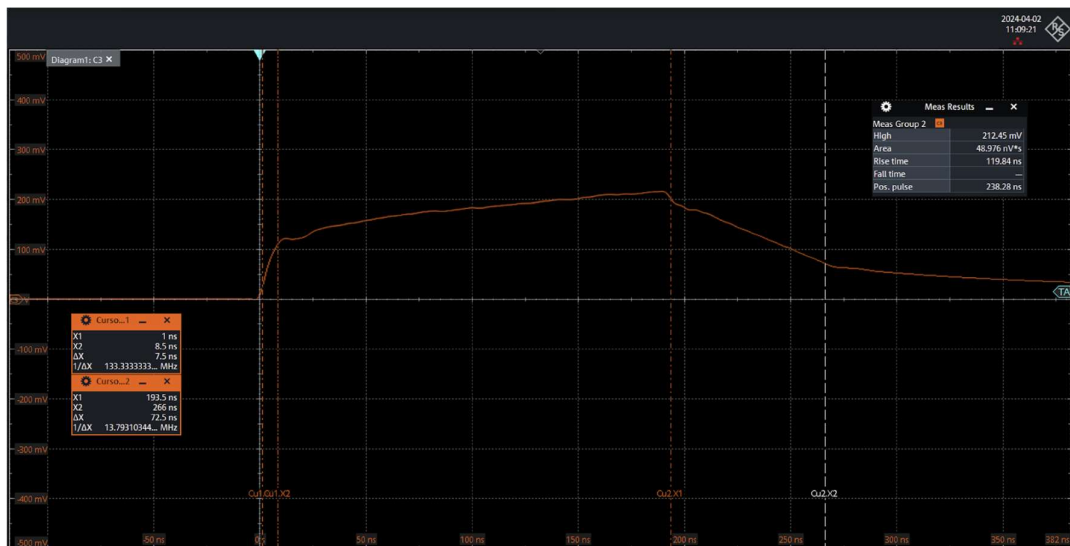
0,	0,	0,	0,	0,	0
1218,	327,	403,	10,	360,	327
1670,	566,	558,	1009,	490,	566
2118,	804,	713,	2009,	620,	804
2544,	1043,	868,	3008,	1241,	1043
2999,	1281,	1023,	4007,	1365,	1281
3453,	1520,	1178,	5007,	1489,	1520
3908,	1758,	1334,	6006,	1613,	1758
4363,	1997,	1489,	7005,	1737,	1997
4817,	2235,	1644,	8005,	1861,	2235
5272,	2474,	1799,	9004,	1985,	2474
5727,	2712,	1954,	10003,	2109,	2712
6181,	2951,	2109,	11003,	2234,	2951
6636,	3189,	2265,	12002,	2358,	3189
7091,	3428,	2420,	13001,	2482,	3428
7545,	3666,	2575,	14001,	2606,	3666
8000,	3905,	2730,	15000,	2730,	3905
8001,	3906,	65535,	15001,	2731,	3906
65535,	65535,	65535,	65535,	65535,	65535
65535,	65535,	65535,	65535,	65535,	65535

KUVA 15, Esimerkki mikrokontrollerin käyttämästä datasta

5 VERIFIKAATION TULOKSET JA NIIDEN ANALYYSI

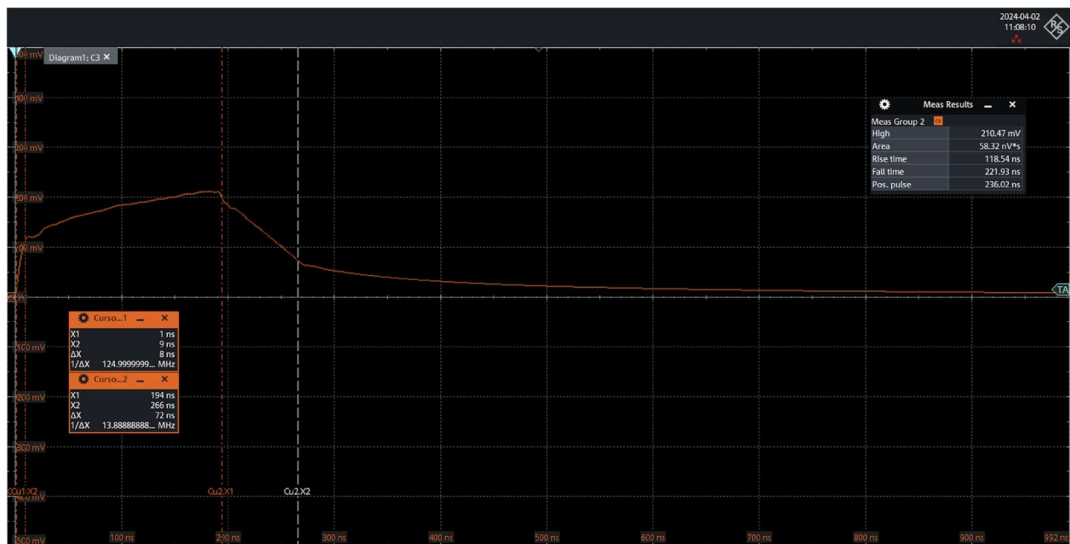
5.1 Pulssi

Laserlaitteen valmistuessa sillä tehtiin vielä verifikaatioprosessiin liittyvät viimeiset mittaukset. Asiakkaan spesifikaatio onnistuttiin täyttämään suurilta osin, vaikka tavoite pulssin laskuajasta ei täysin täyttynytkään. Tuloksista voidaan havaita, että laserin toiminta hidastuu jonkin verran nopean nousun ja laskun jälkeen. Huomionarvoista siis on, ettei mitattu nousuaika vastannut nousua nollassa tasosta maksimitasoon ja tämä sama piirre koskee myös laskuaikaa.



KUVA 16, Pulssin nousu- ja laskuajan mittauksia

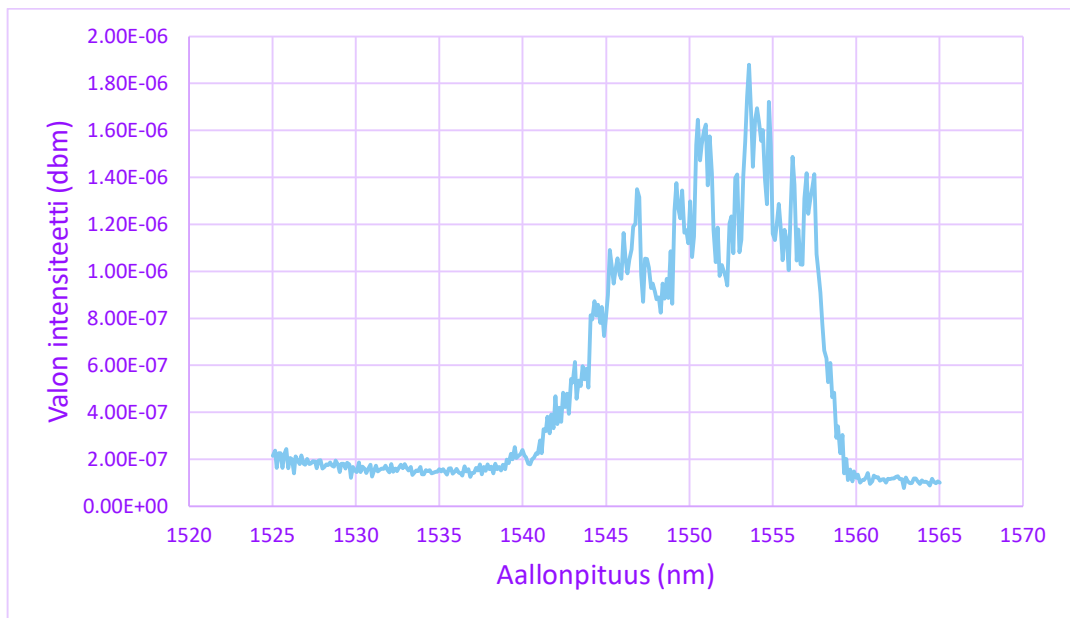
Laserin pulssissa tapahtui mielenkiintoinen ilmiö, johon ei tämän tutkielman aikana saatu kuitenkaan vastausta. Laserin pulssista jäi jälkeen laskeva häntä, joka oli pituudeltaan moninkertainen itse pulssiin. On sinällään epätodennäköistä, että häntä syntyisi lasersirun sisäisestä kapasitanssista, koska sirun kapasitanssi on todella vähäinen sen pienen koon takia. Pulssin häntä on kuitenkin havaittavissa myös kaikissa testatuissa laserpaketeissa, jolloin paketin kokokaan ei suoraan selitä pulssin laskevaa häntää. Yhteenvetona voidaan päätellä, että häntä ja sen muodostava ilmiö tapahtuu siis jo lasersirun tasolla, eikä se ole riippuvainen laserpaketista tai muista ulkoisista tekijöistä.



KUVA 17, Laserin optisen pulssin laskeva häntä

5.2 Aallonpituus

Verifikaatiotestien aika myös laserin tuottama aallonpituus mitattiin käyttämällä kaupallista OSA laitetta. Mittaus suoritettiin laserin maksimiteholla. Aallonpituutta tarkastelemalla voidaan sen havaita asettuvan hyvin asiakkaan määrittämälle alueelle.



KAAVIO 1. Aallonpituus

6 YHTEENVETO JA POHDINTA

Opinnäytetyön aikana tutkittiin erilaisten laserpakettien pulssikäyttäytymistä ja rakennettiin tutkimustiedon perusteella laserlaite asiakaskäyttöön. Tavoitteisiin päästiin suurimmilta osin ja opinnäytetyöstä muodostunut tutkimustyö on arvokasta yrityksille myös tulevissa projekteissa.

Haastavaksi opinnäytetyössä osoittautui parametrien määrittäminen, sekä joidenkin mittauksien toteuttaminen. Työssä tehtiin paljon asioita, joita kohdeyrityksessä ei ollut aikaisemmin toteutettu. Tutkielman teko kuitenkin mahdollisti paljon uuden oppimista lasereista, kuten niiden toiminnasta sekä pulssituksesta.

Tutkielman kannalta jokseenkin yllättävä havainto oli, että pulssia ajettaessa laserpaketin käyttäytymiseen vaikutti merkittävästi paketin koko sekä johtimien pituus. Lisäksi mielenkiintoinen havainto oli se, että paketeissa pulssilla ajettut laserisirut olivat täysin samoja, joita ajetaan myös jatkuvana aallon käyttökohteissa.

Jatkotutkimusaiheiksi ehdotetaan tämän tutkielman pohjalta pulssin laskuaikaan vaikuttavien tekijöiden tarkastelua. Lisäksi tutkimusta tarvitaan lisää myös esimerkiksi erilaisten aallonpituuksien lasersirujen pulssikäyttäytymisestä. Laserteknologia voi tulevaisuudessa mahdollistaa yhä useampia käytännön sovellutuksia eri käyttökohteissa ja toimialoilla, joten aiheen parissa tehty tutkimustyö voidaan katsoa tarpeelliseksi myös tätä laajemminkin.



KUVA 18, Valmis laserlaite

LÄHTEET

- Breitung, S. (2024). Trends in Laser Technology: What the Short Pulse Laser Can Do. *EMO Hannover*. Haettu osoitteesta <https://emo-hannover.com/news/trends-in-laser-technology-what-the-short-pulse-laser-can-do>, 1.4.2024.
- Guo, C., & Singh, S. C. (Eds.). (2021). *Handbook of Laser Technology and Applications: Lasers: Principles and Operations* (Volume One) (Vol. 1). CRC Press. Haettu osoitteesta <https://www.taylorfrancis.com/libproxy.tuni.fi/books/edit/10.1201/b21828/handbook-laser-technology-applications-chunlei-guo-subhash-chandra-singh>, 3.3.2024.
- Hecht, J. (2024). Laser applications. *Britannica*. Haettu osoitteesta <https://www.britannica.com/biography/Charles-Hard-Townes>, 3.3.2024.
- Hitz, C. B., Ewing, J. J., & Hecht, J. (2012). *Introduction to laser technology*. John Wiley & Sons. Haettu osoitteesta https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=DIWAILD6XUoC&oi=fnd&pg=PR9&dq=laser+technology&ots=cbUsQo6_ZK&sig=OoeZb1tAa-YHHIKk2dKqx1jR0XyA&redir_esc=y#v=onepage&q=laser%20technology&f=false, 22.2.2024.
- McFadden, C. (2018). The History of Laser Technology and What It Can Do Today. *Interesting engineering*. Haettu osoitteesta <https://interestingengineering.com/science/the-history-of-laser-technology-and-what-it-can-do-today>, 20.2.2024.

LIITTEET

Liite 1. Tehon- ja pulssituksen verifikaatiomittaukset

1. Optical power tests													Operator:		knie	
1) Set the device under test to the operating mode specified below.													Date:		08/04/2024	
2) Input a 5 V pulse signal with specified pulse length and repetition rate. Input the required setpoint voltage.													Entity ID:		1257649	
3) Measure and record the output power after 30 s emission duration using a suitable power meter and store pulse shape with oscilloscope. Calculate peak power. Power should be within specified percentage of target.																
4) Record the used equipment into the table.																
EqID	Channel	Setpoint (mV)	Pulse length (ns)	Repetition rate (kHz)	Target pulse mean power (mW)	Measured average power (mW)	Calculated pulse mean power (mW)	Rise time (ns)	Fall time (ns)	Target peak power (mW)	Measured peak power (mW)	Pass (-1) / Fail (+1) m/s calibration				
253 & 390	1	500	100	20	800	1	500	8.4	8	800	280	-				
		500	200	20	800	2.14	535	8.5	10	800	360	-				
		1000	200	20	1600	6.43	1607.5	7	27	1600	1150	1				
		1500	200	20	2400	10.7	2675	7.5	44	2400	1930	1				
		2000	200	20	3200	14.7	3675	7.5	58.5	3200	2670	1				
		2500	100	20	4000	9.24	4620	7.2	69.6	4000	2380	1				
		2500	200	20	4000	17.6	6400	7.5	72.5	4000	3250	1				
		RESULT											PASS			

Liite 2. Aallonpituuden mittaukset

2. Spectral tests													Operator:		kinte	
1) Set the device under test to the operating mode specified below													Date:		08/04/2024	
2) Input a 5 V pulse signal with specified pulse length and repetition rate. Input the required setpoint voltage.																
3) Measure and record the spectrum to MLD9 after 30 s emission duration using a suitable spectrometer. Record peak wavelength and spectral bandwidth to table.													Entity ID:		1237649	
4) Record the used equipment into the table.																
EqID	Channel	Pulse length (ns)	Repetition rate (kHz)	Target setpoint (mV)	Measured peak wavelength (nm)	Spec. min (mW)	Spec. max (mW)	Pass (-1) / Fail (-0)	Measured Spectral Integral (%)	Spectral Integral minimum	Spectral Integral maximum	Pass (-1) / Fail (-0) bandwidth	Comments			
592	1	200	20	500	1548	1535	1565	1	82 %	80 %	100 %	1				
		200	20	2500	1553	1535	1565	1	81 %	80 %	100 %	1	MLD9 parameters: Channel 1 peak lambda Channel 1 spectral distribution			
RESULT												PASS				