

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond

Alen Svistun 185893IACB

**Akutoitel toimiva laserdiodi toitelahenduse
uurimine ja konstrueerimine voolutsütomeetria
rakenduse jaoks**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Kaiser Pärnamets
magistrikraad

Kaasjuhendaja: Ants Koel
doktorikraad

Tallinn 2021

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Alen Svistun

13.05.2021

Annotatsioon

Töö eesmärgiks on kognitiivse kiiplaborsüsteemil põhinevale voolutsütomeetrile laserdiodi toitelahenduse uurimine ja konstrueerimine. Töö käigus on uuritud voolutsütomeetrias kasutatud valgusallika liike. Tehtud on ülevaade voolutsütomeetri üldisest toimimisest ja fluorestsentsmikroskoopiast. Töös on kirjeldatud, kuidas laserdiod toimib ja kuidas seda juhtida. Uuritud on pooljuhtlaseri kui projekti sobiva valgusallika ohutuse põhimõtteid ning laserdiodi tööks olulisi parameetreid, mida laserdiodi andmelehest leida võib. Käsitletud materjali põhjal on leitud projekti sobivaks pooljuhtlaseriks 488 nm lainepikkusel kiirgav laserdiod GH04850B2G tootjalt Sharp Microelectronics. Pooljuhtlaseri juhtimisest on täpsemalt kirjeldatud nii automaatse voolu kontrollimise (ACC) kui ka automaatse võimsuse kontrollimise (APC) režiimis. Töös hindan ühe LTC3454 (tootjalt Analog Devices) kiibil põhineva ACC režiimi juhtskeemi toimimist nii simulatsioonis kui ka katsetega kokkupandud makett- ja perfoplaadil. Katsetatud on toimimist nii pideval kui ka moduleeritud väljundsignaali juhtimisel. Lõppeesmärgina on disainitud PCB lahendus.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 35 leheküljel, 7 peatükki, 21 joonist, 1 tabelit.

Abstract

Research and Design of a Battery Powered Laser Diode Driver for a Flow Cytometry Application

The purpose of this work is to develop and investigate a constant current driver solution that can power a laser diode for the application in a flow cytometer. To understand the role of the light source in the flow cytometer, conventional methods of flow cytometry, as well as fluorescence microscopy have been researched. It has been determined that the laser diode provides multiple advantages over other light sources that traditionally have been used in a flow cytometer. For the realisation of a light source driver, the laser diode GH04850B2G manufactured by Sharp Microelectronics has been chosen as a suitable light source. Hence it has been deemed necessary to investigate how the laser diode operates and how it is controlled. In addition to providing the necessary background to safely operate the laser diode, several important and most commonly included parameters in the datasheet of a laser diode are described. Two of the most common control schemes are looked in detail: automatic current control (ACC) and automatic power control (APC). A constant-current ACC driver solution based on the LTC3454 buck-boost driver by Analog Devices is evaluated. In addition to operating in constant wave (CW), the circuit incorporates a simple PWM capability. The solution is simulated in LTspice after which it is assembled and tested on a breadboard (soldered and solderless). The final solution is designed on a printed circuit board (PCB).

The thesis is in Estonian and contains 35 pages of text, 7 chapters, 21 figures, 1 table.

Lühendite ja mõistete sõnastik

PCB	<i>Printed circuit board</i> , trükkplaat
LOC	<i>Lab-on-a-chip</i> , kiiplaborsüsteem
DNA	<i>Deoxyribonucleic acid</i> , desoksüribonukleinhape
FSC	<i>Forward scatter</i> , valguse otsehajumine
SSC	<i>Side scatter</i> , valguse kõrvalhajumine
LED	<i>Light-emitting diode</i> , valgusdiod
LD	<i>Laser diode</i> , laserdiod
PD	<i>Photodiode</i> , fotodiod
MEMS	<i>Microelectromechanical systems</i> , elektromehaaniline mikrosüsteem
CCD	<i>Charge-coupled device</i> , laengusidestusseadis
CMOS	<i>Complementary metal–oxide–semiconductor</i> , loogikalülituste tehnoloogia
CW	<i>Continuous wave</i> , konstantse amplituudi ja sagedusega laine; pidev töörežiim
YAG	<i>Yttrium aluminium garnet</i> , tahkislaseris kasutatav sünteetiline kristall
COD	<i>Catastrophic optical damage</i> , laseri pooljuhtmaterjali hävimine
QW	<i>Quantum-well</i> , kvantkaevuga laseristruktuur
FPR	<i>Fabry-Pérot resonator</i> , laseri resonatori struktuur
ACC	<i>Automatic current control</i> , automaatne voolujuhtimine
APC	<i>Automatic power control</i> , automaatne võimsusejuhtimine
EMI	<i>Electromagnetic interference</i> , elektromagnetiline häiritus
SS	<i>Slow-start</i> , voolu aeglane rakendamine
IC	<i>Integrated circuit</i> , integraallülitus
ESR	<i>Equivalent series resistance</i> , ekvivalentne jadatakistus
PWM	<i>Pulse-width modulation</i> , pulsilaiusmodulatsioon
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor</i> , isoleeritud paisuga väljatransistor
SMD	<i>Surface-mount device</i> , pinnale monteeritud seade või komponent

Sisukord

1 Sissejuhatus	9
2 Voolutsütomeetrised alused	10
2.1 Mikrovedelikundus.....	11
2.2 Kiiplaborsüsteem.....	12
2.3 Fluorostsentsmikroskoopia ja optiline süsteem.....	13
3 Ülevaade voolutsütomeetria valgusallikatest	16
3.1 Mittekoherentsed valgusallikad.....	16
3.2 Koherentsed valgusallikad	18
4 Laserdiodi toimimine	22
4.1 Aktiivne võimenduskeskkond	22
4.2 Resonaator	24
4.3 Laserdiodi parameetrid.....	25
4.4 Laserdiodi valik.....	27
5 Laserdiodi juhtimine.....	28
5.1 ACC (Automatic Current Control).....	29
5.2 APC (Automatic Power Control)	30
5.3 Juhtskeemi lisakaitsed	32
5.4 Juhtskeemi IC valik.....	34
6 Skeemi realiseerimine	35
6.1 Skeemi koostamine	36
6.2 Skeemi simuleerimine	38
6.3 Skeemi kokkupanek ja tulemused	41
7 Kokkuvõte	43
Kasutatud kirjandus	44
Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks	48
Lisa 2 – Valgusallikate tehnoloogiate võrdlus	49
Lisa 3 – LTC3454 kiibil põhineva valgusallika juhtskeemilahendus perfoplaadil	50
Lisa 4 - LTC3454 kiibil põhineva valgusallika juhtskeemi PCB lahendus.....	51

Jooniste loetelu

Joonis 1. Voolutsütomeetri põhikomponendid [7].	10
Joonis 2. Voolutsütomeetri mõõtekamber [7].	11
Joonis 3. Voolutsütomeetri mikrovedeliksüsteem [7].	12
Joonis 4. Valguse hajumine rakult [16].	14
Joonis 5. Voolutsütomeetri optiline süsteem [15].	15
Joonis 6. (a) Elavhõbelamp [18], (b) ksenoonlamp [19], (c) metallhalogeniidlamp [20], (d) erinevad LED kiibid [21].	17
Joonis 7. (a) Roheline He-Ne gaaslaser [26], (b) punane He-Ne gaaslaser [27].	19
Joonis 8. (a) Dielektrik- ehk tahkislaserd [29], (b) rodamiin 6G värvainel põhinev vedeliklaser [30].	19
Joonis 9. Erinevates pakenditüüpides pooljuhtlaserd [32].	20
Joonis 10. Laseri ja LED fluorostseerumise erinevus kiirgusspektris [34].	21
Joonis 11. (a) Pooljuhtlaseri tööpõhimõte [37, lk 462], (b) pooljuhtmaterjalide iseloomulikud kiirgusspektrid [37, lk 463], (c) kahekordse heterostruktuuriga LD [37, lk 463], (d) kvantkaevuga LD [38].	24
Joonis 12. Algeline ACC juhtskeem [53].	30
Joonis 13. APC juhtskeemi lahendus [54, lk 1].	31
Joonis 14. ILX <i>Lightwave</i> juhtskeemi kaitsemehhanismide plokkskeem [59, lk 5].	33
Joonis 15. LTC3454 kiibi joonis [60].	35
Joonis 16. LTC3454 kiibil põhinev moduleerimisvõimalusega ACC skeem.	38
Joonis 17. Väljundvoolu CW simulatsioon tarkvaras LTspice.	39
Joonis 18. Väljundvoolu simulatsioon PWM modulatsiooniga sagedusel 10 kHz.	40
Joonis 19. Väljundvoolu simulatsioon PWM modulatsiooniga sagedusel 0.5 kHz.	40
Joonis 20. Skeemilahendus perfoplaadil vaadatuna (a) pealt poolt, (b) alt poolt.	50
Joonis 21. LTC3454 PCB lahendus (a) nähtavate ühendustega, (b) 3D vaates.	51

Tabelite loetelu

Tabel 1. Valgusallikate võrdlus kvantitatiivse, elusrakkude ja mitmevärvilisel pildistamisel [17, lk 28].....	49
---	----

1 Sissejuhatus

Kaasaja üheks suureks väljakutseks on kriisipiirkondades bakteriaalsetest ohtudest tingitud epideemiad, millele reageerimine kiirete testivõimalustega on tihti piiratud. Moodsad kommertsiaalsed voolutsütomeetrid lubavad määrata rakkude eri parameetreid, kuid need on statsionaarsed ja kallid mõõtevahendid [1]–[3], millele on kehv juurdepääs piiratud infrastruktuuriga alades. Viimasel juhul võivad tekkida bakterite testimisel viivitused, millest võivad sõltuda inimeste elud.

Voolutsütomeetri üheks oluliseks osaks on valgusallika kiirus, mida juhitakse läbi analüüsitava proovi, milles sisalduvate rakkude omadusi kindlaks määrata soovitakse. Sõltuvalt kasutatavast valgusallikast eristuvad valgustamise juhtskeemid. Mobiilse ja statsionaarse mõõteseadme puhul on tähtis ka vastav toitelahendus.

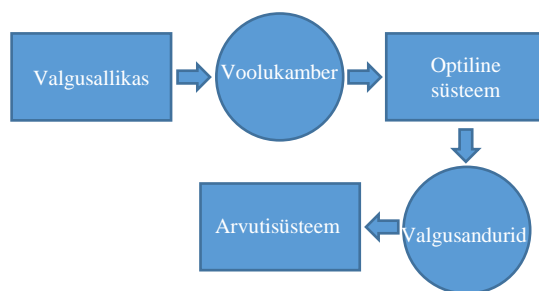
Käesoleva töö eesmärgiks on PRG620 ("CogniFlow-Cyte: Kognitiivne kiiplaborsüsteem automatiseeritud voolutsütomeetria tarbeks") teadusprojektis arendatava kognitiivse kiiplaborsüsteemil põhineva voolutsütomeetri valgusallika toitelahenduse uurimine ja konstrueerimine. Lähtuvalt mobiilse mõõteseadme nõuetest on lahendatavateks ülesanneteks:

- tsütomeetriliste meetodite ja kasutatud valgusallikate uurimine;
- akutoitel toimiva laserdiodi juhtskeemi ja toitelahenduse uurimine ja leidmine;
- valgusallika ja skeemi kaitseelementide kasutamine (*soft-start*, ülevoolukaitse, lühisekaitse);
- modulatsiooni sisend laserkiire sisse ja väljalülitamiseks
- skeemi realiseerimine makett- ja perfoplaadil ning PCB (*printed circuit board*) peal;
- makett- ja perfoplaadi lahenduste toimimise katsetamine;

2 Voolutsütomeetrilised alused

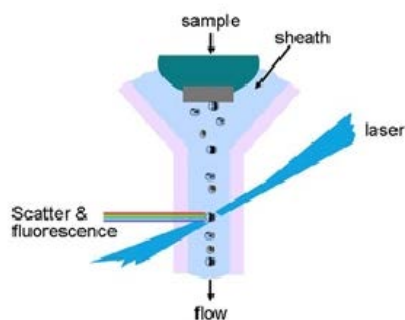
Tsütomeetri tööpõhimõtte mõistmiseks on tarvis teha ülevaade kasutatavatest tehnoloogiatest. Selles peatükis on kirjeldatud, millest tsütomeeter koosneb ja kuidas on võimalik jõuda rakkude kvantitatiivse uurimiseni. Vaatluse all on mikrovedelikunduse ning kiiplaborsüsteemide (LOC) rollid kaasaegses voolutsütomeetris. Seejärel on käsitletud fluorestsentsmikroskoopiat ja optilise süsteemi ehitust. Peatüki lõpuks on lugejal tekkinud arusaam kasutatavatest põhimeetoditest rakkude, bakterite ja mikromeetri skaalal uuritavate proovide mõõtmisest. Tundes voolutsütomeetria eesmärke on võimalik paremini mõista valgusallika rolli voolutsütomeetris.

Tsütomeetria tähendab raku parameetrite mõõtmist, mille korral mõõdetavad muutujad võivad olla rakkude suurus, arv, morfoloogia (kuju ja struktuur), eluea tsükli faas, DNA (desoksüribonukleiinhappe) sisaldus ja teatud proteiinide sisalduvus rakkude kihil või tsütoplasmas [4, lk 1–4], [5, lk 112–113], [6, lk 1]. Loetud põhjustel pakub tsütomeetria rakubioloogilisi ja meditsiinilisi rakendusi eelkõige haiguste määramisel.



Joonis 1. Voolutsütomeetri põhikomponendid [7].

Kõige lihtsama tsütomeetri struktuur (Joonis 1) koosneb valgusallikast, mõõtekambrist, optilisest süsteemist, valgusdetektoritest ja arvutist. Mõõtekamber (Joonis 2) on seadme tuumik, mille ülesanne on transportida rakke ükshaaval mõõtmispunkti. Testitav proov pumbatakse puhvri (vee või muu kandjavedeliku) voolu keskele, nii et nad ei segune. Kitsenenud proov, mille läbimõõt on mõnikümmend kuni sada mikromeetrit, voolab kanali keskel fokuseeritud valgusallika punkti, milles toimub andmete kogumine [7].



Joonis 2. Voolutsütomeetri mõõtekamber [7].

Laias laastus on kahte tüüpi tsütomeetrit: statsionaarsed ja läbivoolu tsütomeetrid ehk voolutsütomeetrid. Statsionaarne tsütomeetria on vanimat tüüpi tsütomeetria, milles kasutatakse valgusmikroskoopi suure arvu rakkude kuvamiseks. Kuvamise hetkel ei toimu rakkude automeeritud liikumist läbi kanali, mistõttu on võimalik mitu korda ja kõrge resolutsiooniga proovist pilti teha [8, lk 2–3].

Voolutsütomeetri puhul juhitakse uuritav raku suspensioon üksteise järel peene joana mõõtekambrisse, mille tagajärjel valgusallika footonid hajuvad ja peegelduvad rakkudelt [9].

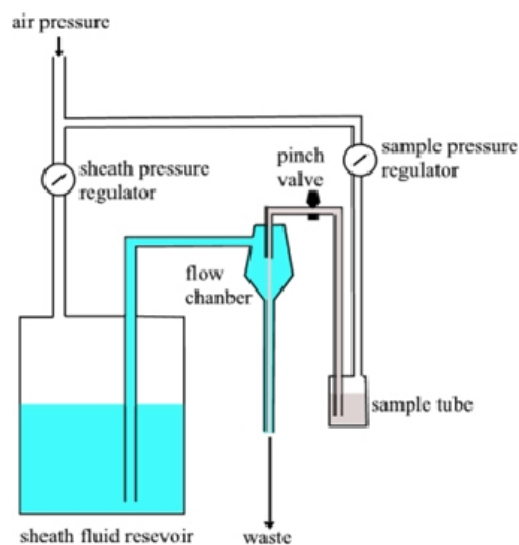
Statsionaarsete tsütomeetrite kuvamise täpsus on üldjuhul parem kui läbivoolu omal, kuid viimase läbilaskevõime on kordades parem ehk lubab mõõta tuhandete rakkude parameetreid sekundis. [6, lk 6]. Testimise kiiruses on voolutsütomeetril selge eelis.

2.1 Mikrovedelikundus

Voolutsütomeetrite töös on oluline roll mõne saja mikromeetriste läbimõõtudega vedelike jugade täpsel juhtimisel ja manipulatsioonil. Tüüpilises mikrovedeliksüsteemis toimub vedelike transport, segamine, eraldamine, suspensioon ja muu selline töötlemine. Mõndades rakendustes sõltutakse passiivsest vedelikuvoolude juhtimisest kasutades ära kapillaarsust mõjutavaid elemente voolu kiirendamiseks või takistamiseks. Aktiivses mikrovedelikunduses kasutatakse vedelike transportimiseks mikropumpasid ja -ventiile. Pumpadega on võimalik pidevalt täpses koguses vedeliku voolu suurendada või vähendada. Ventiiidega kontrollitakse pumbatud voolu liikumise suunda [4].

Voolutsütomeetri puhul on kandjavedelik juhitud läbi seadme mõõtekambri kasutades kompressori poolt tekitatud õhurõhku. Sama rõhuga surutakse testitav proov

kandjavedelikule. Analüüsitava proovi voolukiirust reguleeritakse rõhuregulaatoriga, millel on üks fikseeritud seadistus, kolm seadistust (madal, keskmine, kõrge) või mida saab pidevalt muuta. Eraldi ventiiliga kontrollitakse, kas testitavat proovi pumbatakse kandjavedelikku või mitte. Mõned süsteemid transpordivad proovi kasutades süstlapumpa. Mõlemal juhul saab arvutitega juhtides täpselt korrigeerida voolukiiruseid. Mõõtekambri puhastamiseks pärast mõõtmist kasutatakse vaakumsüsteemi, et vähendada ummistusi ja lisatakistusi vedelike voolamisel [7].



Joonis 3. Voolutsütomeetri mikrovedeliksüsteem [7].

Laboratoorsetes tingimustes tekitatud protsessid (Joonis 3) on tihtipeale miniaturiseeritud kiibile, millega saab suurendada juhtimise efektiivsust ja mobiilsust, samal ajal vähendades testitava proovi ja kandjavedelike kogust [10].

2.2 Kiiplaborsüsteem

Kiiplaborsüsteem ehk LOC, mis kuulub elektromehaaniliste mikrosüsteemide (MEMS) alla, on seade, millega integreeritakse ühte või mitut laboratoorset funktsiooni ühele integraalskeemile, mille suurusjärk on mõni ruutmillimeeter kuni -sentimeeter. Sellised süsteemid on võimelised teostama mõõtmisprotsesse väga väikeste vedelikukogustega (mõni pikoliiter) [11].

Kiiplaborsüsteemid jagunevad üldjuhul kolme kategooriasse: ajamitega, anduritega ja väljastamisskeemideks. Ajamitega LOC-s tekitatakse vedelikes elektromagnetiliste

mõjutustega elektrilisi või mehaanilisi jõude, millega kontrollitakse vedelikus sisalduvate osakeste liikumist. Anduritega LOC-s mõõdetakse mikrokanalites sisalduva proovi elektrilisi, optilisi, magnetilisi või termilisi omadusi. Väljastavas LOC-s võimendatakse ja filtreeritakse väljundsignaale ning kasutatakse liidesena LOC ja arvuti vahel [12, lk 3].

Bioloogilistes ja meditsiinilistes rakendustes on kõige tundlikum tuvastamistehnoloogia optiline kuvamine, statsionaarsete proovide mõõtmisel on tihti kasutatavaks seadmeks valgusmikroskoop. LOC rakendustes kasutatakse kõige enam CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*) ja CCD (*charge-coupled device*) andureid rakkude pildistamiseks [6]. Üldjuhul optilise kuvamise jaoks kasutatavaid valgusallikaid ja mikroskoobe on suuruse tõttu raske kasutada LOC rakendustes, mistõttu kombineeritakse CCD ja CMOS andureid mikrovedeliksüsteemidega, et vähendada optiliste komponentide mahtu [12, lk 5].

2.3 Fluorostsentsmikroskoopia ja optiline süsteem

Paljud ained on võimelised helenduma neis neeldunud valgusenergia toimel. Rakkudes leidub mõningaid looduslikult fluorestseeruvaid aineid, nt klorofüll, porfüriinid, A-vitamiin. Rakukomponentide uurimiseks kasutatakse fluorestseeruvaid värvaineid ehk fluorofoore, millega värvitakse erinevaid rakukomponente. Väga laialt on levinud rakibioloogias immuunfluorestsentsi meetod, mis põhineb fluorestseeruvate värvainetega konjugeeritud antikehade kasutamisele. Enamlevinud fluorofooridena antikehade märgistamiseks kasutatakse fluorestsüan-3-ünaati (FITC), tetrametüül-rodamiin-1,2,3,4-tetrakarbonyl-5,6-dimetüülisototsüan-3-ünaati (TRITC), fukoerütriini (PE) jt.

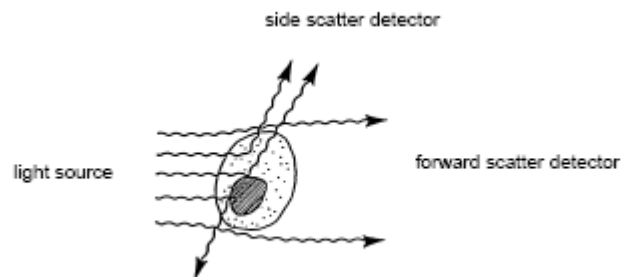
Ergastusvalguse toimel tekib fluorofooris emissioonvalgus ehk fluorestsents, mis on pikema lainepikkusega kui ergastusvalgus (FITC-i emissioonvalgus on 520 nm, s.t. roheline). Enne silma jõudmist läbib emissioonvalgus veel üht filtrit, mis püüab kinni võimaliku lühilainelise kiirguse [9]. Fluorestseeruv kiirgus toimub alati pikemal lainepikkusel kui neeldunud kiirgusel, seda nimetatakse Stokesi seaduseks. Stokesi nihkeks nimetatakse lainepikkuste erinevust kiirgunud ja neeldunud spektrite maksimumi vahel [13].

Kuna igal kasutataval fluorofooril on iseloomulik lainepikkus, millega fluorofoori ergastatakse, ning iseloomulik kiirgamise lainepikkus, siis võivad kiirgusspektrumid

kattuda. Üldiselt peetakse üksteisest eristatavate korruga kasutatavate fluorofooride arvuks 17-18. Sellise kompleksuse juures on oluline ja töömahukas optimeerida visuaalse müra vähendamist [14, lk 2].

Fluorestsentsmikroskoopia on väga tundlik meetod, sest mikroskoobi vaateväli on tume ja tumedal foonil paistavad silma ka väga nõrgalt helenduvad objektid [9].

Voolutsütomeetri peamised optilised komponendid on valgusallikas, fotokordistid, tõkkefiltrid, valgusejaoturid ja läätsed. Näiteks rakkude, mille antikehad on värvitud fluorestsiniiga, fluorestsentsi saab ergastada sinise argoon-ioonlaseriga, mille kiirgus läbib mõõtekambrit fokuseeriva lääts kaudu. Kiirgamine läbi mõõteobjekti tekitab kahte tüüpi valguse hajumist – valguse otsehajumist (*forward scatter* ehk FSC) ja kõrvalhajumist (*side scatter* ehk SSC). Otsehajumine (Joonis 4) tekib valguskiirguse objektidest läbi hajumisel teekonnast kõrvale kandumata, jäädes väikese nurga alla. Teisel pool mõõtekambrit on optiline tõke, mille taga olevas fotokordistis mõõdetakse otsehajumist väikese nurga all. Kuna rakud on poolläbipaistvad, tabavad enamik footonid raku tsütoplasmat ehk toimub otsehajumine, ent mõned footonid tabavad organelle, mille tagajärjel toimub hajumine suurema nurga all kui otsehajumisel. Viimast nähtust nimetatakse kõrvalhajumiseks (Joonis 4) [15] [16].



Joonis 4. Valguse hajumine rakult [16].

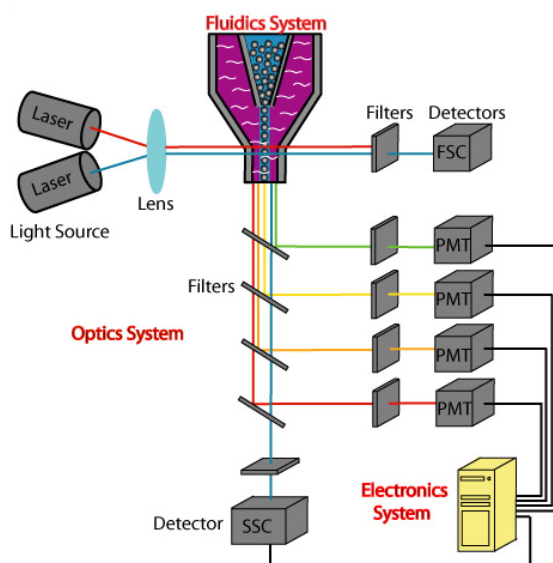
Mõõtekambriga risti on lisatud fokuseeriv lääts, mis koondab valguse kõrvalhajumist läbi mitmete valgusejaoturite anduritesse läbi tõkkefiltrite, mis lasevad läbi ainult fluorofoori fluorestsentsi lainepikkuse [7], [15], [16].

Rakkude suuruse ja kasutatava valgusallika lainepikkused mõjutavad valguse hajutamist. Kui rakud on väiksemad kui läbikuvatava valgusallika lainepikkus, siis hajuvus on ebahühtlane ja madala intensiivsusega. Sel põhjusel ergastatakse osakesi madalama

lainepikkusega kui uuritava osakese suurust, näiteks tüüpiliselt levinud lainepikkustel 488 nm või 405 nm [15]. Seetõttu kiiritatakse näiteks 488 nm laseritega 488 nm-l ergastuvaid fluorofore, mis fluorestseeruvad lainepikkustel 490 – 525 nm.

Valguse hajumist mõõdetakse kahe optilise anduriga. Otsehajumist mõõdetakse FSC ja kõrvalhajumist SSC anduris. Koos tehtud mõõtmine lubab teha teatud rakkude eristamist heterogeenses rakupopulatsioonis. FSC anduriga on võimalik eristada rakke suuruse järgi, sest FSC intensiivsus on võrdeline raku diameetriga, mis mõjutab valguse difraktsiooni. Andurina kasutatakse fotodiodi ehk PD (*photo diode*) [15]. Andurid, valgusallikad, läätsed ja filtrid moodustavad optilise süsteemi (Joonis 5).

SSC mõõtmine annab informatsiooni raku sisemise struktuuri kohta. Intensiivsust mõjutavad rakugraanulid – ja tuum. FSC-ga võrreldes on SSC valgussignaalid nõrgemad, mistõttu kasutatakse tundlikumat optilist andurit, tavaliselt fotokordistit.



Joonis 5. Voolutsütomeetri optiline süsteem [15].

Fluorostentsmikroskoopiaga üldiselt soovitakse saavutada kolme eesmärgi, et teha kõrgkvaliteedilisi mikroskoopilisi pilte. Esiteks tuvastatavat objekti on tarvis piisavalt suurendada võrreldes algse prooviga. Teiseks on tähtis, et pildis oleks piisavalt kontrasti detailide eristamiseks objekti tausta suhtes. Kolmandaks on oluline pildi resolutsioon, et eristada erinevaid objekte ja nende tunnuseid [17, lk 21].

3 Ülevaade voolutsütomeetria valgusallikatest

Valgusallikate peamine ülesanne on seega tekitada fluorestsentsi ja hajutada footoneid valgustavate objektide pealt, et määrata objektide omadusi või tuvastada liikunud objektid proovis. Fluorestsentsi tekkimisest ja Stokesi nihkest oli juttu peatükis 2.3. Käesolevas peatükis käsitlem voolutsütomeetria jaoks kasulikke valgusallikaid ja nende omadusi.

Fluorestsentsmikroskoopia meetodid sõltuvad tihti valgetest valgusallikatest, mis traditsiooniliselt on välja arenenud elavhõbelampidest, harvem kasutatud metallhalogeenilampidest kui ka tänapäeval kasutatavatest valgusdiodidest ehk LED-dest (*light-emitting diode*). Tüüpiliselt on kaasaegsete kommertsiaalsete voolutsütomeetrite puhul valgusallikaks laser, nt gaaslaser, tahkislaser või laserdiod ehk LD (*laser diode*). Kaasaegsete valgusallikate puhul saame rääkida ühtlasemast võimsuse jaotumisest valgusspektris, võimaldades kasutada fluorofoore, mis aktiveeruvad väljaspool traditsiooniliselt kasutatud valgusallikate tipplaine pikkust [17, lk 21].

Võttes vaatluse alla traditsionaalselt kasutatud valgusallika tüüpe, saab hinnata nende positiivseid ja negatiivseid omadusi eri tüüpi kuvamistehnoloogiate kontekstis.

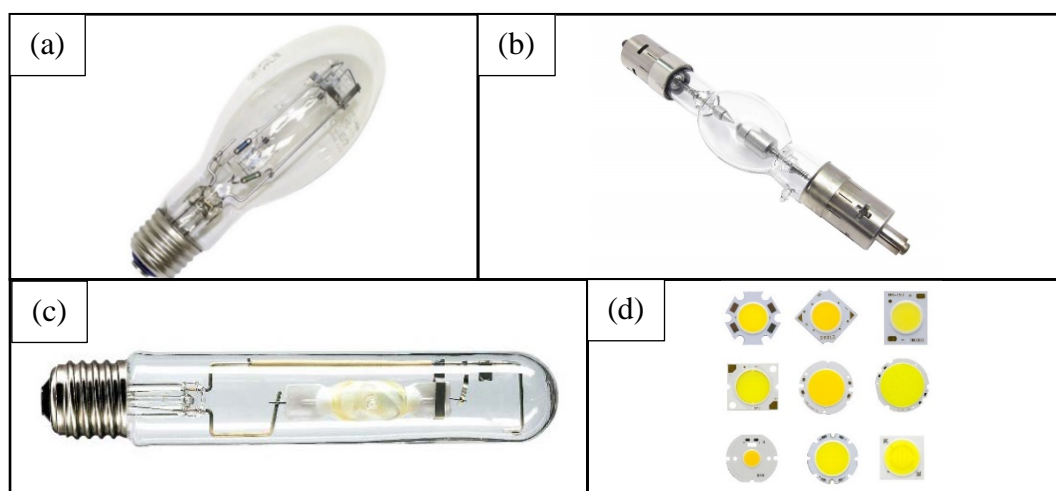
3.1 Mittekoherentsed valgusallikad

Elavhõbelampe (Joonis 6, a) kasutatakse tänapäevalgi paljudes uurimislaborites, et tekitada suurema võimsusega fluorestsentsergastust üle ultravioletse-nähtava spektriala (190 – 400 nm ja 400 – 800 nm). Elavhõbelampide eeliseks on kiirgamine mitmete tipplaine pikkuste juures, mis katab kogu nähtava spektriala. Piisab õige filtri soetamisest, et saavutada sobiva fluorofoori ergastamine. Suureks puuduseks on lambi ebahütlane valgustatus mikroskoobi vaateväljas, sest valgus pärineb kaarlahendusest. Lisaks sellele on lambil lühike eluiga – pirni on vaja vahetada iga 200 – 300 tunni tagant, sest lambi intensiivsus kahaneb. Vahetamisel tuleb kaarlahenduse omapärast tulenevalt ka iga kord pirni asendit kalibreerida. Elusrakkude pildistamise puhul on tähtis vähendada

fotopleegitust neutraalse tihedusega filtrite abil. Ultraviolettkiirgust tuleb samuti filtritega vähendada elusrakkude jaoks [17, lk 21].

Ksenoonlampide (Joonis 6, b) eelised ja puudused on elavhõbelampidega sarnased, kuid esimeste ergastusintensiivsused üle nähtava spektriala on palju ühtlasemad, töötades madalamal võimsusel. Eeliseks on ksenoonlampide eluiga mitu korda pikem, ligikaudu 1000 tundi. Paljudele infrapunases regioonis ergastuvatele värvainetele on ksenoonlampid ideaalsed, sest palju võimsust kiirgub just infrapunases spektrialas. Elusrakkude pildistamisel on samas vajalik kasutada soojusfiltreid [17, lk 22].

Metallhalogeniidlampidel (Joonis 6, c) on elavhõbelampidega sarnane kiirgusspekter, kuid tippintensiivsused on natuke madalamad ja vahepealsed intensiivsused on natuke kõrgemad. Metallhalogeniidlampidel on seetõttu sarnaselt ksenoonlampide ühtlasem kiirgusspekter nähtavas spektrialas, kuid esimeste eluiga on 10 korda suurem (~2000 tundi). Kvantitatiivse pildistamise puhul on suur eelis metallhalogeniidlampide stabiilsusel eluea jooksul, garanteerides sarnaseid tulemusi mõõtmiste tegemiste vahel pikema aja tagant [17, lk 22].



Joonis 6. (a) Elavhõbelamp [18], (b) ksenoonlamp [19], (c) metallhalogeniidlamp [20], (d) erinevad LED kiibid [21].

Viimased 10 aastat on fluorestsentsi valgusallikate lipukandja rolli täitnud LED ehk valgusdiodid (Joonis 6, d). LED-de populaarsust on võimaldanud nende kompaktsus ja kerge käsitletavus. LED-d pakuvad diskreetset tipplaine pikkust ning võimaldavad lülitamist millisekundite ajaskaalal. Viimane asjaolu vähendab vajadust filtrite ja ergastuskatikutele, mis vähendavad ergastuse mõju objektile. Samas mõned LED-i

värvused (roheline, kollane) katavad laiemat kiirgusspektrit, mille tõttu on vaja filtreid kasutada, et vähendada ergastatud valguse koosmõju fluorestseerumisel eri kiiritatud lainepikkustel. LED-del on väga pikk eluiga, mis võib olla kümneid tuhandeid tunde.

Suur eelis elavhõbe-, ksenoon- ja metallhalogeniidlampide üle on väiksem soojusehajutus, mis tõttu ei pea LED-d käivitamiseks eelnevalt soojenema ega maha jahtuma. LED-de intensiivsus on täpselt juhitav (~0.1% – 1% täpsusega) ega ei degradeeru aja jooksul. Need LED omadused on sobivad elusrakkude pildistamiseks, sest LED-de täpne juhtimine ja eelnev optilise võimsuse sobitamine teeb filtrite ja ergastuskatike kasutamise tihti ebavajalikuks. Ühe puudusena peetakse valgusdiodide puhul liiga suurt kiirgusspektrit ja tihti madalat väljundvõimsust tervikuna. [17, lk 24, 26].

Tabel 1 (Lisa 4) võtab kokku mittekoherentsete valgusallikate erinevused eri tüüpi pildistamistel. Tabeli põhjal on näha, et LED-de eelis teiste tehnoloogiate üle on stabiilne kiirguse intensiivsus üle aja, individuaalsete LED-de täpne ja kiire väljundi juhtimise võimalus ja teistega võrdlemisi väiksem vajadus filtrite järgi. Samas limiteeritud lainepikkuste arv ja interferents laia valgusspektri tõttu on piltide tegemisel väljakutseks, mille tõttu võib vajalik olla filtrite kasutamine.

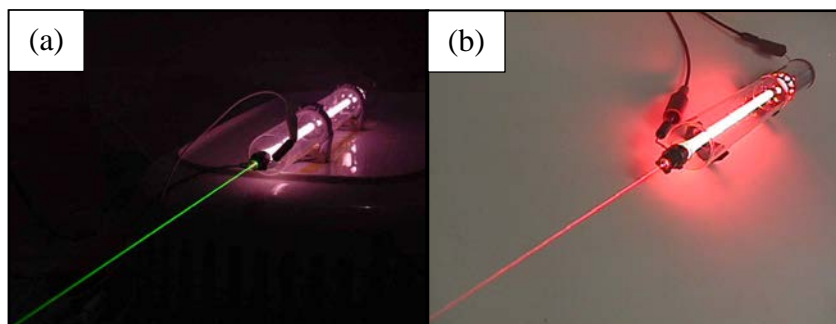
Mainitud LED-de puudujääke suudetakse lahendada laseritega, mida võib üldiselt iseloomustada suure monokromaatilisusega, lainepikkuse stabiilsusega, koherentsusega ning kiirtekimbu väikese hajumisnurgaga.

3.2 Koherentsed valgusallikad

Laserite põlvkondi ja tehnoloogiaid on palju ja neid üldiselt liigitatakse võimendavas keskkonnas pöördhõive tekitamise viiside ehk pumpamise järgi. Liigitatakse ka töötava aine, resonatori ehituse ja töörežiimi järgi. Näiteks töötava aine põhjal eristatakse vedelik-, gaas-, pooljuht- ja dielektriklasereid. Väljundi töörežiimi järgi võib liigitada lasereid pulseerivateks või konstantse amplituudiga (CW) laseriteks [22].

Eri laseritüüpide vahel seisneb enamasti erinevus väljundvõimsuses, kasuteguris [23] ning pakutavates lainepikkustes [24], mis teeb neid sobivaks erinevates rakendustes meditsiinis, militaarvaldkonnas, tööstuslikus ja kommertsiaalvaldkonnas ning teadusuuringutes sealhulgas voolutsütomeetrias [25, lk 447–449].

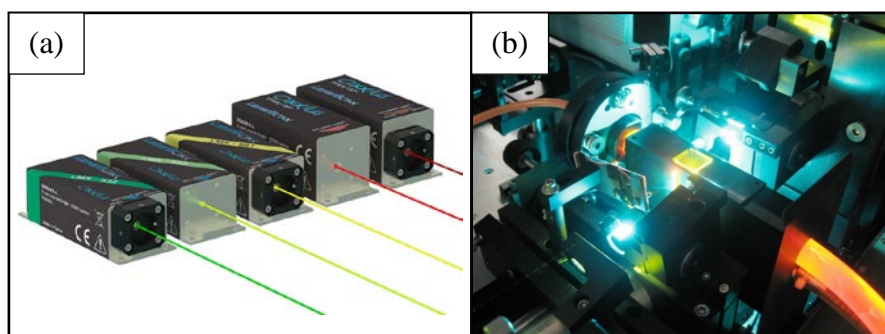
Gaaslasereid kasutatakse üldiselt tööstuses laserlõikamises ja -keevitamisel, põhjusel, et suured võimsused on saavutatavad. Näiteks süsinikdioksiidlaseriga pulseerivas režiimis on võimalik saavutada väljundvõimsus kuni 10 MW, CW režiimis kuni 20 kW. Kasutegur on neil kuni 20% [23]. Joonis 7 taustal töötavad ühe levinuma gaaslaseri kaks tüüpi – roheline (a) ja punane (b) He-Ne gaaslasers.



Joonis 7. (a) Roheline He-Ne gaaslasers [26], (b) punane He-Ne gaaslasers [27].

Dielektriklasersid ehk tahkislasersid (Joonis 8, a) on võimelised samuti saavutama suuri väljundvõimsusi, tehes nende kasutuse atraktiivseks jällegi suure hulga majandus- ja teadusvaldkondades. Nende puuduseks on üldiselt madal kasutegur. Näiteks YAG (*yttrium aluminum garnet*) laseritega on võimalik saavutada kuni 10 MW pulseerivas režiimis ja 400 W pidevas režiimis, kuid kasuteguriga kuni 3% [23].

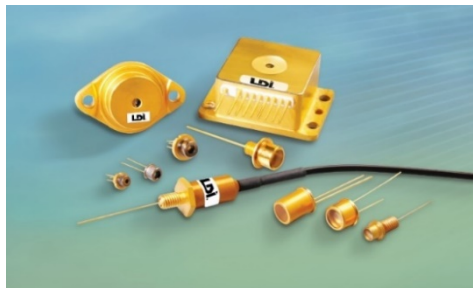
Vedeliklaseritel (Joonis 8, b) on suure võimsusega laseritest üks kõrgemaid kasutegureid, mis ulatub kuni 30%. Kõrge kasuteguri põhjuseks on võimendava keskkonnana kasutatav orgaaniline vedeliklahus, mis jahutab pöördhõive protsessi. Sõltuvalt kasutatavast orgaanilisest lahusest on kiirguse spektriala selekteeritav [28]. Rodamiin 6G on üks orgaanilisi lahuseid, mille põhjal ehitatakse ühte tüüpi vedeliklaserit.



Joonis 8. (a) Dielektrik- ehk tahkislasersid [29], (b) rodamiin 6G värvainel põhinev vedeliklasers [30].

Pooljuhtlaserid ehk LD (Joonis 9) pumbatakse elektriliselt. Sarnaselt transistoridele ja diodidele on LD-d valmistatud pooljuhtidest. Erinevalt diodist või transistorist tekitab aukude ja elektronide rekombinatsioon optilise võimenduse. Peegeldumine pooljuhina kasutatava kristalli otstelt tekitab kristallist optilise resonatori. Saavutatavad võimsused näiteks galliumarseenfosfiid (GaAsP) või indiumgalliumarseniid (InGaAs) pooljuhtlaseritel on pidevrežiimis kuni 100 mW, impulssrežiimis 10 W. Teoreetiliselt suudavad LD-d saavutada kasutegurit kuni 100% [23].

Kuna räni tootmisprotsesside arengud on võimaldanud tuua pooljuhtide suurust väiksemaks, on LD-d pakendatud üsna kompaktselt võrreldes teiste laseri tüüpidega (Joonis 9). Mainitud põhjused teevad LD atraktiivseks komponendiks madalama võimsusega elektroonilistes seadmetes, nagu CD/DVD-draivides ja printerites ning ka kiudoptilises kommunikatsioonis. LD-de turg on üks suuremaid – iga aasta müüakse kümneid tuhandeid infrapunaseid pooljuhtlasereid. Tänapäeval on nende hind vaid mõned dollarid [31, Ptk 1.9.12].

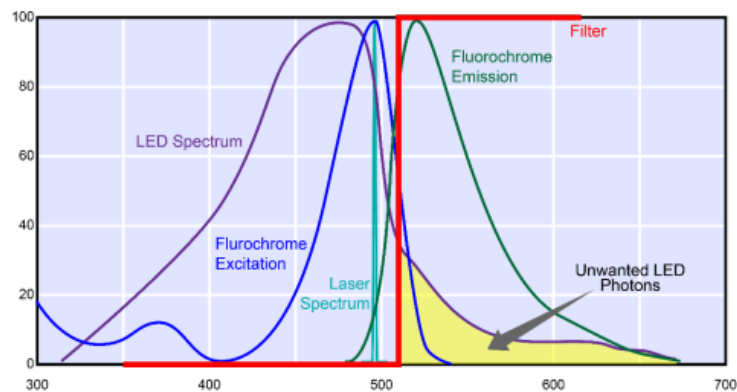


Joonis 9. Erinevates pakenditüüpides pooljuhtlaserid [32].

Viimastel aastatel on punased (635 – 640 nm), violetsed (~405 nm) ja UV LD-d integreeritud kommertsiaalsetesse ja laboritesse mõeldud voolutsütomeetritesse. Neid arenguid silmas pidades arvatakse, et LD-d ja tahkislaserid võtavad tulevikus üle ja asendavad siiani voolutsütomeetrias kasutatud valgusallikad. LD-de sobivus voolutsütomeetrile sõltub enamasti kasutatavast fluorofoorist ning kiirguse ribalaiusest.

Ühe lisakarakteristikuna, mis eristab LD-d teistest laseritest on suurem variatsioon kiirguse lainepikkustes, mis võib olla kuni mitmeid nanomeetreid. Variatsioon on tingitud väikeste kompositsioonierinevustega pooljuhimaterjalis. Selle kiirgamise lainepikkuse ebatäpsusest tingitud fluorofoori fluorostsentskiirguse intensiivsus võib tagajärjena olla ebarahuldav ja tekitada visuaalset müra objektide pildistamisel. Tootjad tihti peale on

teadlikud lainepikkuse variatsioonist, kuid kasutajatele seda informatsiooni alati ei edasta. Samuti on LD-de kiirguva lainepikkuse variatsioon sõltuv temperatuurist. Sellest hoolimata on nende väljund tüüpiliselt müravaba [31, Ptk 1.9.13]. Sarnaselt LED-le on LD-de töörežiim väga tundlik voolupiikidele, toitevoolu transientidele ja üldiselt ülevoolule, mille tõttu võib pooljuhtmaterjal hävineda COD (*catastrophic optical damage*) tõttu [33]. Joonis 10 illustreerib LED ja LD valgusspektrite märkimisväärset erinevust.



Joonis 10. Laseri ja LED fluorostseerumise erinevus kiirgusspektris [34].

Voolutsütomeetria jaoks kõige kasulikum valgusallikate omadus on koherentsus, mis praktikas tähendab, et footonite võimsust saab kontsentreerida väga väiksele pindalale. Kuna rakud veedavad valgustatavas punktis lühikest aega, aitab suurem võimsusetihedus konkreetsel lainepikkusel tõhusamalt mõõta markeeritud rakkude fluorestsentsi [35].

Vaadeldud valgusallikate liikidest ja omadustest selgub, et kaasaegse mobiilse tsütomeetri jaoks võiks olla sobiv LD, et vähendada optiliste komponentide hulka seadmes tervikuna, näiteks filtreid ja läätsesid. LED-ga võrreldes on LD-l suurem monokromaatsus, väiksem kiire divergents, suurem võimsusetihedus, ja kitsam valgusspekter. Pooljuhtlaseri eelised kiire kvaliteedis vähendavad rohkete filtrite ja läätsede kasutamise vajadust märkimisväärselt. Mainitud põhjustel on võetud vaatluse alla pooljuhtlaser kui projekti potentsiaalne valgusallikas.

LD parameetreid ja toimimist käsitlet lähemalt järgmises peatükis, lõppeesmärgiga leida sobiv pooljuhtlaser ning olla valmis LD mainitud puudujääke arvestama lõpplahenduse skeemis. Mainitud probleemid nõuavad, et LD toiteskeem, juhtimine ja kaitse oleks teadlikult ja ettevaatlikult arendatud.

4 Laserdiodi toimimine

Olles veendunud, et laserdiodil on potentsiaalselt õiged omadused rakkude pildistamise ja rakkude loendamise jaoks, on mõistlik uurida lähemalt, kuidas LD töötab. Peatüki eesmärgiks on vaadelda LD toimimist üldiselt ja loetleda olulisemaid LD andmelehtede parameetreid, mis määravad LD omadusi.

Pooljuhtlaserite optiline kiirgamine tuleneb laengukandjate paaride (elektronide ja aukude) energilisest rekombineerumisest. Kvantmehaanika teooria ütleb, et vaba elektroni energiaspekter on pidev. Kui elektron kuulub aatomi või kristallvõre koosseisu, siis on tema spekter diskreetne (mittepidev) ja energial saavad olla ainult kindlad väärtused. Öeldakse, et elektron saab olla teatud energiatasemel ehk kvantmehaanilises energiaolekus [36].

4.1 Aktiivne võimenduskeskkond

Tahkises moodustavad elektronide energiatasemed lubatud tsoone, milleks on valentsitsoon (valentsielektronide energiatsoon) ja juhtivustsoon (määrab aine elektrijuhtivuse) [36]. Voolu juhtivas režiimis täidavad juhtivustsooni elektronid ja valentsitsooni elektronidest maha jäetud augud. Rekombineerumisel tekkinud energiaerinevus kiirgub valgusena, mille sagedus on määratud laseri pooljuhtmaterjali keelutsoonist. Laserkiire tekitamiseks on vaja tekitada laengukandjate pöördhõivet, ehk piisavalt palju elektrone peab olema juhtivustsoonis, et valguse neeldumise tõenäosus oleks ülekompenseeritud kiirgamise tõenäosusega. Pöördhõive tekitamiseks tuleb pumbata pooljuhtlaserit, et ergastada piisavalt palju elektrone valentsitsoonist juhtivustsooni. Kuigi säärast pumpamist saab teha optiliselt, on LD-de tehnoloogiline üleolek saavutatud just elektrilise pumpamisega kümnete milliampritega ja pingega mõned voldid (Joonis 11, a) [37, lk 462].

LD kiirgav lainepikkus on määratud pooljuhtmaterjali valikust. Erinevatel materjalidel on valents- ja juhtivustsoonide vaheline keelutsoon erineva laiusega. Keelutsooni

ületamiseks vajalik energia määrab kiirguse lainepikkuse. Erinevaid liitpooljuhtmaterjalide kombineerides saab häälestada keelutsooni laiust ja seega kiirgusspektrit [37, lk 463]. Joonis 11, b on toodud erinevatele pooljuhtmaterjalidele iseloomulikud lainepikkused.

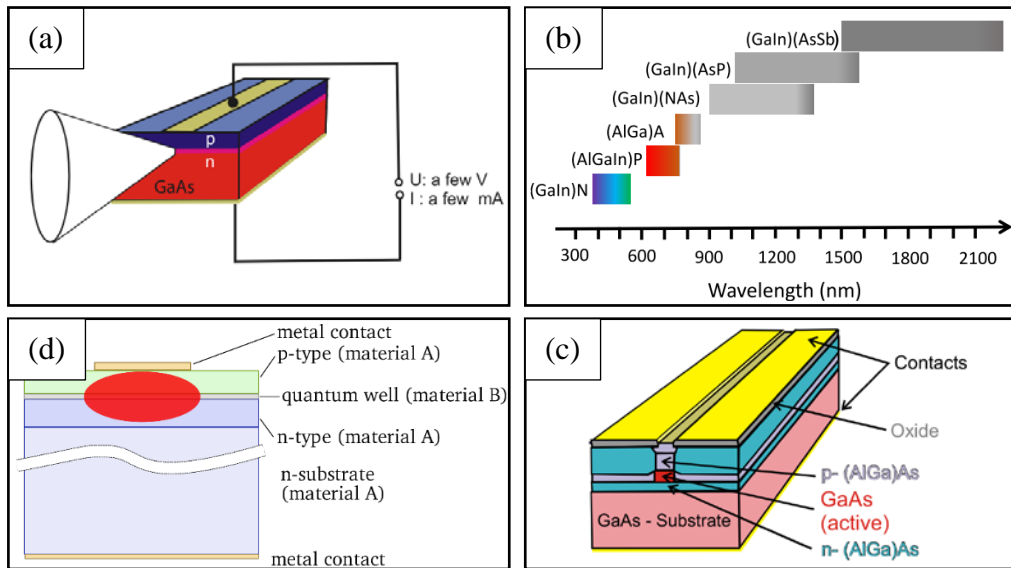
Üks esimesi LD versioone koosnes galliumarseniidil (GaAs) põhineval otsepingestataval pn-siirdel, millel toimub rekombinatsioon p-tüüpi pooljuhi kihi aukude ja n-tüüpi pooljuhi kihi elektronide vahel. Diodile sarnaneva pn-siirde karakteristikku tõttu on saanud LD oma nime. Laseri peeglid on moodustatud pooljuhtmaterjali ära lihvitud tahkudest. Saavutatav 32% peegeldustegur on piisav, et tekitada laseritingimused, kuid sellist tüüpi algelise laseri kasutegur on madal [37, lk 462].

Edasiarengud võimaldasid tõsta laengukandjate kontsentratsiooni pn-siirdel ja võtta kasutusele kahekordne heterostruktuur (Joonis 11, c). Põhiidee seisneb selles, et aktiivne pooljuhtmaterjal (nt GaAs) on teise suurema keelutsooniga materjali (nt (AlGa)As) vahele lükatud. Sellega tekitatakse potentsiaalauk, milles aukude ja elektronide liikumine on alana piiratud, et tõsta laengukandjate tihedust siirdealal. Kokkuvõttes on saavutatud intensiivsem pöördhõive [37, lk 462].

Kaasaegsed kristalli kasvatamise meetodid on toonud kaasa laserstruktuuride arengu, millega võimaldatakse suure täpsusega ette anda pooljuhtseadiste ruumilist kompositsiooni aatomi mõõtmetega võrreldavas suurusjärgus ning määrata samal tasemel pooljuhtmaterjali koostist. See tähendab, et laserite elektroonilisi ja optilisi omadusi saab märkimisväärselt täpsustada võrreldes varasemate pooljuhtmaterjalidega laseritega. Kvantkaevuga ehk QW (*quantum-well*) laserstruktuuride omadused ületavad lihtsiiretega pooljuhtmaterjalidel põhinevate laserite omadusi. See tõttu on QW laserstruktuur tänapäeva kommertsiaalsetes LD-des kõige levinum aktiivne võimenduskeskkond [37, lk 462].

QW laserstruktuuri (Joonis 11, d) võimendav keskkond koosneb ühest või rohkemast aatomi mõne aatomi paksusest väiksema keelutsooni laiusega pooljuhi kihist, mis on vaheldumisi suure keelutsooniga laiusega pooljuhi kihtidega vahelduv. Selline struktuur piirab väiksema keelutsooni laiusega pooljuhis laengukandjate liikumist potentsiaalaukudesse ehk kaevudesse. Kuna tervikstruktuuri temperatuurist piiratud ei saa laengukandjad aatomkihiga risti suunas liikuda, on nende vastavad energiatasemed

kvanditud ehk laengukandjatel saavad olla ainult diskreetsed kineetilised energiad [37, lk 462–463].



Joonis 11. (a) Pooljuhtlaseri tööpõhimõte [37, lk 462], (b) pooljuhtmaterjalide iseloomulikud kiirgusspektrid [37, lk 463], (c) kahekordse heterostruktuuriga LD [37, lk 463], (d) kvantkaevuga LD [38].

4.2 Resonaator

Aktiivne võimenduskeskkond lubab kokkuvõttes laengukandjatel liikuda ainult teatud energiatasemete vahel, mille määrab pooljuhtmaterjali keelutsoon. Lisaks sellele on oluline laserstruktuuri komponent resonaator, mille vahel pöördhõive parajasti aset leiab. See on vajalik, et tekitada positiivne tagasiside stimuleeritud kiirgamise võimendamiseks. Üks lihtsamaid versioone sellisest süsteemist on Fabry-Pérot resonaator (FPR), mis koosneb kahest samatasemelisest paralleelsest peeglist. Pooljuhtmaterjalide korral on idee lihtne – lihvitakse ära kristalli pind risti lainejuhiga [37, lk 465].

FPR-ga laseri kiirgavad lainepikkused ei ole täpselt määratletud. Resonaatoris on optilise pikkusega L maksimaalsed intensiivsused lainepikkustel $\frac{ncL}{2}$, kus c on valguse kiirus ja n on positiivne täisarv. See tähendab, et 500 mikromeetri suurusel laserstruktuuril on sadu lainemoode, mis tekitavad väljundisse multimoodilise kiirgamise. Multimoodiline kiirgamine on keeruline ja raskesti juhitud laseri töötamisel kõrgsageduslikul modulatsioonil [37, lk 465].

Multimoodilist kiirgamist on võimalik vähendada hajutatud tagasisidega ehk DFB (*distributed feedback*) laseritega. Selliste resonatorite lainejuhis moduleeritakse perioodiliselt pooljuhi murdumisnäitajat, mis tekitab mitmeid peegeldusi eri lainejuhi asukohtades. Teatud lainepikkustel toimub lainete konstruktiivne interferents, millest piisab resonatori positiivse tagasiside tekitamiseks. Saavutatav on ühemoodiline kiirgamine [37, lk 466].

Siiani kirjeldatud servast kiirgavate laserite üheks puuduseks on ka kehvem laserkiire ellipsikujuline ristlõige, mis tuleneb väljundstruktuuri ristküliku kujulise ava difraktsioonist [37, lk 466].

4.3 Laserdiodi parameetrid

LD-del on hulk mõõdetavaid parameetreid, mis jagunevad kategooriliste omaduste järgi elektrilisteks, ruumilisteks, spektraalseteks, optilisteks ja dünaamilisteks parameetriteks. Kommertsiaalsetes LD andmelehtedes on tavaliselt välja toodud vähemalt elektrilised, ruumilised ja spektraalsed parameetrid [39, lk 1].

Kõige olulisem elektriline parameeter on LD intensiivsuse (mõnikord väljundvõimsuse) ja voolu ehk L-I karakteristik, millega määratakse töövoolu ja lävevoolu punktid. Töövool on LD läbiv vool tootja poolt määratud väljundvõimusel normaalses töörežiimis. Lävevooluks on punkt, milles spontaanne kiirgamine läheb üle stimuleeritud (positiivse tagasisidega) kiirgamiseks. Mainimisväärt on asjaolu, et L-I karakteristik on ettenähtud töötemperatuuril ja töörežiimis lineaarne. L-I karakteristik muutub LD temperatuuri suurenedes ebalinearseks, sest lävevoolu punkt tõuseb eksponentsiaalselt temperatuuri kasvades [39, lk 1].

L-I karakteristikust on võimalik tuletada tõususirge efektiivsust, mida mõõdetakse ühikutes mW/mA (millivatt milliampri kohta). Temperatuuri tõustes ei nihku ainult lävevool, vaid ka tõususirge efektiivsus läheb alla. Näiteks LD, millel on efektiivsus 0,3 mW/mA temperatuuril 25°C, efektiivsus langeb iga 10°C tõusul 0,01 mW/mA [39, lk 2].

Voolu ja pinge ehk I-U karakteristik on teine oluline parameeter, mis iseloomustab pooljuhtmaterjalil tekkivat pingelangu normaalses töörežiimis mingil töövoolul. Kirjeldatud karakteristik on käitumiselt sarnane teiste diodide I-U karakteristikuga, mis ei sõltu suurel hulgal temperatuurist [39, lk 3].

Andmelehtedes võib tihti näha parameetrit nimega *kink*, mille definitsioon on varieeruv, kuid üldiselt tähistab väljundvõimsuse ja voolu sõltuvust pärast tööpunkti ja enne COD ehk pooljuhtmaterjali hävimist. Laseri L-I karakteristik ei pruugi töövoolest kõrgematel väärtustel olla lineaarne, vaid hoopis kõverdub sirgest eemale kõverjoonena [40, lk 9].

Elektrilistest parameetritest ei tohiks mainimata jätta LD maksimaalset vastupinget, mida tohib rakendada LD otstele seadet kahjustamata [41, lk 3]. Kuna mainitud vastupinge on üldjuhul vaid mõned voldid nagu paljudel pooljuhtidelgi, siis tuleb olla eriti ettevaatlik, et mitte eksida ühendamisel LD polaarsusega. Vigade vältimiseks oleks mõistlik rakendada kasutatavas juhtskeemis vastupingekaitset.

Ruumilistest parameetritest kõige olulisem on kaugvälja muster. LD-d ei kiirga täiusliku kollineaarsusega valguskiirt, vaid kiirgab ellipsi ristlõikega koonuselist kiirt. Kiire divergentsinurkadeks mõõdetakse LD aktiivse regiooni ristruual ja paralleelsel teljel, kus intensiivsus on pool maksimumist. Vastavatel telgedel on tavalisteks LD divergentsinurkadeks 30° ja 12° . Kuigi LD divergentsi üldiselt ei saa täielikult vältida, on arengud võimaldanud ümaramat kiire ristlõiget kohendades pooljuhtmaterjali murdumisnäitajat [39, lk 5].

Kiire intensiivsuse distributsioon erineb ühel teljel teisest. Ristruual teljel on LD intensiivsus sarnane Gaussi distributsiooniga, kuid paralleelsel teljel on rohkem multimoodilist ostsilleerimist, mis tagab teistsuguse ja tihti ebahühtlasema distributsiooni. Seetõttu on LD-de tootja poolt on tihtipeale defineeritud suunanurk, mis määrab kõige suurema intensiivsusega telje referentstahu suhtes. Tahu äärtesse on tihti jäetud sälgud, mis viitavad vastavalt ristruuale ja paralleelsele teljele [39, lk 5].

Spektrilaius on spektraalsete omaduste puhul üks olulisemaid parameetreid, mis määrab LD puhul tema rakenduse. Spektrilaiusega on võimalik öelda, kas tegu on ühe- või multimoodilise LD-ga. Sõltuvalt resonatori ehitusest, kas tegu on FPR või DFB tüüpi laseriga, on määratud kas kitsas või lai spektrilaius. Multimoodilistel, sealhulgas FPR laseritel on tihtipeale spektrilaius mõned nanomeetrid samal ajal kui ühemoodilistel nagu DFB laseritel on spektrilaius kuni 0,1 nanomeetrit [39, lk 7].

Spektrilaiuse sisse jääb üldjuhul tipplainepikkus, mille juures toimub maksimaalse intensiivsusega kiirgamine. Tootja poolt spetsifitseeritud maksimaalne optiline võimsus on just saavutatav sellel lainepikkusel [41, lk 3].

Mainitud spektraalsete parameetrite täpsused on tundlikud eriti toidetava voolu müra ning laseri toimise temperatuuri suhtes. Tipplainepikkus võib nihkuda nii L-I karakteristikute temperatuuri sõltuvuse tõttu kui ka töövoolu nihkumise tõttu [39, lk 7].

4.4 Laserdiodi valik

Kõige olulisem valiku tegur oli lainepikkus, mis peaks ergastama projektis kasutatavat fluorofoori FITC tipplainepikkusega 488 nm. Teine oluline tegur LD valimisel oli hind. Hinnalt jäävad laserdiodid, millel on integreeritud fotodiod, soovitud lainepikkusel (488 nm) vahemikku 500 kuni mõni tuhat eurot [42]. Madala võimsusega laserdiodi PD-ta on võimalik soetada umbes 30 € eest [43]. Majanduslikel põhjustel on välistatud anduriga LD valik. Käsitatud pooljuhtlaseri lainepikkust ja hinda arvesse võttes on projekti leitud pooljuhtlaser GH04850B2G tootjalt Sharp Microelectronics. LD puudutav informatsioon on leitud GH04850B2G andmelehel [44].

Tegemist on 488 nm helesinise tipplainepikkusega LD-ga, mille pooljuht on valmistatud indiumalumiinumgalliumnitriidi (InAlGaN) komposiidist. Pooljuhtlaseri võimenduskeskkonnaks on mitmekordne kvantkaev. Laine võnkumine toimub *transverse electric* moodis, mis tähendab, et elektromagnetlaine elektriline komponent võngub risti laine levimise suunaga ning magnetiline komponent levib laine levimise suunas. Pooljuhtlaseril on 3 terminali: katood, anood ja korpus. Pakenditüübiks on 5.6 mm diameetriga TO-18.

Tootja poolt lubatud maksimaalne optiline võimsus CW režiimis on 55 mW, maksimaalne vastupinge 2 V ja ümbrise temperatuur võib olla töö ajal vahemikus -10 – 60 °C. Lävevool on tüüpiliselt 40 mA kuni maksimaalselt 60 mA. LD ettenähtud võimsuse (50 mW) juures kiirgamine toimub tipplainepikkusel tüüpiliselt 487 nm või lainepikkusel vahemikus 480 – 495 nm, töövoolul 105 – 135 mA ja pingel 6 – 7.5 V. LD on võimeline toimima ka madalamal pingel ning optilise võimsusel. Kiire kuju iseloomustavad lubatud divergentsinurga vahemikud paralleelsel teljel ja ristruval teljel on vastavalt 6° – 10° ja 20° – 26°. Tõususerge efektiivsus on vähemalt 0.5 mW/mA, kuid tüüpiliselt 0.8 mW/mA.

5 Laserdiodi juhtimine

Peatükis 4 kirjeldatud LD toimise mehhanismide tõttu on oluline uurida, kuidas valgusallikat ohutult toita ja juhtida. LD soovitud parameetrid peavad jääma stabiilseks ja LD hävimise tõenäosus võiks jääda võimalikult madalale. Käesoleva töö olulisima peatüki puhul on plaanis kirjeldada LD erinevatest juhtimise põhimõtetest ja meetoditest, erinevate võtete iseärasustest ja puudustest. Lõputöö üks eesmärk, juhtskeemi disain, võtab inspiratsiooni uuritavast materjalist, et arendada ja realiseerida toimiv LD toitelahendus. Eraldi on tarvis mainida ka juhtskeemi lisakaitseid, mida rakendada tuleks, et kaitsta nii juhtskeemi kui ka LD.

LD korrektseks juhtimiseks on tarvis juhtskeemi, mis on võimeline toitma valgusallikat stabiilselt piisaval hulgal vooluga. Põhjus, miks pingesallikaid kasutada ei saa, on mitmeid. Esiteks pingesallikate pinget käivitamisel tõuseb üles, kuid vool on reguleerimata. LD-d on vooluga juhitavad seadmed, mille puhul väiksema muutuse impedantsis konstantse pinget puhul mõjutab voolu, mida väljundis tarvitatakse. Teine oluline põhjus peitub LD rakenduses, kus väljundiks on soovitud võimalikult konstantse võimsusega ja lainepikkusega kiirus. Skeemilahenduse eesmärgiks on konstantse vooluga juhtimine, et väljundvõimsus ja tipplainepikkus oleksid stabiilsed, kuna mõlemad sõltuvad voolust [45].

Põhjuseid, miks üldse arendada enda lahendus ja mitte kasutada valmismooduleid, on mitmeid. Esiteks on mitmetel kättesaadavatel valmismoodulitel, näiteks moodulil Micro Flexdrive V5 [46], puudu analoog- või digitaalmodulatsiooni võimalus. Teised kättesaadavad moodulid, näiteks moodulid tootjalt iC-Haus [47], on mõeldud fotodiodidega pooljuhtlaserite juhtimiseks. Nad ei ole võimelised fotodiodita pooljuhtlaserit juhtima. Uurimistöös on leitud, et kättesaadavus valmismoodulile, mis juhiks pooljuhtlaserit ilma fotodiodita ning millega saaks moduleerida väljundisignaali, on pigem puudulik. Mainitud põhjustel on leitud, et oma lahenduse leidmine on õigustatud.

5.1 ACC (Automatic Current Control)

Konstantse voolu juhtimisega üldjuhul muudetakse pinget vastavalt voolu muutumisele, et vool püsiks muutumatuna. Juhtimist tavaliselt lahendatakse vooluallikaga ja LD tarvitava voolu monitoorimisega negatiivse tagasiside konfiguratsioonis. Kirjeldatud meetod on automaatne voolujuhtimine ehk ACC, sest vool jääb konstantseks LD pingele kõikumistele [48].

Hoides ainult konstantset pinget kompenseeriks toiteallikas LD-i vooluvajadust voolu tõstmisega, mis aga potentsiaalselt kahjustab seadet. Voolu limiteerimata tekib soojuslabilööks suurenenud võimsuse tõttu, mida LD ei ole disainitud taluma. Vool, mis LD läbib, peab olema konstantne ja kontrollitav, et mitte lühiajaliseltki ületada LD tootja poolt määratud maksimaalset lubatud tarvitavat voolu [49].

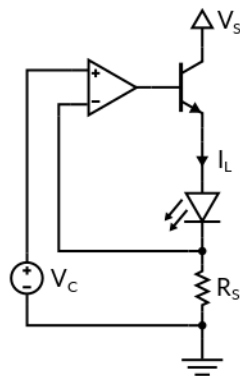
Teadaolevalt on olemas mitmeid eri keerukusega konstantse vooluallika topoloogiaid. Konstantset vooluallikat on võimalik ehitada pingestabilisaatoritest, mille põhiliikideks on lineaar- ja impulss-stabilisaatorid. Pikemalt stabilisaatorite tööpõhimõtteid selles töös ei kirjeldaks, kuid ülevaadet teha oleks kohane. Pingestabilisaatorid hoiavad ettenähtud väljundpinget sõltumata sisendpinge või koormustakistuse muutusest [50].

Lineaarstabilisaatorid kasutavad konstantse väljundpinge hoidmiseks negatiivset tagasisidet, mis avaldub pingejaguri väärtuste muutmises tagasisideahelas. Dünaamilise takistusega Zeneri diodi kasutatakse reguleeriva elemendina. Sisendpinge ja väljundpinge erinevus hajutatakse soojusena. Eelisteks on madal väljundpinge lainjus, kiire rakendusaeg koormuse muutustele ja madal EMI (*electromagnetic interference*). Kehvadeks omadusteks on madal kasutegur, skeemi suured mõõtmed ja radiaatori vajalikkus. Lineaarstabilisaatorite väljundpinget ei saa tõsta sisendpingest suuremaks [51].

Impulss-stabilisaatorite reguleerelement, milleks on jõutransistor, toimib lülitamisrežiimis, kus kõrgsagedusega töösükkel määrab laengu suuruse koormusele. Sarnaselt lineaarstabilisaatoritele väljundpinget hoitakse konstantsena negatiivse tagasiside abil. Impulss-stabilisaatorid saavutavad kordades parema kasuteguri, sest reguleerelement juhib voolu täielikult, seega transistor pingelangu ei tekita ega palju võimsust hajuta. Erinevalt lineaarstabilisaatoritest on võimalik nii sisendpingest suurem

kui ka väiksem väljundpinge. Puudusteks on suurem väljundpinge lainjus, aeglasem rakendusaege koormuse muutustele [51].

Konstantse vooluga juhtimise üks võimalik lahendus on stabilisaatoriga kontrollitud vooluallikas (Joonis 12), milles väljundpinge muutmine ja hoidmine sõltub konstantsest tagasiside kontrollpingest ja takistist, mis voolu määrab. Takisti väärtus võib olla muudetav potentsiomeetriga, et täpsustada koormusest sõltumatu väljundvool mingis vahemikus [52].



Joonis 12. Lihtsustatud ACC juhtskeem [53].

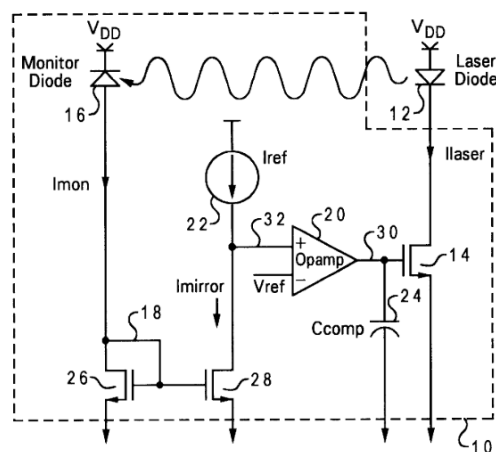
Märkimisväärne ACC juhtimise puudujääk on optilise väljundvõimsuse ebastabiilsus, sest voolu hoidmine ei käi väljundvõimsuse järgi, vaid LD-l tekkiva pinge järgi. LD L-I karakteristiku graafik nihkub paremale pn-siirde temperatuuri kasvades. Temperatuuri kasvades on konstantse voolu hoidmiseks LD-l langenud pinge suurenenud. Kui temperatuur hakkab ettenähtud töötemperatuuri ületama, siis sama optilise väljundvõimsuse tekitamiseks on vaja suuremat voolu, sest nii lävevool kui ka töövool nihkuvad. [48].

5.2 APC (Automatic Power Control)

Teine peamine meetod pooljuhtlaseri juhtimiseks on APC (*automatic power control*) ehk automaatne võimsusejuhtimine. APC juhtimine kasutab fotodiodi, mis tekitab LD optilise võimsusega proportsionaalse monitoorvoolu. Eelnevalt mainitud ACC juhtimise puuduseks oli kirjeldatud pooljuhtlaseri temperatuuri kasvamine, mis nihutab L-I graafikut paremale. Fotodiodi monitoorvoolu kasutatakse tagasiside kaudu

kontrollsignaalina, et hoida mingile konstantsele optilisele võimsusele vastavat voolu. Tulemuseks on stabiilsem väljundkiirgus, mis ei allu soojenemise mõjudele [48].

Üldine APC tööpõhimõte (Joonis 13) on realiseeritav konstantse vooluallika, operatsioonivõimendi, valgusetundliku seadme ja voolupeegli. Vooluallikas seab pooljuhtlaseri tööpunkti. Opvõimendi üheks sisendiks on mingi referentspinge, teine sisend on tagasisidesignaali, milleks on voolupeegli väljund. Fotodiodid genereerivad mõõdetud LD-ga proportsionaalse voolu, mida voolupeegel väljundisse kopeerib. Konstantse vooluallika vool ja LD väljundvõimsuse järgi genereerivad monitoorvoolu vastutavad opvõimendi väljundis tekkiva referentsvoolu eest, millega LD juhitakse [54, lk 1].



Joonis 13. APC juhtskeemi lahendus [54, lk 1].

Erinevalt ACC juhtimisest lubab APC juhtimine töövoolu muutmist ehk kompenseerimist, et hoida väljundis konstantset valguse intensiivsust. APC skeemi on võimalik disainida nii LD ümbrisesse integreeritud fotodiodi kui ka välise fotodiodiga. ACC skeemid võivad olla keerukamad ja tekitada rohkem müra pideva väljundvoolu muutmise tõttu [55].

APC juhtskeemide teiseks suureks puuduseks on soojuslabilöögiga oht, kui puudub liigtemperatuuri ja ülevoolu kaitse. Soojuslabilöök võib tekkida, kui APC juhtskeem üritab hoida stabiilset väljundvõimsust voolu tõstmise arvelt. Pooljuhtlaseri temperatuuri jätkuval suurenemisel võib hävineda või rikneda pn-siirdeala, vähendades LD eluiga [56].

Sõltuvalt ettenähtud pakutavatest optilistest võimsustest on LD-del varieeruvad kasutegurid, see tähendab, et LD-d ei teisenda kogu elektrilist võimsust optiliseks

võimsuseks. Madala võimsusega pooljuhtlaserid (<10 W) [57] nõuavad vähem toitevoolu ning genereerivad seetõttu vähem soojust, ehk neil on parem kasutegur [55]. Seetõttu on piisavalt ohutu ja aktsepteeritav juhtida madala võimsusega pooljuhtlasereid ACC režiimis, temperatuuri järgi kontrollimata [58], [59, lk 9].

5.3 Juhtskeemi lisakaitse

Siiani on kirjeldatud peamiste LD tõrkemehhanismidena pooljuhtlaseri juhtimisel COD ning ülesoojenemist pn-siirdealal. LD on äärmiselt tundlik voolupiikidele, toitevoolu transientidele ja voolule, mis vähem kui millisekundi jooksul ületab ettenähtud lubatud parameetrid. Sümptomiteks võivad olla LD vähenenud optiline võimsus, lävevoolu nihkumine, kiire divergentsi muutus, võimetus fokuseerida ja lõpuks pooljuhtlaseri hävinemine. LD riknemine kui ka hävimine võib olla kulukas nii ajaliselt kui ka rahaliselt [39, lk 3].

Rakendatavad kaitse toiteallika poolelt peaksid integreerima voolupiirikut juhtimisvoolule, takistama vastupinge olukorda pooljuhi siirdealal ning vähendama transiente ja piike toitesignaalis. Kindlasti on oluline, et toiteallikas ja skeemilahendus ei genereeri ise oma müra. Soovitatav on temperatuuri piirav kaitse ning lühisekaitse. Skeemi voolu piikide piiramiseks rakendatakse voolu aeglast tõstmist, et ohutult saavutada ettenähtud töövool. Sellist lahendust nimetatakse *soft-start* (SS), mõnikord *slow-start* skeemiks [59, lk 3].

SS skeem kaitseb sisselülitamisel tekkinud voolupiikide eest, tekitades käivitamisel voolu hilistumise, mida mõõdetakse tavaliselt mikro- või millisekundites. Väljundvoolu tekitamist hoitakse kinni, kuni käivitamisel tekkinud juhtskeemi transiendid on lõplikult maha surutud. Sõltuvalt piikide suurusest peab hilistumine olema piisavalt pikk, kuid enamasti 100 ms on piisav [59, lk 5].

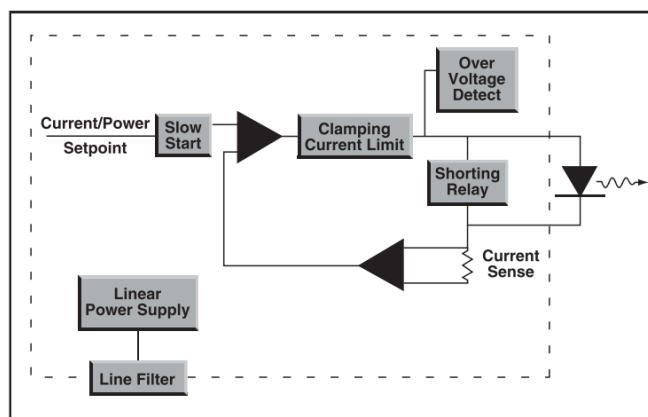
Voolupiirik on tihti kriitiline kaitsekomponent, mis ennetab olukordi, kus kogemata ületatakse juhtvoolu ettenähtud töövoolu maksimumist. Piirik seatakse tavaliselt maksimaalsest töövoolust pisut kõrgemale, et lubada voolu fikseerimist mingis vahemikus pooljuhtlaserit ohutu panemata [59, lk 5].

Ülepingekaitse on lisameede, et vältida väljundpinge küllastust olukorras, kus koormuse impedants võib järsku suurenedada, samal ajal kui üritatakse hoida konstantset voolu.

Väljakujunenud olukorras ei pruugi regulaator suuta genereerida määratud töövoolu. Veel enam võib toiteallikas koormuse impedantsi vähenemisel rahuldada tekkinud voolunõudlust liiga järsult ja viia väljundi lühisesse või ületada voolu piirväärtust, mille ületamise eest skeem kaitstud on. Üldiselt muutub pooljuhtlaseri impedants aeglaselt, kuid kõige lühikesemgi ülevoolu olukord võib ohtlikuks kujuneda [59, lk 6].

Toitesignaali transiendid võivad samuti potentsiaalselt kahjustada pooljuhtlaserit. Transiendid võivad tekkida nii toiteallika poolelt kui ka impulss-stabilisaatori kõrgsageduslikust lülitamisest. Elektriline müra, mis kiirgab vooluahela juhtmetes või radades, nõuab adekvaatset mahasurumist. Müra mahasurumiseks rakendatakse mitu filterkondensaatorit sisendis kui ka väljundis [59, lk 6–7].

Kõrgvõimsuseliste pooljuhtlaserite temperatuuri on tarvis kontrollida, et vältida mitmete LD parameetrite ebastabiilsust pn-siirde soojenemisel. Temperatuuri anduriga juhitakse näiteks Peltier' elementi, mis jahutab valgusallikat. Madalavõimsuseliste pooljuhtlaserite jaoks sageli piisab passiivsetest vahenditest, nagu radiaatorist või metallkorpusest, et hajutada soojust [59, lk 9].



Joonis 14. ILX *Lightwave* juhtskeemi kaitsemehhanismide plokkskeem [59, lk 5].

Peatükis kirjeldatud juht- ja kaitse skeemide lahenduste järgi valmistatakse kompaktsed integraallülitised, mille eesmärgiks on LED-de, LD-de ja teiste dünaamiliste impedantsidega seadmete konstantse vooluga või võimsusega juhtimine. LED juhtskeemide integraallülitused on üldiselt eesmärgilt ja sobivuselt sarnased madala võimsusega LD-de juhtimiseks, kuid tuleks veenduda, et pooljuhtlaseri ohutu juhtimise kriteeriumitele vastavad skeemi kaitse komponendid oleksid olemas.

5.4 Juhtskeemi IC valik

PD-ta laserdiodi saab juhtida ACC režiimis, seega eelnevalt uuritud materjalile ja LD edukaks juhtimiseks mõeldud kriteeriumitele tuginedes sai valitud skeemi peamiseks komponendiks IC (*integrated circuit*) tootenimega LTC3454 *Buck-Boost Driver* tootjalt Analog Devices. Järgneva informatsiooni aluseks on LTC3454 andmeleht [60].

Tegemist on impulss-stabilisaatoril põhineva voolu regulaatoriga, mille kontrollahela takistitust muutes on võimalik fikseerida väljundvool täpsusega 3.5%. IC on optimeeritud juhtima ühte valgusdiodi, mis tarbib CW režiimis kuni 1 A. Sisendiks võib olla toiteallikas pingevahemikus 2.7 – 5.5 V. Maksimaalne reguleeritud väljundpinge on vahemikus 4.95 – 5.35 V. Impulss-stabilisaatoritele kohaselt on lubatud kasutegur üle 90%.

IC valikul oli oluline arvestada nii juhtskeemi enda kui ka pooljuhtlaseri kaitsmise kriteeriumeid. LTC3454 integreerib mitmeid kasulikke kaitseskeeme, mis täiendavad pooljuhtlaseri ohutut juhtimist peale konstantse voolu reguleerimise. Nimelt on integreeritud lühisekaitse, mida rakendatakse sisendvoolu 3.4 A ületamisel vooluallika ühendamise katkestamisega, mille järel tühjendatakse teist ahelat pidi induktorivool võimalikult kiiresti ja ohutult.

Ülepingekaitse, juhaks kui väljundahel katkeb, on rakendatud veavõimendiga. Võimendi ei mängi rolli skeemi normaalse töö korral, kuid pinge kerkimisel väljundis tühise korral võtab veavõimendi reguleerimiseahela töö üle, et vältida väljundpinge kontrollimatut tõusmist. Ülepingekaitse rakendub ligikaudu 5.15 V juures.

LTC3454 kaitsetest olulisim komponent on fikseeritud SS, mis rakendub LTC3454 käivitumisel või taaskäivitumisel. SS hoiab sisemise veavõimendi väljundpinget kinni ning 200 mikrosekundi jooksul lubab pingel lineaarselt tõusta 0.9 voldist 2.1 voldini. Sellega piiratakse impulss-stabilisaatori töötsükli kiirust ehk töövoolul ei lasta momentaanselt rakenduda.

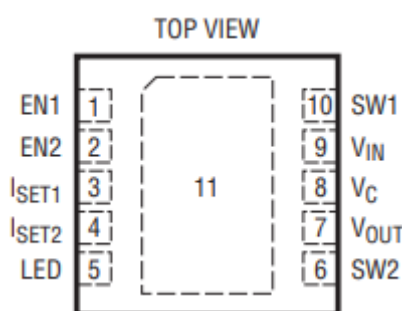
Järgnevas peatükis käsitlen skeemi realiseerimist LD GH04850B2G juhtimiseks ACC režiimis LTC3454 kiibiga. Vaatluse alla ei ole võetud eraldi temperatuuri juhtimise skeemi, kuna selle vajalikkus pole selge ning esialgsel hinnangul on piisavalt ohutu madalavõimsuselist pooljuhtlaserit toita ka ainult voolu juhtides.

6 Skeemi realiseerimine

Käesolevas peatükis saab käsitletud skeemi realiseerimist makett- ja perfoplaadil ning jõudmist trükkplaadi disainini. Skeemi koostamise teema all on kirjeldatud komponentide valikut ja argumentatsiooni, antud on esialgne hinnang skeemi jätkusuutlikkusele ning skeemilahendus kokkupanenduna simuleerimistarkvaras LTspice. Sama tarkvara kasutades on tehtud mõned simulatsioonid, et kinnitada esialgset hinnangut skeemi toimimises ning viia vajadusel sisse muudatusi. Viimases alapeatükis on kirjeldatud skeemi kokkupanekut makettplaadil ja trükkplaadi disainimist tarkvarapaketi CircuitMaker.

Kõige olulisem skeemi toimimise mõõtepuuks on ohutu konstantse voolu seadmine. Moduleerimise saavutamine on kõige vähem kriitiline. Moduleerimise toimima saamine on lisaväärtus antud projekti jaoks.

Skeemi arendamise alusena on kasutatud LTC3454 andmelehe kiibi joonist, mis täpsustab viikude nimetusi ja funktsioone.



Joonis 15. LTC3454 kiibi joonis [60].

Väljundvool on programmeeritav kasutades kahte sisendit EN1 ja EN2, mis lülitavad vastavaid sisendeid I_{SET1} ja I_{SET2}, mille takistused määravad väljundi voolutaseme. Näiteks kui EN1 on kõrge, toimub väljundvoolu seadmine I_{SET1} järgi. Induktor, mille töö on hoida lülitamise ajal voolu, ühendatakse SW1 ja SW2 vahele. Toiteallikaks on valitud nominaalpingega 3.7 V liitiumioonaku, mis on ühendatud V_{IN} ja neutraali (GND) vahele.

Reguleerimine toimub viigu V_{OUT} kaudu, seega koormus ühendatakse V_{OUT} ja LED terminali vahele. LD katoode ühendatakse viiku V_{OUT} ja anood LED viiguga. LED terminaliga ühendatud automaatne veanullimisvõimendi (*autozeroing error amplifier*) vastutab töövoolu punkti seadmise ja hoidmise eest. Maksimaalne reguleeritud väljundpinge on vahemikus 4.95 – 5.35 V.

Terminaliga V_C ühendatakse 0.1 μF kondensaator, mille järgi sisemiste veavõimendite väljundit kompenseeritakse. Kuna V_C viigu pinge määrab sisemiste transistoride lülitamise töösükli, vastutab kondensaator 1 MHz sagedusest madalamate signaalide tõrjumise eest.

Sisendkondensaator on mõeldud müra eraldamiseks sisendi ja väljundi vahel. Väljundkondensaatori ülesandeks on laadida ja tühjeneda, et vähendada väljundsignaali lainjust. Teiseks ülesandeks on vähendada kõrgsageduslikku müra. Mõlemad peaksid olema madala ESR-ga keraamilised kondensaatorid väärtustega andmelehe järgi vähemalt vastavalt 2.2 μF ja 10 μF . Väärtuste valik sõltub omakorda väljundvoolu moduleerimise tingimusest, millest on ka kirjeldatud järgmises alapeatükis.

6.1 Skeemi koostamine

Lugedes lähemalt pooljuhtlaser GH04850B2G andmelehte [44], on selge, et lävevool, kus laser stimuleeritult kiirgama hakkab, on tüüpiliselt 40 mA ja maksimaalselt 60 mA, kui laser on soojenenud. Tüüpiline töövool ettenähtud väljundvõimsusega (50 mW) kiirgamisel on 105 mA ning maksimaalselt 135 mA. Seega väljundvoolu seadevahemikuks oleks kontrollahelas vaja püsitakistit, millega ei tekitataks väljundis üle 135 mA. Jadamisi ühendatakse muuttakisti, millega pole suurt mõtet alla 40 mA väljundvoolu seada. Kontrollahelasse lisatavad kaks muuttakistit peen- ja jänehäälestamiseks annaksid täpsema kontrolli väljundvoolu üle.

Väljundvoolu on võimalik seada neljal tasemel, kui kasutada fikseeritud väärtustega takisteid kontrollahelas. Ometi piisab käesoleva projekti jaoks ühest sisendist ja kontrollahela muuttakistist, et väljundvoolu muuta mingis vahemikus. Kasutatud on sisendeid EN1 ja I_{SET1} . EN1 on ühendatud V_{IN} kaudu kõrgeks ning EN2 ja I_{SET2} neutraali kaudu madalaks.

LTC3454 andmeleht [60] täpsustab väljundvoolu seadmiseks kontrollahela I_{SET1} kaudu järgneva valemi:

$$I_{LED} = 3850 \left(\frac{0.8 V}{R_{ISET1}} \right)$$

Avaldades R_{ISET1} kaudu saaksime:

$$R_{ISET1} = 3850 \left(\frac{0.8 V}{I_{LED}} \right)$$

Arvutatud püsitakisti väärtus, mis vastab väljundvoolule 140 mA, on 22 kΩ ning selle jaoks on olemas standardväärtus. Muuttakistite koguväärtus oleks 70 kΩ (50 kΩ ja 20 kΩ või alternatiivina 47 kΩ ja 22 kΩ takistuste summa) kui väljundvool on ~33 mA. Väljundvoolu seatavaks vahemikuks on seega valemi järgi 33 – 140 mA.

Induktori väärtuse valikust sõltub induktorivoolu pulsatsioon. Induktorit läbib nii madal kui ka kõrgsageduslik voolukomponent. Kuna väljundkondensaatoritel on kõrgsageduslikule voolule madal impedants, siis kondensaatori ESR (*equivalent series resistance*) tõttu tekib väljundisse ebasoovitud pingepulsatsioon.. Väljundkondensaatoritel peaks olema piisavalt madal ESR ning induktoriväärtus võiks olla piisavalt suur. Andmeleht soovib kasutada 4.7 μH või 5.0 μH väärtust, kuid pakub hinnatavaks induktoriväärtuseks valemi:

$$L > \frac{V_{IN(MIN)}^2 \cdot (V_{OUT} - V_{IN(MIN)}) \cdot 100\%}{f \cdot I_{OUT(MAX)} \cdot \%Ripple \cdot V_{OUT}^2}$$

, kus $V_{IN(MIN)}$ on madalaim toiteallika pinge, V_{OUT} on väljundpinge, f regulaatori lülitamissagedus, $I_{OUT(MAX)}$ maksimaalne väljundvool ja $\%Ripple$ induktorivoolu pulsatsioon. Kasutatud on väärtusi vastavalt 3.3 V, 5 V, 1 MHz, 0.14 A ja 10%, et arvutada induksiooniks 52 μH, ümardatult standardväärtuseni 47 μH, mis oleks valitud induktori väärtus.

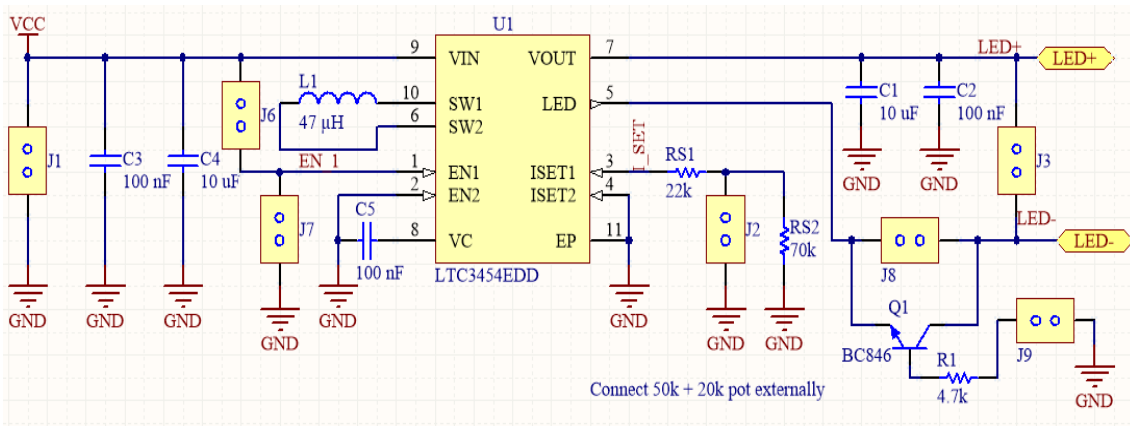
Projekti üheks eesmärkideks on püstitatud väljundvoolu modulatsioon, et sünkroniseerida kaamerat, mis pildistavad mikrokanalis liikuvaid objekte. Kui oleks vaja jäädvustada pildile 10000 osakest sekundis, siis kiirgust oleks vaja juhtida sagedusel 10 kHz.

Mõnikord rakendatakse PWM (*pulse-width modulation*) ehk pulsilaiusmodulatsiooni EN viikudele, mis regulaatori tööd käivitab. Kiibi andmelehes mainitud lahendust ei

soovitata, seega ühe lahendusena võiks koormust otse lülitada sisse ja välja transistori abil. Andmelehe järgi väljundpinge ei küllastu üle 5.15 V tühise korral, seega esialgsel hinnangul koormuse lülitamine probleemi ei tekita. Lülitav komponent võib olla nii isoleeritud paisuga väljatransistor (MOSFET) kui ka bipolaartransistor.

Potentsiaalseid parasiitinduktiivsused- ning mahtuvused võivad mõjutada regulaatori ja väljundi stabiilsust. Kasutades nii väljundis kui ka sisendis nii 10 μF kui ka 100 nF väärtusega kondensaatorit võimaldaksid lahtisidestada eri sageduskomponentidega müra väljundsignaalist. 100 nF on impulss-stabilisaatorite puhul tüüpiliselt kasutatud väärtus, et vähendada sisemiste lülitamiste tekitatud müra.

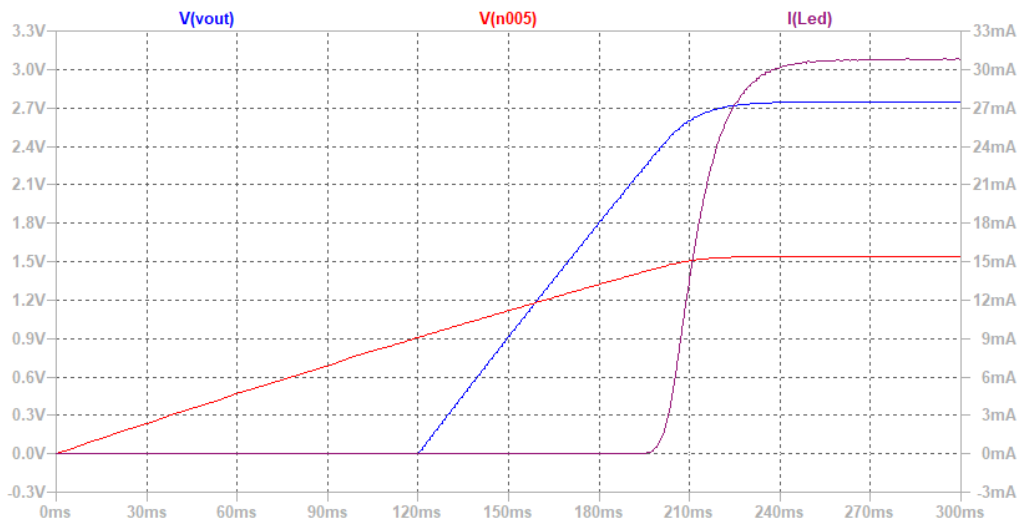
Peatükis kirjeldatud väärtustega komponentidega ja paika pandud ühenduste alusel on koostatud skeem (Joonis 16). Tehtud skeem on abiks tulevates peatükkides simulatsiooni tegemises ja trükkplaadi peale kokkupanekus ning PCB arenduses.



Joonis 16. LTC3454 kiibil põhinev moduleerimisvõimalusega ACC skeem.

6.2 Skeemi simuleerimine

Mõistlik oleks veenduda enne makett- ja perfoplaadile kokkupanemist ning trükkplaadile arendamist, et koostatud skeem on võimeline tekitama ja hoidma mingit konstantset voolu, mis läbib dünaamilise impedantsiga koormust. Simuleerimise eesmärk oleks jälgida CW-režiimis ning PWM moduleerimisel väljundvoolu, kui kontrollahela takistus on 80 k Ω . Väljundvool peaks olema ligikaudu 39 mA antud takistuse juures. Simuleerimisel on kasutatud koormusena LED valgusallikat STWB12C.

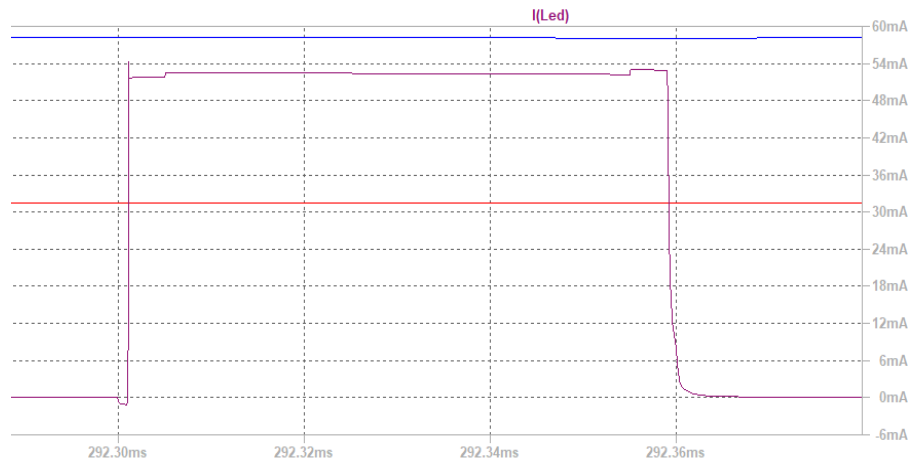


Joonis 17. Väljundvoolu CW simulatsioon tarkvaras LTspice.

Simulatsioon (Joonis 17) võimaldab teha mitut tähelepanekut. Esiteks on näha hästi skeemi SS-kaitse rakendust, kui pinge V_C viigul (V(n005)) tõuseb 0.9 voldist kuni ligikaudu 1.5 voldini. Väljundpinge tõuseb samuti lineaarselt ning väljundvool hakkab tõusma, kui saavutatud pinge on ligikaudu 2.2 V. Nähtus on kooskõlas andmelehega.

Teiseks on näha, et reguleeritud väljundvool ei ole ligikaudu 39 mA nagu valem ennustaks. Teiste sarnaste simulatsioonidega aga erinevate seadetakistite puhul tehtud simulatsioonid annavad igal korral erinevuse valemis arvatutuga umbes 8 mA. Põhjenduseks on kaks võimalikku eeldust – kas andmelehe pakutud valem on ebatäpne või simulatsioon on ebatäpne. Enne reaalselt kokkupanekut ja katsetamist on ebamõistlik võtta simulatsiooni lõpliku tõena.

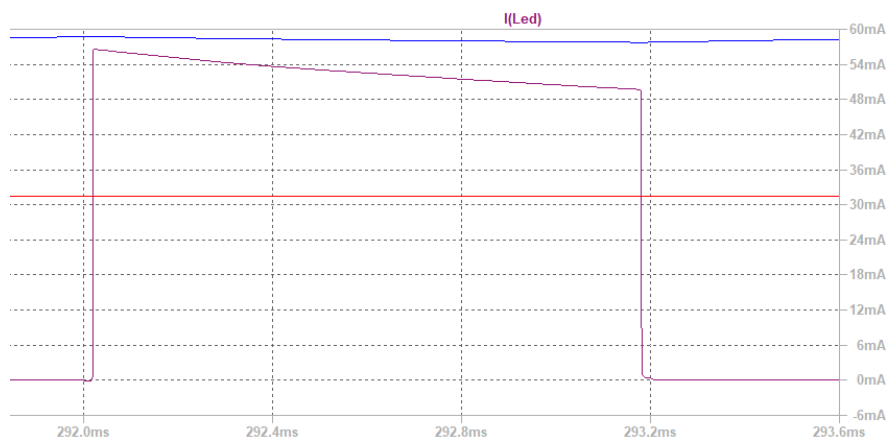
PWM modulatsioon on simuleeritud kasutades PWM signaali, mis on ühendatud MOSFET lättega. Vaadeldud on tulemusi sagedustel 500 Hz ning 10 kHz, töötükliga 50%.



Joonis 18. Väljundvoolu simulatsioon PWM modulatsiooniga sagedusel 10 kHz.

Üldiselt on signaalikuju (Joonis 18) (tumepunane joon) lainjas ja meenutab nelinurka. Signaali tõusul on samas umbes 4 milliamprine *overshoot*. Teiseks on näha, et väljundvool on ettenähtud tasemest (39 mA) umbes 1.33 korda suurem – relaksatsioonis ligikaudu 51 mA. Teistel sagedustel tehtud PWM simulatsioonid näitavad samuti sarnast ebakõla, kus seatav voolutase lülitatud olekus on 1.33 korda suurem.

Võimalik jällegi, et simulatsioonid pakuvad ebausutavaid tulemusi, kuid eksisteerib variant, et väljundvoolu reguleerimist mõjutab juhtimissignaali töötsükkel. Kui koormus lülitub sisse näiteks väiksemal osal signaali perioodist, kompenseerib kiibi regulatsioon suurema vooluga, et täita voolunõudlust, mis tekib väljalülitamisel väljundpinge küllastumisel. Selline käitumine võimaldaks tekitada suure vooluga lühikese kestvusega impulsse.



Joonis 19. Väljundvoolu simulatsioon PWM modulatsiooniga sagedusel 0.5 kHz.

Madalal PWM sagedusel (Joonis 19) on näha voolu signaalikuju (tumepunane) kerget moonutust, mis väljendub mõlema frondi tippväärtuste 6 mA erinevusega. Jällegi on näha, et signaali vool on keskel läbi 51 mA.

Tulemustest võib järeldada, et korraliku aktiivfiltri disainita on keeruline parimat müravaba moduleeritud signaali kätte saada. Teiseks mõjutab ilmselt PWM töösükkel töövoolu, kuid valemit voolu seadmiseks on keeruline tuletada, sest rolli võivad mängida mitmed tegurid. Kuna vooluseadmise jaoks töösükli täpne mõju teada ei ole, võib samasäärane käitumine madalavõimsusega pooljuhtlaserile ohtlik olla. Esialgu on tehtud eeldus, et töösükkel on konstantselt 50%, et mõju väljundvoolu seadmisele oleks võimalikult väike. CW režiimis erineb vool valemist leitavast väljundvoolust 8 mA, kuid signaal paistab olevat stabiilne.

6.3 Skeemi kokkupanek ja tulemused

Skeemi kokkupaneku eesmärk oli veenduda, et skeem on realselt võimeline voolu reguleerima ja hoidma ning veenduda tulemustes, mis kinnitaksid, et lahendus on jätkusuutlik. Makett- ja perfoplaadi katsetamisel kasutati esialgu koormusena valgusdiodi, seejärel projekti valitud laserdiodi. Lõpuks sai kogutud andmete ja tähelepanekute põhjal arendatud PCB ehk trükkplaadi lahendus.

Alguses sai komponendid makettplaadi kaudu ära ühendatud ning koormuseks kasutada lihtsat takistit. Näha oli CW ja PWM režiimi stabiilset töötamist. Sealhulgas takistiga toimimise ajal oli võimalik PWM moduleerimisel, et väljundvoolu käitumine kattus ühe simulatsiooni tulemusega (Joonis 19) – madalatel sagedustel oli visuaalselt märgata voolu kõikumist või piike. LED või LD-ga lõpetas skeem stabiilse reguleerimise ja toimimise. Potentsiaalne ostsilleerumine ja kontrollahela müra ei taganud stabiilset väljundit.

Kuna makettplaadi radadel võisid eksisteerida tundliku kiibi jaoks rolli mängivad parasiitinduksioonid või -mahtuvused, seoti neid asjaolusid esmalt ebaõnnestumise põhjuseks. Näiteks tagasisideahelas võivad olla hilistumised kõrgsagedusliku müra tõttu. Seetõttu sai joodetud skeem kokku ka perfoplaadil (Lisa 3), et müra rolli pisendada.

Perfoplaadi lahendus töötas esimesel katsel nii PWM ja CW režiimis, kuid lakkas seejärel töötamast ebaspetsiifilistel asjaoludel, mille korral väljundvoolu ei tekitatud. Kasutatud

oli ohutusabinõusid nagu maandatud lauamatt ja käevõru. Probleemi allikaks ei paistnud olevat kiibi LTC3454 ega valgusallika riknemine. Valgusallikas funktsioneeris individuaalselt labori toiteallikalt ning kiip suutis tühisel reguleerida 5.15 V. Skeem samuti oli korrektne. Järelikult moodustused mürakomponendid, mida piisavalt ei summutatud ja mõjutasid voolureguleerimist.

Lahenduse jätkusuutlikkuse viimaseks veendumiseks oleks mõistlik arendada PCB lahendus. Varasemad kokkupaneku kogemused näitasid skeemi toimimist mõnel katse korral ning trükkplaat aitaks elimineerida potentsiaalsed veaolukorrad. Skeem sai kantud ümber PCB disainimistarkvarasse CircuitMaker, kus ühendatavad SMD (*surface mount device*) komponendid võimaldaksid teha võimalikult lühikesi ühendusi skeemi kriitilistes asukohtades ning tuua komponendid võimalikult kiibi lähedale.

PCB lahenduse jaoks sai loodud lühikesed ühendused ja komponendid toodud kiibi lähedale. Mõlemal pool kiipi sai lisatud neutraaltasand. Kuna tasand katab kogu kiibi pindala, siis on võimalik suurt hulka voolu tagasi juhtida, mis aitab müra minimaalsena hoida.

Kirjutamise hetkeks on valminud PCB disain (Lisa 4) ja tootjale saadetud vajalik Gerberi fail, mille järel on vaja oodata tellitud trükkplaatide ja komponentide saabumiseni. Trükkplaatide kohale jõudmisel on planeeritud lõpplahenduse katsetamine ning veendumine, et skeem on suuteline nii CW ja PWM režiimis stabiilselt pooljuhtlaserit juhtima.

7 Kokkuvõte

Lõputöö üheks eesmärgiks oli uurida teadusprojekti PRG620 arendatava voolutsütomeetri üldiseid toimimispõhimõtteid ning voolutsütomeetrias kasutatud valgusallikaid. Voolutsütomeetrias on tänapäeval kasutatavaid valgusallikad LED ja pooljuhtlaser, et tekitada mikrokanalites uuritavatel fluorofooriga märgistatud objektidel fluorestsentsi.

Pooljuhtlaseri väiksemal kiire divergentsil, suuremal monokromaatsusel ning suuremal koherentsusel on selge eelis teiste valgusallikate üle. Need omadused lubavad suurema võimsustihedusega kitsamal spektril tekitada fluorestsentsi, et eristada paremini mikrokanalites voolavaid objekte. Projekti sai valitud tipplaine pikkusel 488 nm kiirgav pooljuhtlaser GH04850B2G tootjalt Sharp Microelectronics.

Teiseks projekti oluliseks eesmärgiks oli leida lahendus, millega ohutult ja konstantselt juhtida valitud valgusallika töövoolu. Valitud lahendus põhineb kiibil LTC3454 *Buck-Boost Driver* tootjalt Analog Devices. Kiip sisaldab *soft-start*, lühise-, ülevoolu- ja ülepingekaitset ning suudab reguleerida voolu kuni 1 A. Kiip töötab toiteallikaga pingevahemikus 2.7 – 5.5 V. Disainitud juhtskeemi eesmärk oleks nii CW kui ka PWM režiimis kontrollida tagasisideahela takistitega seatud väljundvoolu.

Lõppeesmärgiks oli realiseerida lahendus makett-, perfo- ja lõpuks trükkplaadil, et veenduda skeemi toimimises ja jätkusuutlikkuses nii CW kui ka PWM režiimis. Kuigi simulatsioonid näitasid teatud skeemi stabiilsust ja toimimist, olid reaalsuses makett- ja perfoplaadi lahendused ebastabiilsed ja nende katsete tulemused ebaselged. Trükkplaadi ehk PCB lahendus sai disainitud, et vähendada võimalikke ebastabiilsust tekitavaid faktoreid, ehk lõplik skeemi toimimise katsetamine jääb ootama tootjalt trükkplaadi saabumist.

Kasutatud kirjandus

- [1] „Biocompare. Ostjajuhend biomeditsiini seadmetele“. <https://www.biocompare.com/Editorial-Articles/146008-Cell-Analysis-at-the-Bench-Benchtop-Flow-Cytometers/> (vaadatud apr 17, 2021).
- [2] „LabX. Teaduslike mõõteseadmete e-pood“. <https://www.labx.com/flow-cytometers> (vaadatud apr 17, 2021).
- [3] „Excedr. Teaduslike mõõteseadmete liising“. <https://www.excedr.com/blog/how-much-does-a-flow-cytometer-cost/> (vaadatud apr 17, 2021).
- [4] A. L. Givan, „Chapter 1 Flow cytometry: An Introduction“, *Methods Mol. Biol.*, kd 699, lk 1–29, doi: 10.1007/978-1-61737-950-5.
- [5] J. Picot, C. L. Guerin, C. Le Van Kim, ja C. M. Boulanger, „Flow cytometry: Retrospective, fundamentals and recent instrumentation“, *Cytotechnology*, kd 64, nr 2, lk 109–130, 2012, doi: 10.1007/s10616-011-9415-0.
- [6] K. Pärnamets *et al.*, „Optical Detection Methods for High-Throughput Fluorescent Droplet Microflow Cytometry“, *Micromachines*, lk 1–20, 2021.
- [7] „Flow Cytometry - A Basic Introduction“. <https://flowbook.denovosoftware.com/chapter-2-flow-cytometer> (vaadatud apr 17, 2021).
- [8] Y. Han, Y. Gu, A. C. Zhang, ja Y. H. Lo, „Review: Imaging technologies for flow cytometry“, *Lab Chip*, kd 16, nr 24, lk 4639–4647, 2016, doi: 10.1039/c6lc01063f.
- [9] „Rakubioloogia meetodid“. <http://cellbio.ebc.ee/rakubio/methods.html> (vaadatud apr 17, 2021).
- [10] „Elveflow. Microfluidics: A general overview of microfluidics“. <https://www.elflow.com/microfluidic-reviews/general-microfluidics/a-general-overview-of-microfluidics/> (vaadatud apr 17, 2021).
- [11] „Elveflow. Introduction to lab-on-a-chip 2020: review, history and future“. <https://www.elflow.com/microfluidic-reviews/general-microfluidics/introduction-to-lab-on-a-chip-review-history-and-future/> (vaadatud apr 17, 2021).
- [12] Y. H. Ghallab ja W. Badawy, *Lab-on-a-chip: Techniques, Circuits, and Biomedical Applications*. 2010.
- [13] „Edinburgh Instruments. What is the Stokes Shift?“. <https://www.edinst.com/blog/what-is-the-stokes-shift/> (vaadatud mai 04, 2021).
- [14] O. Ornatsky, D. Bandura, V. Baranov, M. Nitz, M. A. Winnik, ja S. Tanner, „Highly multiparametric analysis by mass cytometry“, *J. Immunol. Methods*, kd 361, nr 1–2, lk 1–20, 2010, doi: 10.1016/j.jim.2010.07.002.
- [15] „Flowjo. Forward Scatter vs. Side Scatter“. <https://www.flowjo.com/learn/flowjo-university/flowjo/before-flowjo/58/> (vaadatud apr 17, 2021).
- [16] „Biomedical Research Core Facilities“. <https://brcf.medicine.umich.edu/cores/flow-cytometry/training-education/lessons/lesson-one-flow-cytometry-signals-scatter-and-fluorescent/> (vaadatud apr 17, 2021).

- [17] K. Aswani, T. Jinadasa, ja C. M. Brown, „Fluorescence Microscopy Light Sources“, *Micros. Today*, kd 20, nr 4, lk 22–28, 2012, doi: 10.1017/s1551929512000399.
- [18] „EYE Lighting 41000 - H100/MED Mercury Vapor Light Bulb“. <https://www.walmart.com/ip/EYE-Lighting-41000-H100-MED-Mercury-Vapor-Light-Bulb/184593960?wmlspartner=bizratecom&affcmpid=3020292107&tmode=0000> (vaadatud mai 03, 2021).
- [19] „Xenon (Xe) Arc Lamps“. <https://www.newport.com/f/xenon-arc-lamps> (vaadatud mai 03, 2021).
- [20] „400W Metal Halide Lamp“. <https://warisanlighting.com/400w-metal-halide-lamp.html> (vaadatud mai 05, 2021).
- [21] „High power COB LED lights“. <https://www.myde-lighting.com/products/high-power-cob-led-lights/> (vaadatud mai 03, 2021).
- [22] „Oregon State University“. <https://ehs.oregonstate.edu/laser/training/laser-types-and-classification> (vaadatud apr 20, 2021).
- [23] „Keyence. Automated welding basics“. <https://www.keyence.com/ss/products/measure/welding/laser/difference.jsp> (vaadatud apr 20, 2021).
- [24] „Wikipedia“. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_laser_types (vaadatud apr 20, 2021).
- [25] W. G. Telford, *Overview of lasers for flow cytometry*, kd 1678. 2018.
- [26] J. Miller, „Gas Laser - Helium Neon“. <https://www.pinterest.com/pin/374502525237891962/> (vaadatud mai 03, 2021).
- [27] „Eureka! Physics. Helium-Neon Laser“. <https://eurekaphysics.wordpress.com/experimental-physics/laser/helium-neon-laser/> (vaadatud mai 04, 2021).
- [28] „ScienceDirect. Dye lasers“. <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/dye-lasers> (vaadatud apr 20, 2021).
- [29] „Photonic Solutions. Diode Pumped Solid State Lasers“. <https://www.photonicsolutions.co.uk/laserprods.php?cat=lasDPSS> (vaadatud mai 13, 2021).
- [30] „Close-up of a table-top CW dye laser based on rhodamine 6G, emitting at 580 nm (yellow)“. https://en.wikipedia.org/wiki/Dye_laser (vaadatud mai 03, 2021).
- [31] H. M. Shapiro ja W. G. Telford, „Lasers for flow cytometry“, *Curr. Protoc. Cytom.*, nr SUPPL. 49, lk 1–17, 2009, doi: 10.1002/0471142956.cy0109s49.
- [32] „OSI Laser Diode Introduces High-Power Pulsed Laser Diodes“. <https://www.photoniconline.com/doc/osi-laser-diode-introduces-high-power-pulsed-laser-diodes-0001> (vaadatud mai 03, 2021).
- [33] „Spie. The international society for optics and photonics“. <https://spie.org/news/1495-catastrophic-optical-damage-in-semiconductor-lasers?SSO=1> (vaadatud apr 21, 2021).
- [34] „Seven Advantages of Lasers Over LEDs for Life Sciences Applications“. https://www.coherent.com/assets/pdf/Coherent_Whitepaper-Lasers_vs_LEDs.pdf (vaadatud apr 21, 2021).
- [35] „Cheeky Scientist“. <https://expert.cheekyscientist.com/what-is-a-flow-cytometry-laser-how-flow-cytometry-optics-function/> (vaadatud apr 26, 2021).
- [36] J. Krustok, „Pooljuhtide tsooniteooria“. http://staff.ttu.ee/~juri.krustok/Course/PDF/IV-Pooljuhtide_tsooniteooria.pdf (vaadatud apr 22, 2021).

- [37] S. W. Koch ja M. R. Hofmann, „Semiconductor lasers“, *Encycl. Mod. Opt.*, kd 1–5, lk 462–468, 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.10103-1.
- [38] „Wikipedia. Laser diode“. https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_diode (vaadatud mai 10, 2021).
- [39] T. Hertsens, „Measuring diode laser characteristics“, *Lasers Optron.*, kd 8, nr 2, lk 37–38, 40, 1989.
- [40] I. J. R. Dahn, T. Van, ja N. Westminster, „United States Patent [191 [11] Patent Number“:, kd 2, nr 19, lk 1–7, 1990.
- [41] Global Laser, „Laser Diode Characteristics and Definitions“, lk 10, 2015.
- [42] „Roithner LaserTechnik. Laserdiodide hinnad“. <http://www.roithner-laser.com/pricelist.pdf> (vaadatud mai 13, 2021).
- [43] „Alibaba. 488nm GH04850B2G“. https://www.alibaba.com/product-detail/488nm-50mw-laser-diode-Sharp-TO18_1600100878889.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.3.4dad6bdp1pv3F (vaadatud mai 13, 2021).
- [44] „Mouser. GH048350B2G andmeleht“. <https://www.mouser.ee/datasheet/2/365/GH04850B2G-1627719.pdf> (vaadatud mai 01, 2021).
- [45] „Laser Diode Control. Laser Diode Driver Basics and Circuit Design Fundamentals“. <https://www.laserdiodecontrol.com/laser-diode-driver-basics-and-fundamentals> (vaadatud apr 26, 2021).
- [46] „Micro Flexdrive V5“. https://innolasers.com/shop/index.php?id_product=8&controller=product (vaadatud mai 10, 2021).
- [47] „iC-Haus. Laser Diode and LED Drivers“. <https://www.ichaus.de/keyword/Laser-Diode-and-LED-Drivers> (vaadatud mai 10, 2021).
- [48] „All About Circuits. An Introduction to Laser Diodes“. <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/an-introduction-to-laser-diodes> (vaadatud apr 28, 2021).
- [49] „RP-Photonics. Laser Diode Drivers“. https://www.rp-photonics.com/laser_diode_drivers.html (vaadatud apr 27, 2021).
- [50] „Kohiki. Voltage regulator-Types, Ic, Module, Alternator Explained“. <https://www.kohiki.com/voltage-regulator-types-ic-module-alternator-explained.html> (vaadatud apr 27, 2021).
- [51] „Elprocus. Different Types of Voltage Regulators with Working Principle“. <https://www.elprocus.com/types-of-voltage-regulators-and-working-principle/> (vaadatud apr 27, 2021).
- [52] „Electronics-Notes. Active Transistor Constant Current Source“. https://www.electronics-notes.com/articles/analogue_circuits/transistor/active-constant-current-source.php (vaadatud apr 28, 2021).
- [53] „Koheron. Understanding the basics of laser diode drivers“. <https://www.koheron.com/blog/2018/10/16/understanding-the-basics-of-laser-diode-drivers> (vaadatud apr 30, 2021).
- [54] I. Steven, J. Baumgartner, D. S. Hedin, ja D. W. Siljeborg, „(12) United States Patent“, kd 1, nr 12, 2002.
- [55] „LaserFocusWorld. Laser diodes require the right power source“. <https://www.laserfocusworld.com/detectors-imaging/article/16548556/laser-diodes-require-the-right-power-source> (vaadatud apr 29, 2021).
- [56] „Optima. Glossary, Application Notes, and FAQ’s“. <http://www.optima-optics.com/notes.htm> (vaadatud apr 30, 2021).

- [57] „Laser Diode Source. HIGH POWER LASER DIODES“.
https://www.laserdiodesource.com/laser-diode-by-technology/high_power_stack
(vaadatud apr 30, 2021).
- [58] „ProPhotonix. Driving Laser Diodes“.
<https://www.prophotonix.com/blog/driving-laser-diodes/> (vaadatud apr 30, 2021).
- [59] D. Hodgson ja B. Olsen, „Protecting Your Laser Diode“, *Strategy*, lk 1–30, 2003, [Online]. Available at: http://www.edmundoptics.com/lasers/fiber-coupled-lasers/fiber-coupled-laser-systems/1426#tool-tip-9883%5Cnhttp://assets.newport.com/webDocuments-EN/images/AN03_Protecting_Laser_Diode_IX.PDF%5Cnhttp://www.newport.com/Application-Notes-Technical-Notes-and-W.
- [60] „Analog Devices. LTC3454 andmeleht“.
<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3454fa.pdf> (vaadatud mai 01, 2021).

Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Alen Svistun

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Akutoitel toimiva laserdiodi toitelahenduse uurimine ja konstrueerimine voolutsütomeetria rakenduse jaoks“, mille juhendajad on Kaiser Pärnamägi ning Ants Koel.
 - 1.1. reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

13.05.2021

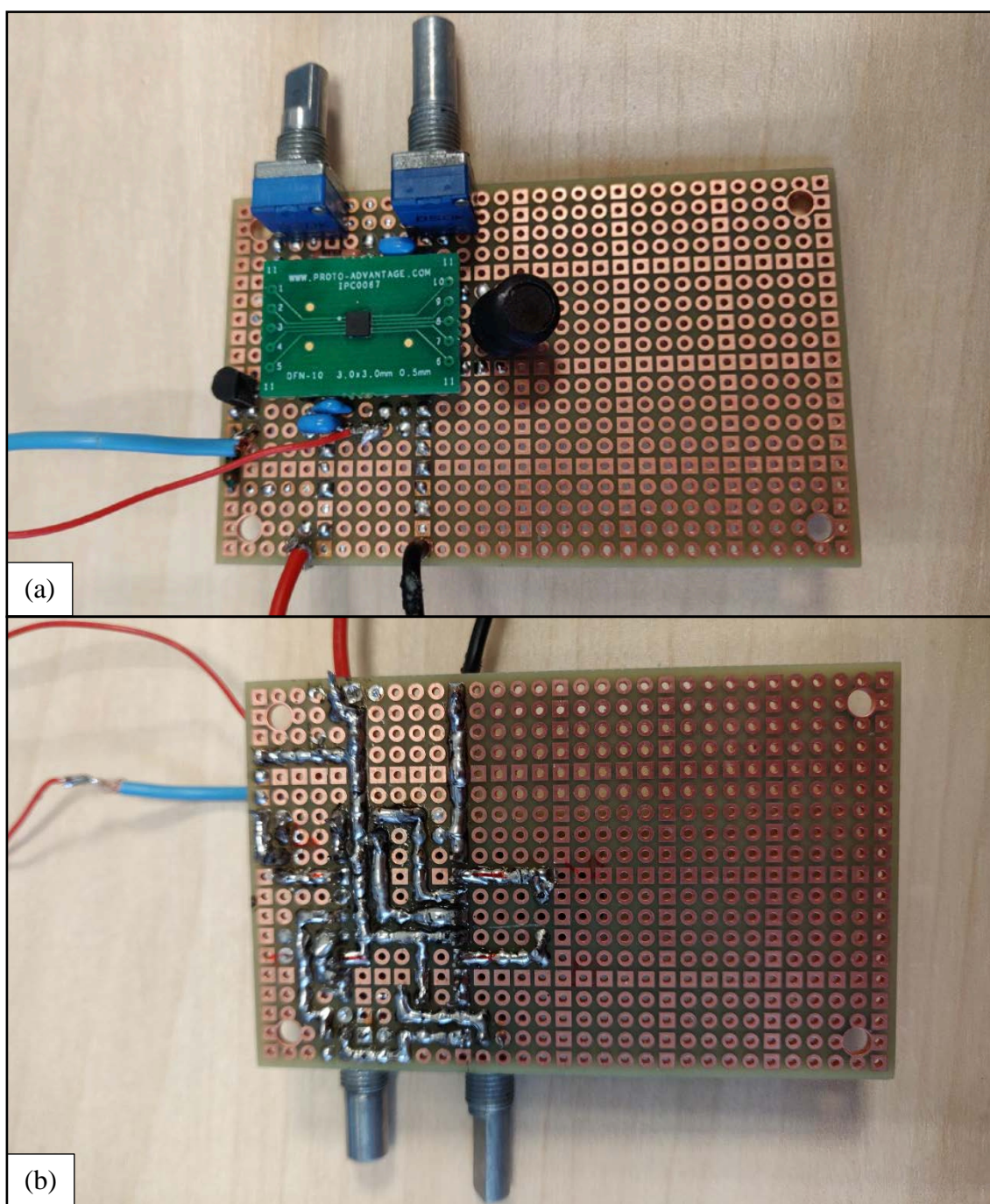
¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

Lisa 2 – Valgusallikate tehnoloogiate võrdlus

Tabel 1. Valgusallikate võrdlus kvantitatiivse, elusrakkude ja mitmevärvilisel pildistamisel [17, lk 28].

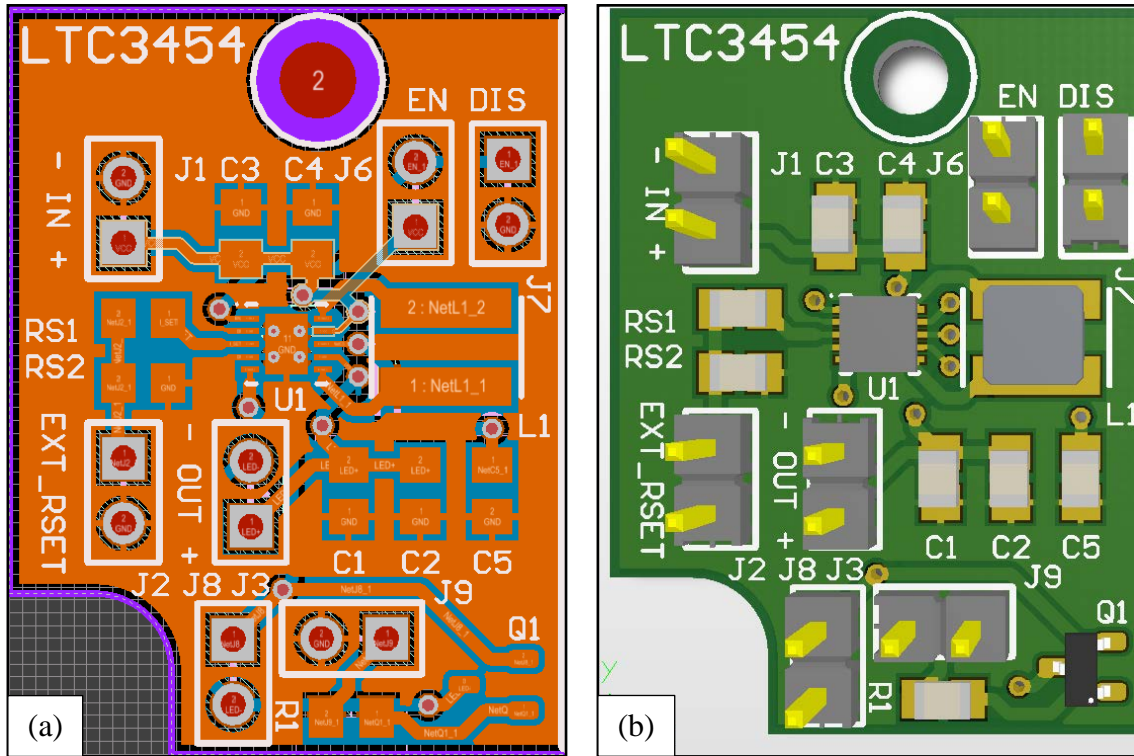
		Kvantitatiivne pilditehnoloogia	Elusrakkude pilditehnoloogia	Mitmevärviline pilditehnoloogia
Elavhõbe	Plussid	Valge valgusallikas Kättesaadavus	Valge valgusallikas Kättesaadavus	Valge valgusallikas
	Miinusid	Soojendusaeg Ebäühtlane valgustus Värelus Intensiivsuse hääbumine aja jooksul	Vajab valguskatikut Vajab neutraalse tihedusega (ND) filtrit Vajab ultraviolettfiltrit (UV-filtrit)	Ergastamise intensiiv-sust ei saa täpselt määrata igal lainepikkusel Filtriratta kiirus piirab kasutust
Ksenoon	Plussid	Valge valgusallikas Ühtlane võimsus-tihedus üle nähtava spektri	Valge valgusallikas Nõrk UV-komponent	Valge valgusallikas
	Miinusid	Soojendusaeg Ebäühtlane valgustus Värelus Intensiivsuse hääbumine aja jooksul	Vajab valguskatikut Vajab ND-filtrit Soovituslik infrapunafilter (IR-filtrit)	Ergastamise intensiiv-sust ei saa täpselt määrata igal lainepikkusel Filtriratta kiirus piirab kasutust
Metall-halogeniid	Plussid	Valge valgusallikas Ühtlane valgustus Stabiilne intensiivsus aja jooksul	Valge valgusallikas Valguse intensiivsust saab kontrollida	Valge valgusallikas
	Miinusid	Soojendusaeg Värelus	Vajab valguskatikut Vajab UV-filtrit Võib ikka vajada ND-filtrit	Ergastamise intensiiv-sust ei saa täpselt määrata igal lainepikkusel Filtriratta kiirus piirab kasutust
LED	Plussid	Täpne kontroll intensiivsuse üle Ühtlane valgustus Stabiilne intensiivsus aja jooksul	UV- ning IR-komponentide puudumine Kiire sisse-välja lülitamine Ei vaja valguskatikut Täpne kontroll iga LED intensiivsuse üle	Võimalik ergastamise intensiivsuse täpne määramine Kiire sisse-välja lülitamine
	Miinusid	Vaja ergastamisfiltrid Mõnedel LED-del on piiratud arv lainepikkusi	Ülekostvuse võimalikus mitme LED korral Mõnedel LED-del on piiratud arv lainepikkusi	Süsteemi piirab LED-de piiratud lainepikkuste vahemik Ülekostvust on vaja korrigeerida

Lisa 3 – LTC3454 kiibil põhineva valgusallika juhtskeemilahendus perfoplaadil



Joonis 20. Skeemilahendus perfoplaadil vaadatuna (a) pealt poolt, (b) alt poolt.

Lisa 4 - LTC3454 kiibil põhineva valgusallika juhtskeemi PCB lahendus



Joonis 21. LTC3454 PCB lahendus (a) nähtavate ühendustega, (b) 3D vaates.