



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Mehhatroonikainstituut

Kvaliteeditehnika ja metroloogia õppetool

MHT40LT

*Henrik Heinmets*

**Korduvustäpsuse hindamine Ge- ja Si-fotodetektorite**

**võrdlusel**

Bakalaureusetöö

Autor taotleb  
tehnikateaduste bakalaureuse  
akadeemilist kraadi

Tallinn  
2015

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....”.....201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....”.....201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”.....201... a.

..... allkiri

## **BAKALAUREUSETÖÖÜLESANNE**

2015. aastal kevadsemester

Üliõpilane: Henrik Heinmets  
Õppekava: MAHB02/09 Mehhatroonika  
Eriala: Mehhatroonika  
Juhendaja: Toomas Kübarsepp, professor  
Konsultandid:

### **BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:**

(eesti keeles) **Korduvustäpsuse hindamine Ge- ja Si-fotodetektorite võrdlusel**  
(inglise keeles) **Estimation of repeatability in comparison of Ge- and Si-based photodetectors**

### **Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:**

<b>Nr</b>	<b>Ülesande kirjeldus</b>	<b>Täitmise tähtaeg</b>
<b>1.</b>	Ge- ja Si-põhiste fotodiodide toimimise ülevaade.	<b>01.04.2015</b>
<b>2.</b>	Ge -diodi kinnituse valmistamine.	<b>08.04.2015</b>
<b>3.</b>	Ge - ja Si-põhise fotodetektori tundlikkuse võrdlemine.	<b>22.04.2015</b>
<b>4.</b>	Tulemuste analüüs ja korduvustäpsuse hindamine.	<b>29.04.2015</b>

**Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:** Töö eesmärgiks on võrrelda erinevast pooljuhtmaterjalist fotodetektoreid. Töö käigus valmistatakse vastuvõtava hinnatasemega Ge-fotodiodile kinnitus ja viiakse läbi võrdlus Si-põhise täppisdetektoriga kasutades laserit ja automatiseeritud liigutuslauda. Saadud tulemuste põhjal hinnatakse erinevate keelupilu laiustega pooljuhtist valmistatud fotodetektorite võrdlusel ilmnevaid mõjureid ja nendest tulenevaid määramatuse komponente.

### **Täiendavad märkused ja nõuded: -**

**Töö keel:** eesti keel

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt .....

**Töö esitamise tähtaeg: 22.05.2015**

**Üliõpilane** Henrik Heinmets

/allkiri/ ..... kuupäev.....

**Juhendaja** Toomas Kübarsepp

/allkiri/ ..... kuupäev 24.03.2015

/allkirjastatud digitaalselt/

# SISUKORD

Bakalaureusetöö ülesanne	3
Eesmärk	5
1. Sissejuhatus, eemärk	6
2. Ge-diooni ja Si-fotodetektori toimimine	8
2.1 Ge-dioon	12
2.2 Si-detektor	14
3. Meetodi kirjeldus	16
4. Katseskeemi kirjeldus	17
4.1 Mehaanika	18
4.2 Elektroonika	21
4.3 Tarkvara	24
5. Tulemused	27
6. Analüüs	31
Kokkuvõte	35
Summary	36
Kasutatud kirjandus	37

## EESSÕNA

Lõputöö teema pakkus välja Tallinna Tehnikaülikooli mehaanikateaduskonna kvaliteeditehnika ja metroloogia õppetooli juhataja ja professor Toomas Kübarsepp, kelle juhendamisel ka kogu töö sai tehtud. Vajalikud mõõtmised sooritasin TTÜ mehaanikateaduskonna metrooloogialaboris. Mõõtmisteks vajaliku diodi kinnituse tegin AS Saku Metall Uksetehases, kus ma läbisin ka bakalaureuse erialapraktika ja töötan.

Töö pakkus huvi mitmel põhjusel. Võimalus tööd teha laseritega, mida senise õppeaja jooksul veel teha polnud saanud ning algusest lõpuni ise välja arendada ja valmis teha kinnitusstatiiv diodile.

# 1. SISSEJUHATUS

Bakalaureusetöö eesmärgiks oli võrrelda kahte erinevast pooljuhtmaterjalist fotodetektorit. Ilma korpuseta germaaniumist tööpinnaga diodi võrreldakse juba varem karakteriseeritud kolmest räinitööpinnaga (Si) diodist koosneva detektoriga.

Töö käigus tuleb leida lahendus germaaniumist fotodiodi kinnitamiseks, et oleks võimalik sooritada ühtlastel tingimustel mõõtmised ja viiakse läbi võrdlus Si-põhise täppisdetektoriga, kasutades laserit ja automatiseeritud liigutuslauda.

Mõõtmiste tulemuste põhjal hinnatakse erinevate keelupilu laiustega pooljuhtist valmistatud fotodetektorite võrdlusel ilmnevaid mõjureid, vastavust tootjapoolsetele andmetele ja nendest tulenevaid määramatuse komponente.

Töö käik jagunes nelja osasse.

- 1.) Germaaniumdiodile kinnituse konstrueerimine ja valmistamine
- 2.) Mõõtmisüsteemide ja seadmete paigaldamine ning ettevalmistamine
- 3.) Mõõtmised
- 4.) Tulemuste analüüs

Sarnased mõõtmised võib leida Marco Antonio López Ordoñez'i doktoritöös "Optical characterization of Ge- and InGaAs-semiconductor detectors for high accuracy optical radiant power measurements in the near infrared" [1]. Selles töös aga võrdleb autor omavahel Ge diodi Ge detektoriga ning samamoodi InGaAs diodi InGaAs detektoriga, et tuvastada erinevate kadude mõju mõõtmistulemustele. Katsed sooritatakse ka pikemal lainepikkusel(1240-1620 nm).

Kuna Eestis üksi ettevõtte selliseid kalibreerimisteenuseid võrdluse teel ei osuta, on tulemustest otsene kasu edaspidiseks, kui peaks tekkima vajadus koostada mõõtesüsteem, teostamaks mõõtmisi lähi infrapuna lainepikkustel. Tegemist on telekommunikatsioonis

kasutatavad lainepikkuse piirkonnaga, mis on kiirelt kasvav tööstusharu ning selle kasutusala laienevad pidevalt.

Töö esimeses osas, fotodiodile kinnituse projekteerimisel kasutasin Siemensi tarkvara Solid Edge ST5. Kasutades diodi tootja kodulehelt leitavat diodi 3-D mudelit, konstrueerisin diodile kinnituse.

Töö teises osas, mõõtmiste läbiviimisel oli kasutusel tarkvara Thorlabs APT User. Tegu on tootja kodulehel saadaval oleva tasuta tarkvaraga, mille abil sai koostada programmi automatiseeritud liigutuslaua kasutamiseks.

## 2. GERMAANIUMDIOODI JA RÄNIFOTODETEKTORI TOIMIMINE

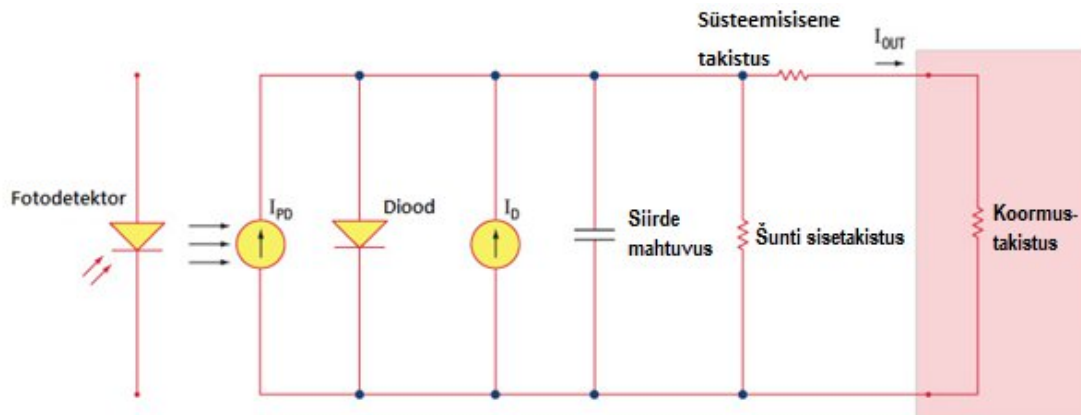
Fotodiod on pn-siirdega pooljuhtdiod, milles tekib sisefotoefekt. Sisefotoefekt on valguse neeldumise poolt põhjustatud nähtus, mis tekib tahketes ainetes, antud juhul pooljuhisis, ning mille käigus footon muundub elektroniks või elektron-paariks.

Fotodiodi käitumine kasutamisel on sarnane tavalisele diodile, kuid erinevalt tavalisele diodile tekib selles fotovool, kui valgus neeldub diodil siirdele tundlikul pinnal. Fotodiod on kiirelt reageeriv, kõrge lineaarsuse seade, milles esineb kõrge kvantefektiivus, mida saab kasutada laia valiku erinevate rakenduste jaoks.

Tänapäeval väga levinud kiudoptilised süsteemid, mida kasutatakse näiteks andmeedastusel, koosnevad optilisest valgusallikast, nagu näiteks laser, optilisest kiust, mida mööda ühendus toimub ning optilisest detektorist, mis töötab vastuvõtjana. Andmeedastuse suure paindlikuse tõttu on kiudoptilised süsteemid kasutusel ka näiteks spektroskoopias, biomeditsiinis, kosmose-, auto-, sõja- ning metallitööstuses.

Fotodiodide kasutamisel ning valikul on väga oluline teada eeldatavat väljundvoolu suurust ning diodi tundlikust pinnale langevale valgusele. Joonisel 2.1. on kujutatud siirdega fotodiodi mudel koos kõigi põhiliste diskreetkomponentidega. See aitab paremini ette kujutada diodi põhikarakteristikute teket ning mõista Thorlabs'i fotodiodide ehitust ja toimet [2]. Valguse langemisel diodile kasvab vabade elektron-paaride arv ning tekib fotovool.





Sele 2.1. Fotodiodi mudel

Diodide tööpinna materjali koostis määrab vastava seadme toimimispiirkonna ja mõõtmistäpsuse. Lähini-infrapuna (750 - 1400 nm) valguse lainepikkustel mõõtmiste teostamiseks, on põhilised kasutuselolevad pooljuht-materjalid räni (Si), germaanium (Ge) ja indium-gallium-arseen (InGaAs). Antud piirkonnas toimub ka kiudoptiline andmeedastus ning telekommunikatsiooni side. Diodidel on suur tundlikus ning kiire reageerimisaeg.

### Fotodiodi töörežiimid

Fotodioode saab kasutada kahel erineval viisil - fotomahtuvus ehk vastupingerežiimil või fotogalvaanilisel režiimil. Režiimi valik sõltub rakenduses vajalikest kiiruse nõuetest ning lubatud pimevoolu kogusest.

### Vastupingerežiim

Selles režiimis on diodile rakendatud välisest toiteallikast vastupinge. Valguse mõjul kujunev fotovool läbib diodi ka vastassuunas, olles võrdelises seoses talle langeva valguse hulga. Vastupinge kasutamisel suureneb rakenduv siire, mille tõttu tõuseb diodi tundlikus, kahanenud siirde mahtuvusega. Ka reageerib diod valgusele väga kiiresti. Sellisel juhul on tekkiva pimevoolu hulk küll suurem, kuid seda saab piirata diodi tundliku piirkonna materjali valikuga.

## Fotogalvaaniline režiim

Fotogalvaanilist režiimi ehk avatud vooluringiga režiimi kasutatakse tänapäevastest päiksepaneelides. Seadmes liikuv fotovool on piiratud ning pinge hakkab sel juhul kasvama. Tekib fotogalvaaniline efekt, ning pimevoolu hulk süsteemis jääb võimalikult väikseks

Diiodide põhikarakteristikud on:

## Tundlikkus $\eta$ (?)

Fotodiiodi tundlikkust iseloomustab diiodi poolt tekkiva fotofoolu  $I_{ph}$  suhe diiodile langeva valguse võimsusega  $P_{opt}$  teatud lainepikkusel (valem (2.1))

$$\eta = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} \quad (2.1)$$

## Pimevool $I_{0}$

Pimevool on lekkevool, mis tekib, kui fotodiiodile on rakendatud eelpinge. Kui diiod töötab vastupingerežiimil, on pimevool suurem ning otseses seoses temperatuuri muutusega. Pimevool kahekordistub umbes iga 10-kraadise temperatuuri tõusu kohta. Mida suurem on diiodi eelpingestatus, seda väiksem on siirde mahtuvus, kuid suureneb pimevoolu hulk.

Pimevoolu teke on ka otseses sõltuvuses diiodi aktiivse pinna materjalist ja tundliku ala suurusel. Ränist tööpinnaga diiodidel on tavaliselt väiksem pimevool, võrreldes germaaniumist seadmetega, mille pimevoolu hulk on üsna kõrge. Tabelis 2.1. on esitatud mõnede levinumate diiodides kasutatavate materjalide suhteline pimevoolu hulk, reageerimise kiirus, tundlikkus ning hind.

Tabel 2.1. Erinevate materjalide tundlikkus pimevoolule

Materjal	Pimevoolu hulk	Reageerimiskiirus	Tundlikkuspäikond	Hind
Si	madal	kiire	nähtav kuni NIR	madal
Ge	kõrge	aeglane	NIR	madal
GaP	madal	kiire	UV kuni nähtav	keskmise
InGaAs	madal	kiire	NIR	keskmise
InAsSb	kõrge	aeglane	NIR kuni MIR	kõrge
Extended InGaAs	kõrge	kiire	NIR	kõrge
HgCdTe	kõrge	aeglane	NIR kuni MIR	kõrge

kus nähtav valgus on 380-750 nm, NIR on lähi infrapuna- (750–1400 nm), MIR keskinfrapuna- (3000–8000 nm) ja UV on ultra-violetkiirgus (10–400 nm)

Fotodiodi tekitatavat väljundvoolu arvutakse valemiga

$$I_{out} = I_{dark} + I_{ph} \quad (2.2)$$

kus  $I_{out}$  on väljundvoolu väärtus,

$I_{dark}$  on pimevoolu väärtus,

$I_{ph}$  on diodi poolt tekitatud fotovool.

### **Siirde mahtuvus $\beta$**

Siirde mahtuvus on fotodiodi oluline omadus, millega võib avaldada suurt mõju fotodiodi ribalaiusele ja vastuvõtlikusele. Oluline on teada, et suuremad diodi aktiivsed pinnad hõlmavad suurema siirde mahu, kõrgendatud laengu mahtuvusega.

### **Süsteemisene takistus**

Süsteemisene takistus on pooljuhtmaterjali takistus. Tavaliselt on see piisvalt väike, et seda eirata. Takistus tekib fotodiodi kontaktikohtadest ning traatühendustest ja seda kasutatakse peamiselt, et määrata diodi lineaarsust fotogalvaanilisel režiimil.

### **Šunti sisetakistus**

Šunti sisetakistus väljendab eelpingestamata siirdega fotodiodi takistust. Ideaalsel fotodiodil esineb lõpmatu väärtusega šunti sisetakistus, kuid tegelikkuses ulatuvad väärtused alates kümnest oomist kuni mitme tuhande megaoomini, mis sõltuvad fotodiodi aktiivse pinna materjalist. Näiteks InGaAs diodi šunti sisetakistus jääb suurusjärku kuni 10 M $\Omega$ , samas kui germaaniumist diodil on see mõne k $\Omega$  piiris. Selle tulemusel võib oluliselt mõjutada fotodiodi voolus olevat müra. Enamike rakenduste puhul aga tekib suurest takistusest väike mõju, mida võib süsteemis eirata.

## 2.1 Ge-diood

Thorlabs'i germaaniumist fotodiood FDG1010 sobib mõõtmaks nii pulseeriva, kui pideva lainega valgusallikaid, muutes optilise võimsuse fotovooluks. Diod on korpuseta, asub keraamilisel alusplaadil ning on varustatud anoodi ning katoodi juhtmega. Fotodioodi anoodil tekib vool, mis avaldub dioodile langeva valguse suhtest ja lainepikkusest.

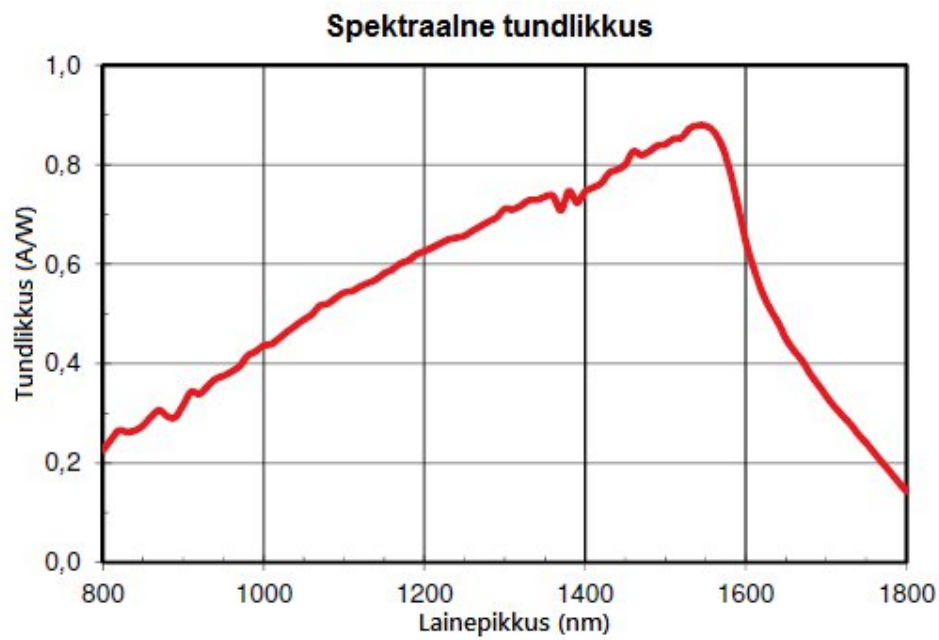
Germaaniumist fotodioodide kasutatakse põhiliselt ühesoonelistes optilistes kiudkaablites, kus valgusallika lainepikkus jääb vahemiku 1230nm kuni 1675 nm. Töös olevad mõõtmised toimusid lühemal lainepikkusel, kuna dioodiga võrreldav ränidetektor ei ole mõeldud nii suurtele lainepikkustele.

Tabel 2.2. Diodi Thorlabs FDG1010 tehnilised parameetrid

<b>Sensori materjal</b>	Ge
<b>Lainepikkuse vahemik</b>	800 - 1800 nm
<b>Lainepikkuse haripunkt</b>	1550 nm
<b>Tundlikus</b>	0,95 A/W
<b>Tundliku ala suurus</b>	100 mm <sup>2</sup> (10 mm x 10 mm)
<b>Tõusu/languse aeg (R<sub>L</sub> = 50 Ohms, 1 V)</b>	3,5 μs / 3,5 μs
<b>NEP, keskmine (1500 nm)</b>	4,0 x 10 <sup>-12</sup> W/Hz <sup>1/2</sup>
<b>Pimevool (0,3 V)</b>	50 μA (Typ.)
<b>Elektrimahtuvus (1 V)</b>	30 nF (Typ.)
<b>Ümbris</b>	Keraamiline
<b>Piirväärtused</b>	
<b>Maksimaalne vastupinge</b>	1 V
<b>Töötemperatuur</b>	-55 kuni 60 °C
<b>Hoiustamistemperatuur</b>	-55 kuni 60 °C

kus NEP on Noise-equivalent power, ehk fotodioodi tundlikkuse mõõt, mis avaldub kasuliku signaali võimsuse ja sellele lisandunud müra võimsuse suhtena.

Graafikus Sele 2.2. on kajastatud tootja poolt väljastatud väärtused diodi FGD1010 tundlikkusele kogu diodile määratud lainevahemikus.



Sele 2.2. Ge-diodi FDG1010 tundlikkus

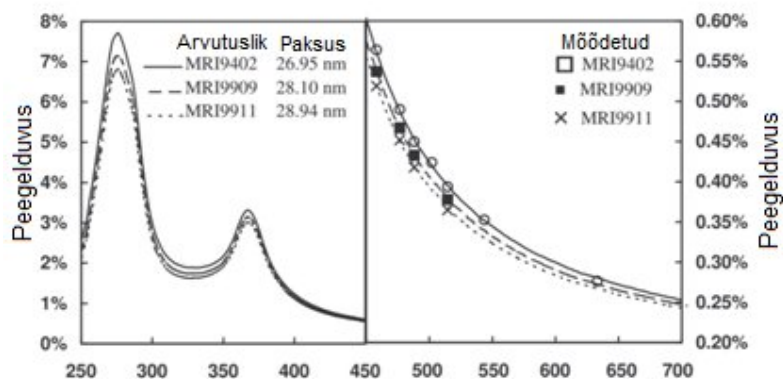
Mõõtmistel kasutatud laseri lainepikkusel 850 nm on tehniliste andmete järgi diodi tundlikus  
 $\eta = 0,27525 \text{ A/W}$  .

## 2.2 Si-detektor

Kasutatud tugidetektor on valmistatud kolmest ränifotodiodist Hamamatsu S1337-11. Diodid on järjestatud detektoris 45°-kraadise nurga all, et suunata ühelt diodilt peegeldunud neeldumata osa valgusest järgmisele. Sellisel moel toimub detektoris viis peegeldust üksteise järel enne, kui lõplikult neeldumata valgus peegeldub detektorist välja. Ränifotodiodid on paigutatud detektori korpusesse sellisel moel, et kindlustada detektori tundlikkuse sõltumatus sisenenud valguse polarisatsiooniastmest [3].

Taoliselt konstrueeritud detektorist väljuv tagasipeegeldus lainepikkuste vahemikus 400 nm - 1000 nm on väike (<1% sisenenud valgusest) võrreldes üksikult fotodiodilt tagasipeegeldunud valguse osaga (~30%) ja on seepärast paljudes etalonilaborites kasutusel tugidetektorina [1].

Peegeldust fotodetektorist on võimalik hinnata, kui on teada diodi pinnal oleva SiO<sub>2</sub> selgendava kihi paksus [4]. Selgendava kihi nimipaksus Hamamatsu S1337-11 tüüpi diodel on 30 nm. Kolme-elementiliste ränidetektorite iseloomulikke peegelduse kõveraid on näidatud graafikus Sele 2.3.



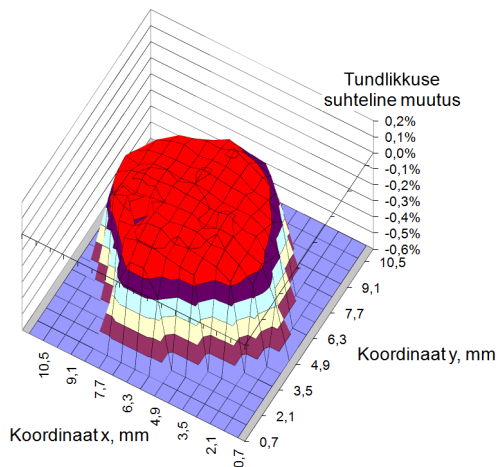
Sele 2.3. Mõõdetud ja arvutatud peegelduse sõltuvus lainepikkusest erinevate 3-elementiliste ränifotodetektorite kohta [5]

Pooljuhtdiodide spektraalse tundlikkuse valemi (2.3) põhjal võib järeldada, et tundlikkus  $R$  lainepikkusel 633 nm on 0,5092 mA/mW. Nagu näha joonisel 2.3, väheneb peegeldus lainepikkuse kasvades, millest saab tuletada, et kasutatud 3-diodilise detektori tundlikkus lainepikkusel 850 nm on  $(0,6842 \pm 0,0021)$  mA/mW eeldusel, et kvantefektiivsus  $\varepsilon_i = 0,999 \pm 0,001$ .

$$R(\lambda) = [1 - \rho(\lambda)]^2 \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad (2.3)$$

kus  $\rho$  on tundlikus,  
 $\lambda$  on lainepikkus,  
 $n_1$  on tihedus,  
 $n_2$  on kvantefektiivsus

TTÜ kasutuses oleva ränidetektori peegeldust on mõõdetud lainepikkusel 633 nm,  $\rho=0,27\%$ . Antud töös oli ülesandeks uurida korratavust pooljuhtdetektorite võrdlusele. Üks korratavuse mõjuritest on tundlikkuse pinnaühtlus. Mehhatroonikainstituudi Si-detektori pinnaühtlus on mõõdetud lainepikkusel 633 nm ja esitatud joonisel 2.4. Jooniselt on näha, et aktiivse pinna põhiosas on tundlikkus ühtlane piirides  $\pm 0,1\%$ .



Sele 2.4. Ränidetektori pinnaühtlus mõõdetuna lainepikkusel 633 nm

### 3. MEETODI KIRJELDUS

Vastavalt vajadusele hinnata korpuseta eelnevalt kontrollimata tundlikkuse väärtustega germaaniumist tööpinnaga diodi, kasutasin võrdluseks juba eelnevalt karakteriseeritud, kolme ränist tööpinna diodiga, täppisdetektorit.

Tööks vajalikud mõõtmised sooritasin Tallinna Tehnikaülikooli mehaanikateaduskonna metrooloogialaboris. Kuna sel perioodil kedagi teist selles laboris ei liikunud, sai kogu mõõtmis skeemi pidevalt üleval hoida muutumatutes tingimustes.

Mõõtmised viisin läbi kahel erineval päeval. Esimesel päeval toimus katseskeemi valmispanek, töökorda seadmine ning mõõtmisteks ettevalmistuste tegemine. Samal päeval tegin ka esimesed proovimõõtmised, kus diodide positsiooni liigutasin käsitsi ning tulemused võtsin seeriatena järjest, kattes umbkaudu ühtlase vahe järel kiire langemise diodile. Saadud andmetega viisin läbi ka esimesed prooviarvutused.

Mõõtmised sooritasin nii 850 nm, kui 635 nm lainepikkusega laseriga. Kuna 635 nm jääb germaaniumdiodi tundlikuspiirkonnast välja, sai proovimõõtmistel selgeks, et neid tulemusi kasutada ei saa. Mõõtmistulemuste erinevus jäi kogu katsel vahemikku 0,5  $\mu\text{A}$ .

Põhikatsed mõõtmised viisin läbi eraldi mõlema laseri jaoks kolmes osas, umbes veerandtunnise ajavahega. Igas osas läbis automaatse liigutuslaua jaoks koostatud programm 5 tsüklit, liigutades mõlemad diodid kordamööda laseri valguskiire ette. Mõõtmiste korratavuse mõtte oli leida diodi tundlikkust mõjutavad tegurid - nii sisesed, kui välised. Hinnates tegurite suurust on võimalik vastavalt arvestada nende mõju, või vajadusel need kõrvaldada.

Samal tingimustel korduval mõõtmisel ilmneb mõõtetulemuste triiv ning võrreldes germaaniumdiodi ränist täppisdetektoriga, on võimalik teha selgeks, kas tegurid mõjutavad dioode ühtemoodi ning jälgida diodi tulemuste lineaarsust.

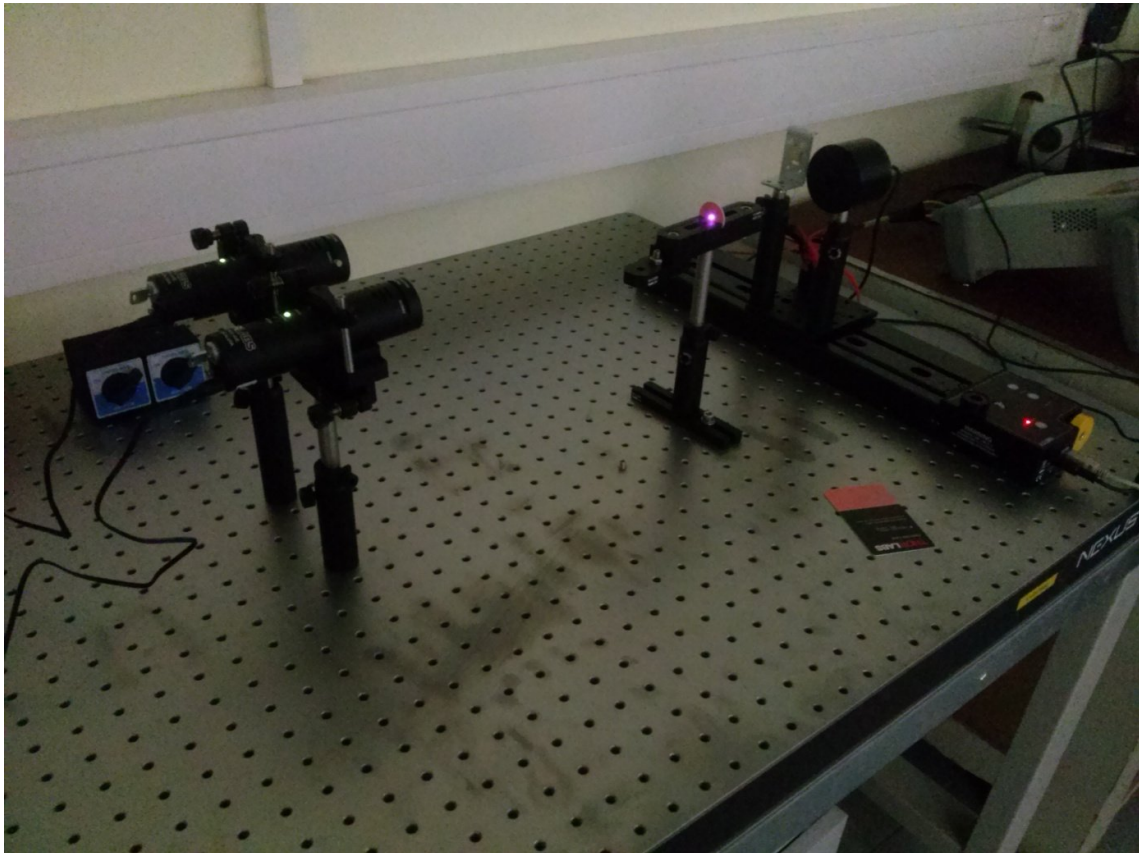
Diodid olid mõõtmisteks eelpingestamata ning mõõtmisel kasutasin fotogalvaanilist režiimi.



## 4. KATSESCHEEMI KIRJELDUS

Mõõtmised toimusid Tallinna Tehnikaülikooli metroloogia laboris, kasutades suuremas osas ettevõtte Thorlabs tooteid. Thorlabs on Ameerika Ühendriikidest, New Jersey'st pärit ettevõtte, kes tegeleb peamiselt optikaseadmete tootmisega. Mõõtmisvahendid olid kõik juba eelnevalt ülikoolil olemas. Puudu oli vaid kinnitus ja korpus Ge-diodile Thorlabs FDG1010.

Mõõtmised toimusid kahe laseriga - nähtava valgusega laser lainepikkusega 635 nm ja lähis-infrapuna laser valguse lainepikkusega 850 nm. Kuna tootja poolt antud tehnilistes kirjeldustes on märgitud Ge-diodi valgustundlikuse piirkond alates 800 nm, siis kasutasin nähtava valgusega laserit vaid kontrolliks ja võrdluseks.



Sele 4.1. Katseskeem

Selel 4.1. on näha katseskeem, mille vasakus ääres paiknevad kaks eelpool nimetatud lainepikkustega laserit ning paremas ääres on automaatne liigutuslaud, koos sellele kinnitatud, ilma korpuseta germaaniumist diodi ning ränidiodidest koosnev täppisdetektoriga.

Eespool paiknev on 850 nm lainepikkusega lähi-infrapuna laser. Selle kõrval asub 635 nm valguse lainepikkusega nähtava valgusega laser.

Laserid asuvad ühel ja samal kaugusel diodidest ning nende asukohta katse käigus ei muudetud. Laserite kiire rihtimiseks on laseritega kaasas kinnitused KM200V Kinematic V-Clamp, millega on võimalik  $\pm 4$  kraadi täpsusega reguleerida silindrilise objekti otsa kallet vertikaaltelgepidi, kui lengerdust horisintaaltelgepidi.

Dioodie ning laserite vahel asub statiiv koos joondamiskettaga. Ketas on tehtud materjalist, mille abil saab näha lähi-infrapuna valguse langemist. Ketta keskel on 1,5 mm läbimõõduga ava. Selle abil on lihtne rihtida kiirt ning piirata diodile langeva kiire võimsust.

## 4.1 Mehaanika

### 4.1.1 Diodi kinnitus

Töö esimene etapp oli eelnevalt olemasolevale Ge-diodile kinnituse ja korpuse konstrueerimine ning valmistamine. Suures osas on ilma korpusteta müüdavad diodid ikkagi suurema ümbritseva metallkesta sees, mille küljes on tugevad metallist pulgad anodi ja katodi jaoks. Kestad on ringikujulised, mis teeb nende paigaldamise lihtsamaks ja vähem täpsust nõudvamaks.

Toimiva lahenduse leidmise tegi raskeks asjaolu, et diodi tundlik pind on peaaegu samas mõõdus pinnaga, millele see kinnitatud on. Diod on keraamilisel plaadil ning ühendamiseks on plaadile joodetud juhtmed. Tegu on äärmiselt hapra ning õrna detailiga ning seda tuli arvestada kinnituse konstrueerimisel. Diodi hoidmiseks on kasutusel M3 plastikust mutrid poldid ning seibid, juhtmeid hoiavad paigal kummist alusega seibid.



Sele 4.2. Thorlabs Ge-diod FDG1010

Et vältida võimalike viivitusi kinnituse valmimisel, mis oleks võinud tekkida, kui lasta kinnitus toota tellimuse alusel mõnest ettevõttest, kasutasin ära kogu ressursi, mis oli koheselt saadav. Seetõttu sai kinnituse tootmisprotsessiks 2 mm kuumtsingitud lehtmetailist tooriku stantsimine ning seejärel painutamine.

Kuna Thorlabs statiivpostid on kõik M4 keermega, lisasin kinnitusele vastava mõõtmega pressmutri. Kinnituse ülemine äär on painutatud väljapoole, et lisada kate, kaitsmaks diodi, kui see pole kasutusel. Kinnitusele jäi lisamata ka pistik, ning peenikeste ja õrnade juhtmete kaitsmiseks on need kinnituse külge fikseeritud.



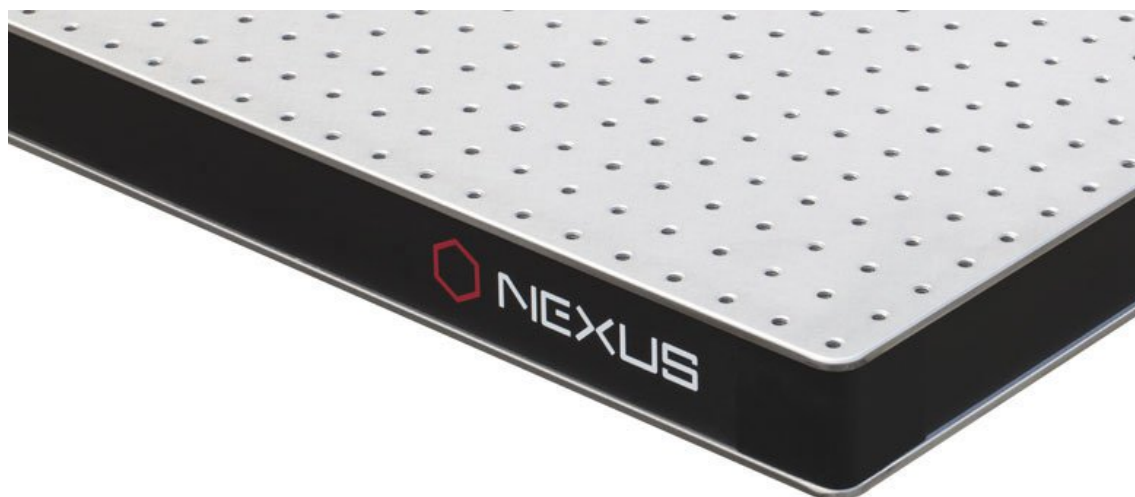
Sele 4.3. Ge-diodi kinnituse esialgne variant

#### 4.1.2 Mõõtmisalus ja vahendid

Mõõtmisteks oli kasutusel Thorlabs Nexus Breadboard B75120A, mõõtmetega 750 mm \* 1200 mm \* 60 mm. Tegemist on teraskonstruksiooniga, millel on väga hea termiline stabiilsus ning lairiba summutus optimeeritud vastavalt aluse suurusele.

Aluse all ja peal on 5 mm paksune roostevabast terasest mattpinnaga kate, tolerantsiga  $\pm 0,1$  mm ühe ruutmeetri kohta. Alusel on reas iga 25 mm järel ava keermega M6, mis muudab seadmete paigaldamise lihtsaks.

Iga komplektiga tuleb kaasa ka kohver M6 mõõduga mutreid, polte ning seibe.



Sele 4.4. Thorlabs Nexus Breadboard B75120A

#### 4.1.3 Automaatne liigutuslaud

Mõõtmistulemuste võimalikult suure ühtluse ja täpsuse saavutamiseks, oli katsel kasutusel automaatne liigutuslaud Thorlabs LTS300. Tegu on 300 mm pikkuse liikumisulatusega platvormiga, mida saab juhtida nii käsitsi, juhtklaviatuuril olevate nuppude abil, või ühendatult arvutiga. Platvormi käitab kõrge jõudlusega samm-mootor.

Lisaks on võimalik osta juurde statiive, mille abil saab kolme liigutuslauaga katta liikumine kõigis kolmes teljes. Kuna antud mõõtmiste puhul toimus liikumine ainult kahel teljel, millest ühe sai fikseerida, piisas vaid horisontaaltelgepidi automatiseeritud liikumisest.

Liigutuslaud ühendub USB-kaabliga arvutisse ning sealt on võimalik väga lihtsalt ja täpselt platvormi asukohta positsioneerida.



Sele 4.5. Automaatne liigutuslaud Thorlabs LTS300

## 4.2 Elektroonika

### 4.2.1 Multimeeter

Töös kasutatud multimeeter oli Keysight 34411A 6½-Digit Enhanced-Performance DMM. Tegemist on väga kõrgelt hinnatud ning täpse aparaadiga, mida saab ka ühendada arvutiga läbi USB liidese või kohtvõrgu(LAN). Masin suudab teha 50000 mõõtmist sekundis ning laiendatud on ka mõõtmispiirkondade valikut.

Mõõtmiseks oli kasutusel 10 mA piirkond ning mõõdeti alalisvoolu väärtust. Multimeetril on sisendid nii esipaneelil, kui ka tagaküljel. See tegi mõõtmised mugavaks, kuna pidevalt sai jälgida mõlema diodi tulemusi. Kuigi multimeetri mõõtmisi saab tarkvaraliselt juhtida ning jälgida, pole siiski võimalik vahetada tarkvaraliselt esi- ja tagapaneeli sisendite vahel. Erinevate diodide mõõtmiste näitusid saab vahetada esipaneelil asuva nupuga.



Sele 4.6. Multimeeter Keysight 34411A 6½-Digit Enhanced-Performance DMM[6]

## 4.2.2 Laserid

Antud katsetel oli kasutusel kaks laserit, Thorlabs LDM850 ja Thorlabs LDM635.

Thorlabs LDM850 on 850 nm määratud valguse lainepikkusega infrapunalaser, võimsusega kuni 20 mW. Lainepikkuse tegelik vahemik võib jääd vahemikku 840-860 nm. Seda juhul, kui mõõtmiste ajal muuta väljundvõimsuse väärtust. Laseri kiir on elliptilise kujuga, läbimõõdudega 3,5\*4,4 mm(mõõdetuna 3 meetri kaugusel moodulist).

Thorlabs LDM635 on 635 nanomeetrise määratud valguse lainepikkusega nähtava punase kiirega laser, võimsusega 4.0 mW. Lainepikkuse tegelik vahemik võib jääd vahemikku 625-645 nm. Seda juhul, kui mõõtmiste ajal muuta väljundvõimsuse väärtust. Laseri kiir on elliptilise kujuga, läbimõõdudega 3,0\*5,0 mm(mõõdetuna 3 meetri kaugusel moodulist).

Läbimõõduga 35,5 mm kesta sees asub Fabry–Pérot laser diod, keskmise ribalaiusega 1 nm, kollimeeriv lääts ning võimsuse kontrolleri.

Mõlemal laseril on valguse kiired kollimeeritud, väljundvõimsus on reguleeritav korpuse sisse asetatud keeratavast nupust. Võimsust saab reguleerida vahemikus 0 kuni ette antud toote maksimumini. Iga laseri väljund on polariseeritud ning kiir valgustub pikkupidi. See tähendab, et kui laseril asuv *Enable* nupp, mida on näha ka pildid(Sele 4.7.), on pealpool, on kiir vertikaalselt polariseeritud. Erandiks on teine mõõtmistel kasutatud laser, LDM635, mis on sel juhul horisontaalselt polariseeritud.

Kõikidele antud seeria laseritel on sisseehitatud katik. Lisaks mehaanilisele katikule on ka võtmega lukustatav voolulüliti.

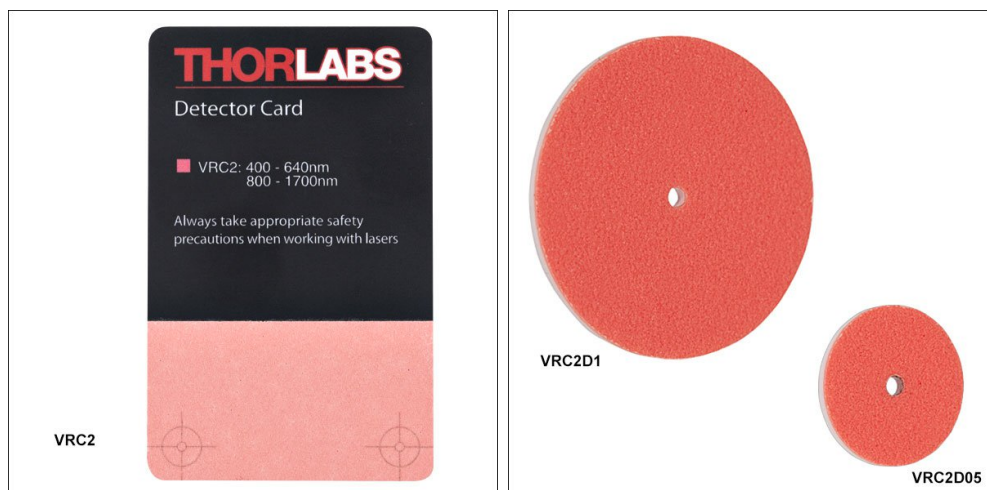


Sele 4.7. Thorlabs LDM850

Kuna kasutusel olnud valgust lainepikkusega 850 nm ei ole palja silmaga näha, oli töö lihtsustamiseks kasutusel ka kiire nähtavaks muutvad abivahendid VRC2 ja VRC2D1

VRC2 on tavalise krediitkaardi suurune detektorkaart, mille pinnal näeb valgust lähi infrapuna kiirgusel. Kaarti saab kasutada kiire asukoha määramiseks.

VRC2D1 on 25,4 mm läbimõõduga ringikujuline ketas, mille keskel on 1,5 mm ava. Ketast kasutatakse laserkiirte joonduseks ning kiire asukoha tuvastamiseks. Ketta pinda kattev aeglaselt kustuv fosfor laadub nähtava valguse käes ning seejärel, kui pinnale langeb lähi infrapunakiirgus, muutub see ketta pinnal nähtavaks valguseks.



Sele 4.8. Thorlabs detektorkaart VRC2 ja joondamisketas VRC2D1

## 4.3 Tarkvara

Töös kasutatav tarkvara oli Solid Edge ST5, mille abil sai konstrueeritud kinnitus Ge-diodile ning APT User, mis on Thorlabs'i enda kodulehelt allalaetav tasuta tarkvara, mille abil saab juhtida ning koostada programmi liigutuslauale Thorlabs LTS300.

### 4.3.1 Solid Edge

Germaanium diodi kinnituse projekteerimisel oli esmaseks abivahendiks Thorlabs kodulehelt allalaetav diodi 3D mudel. Seda kasutades oli oluliselt lihtsam määrata kinnituse avade kaugusi ning detaili suurusi. Kuna kinnituse kiireks valmistamiseks tuli kasutada lehtmetsi, kasutasin joonestamiseks Solid Edge Sheet Metal keskkonda. Kinnituse põhimõte oli lihtne ning täitis kõik vajalikud funktsioonid

### 4.3.2 APT User

APT User ehk Advanced Positioning Technology on Thorlabsi kodulehelt tasuta allalaetav tarkvara, juhtimaks erinevaid detaile. Programmist on mitmeid versioone, vastavalt etteantud masina vajadustele. Siin töös kasutatud versiooniga tuli juhtida positsioneerimisplatvormi liikumist.

USB liidesed võimaldavad ühendada samaaegselt piiramatul arvul seadmeid, ning ka neid kõiki lihtsalt ja üheselt juhtida. Kõiki põhiparameetreid saab muuta ning vajadusel salvestada järgmisteks kasutuskordadeks.

Programmi käivitades ilmub kasutajaliidese paneel, kõigi põhinuppudega, mis asuvad ka liigutuslaua paneelil. Lisaks on seal veel ka info juhitava seadme kohta ning võimalused seadistada platvorm mõõtmisteks. Nuppudega *Jog* on võimalik kontrollida, kas ühendus töötab, ning nupuga *Home/Zero* viisin platvormi algseesse positsiooni, mille väärtus on 0.00.

Nupp *Ident* on mõeldud juhtudeks, kui arvutiga on ühendatud mitu seadet korraga. Kuna iga seadme jaoks on eraldi samasugune programmipaneel, siis vajutades nupule hakkab vastava juhitava seadme küljes LED vilkuma.





Sele 4.9. Programmi APT User graafiline kasutajaliides(GUI)

Programm arvestab liikumist millimeetrites ning punkti määramisel on võimalik kasutada kahte erinevat positsioneerimise viisi:

absoluutsel liikumisel liigub platvorm märgitud positsioonile, mis on määratud kaugusega null väärtusega koordinaadist(*Home*)

relatiivsel liikumisel liigub platvorm vastavalt sisestatud vahemaa eelmisest asukohast.

Mina kasutasin enda töös absoluutseid väärtuseid.

*Dwell Time* on aeg, kaua programm püsib paigal käesolevas punktis, enne liikumist järgmisesse punkti. Määratud aja sisestasin millisekundites.

*Return* kastike märgistatakse juhul, kui on vajadus, et programm liigub lõppedes viimasest punktis tagasi algasendisse.

*Minimu Velocity*, *Acceleration* ja *Maximum Velocity* abil määrasin platvormi liikumise kiirenduse ning minimaalse ja maksimaalse kiiruse. Antud seadme puhul on minimaalne kiirus juba eelnevalt määratud nulliks ning seda ei saa muuta.

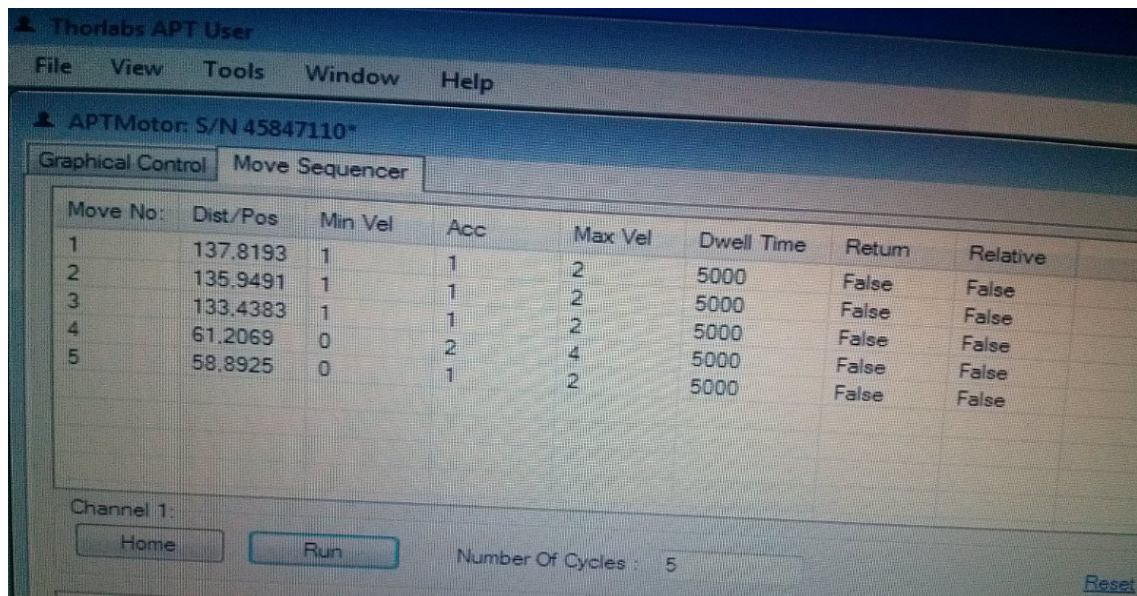
Sisestatud punktile lähenedes süsteem aeglustub, et vältida määratud asukohast ülesõitu ning ebatäpsust.



Sele 4.10. Liikumise seadistamise aken

Rohkemate punktidega programmi koostamiseks kasutasin funktsiooni *Move Sequencer*. Pildil Sele 4.11. oleval programmil on 5 punkti. Esimesed kolm punkti olid määratud Si-detektori aktiivse ala paremasse ning vasakusse serva ja tsesntrisse. Viimased kaks positsiooni asusid Ge-diiodi tsesntris ning antud kõrguse maksmimaalsel väärtusel.

Nupp *Home* viis platvormi esimesele positsioonile ning *Run* käivitab programmi. Selle kõrval asuva lahtriga *Number Of Cycles* määrasin tsükli kordade arvu.



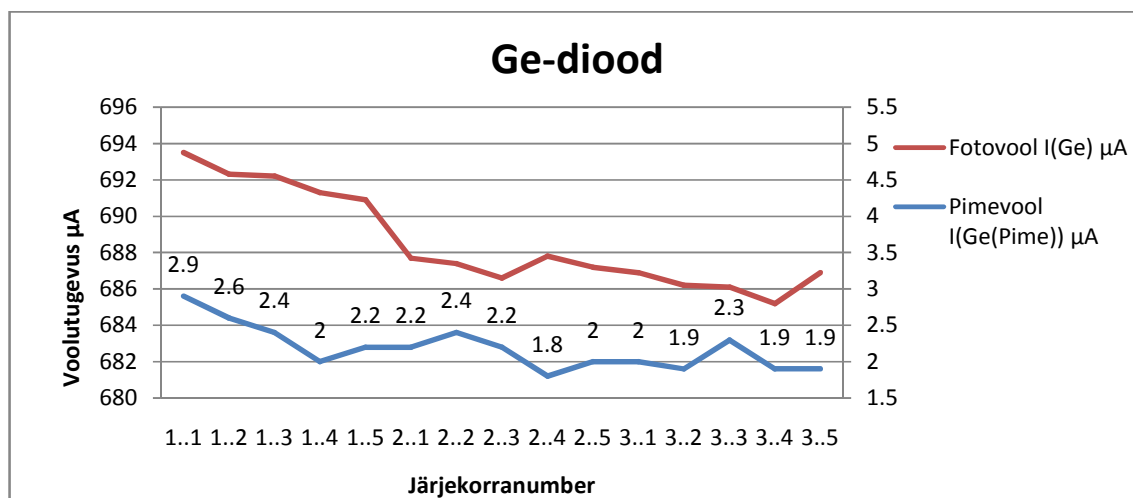
Sele 4.11. Liikumiste andmete aken

## 5. TULEMUSED

Mõõtmised 850 nm lainepikkusega laseriga toimusid kolmes osas, igas osas viis tsüklit, kus laseri ette liikus kõigepealt Si-detektor ning seejärel Ge-diod. Suurema täpsuse ja ühtluse saavutamiseks, võtsin mõõtetulemused ränidiodidega detektori tundlikku pinna tsentrist ning paremast ja vasakust servast. Eelnevad proovimised ja detektori tundlikkuse jälgimised näitasid, et detektoris tekkiv fotovool on veidi suurem just diameetri servadel. Erinevus on küll väike, kõige rohkem ligikaudu 10  $\mu\text{A}$ . Arvutuste jaoks kasutasin igal tsüklil nende kolme tulemuse aritmeetilist keskmist.

Ka germaaniumdiodil viisin proovimõõtmised läbi tsentri tulemustega ning taaskord selgus, et väärtused on üle aktiivse pinna erinevad. Seetõttu teostas diodi pinnal mõõtmised kahes kohas - aktiivse pinna tsentris ning vertikaaltelgepidi samal kõrgusel, kuid horisontaaltelgepidi otsitud maksimaalse väärtuse juures. Tsentri tulemused olid kogu katse ajal ligikaudu 60  $\mu\text{A}$  väiksemad. Arvutustel kasutasin maksimaalselt väärtust.

Diodi ja detektori tulemuste vahepeal mõõtsin ka loetavat pimevoolu hulka, mis jäi nii Ge-diodil, kui Si-detektoril umbes 2 - 4  $\mu\text{A}$  vahele. Germaaniumdiodil oli pimevool pidevalt veidi väiksem. Saadud tulemused on vastavalt graafikutel Sele 5.1. ja Sele 5.2.

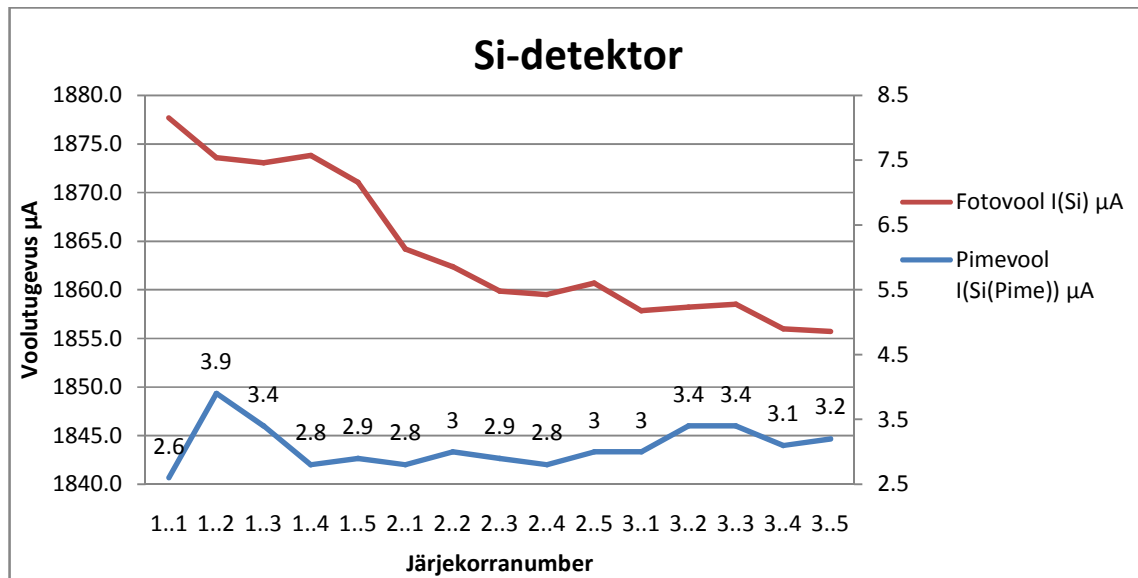


Sele 5.1. Germaaniumdiodi mõõtmistulemused

Graafikul Sele 5.1. on kantud koos, kogu mõõtmiste ulatuses, fotovoolu ning pimevoolu väärtused. Horisontaalteljel on jaotatud viiestesse tsüklitesse kolm mõõtmist. Vasakpoolne

vertikaaltelg näitab diodi fotovoolu väärtuseid ning parempoolne vertikaaltelg näitab pimevoolu tulemuste vahemikku.

Sama põhimõttega on esitatud ka Si-detektori tulemuste graafik Sele 5.2.



Sele 5.2. Si-detektori mõõtmistulemused

Mõlema graafiku fotovoolu tulemustes hakkab kohe silma, et tulemused olid pidevas languses ning et teise mõõtmise lõpus tekib kerge hüpe tulemustes.

Saadud tulemuste kontrolliks kasutasin valemit (5.1), mille abil arvutasin välja germaaniumdiodi tundlikkuse suhte ning seejärel võrdlesin seda tootjapoolsel graafikul olevaga.

$$K_{Si} = \frac{I_{Si} - I_{Si(Pime)}}{I_{Si(Pime)}} * K_{Ge} \quad (5.1)$$

kus  $I_{Si}$  on germaaniumist diodi fotovool ning  $I_{Si(Pime)}$  pimevool,

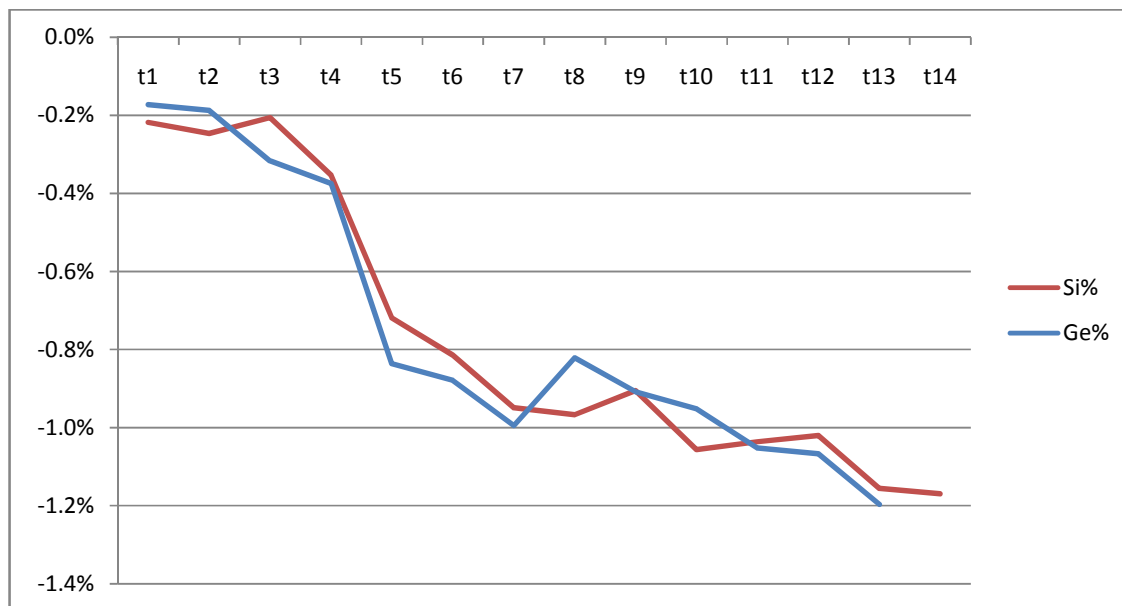
$I_{Si(Pime)}$  on ränidetektori fotovool ning  $I_{Si(Pime)}$  pimevool,

$K_{Si}$  on ränidetektori teoreetiline tundlikkus ning

$K_{Ge}$  on germaaniumdiodi arvutuslik tundlikkus.

$K_{Si}$  väärtuseks võtsin 0,6842 mA/mW, tootja poolt määratud  $K_{Ge}$  väärtus on 0,27525 mA/mW. Minu arvutuslik tundlikkus  $K_{Si}$  jäi umbes 0,2522 mA/mW juurde

Et võrrelda diodidel tekkiva signaali triivi ühtlust ning jälgida triivi suuruse jäämist lubatud piiridesse, arvutan välja tulemuste erinevuse esimesest tulemusest ajahetkel t1. Graafikusse Sele 5.3. kannan erinevused protsentides, veendumaks tulemuste püsimise lubatud piirides

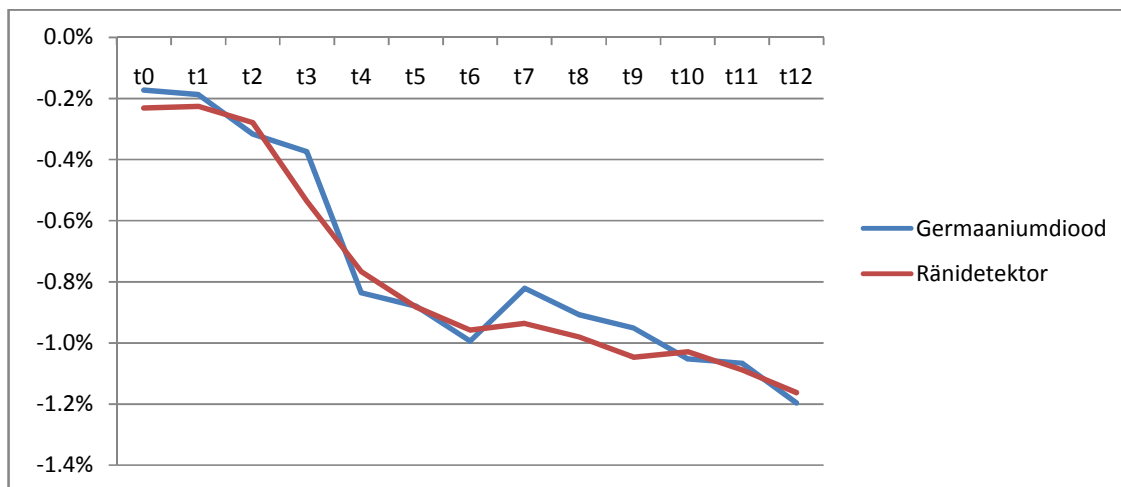


Sele 5.3. Ge-diodi ja Si-detektori tulemuste muutus võrreldes ajahetkega t1

Sele 5.4. kajastab germaaniumdiodi ja ränidetektori tulemuste suhte muutust ajas ehk kordustäpsust. Germaaniumdiodi tulemust ajahetkel t võrreldakse antud ajahetkele eelneva ja järgneva ränidetektori mõõtetulemuse suhtega(valem 5.2).

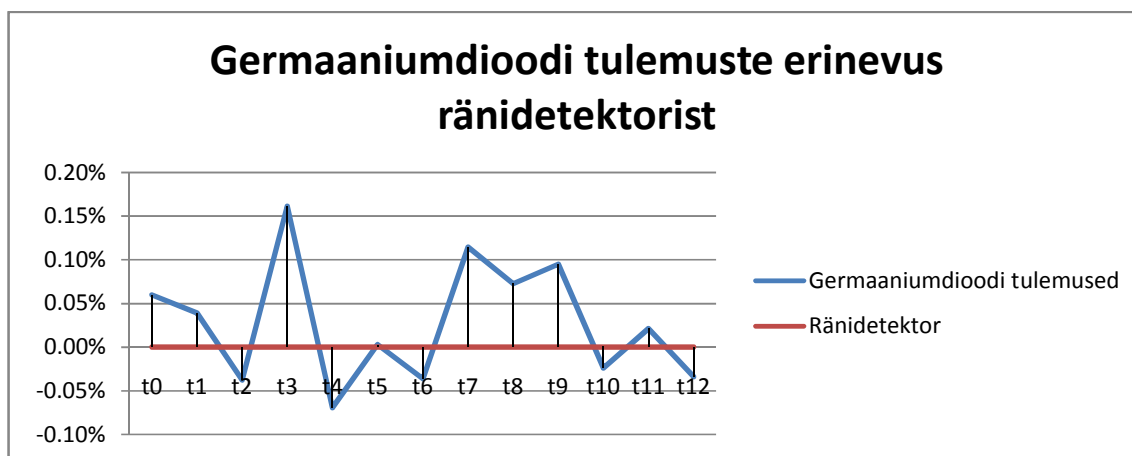
$$\frac{? (?_?)}{\frac{[? (?_{??}) + ? (?_{??})]}{2}} \quad (5.2)$$

kus  $? (?_?)$  on germaaniumdiodi tulemus ajahetkel x,  
 $? (?_{??})$  on ränidetektori tulemus ajahetkel x-1, ehk Ge-diodile eelnev mõõtmine ja  
 $? (?_{??})$  on ränidetektori tulemus ajahetkel x+1, ehk Ge-diodile järgnev mõõt.



Sele 5.4. Ge-diodi erinevus eelnevast ja järgnevast tulemustest protsentides

Illustreerimaks germaaniumdiodi tulemuste erinevust antud ajahetkel ränidetektori tulemustest, on graafikul Sele 5.5. võrdsustatud ränidetektori tulemused nulliga. Germaaniumdiodi suurimad erinevuse väärtused jäävad 0,15 % juurde ning seega on vajalik täpsus saavutatud isegi varuga. Eesmärk oli jääda tulemustega 0,3 % piiridesse, et võrdluse määramatus ei ulatuks üle 1 % . Graafiku abil on võimalik jälgida germaaniumdiodi tulemuste erinevuse suurust.



Sele 5.5. Ge-diodi tulemuste erinevus Si-detektorist

## 6. ANALÜÜS

On teada, et fotodiodi tundlikkus muutub kasutusel aja jooksul [7]. Põhjuseid selleks on mitmeid. Näiteks fotodiodi aktiivse pinna vananemine ning reostus vähendavad tundlikkust, eriti juhul, kui töökeskkonna tingimused ei ole ühtlaselt stabiilsed.

Si-detektori puhul mõjutab kõige enam tulemusi peegeldamisel tekkivad kaod vastavalt kiire asukohale diodil. Kiire langemise asukoht esimesel diodil määrab langemise asukoha viimasele diodile. Sellepärast oli ka mõõtmistel kasutusel tulemused kolmest erinevast kohast. Siiski olid tulemused üsna sarnased, kuna dioode on mitu, ning tagasipeegelduv valgus väheneb diodide arvu suurenedes. See on ka suurim põhjus, miks eelistada ja kasutatakse tugidetektoreid. Kolme mõõtmisel kasutatud punkti vahe oli teineteisest 2 - 2,5 mm.

Kõikide mõõtmiste puhul on ka mingil osal määrav temperatuur. Antud töös temperatuurandureid kasutusel polnud. Et viia temperatuuri mõju võimalikult väikseks, rakendasime võimalust anda masinatel aega soojenemiseks ning ühtlustumiseks. Vaatamata sellele, iga kord, kui diodile uuesti valgus peale langeb, tekib soojenemine ja seejärel jahtumine, mis mõjutab ka vähesel määral lõpptulemust

Germaaniumdiodi puhul said määravaks mitmed tegurid.

Kõige rohkem mõjutab üksiku diodi mõõtmistulemusi suur tagasipeegelduvus, mistõttu on arvatud tulemused väiksemad, kui tootja kodulehel antud graafikus. M. Lopez'i doktoritöös[1] võrreldi üksikut diodi sama tööpinnaga tugidetektoriga ning üksiku germaaniumdiodi tundlikkus oli kogu mõõdetud alas (1200-1650 nm) pidevalt ligikaudu 0,1 A/W väiksem, kui mitme germaaniumdiodiga tugidetektoris, kus peegeldumiskaod on väga väikesed.

Teine suur mõjutaja on fotodiodi tundlikuse ebahütlus pinna ebahütluse tõttu. Sellega arvestamine on väga oluline, kui kasutada fotodiodi ülekande tugietalonina väikse määramatusega mõõtmistel.

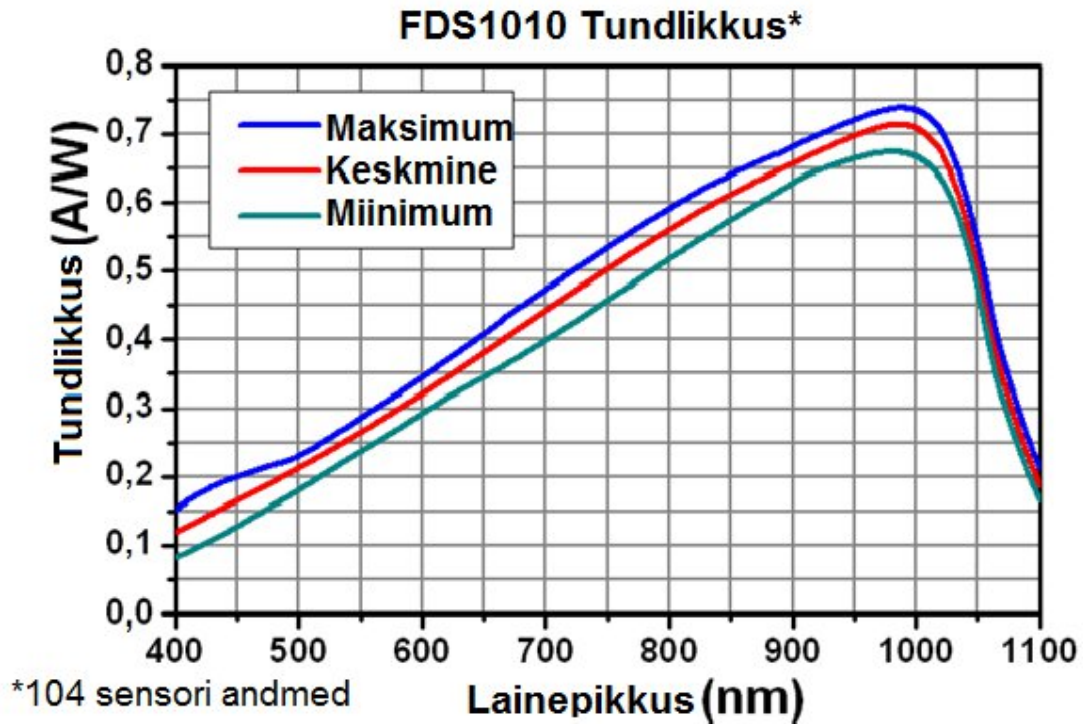
Ideaalsel fotodiodil peaks olema üle aktiivse pinna ühtlane tundlikkus. See tähendab, et kui fotodiodi valgustatakse erinevate kiire diameetritega või kui kiirgus langeb erinevatele kohtadele diodi tundlikkul alal, peaks tulemuseks olema sama suure väärtusega signaal. Tegelikuses esineb aga igal fotodiodil mingil määral pinna ebahütlust, mis oleneb peamiselt tundliku ala suurusest, materjalist ning valmistamise meetodist. Lisaks sellele mõjutab fotodiodi ebahütlust ka mõõtmistel kasutatava kiire lainepikkus, suurus ning homogeensus.

Ebahütluse all peetakse silmas, et nii tolm ja mustus mõjutab tundlikkust, kui fotodiodi pinna kergest ebaparalleelsusest tingitud konarlused ja kõverused [8].

Lisaks on kasutatud germaaniumdiodid suhteliselt suure pinnaga ning mõjuma hakkavad ka süsteemi-sisesed segajad. Suure pinnaga fotodiodidel on tavaliselt kõrge tundlikkus ning suur linearsusvahemik. Kuid tundlikku pinna suurenemisega kasvab ka mahtuvuse ja pimevoolu hulk ning signaali müra suhe.

Kuid erinevused tundlikuses esinevad ka alles tootmisest väljunud diodidel. Ühe ja sama seeria fotodiodi tundlikkus varieerub partiides. Seetõttu võib saadaval fotodiodil olla kergelt erinev vastuvõtlikus tootja tehniliste andmete lehel. Näitena on Thorlabs'i kodulehel ränidiodi FDS1010 tundlikuse graafik(Sele 6.1) erinevatel lainepikkustel. Tegu on väliselt ning ehitusel samasuguse diodiga nagu minu poolt kasutatud germaaniumdiodid FDG1010. Mõlemal on ruudukujulise aktiivse ala suurus 10\*10 mm ning keraamiline põhi. Graafikult on näha tulemuste erinevuse ulatus 104 sama seeria diodi mõõtmise ja võrdlemise tulemusel. Miinimum-, keskmine ja maksimumtundlikkus arvutati välja igas teljepunktis. Vahe suurima ja väikseima punkti vahel jääb suures osas graafikul umbes 0,05 A/W juurde.





Sele 6.1. Thorlabs Si-diodi FDS1010 tundlikkus määratud lainepikkustel

Lisaks diodi enda määramatustele, mängivad tulemustes rolli ka teiste süsteemi liikmete ebatäpsused.

Automaatse liigutuslaua LTS300 tootjajärgne telgepidi absoluutne liikumistäpsus on 47  $\mu\text{m}$ . Seega võib olla määratud punktis platvormi asukoha hälve  $\pm 47 \mu\text{m}$ . Germaaniumdiodi tulemuste mõõtmisel kasutatud kahe punkti vahe oli 2,3144 mm ehk 2314,4  $\mu\text{m}$ . Valemiga 6.1. leian hälbe kasutatud kahe punkti vahel

$$\frac{\Delta}{L} * (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) \quad (6.1)$$

kus  $\Delta$  on liigutuslaua lubatud hälve,

$L$  on kahe punkti vaheline vahemaa,

$I_{\text{max}}$  on diodi tsentri fotovoolu ja

$I_{\text{min}}$  diodi maksimumi fotovoolu väärtus.

Seega 2,3144 mm kohta on keskmine hälve 1,2 ning hälve fotovoolu väärtusest on ligikaudu  $\pm 0,17 \%$ .

Multimeetri Keysight 34411A 6½-Digit Enhanced-Performance DMM kasutusjuhendis on antud 10 mA piirkonna alalisvoolu mõõtmisel tulemuse võimalikuks täpsuseks  $\pm 0.007 + 0.020 \%$ , kus esimene arv on hälve lugemist ning teine arv on hälve mõõtepiirkonnast. See annab seeria kohta hälbeks  $\pm 0,19 \mu\text{A}$  mis on ligikaudu  $\pm 0,03 \%$  fotovoolu väärtusest.

Varasemalt sai juba ka räägitud laserite lainepikkuse vahemikust (ptk 4), mis oli mõlemad juhul  $\pm 10$  nm. Germaaniumdiodi tootjapoolsete andmete järgi tähendab see kuni 0,015 A/W erinevust töös kasutatud võrdlustulemusest. Kuna mõõtmiste käigus jäi laseri väljundvõimsus muutmata, siis seda tegurit ei arvesta. Arvestada tuleb aga laserkiire triivi mõõtmiste käigus. Germaaniumdiodi puhul oli see kuni  $\pm 0,12$  % fotovoolu väärtusest.

Tabel 6.1. Diiodi FDG1010 tundlikkus vahemikus 840-860 nm

FDG1010 Tundlikkus	
Lainepikkus (nm)	Tundlikkus (A/W)
840	0,26513
850	0,27525
860	0,29272

Arvutuslike tulemuste puhul hakkab ka määramatuse tekkel mängima rolli mõõtetulemuste hajuvus. Germaaniumdiodi ühe mõõteseeria standardhälve on arvutuslikult ligikaudu 0,15 % fotovoolu väärtusest ning 0,099 % diiodi tundlikkusest.

Ruuteskirja järgi kõik tegurid kokku liites, on määramatus kuni  $\pm 0,21$  % fotovoolu väärtusest.

## KOKKUVÕTE

Käesolevas töös sooritati germaaniumdiodi Thorlabs FDG1010 tundlikkuse mõõtmised ning võrreldi neid eelnevalt karakteriseeritud kolme ränidiodiga täpsidetektoriga. Võrdluse abil jälgiti erinevate süsteemisestest ning -väliste tegurite mõju tulemustele. Tulemuste põhjal hinnati arvutuslikult mõõtmistulemuste kordustäpsust, hajuvust ning triivi.

Eesmärk oli saavutada germaaniumdiodi ja ränidetektori võrdlusel kordustäpsus 0,3 %, et võrdluse määramatus ei ulatuks üle 1 %. Selline tase on piisav tundlikkuse määramiseks ning Eestis sellise teenuse kättesaadavus hetkel puudub.

Töö käigus konstrueeriti ning valmistati germaaniumist fotodiodile kinnitus, mis võimaldaks läbi viia mõõtmised. Mõõtmised viidi läbi kahe erineva lainepikkusega laseriga - 850 nm lähi infrapuna valguskiirega ning tulemuste võrdluseks oli kasutusel ka 635 nm nähtava lainepikkusega laser.

Mõõtmised toimusid Tallinna Tehnikaülikooli mehhatroonikainstituudi metrooloogialaboris ning mõõtmistel kasutati koolil juba eelnevalt olemasolevaid tarvikuid. Arvestades mõõtmistulemusi ning kõiki katseskeemi mõjutanud tegureid, jäid tulemused määratud piiridesse ning seega võib katsed lugeda õnnestunuks.

## **SUMMARY**

The aim of this work was to perform measurements of responsivity with a Thorlabs germanium diode FGD1010 and compare the results to a previously characterized trap detector consisting of three silicon diodes. During the comparison, it was monitored how different means of system internal and external factors influence the measurement results. Based on the calculations with the results obtained, the repeatability of the measurements, dispersion of the results and drift of the laser beam were evaluated.

The objective in the present study was to achieve a relative comparison repeatability of 0,3 % in responsivity between the germanium diode and a silicon trap detector. Such magnitude is sufficient enough to determine the responsivity and which can be used to establish such kind of a service in Estonia.

During the experiment, a clamp was constructed and built for the germanium diode, to be able to carry out the measurements. The measurements were carried out at two different wavelengths of diode laser modules - one with a 850 nm near infrared light beam and for the comparison of the results, a 635 nm visible light beam laser was also used.

Measurements took place at Metrology laboratory of Mechatronics Institutes of Tallinn University of Technology. Taken into account the results of the measurement and all factors studied that may have altered the experiment, the results stayed in the specified limits and, thus, the experiment can be considered a successfully completed.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] M. Lopez , Optical characterization of Ge- and InGaAs-semiconductor detectors for high accuracy optical radiant power measurements in the near infrared , (2008)
- [2] [WWW] [http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=285](http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=285)
- [3] N. P. Fox , Trap Detectors and their Properties, Metrologia 28, (1991)
- [4] Haapalinna A, Kärhä P, Ikonen E ., Spectral reflectance of silicon photodiodes, Appl Opt. 37, (1998)
- [5] T. Kübarsepp, Optical radiometry using silicon Photodetectors, Thesis for the degree of Doctor of Technology, Espoo, (1999)
- [6] [WWW] <http://www.keysight.com/en/pd-692679-pn-34411A/digital-multimeter-6-digit-enhanced-performance?&cc=EE&lc=eng>
- [7] K. D. Stock, “Spectral ageing pattern of carefully handled silicon photodiodes,” Measurement 5, 141-143 (1987)
- [8] T. Kübarsepp, P. Kärhä, E. Ikonen, Characterization of a polarization-independent transmission trap detector. - *Applied Optics*, 36 (13), 2807 - 2812, (1997)
- [WWW] <http://www.thorlabs.de/index.cfm> (09.04.2015).
- [WWW] <http://et.wikipedia.org/wiki/Fotodiood> (15.05.2015).