

Vilniaus universitetas  
Fizikos fakultetas  
Fotonikos ir nanotechnologijų institutas

Valentinas Andrulis  
TRUMPABANGIŲ INFRARAUDONŲJŲ SPINDULIŲ GaInAsSb/GaSb  
FOTODETEKTORIŲ TECHNOLOGIJŲ TYRIMAS

Magistrantūros studijų mokslo tiriamasis darbas  
Optoelektronikos medžiagų ir technologijų  
studijų programa

Studentas

Valentinas Andrulis

Darbo vadovas

Dr. Arūnas Miasojedovas

Instituto atstovas

Doc. Ramūnas Aleksiejūnas

Vilnius 2020

# Turinys

Įvadas.....	3
1. Literatūros apžvalga .....	5
1.1. Puslaidininkinių medžiagų juostinė diagrama.....	5
1.2. Fotodetektorių tipai bei jų struktūros.....	8
1.2.1. Optinė sugertis puslaidininkyje .....	8
1.2.2. Fotovaržos .....	9
1.2.3. P-n ir p-i-n fotodetektoriai .....	10
1.2.4. Unipoliariniai infraraudonųjų spindulių jutikliai.....	13
1.3. Triukšmų šaltiniai fotodetektoriuose .....	14
1.4. Pagrindinės fotodetektorių savybės .....	17
2. Tyrimo metodika .....	20
2.1. Tiriama bandiniai .....	20
2.2. Detektoriaus I-V charakteristikos matavimas.....	20
2.3. Fotodetektoriaus fotoatsako ir temperatūriniai matavimai .....	21
2.4. Triukšmų charakteristikų matavimas.....	23
3. Rezultatai ir jų aptarimas.....	24
3.1. Tamsinių srovių ir fotoatsako matavimai .....	24
3.2. Aktyvacijos energija.....	40
3.3. Srovės triukšmų matavimai .....	41
3.3. Automatizuoto matavimo programos kūrimas .....	51
Išvados.....	53
Literatūros sąrašas .....	54
Santrauka .....	55
Summary .....	56
Priedai.....	57

## Ivadas

Puslaidininkiniai optoelektronikos prietaisai ir jų technologija per pastarąjį pusamžį sulaukė vis didėjančio susidomėjimo. Ši technologija šiandieną pritaikoma telekomunikacijoje, medicinoje, karinėje pramonėje ir vartotojų kasdieniniuose prietaisuose. Pagrindinis šių prietaisų privalumas yra kompaktiškumas ir galimybė pritaikyti juos specialiai paskirčiai kontroliuojant prietaiso sluoksnių medžiaginę sudėtį, taip keičiant jo fizikines savybes.

Optoelektronikos prietaisai pagrįsti spinduliuotės ir medžiagos tarpusavio sąveika elektrinį signalą paverčiant į optinį ir atvirkščiai. Puslaidininkiniai optoelektronikos prietaisai supaprastintu atveju gali būti skirstomi į dvi pagrindines grupes: šviesą detektuojantys ir šviesą generuojantys. Lazeriniai diodai yra vieni iš labiausiai paplitusių šviesą generuojančių optoelektronikos prietaisų. Jie naudojami šviesolaidiniame ryšyje, brūkšninių kodų nuskaityme, CD/DVD diskų nuskaityme bei įrašyme, lazeriniuose spausdintuvuose ir t.t. Suprantama jog kuriant įvairias optoelektronikos sistemas, šviesos detektavimas bus neatsiejama sistemos dalis. Optinį signalą aptikti galima naudojant fotolaidumą arba fotoelektrinį efektą, tačiau dėl mažesnio atsako laiko ir tiesiškesnio sąryšio tarp krentančios spinduliuotės galios, pramonės ir mokslo srityse, reikalaujančiose tikslų matavimo prietaisų, dažniau pasirenkami fotodiodiniai detektoriai pagrįsti krūvininkų generacija (pvz. fotodiodai).

Fotodiodai pagrįsti fotonų sugertimi aktyviajame sluoksnyje. Didžiausias puslaidininkinių detektorių privalumas yra jog sugeriamų fotonų energijos (arba bangos ilgio) diapazonas priklauso nuo absorbuojančios medžiagos draustinio tarpo dydžio. Pasirenkant medžiagų sudėti galima išgauti detektorių skirtą specialiam bangų ruožui, taip optimizuojant detektorių išskirtinei paskirčiai. Prietaisai dirbantys vidutinio bangos ilgio infraraudonosios spinduliuotės ( MWIR, *angl. Medium Wave Infrared* ) diapazone tarp 2  $\mu\text{m}$  ir 5  $\mu\text{m}$  yra plačiai nagrinėjami cheminių reagentų, taršalų aptikime, mažo nuostolio optinių skaidulų ryšiuose, karinių atsakomųjų priemonių sistemose ir energijos gamyboje. Didžiąją dalį medžiagų šiems prietaisams sudaro stibio turintys III – V puslaidininkiniai lydiniai ir apima keturnarius lydinius  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  ir  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ,  $0 \leq y \leq 1$ ), kurie susideda iš dvinarių lydinių AlAs, AlSb, GaAs, GaSb, InAs ir InSb[1].

Siekiant sukurti detektorius, galinčius funkcionuoti specifiniame bangų ruože, būtina išgryninti detektoriaus sluoksnių auginimo, bei apdirbimo technologijas. Tam pasiekti būtinas patikimas detektoriaus parametrų įvertinimo būdas. Tamsinė srovė, fotoatsako koeficientas, spektrinis atsakas, triukšmą atitinkanti galia (NEP, *angl. noise equivalent power*) bei specifinis detektyvumas yra vieni iš pagrindinių, bet ne visi, fotodetektoriaus savybes apibūdinantys parametrai. Šių parametrų

įvertinimas ir būdas juos valdyti yra pagrindiniai technologiniai įrankiai kuriant pažangiausius fotodetektorius rinkoje.

Pagrindinis šio darbo tikslas yra atlikti 2 – 3  $\mu\text{m}$  bangų ruože veikiančių detektorių analizę, kuri suteiktų grįžtamąjį ryšį kuriant fotodetektorius, pasižyminčiais užsibrėžtomis tamsinės srovės, fotoatsako charakteristikomis, bei būtų gaminami naudojant planarinį apdirbimo metodą, leidžiantį sumažinti detektoriaus vieneto kainą. Šiam tikslui pasiekti buvo išsikeltas uždavinys paruošti eksperimentinę bazę skirtą nagrinėti fotodetektorių elektrines ir optines savybes, taip siekiant įvertinti sukurtų fotodetektorių fotojautrumą, tamsinės srovės, elektrinį triukšmą, savybių kitimą esant temperatūriniais pokyčiams, bei rasti šių savybių sąryšį su geometriniais detektoriaus parametrais. Darbo eiga susideda iš matavimo stendo sukūrimo ir surinkimo, stendo automatizavimo naudojant programinę įrangą, įvairių struktūrų fotodetektorių IV charakteristikų, triukšmo, galios tankio spektrų, fotoatsako, aktyvacijos energijos, geometrinių parametru įtakos savybėms matavimų, gautų duomenų vizualizavimo ir analizės.

# 1. Literatūros apžvalga

## 1.1. Puslaidininkinių medžiagų juostinė diagrama

Kietos būsenos medžiagas galima suskirstyti į tris pagrindines grupes: izoliatorius, puslaidininkius ir laidininkus. Medžiagos kaip sierra, nikelio oksidas ar stiklas yra izoliatoriai ir pasižymi laidumu esančiu  $10^{-17} - 10^{-10}$  S/cm ribose, tuo tarpu laidininkai yra  $10^5 - 10^6$  S/cm ribose. Puslaidininkinėse medžiagose laidumas svyruoja tarp izoliatoriaus ir laidininko verčių ir stipriai priklauso nuo temperatūros, apšvietos ar priemaišų kiekio medžiagoje. Savybių kitimas išskylantis dėl išorinių veiksnių ar kompozicijos pokyčių, leidžia puslaidininkines medžiagas taikyti gausioje elektronikos srityje. Pagrindinės puslaidininkinės medžiagos ir jų junginiai pateikti 1 lentelėje. Maišant įvairias puslaidininkines medžiagas (Ga, In, As ir kt.) galima išgauti skirtingus lydinius, kurie susideda iš dviejų, trijų ar keturių komponentų. Suprantama jog daugiakomponenčių kristalų gamyba reikalauja daug sudėtingesnių procesų, nei tarkime monokristalinio silicio auginimas, tačiau daugianarės medžiagos gali pasižymėti neįprastomis elektrinėmis ir optinėmis savybėmis, pavyzdžiui galio arsenidas plačiai taikomas didelės spartos elektronikoje ir fotonikoje.

**1 lentelė.** Pagrindinės puslaidininkinės medžiagos[2]

Bendra klasifikacija	Puslaidininkis	
	Simbolis	Pavadinimas
Elementas	Si	Silicis
	Ge	Germanis
Dvinariai		
IV-IV	SiC	Silicio karbidas
III-V	AlP	Aluminio fosfidas
	AlAs	Aluminio arsenidas
	AlSb	Aluminio stibidas
	GaN	Galio nitridas
	GaAs	Galio arsenidas
	InAs	Indžio arsenidas
II-VI	ZnO	Cinko oksidas
	ZnSe	Cinko selenidas
	CdTe	Kadmio teluridas
IV-VI	PbS	Švino sulfidas
	PbSe	Švino selenidas
Trinariai	Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As	Aluminio galio arsenidas
	Al <sub>x</sub> In <sub>1-x</sub> As	Aluminio indžio arsenidas
	GaAs <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub>	Galio arsenido fosfidas
	Ga <sub>x</sub> In <sub>1-x</sub> As	Galio indžio arsenidas
	Ga <sub>x</sub> In <sub>1-x</sub> P	Galio indžio fosfidas
Keturnariai	Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As <sub>y</sub> Sb <sub>1-x-y</sub>	Aluminio galio arseno stibidas
	Ga <sub>x</sub> In <sub>1-x</sub> As <sub>1-y</sub> Py	Galio indžio arseno fosfidas

Dėl paprastumo, aprašant kristalinę struktūrą, teigiama jog visas kietasis kūnas sudarytas iš periodiškai pasikartojančių vienetinių celių. Šiuo atveju į kraštines kristalo ribas yra neatsižvelgiama, su prielaida jog atomų, esančių paviršiuje, yra daug mažiau nei viso kristalo tūryje. Vienetinės celės ir kristalo sąryšį apibūdina trys skirtingo ilgio, tarpusavyje nelygiagretūs vektoriai  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  ir  $\mathbf{c}$ . Tuomet kiekvienas gardelės taškas gali būti išreiškiamas  $\mathbf{R}$  vektoriumi.

$$\mathbf{R} = m\mathbf{a} + n\mathbf{b} + p\mathbf{c} \quad (1)$$

čia  $m$ ,  $n$  ir  $p$  – sveikieji skaičiai. Esant periodinei struktūrai, pasinaudojus atvirkštine gardele, elektronų energijos juostas kristale galima aprašyti keliomis konstantomis[3]. Draustinis tarpas juostinėje diagramoje nusako energijos intervalą kuriame elektronų būsenos yra uždraustos. Puslaidininkinėse medžiagose šis draustinis tarpas sutampa su energijos skirtumu tarp valentinės juostos viršaus ir laidumo juostos apačios. Draustinio tarpo teorinis skaičiavimas daugianariams lydiniams yra labai sudėtingas, todėl praktikoje yra naudojamas empirinis Vegardo dėsnis, teigiantis jog kieto tirpalo gardelės parametrai yra apytiksliai lygūs dviejų sudedamųjų dalių gardelės parametru mišinio normai[4]. Bendru atveju gardelės konstanta turi beveik tiesišką priklausomybę su draustiniu energijos tarpu. Kadangi gardelės konstantai pritaikomas Vegardo dėsnis, galima manyti jog tas pats dėsnis tinka ir draustinio tarpo atveju:

$$E_{g,A(1-x)Bx} = (1-x)E_{g,A} + xE_{g,B} + cx(1-x) \quad (2)$$

čia  $x$  – komponento dalis lydale,  $E_{g,A}$  ir  $E_{g,B}$  – komponentų draustinės juostos tarpai,  $c$  – polinkio konstanta.

Vegardo dėsnis aprašo draustinio tarpo priklausomybę dviejų komponentų atžvilgiu, tačiau šį dėsnį galima interpretuoti ir dariniams sudarytiems iš trijų ar daugiau komponentų. Dėl atsitiktinio to paties grupės elementų pasiskirstymo lydinio gardelėje, tikslus keturnarių medžiagų parametru skaičiavimas vargu ar įmanomas. Vietoj to, keturnarių lydinių savybės prognozuojamos interpoliuojant žinomus dvinario arba trinario lydinio duomenys. GaAsInSb lydinys plačiai taikomas infraraudonųjų (IR) spindulių prietaisuose ir gali padėti platų spektrinį diapazoną nuo 0,81  $\mu\text{m}$  iki ~ 6  $\mu\text{m}$ [3]. Pasinaudojant Vegardo dėsniu, šio lydinio draustinės juostos tarpą galima išreikšti formule:

$$E_g(z) = 0,812(1-z) + 0,346z + 0,75x(1-z) \text{ eV} \quad (3)$$

čia  $z$  - kompozicijos dalis  $(\text{GaSb})_{1-z}(\text{InAs}_{0,91}\text{Sb}_{0,09})_z$  lydinyje.

Elektrines savybes optoelektronikos prietaisų medžiagose stipriai priklauso ne tik nuo draustinio juostos tarpo, bet ir krūvininkų koncentracijos. Savitoji krūvininkų koncentracija puslaidininkiuose yra nusakoma kaip krūvininkų koncentracija esant terminei pusiausvyrai, ir nesant

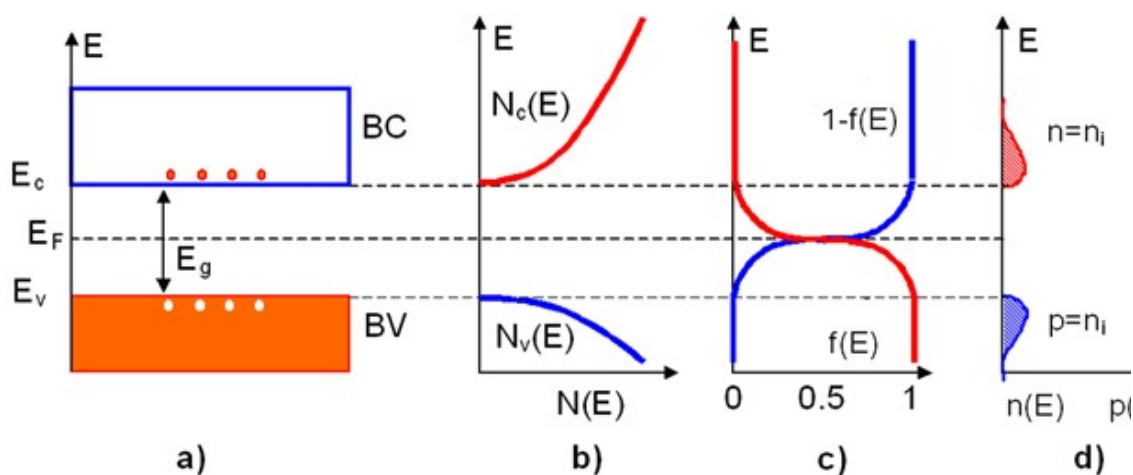
jokiam išoriniam žadinimui kaip šviesa, slėgis ar elektrinis laukas. Savitojo puslaidininkio krūvininkų energetinis pasiskirstymas pavaizduotas 1 paveikslėlyje. Krūvininkų tankis yra lygus:

$$n = \int_0^{E_{top}} n(E) dE = \int_0^{E_{top}} N(E) F(E) dE \quad (4)$$

čia  $n$  – elektronų tankis;  $N(E)$  – būsenų tankis;  $F(E)$  – Fermi pasiskirstymo funkcija. Savitajame puslaidininkyje elektronų skaičius tūrio vienetė laidumo juostoje yra lygus skylių skaičiui tūrio vienetė valentinėje juostoje ir yra lygūs savitajam krūvininkų tankiui  $n_i$ . Kambario temperatūroje šis tankis yra lygus:

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (5)$$

čia  $N_C$  ir  $N_V$  – efektinis būsenų tankis laidumo ir valentinėje juostose;  $E_g$  – draustinis tarpas;  $k$  – Bolstmano konstanta;  $T$  – temperatūra. Šių krūvininkų tankiai yra pakankamai maži, pavyzdžiui siliciui ir galio arsenidui  $n_i$  yra apie  $9,65 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$  ir  $2,25 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-3}$  atitinkamai.



**1 pav.** Savitojo puslaidininkinio a) – juostinė diagrama; b) – būsenų tankiai; c) – Fermi pasiskirstymo funkcija; d) – krūvininkų koncentracijos.[5]

Krūvininkų tankiui padidinti puslaidininkinės medžiagos yra legiruojamos priemaisomis. Priemaišos sukuria papildomus energetinius lygmenis puslaidininkyje ir jei priemaišiniai lygmenys yra seklūs (kambario temperatūroje terminės energijos pakanka jonizuoti visas donorines arba akceptorines priemaišas) elektronų arba skylių koncentracija atitinkamai lygi donorinių arba akceptorinių priemaišų koncentracijai. Priklausomai nuo priemaišų tipo ir jų koncentracijos puslaidininkinės medžiagos gali būti skirstomos į  $n$  ir  $p$  tipo puslaidininkius. Būtent puslaidininkių legiravimas suteikia technologinę galimybę iš medžiagų konstruoti įvairius optoelektronikos prietaisus, kaip lazerius, saulės celes, fotodetektorius, fotodiodus ar loginių grandynų elementus.

## 1.2. Fotodetektorių tipai bei jų struktūros

### 1.2.1. Optinė sugertis puslaidininkyje

Fotonikos prietaisuose pagrindinį vaidmenį atlieką elementari šviesos dalelė – fotonas. Šviesą emituojančiuose dioduose (LED, *angl. light emitting diode*), lazeriuose elektrinė energija yra konvertuojama į optinę, o fotodetektoriuose ar saulės elementuose vyksta atvirkščias procesas: optinė energija verčiama į elektrinį signalą fotodetektoriuje, arba į elektrinę energiją saulės elemento atveju. Elektrono ir fotono sąveiką sudaro pagrindiniai trys procesai: sugertis, spontaninė emisija ir stimuliuota emisija. Optinė fotono sugertis puslaidininkyje sukuria elektrono ir skylės porą. Priklausomai nuo į sugerties sluoksnį krentančio fotono energijos galimi keli sugerties tipai. Jei fotono energija sutampa su puslaidininkio draustinės energijos tarpu, elektronas yra perkeliamas į laidumo juostą, o valentinėje juostoje atsiranda skylė. Didesnės energijos fotono atveju taip pat sugeneruojama ta pati elektrono ir skylės pora, o papildoma energija yra konvertuojama į šilumą. Jei fotono energija yra mažesnė nei draustinis tarpas, sugertis galima tik tuo atveju jei puslaidininkyje egzistuoja papildomi energijos lygmenys draustiniame tarpe atsirandantys dėl defektų ar priemaišų. Fotonų sugertis puslaidininkinėje medžiagoje vienetiniame atstume  $\Delta x$ , yra proporcinga sugerties koeficientui  $\alpha$ . Bendru atveju spinduliuotės srauto intensyvumą bandinyje galima išreikšti kaip funkciją nuo  $x$  koordinatės:

$$\varphi(x) = \varphi_0 e^{-\alpha x} \quad (6)$$

čia  $\varphi$  – fotonų srautas medžiagoje ties  $x$  atstumu nuo paviršiaus;  $\varphi_0$  – fotonų srautas krentantis į medžiagos paviršių. Sugerties koeficientas priklauso nuo krentančio fotono energijos ir dažniausiai pasiekia labai mažas vertes, kuomet bangos ilgis viršija ribinį bangos ilgį  $\lambda_c$ :

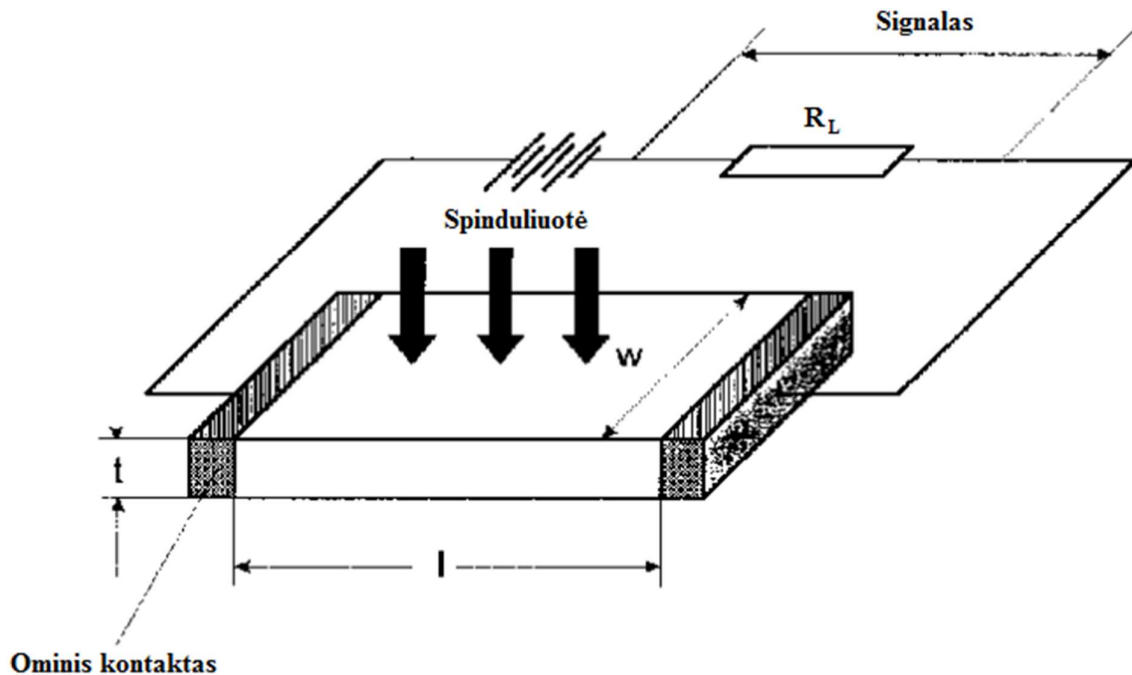
$$\lambda_c = \frac{1,24}{E_g} \mu m \quad (7)$$

Norint užtikrinti maksimalų fotodetektoriaus jautrumą, absorberio sluoksnis turi būti pakankamai storas, kad būtų sugerama didžioji dalis krentančios spinduliuotės.



## 1.2.2. Fotovaržos

Foto varžą elementariu atveju sudaro puslaidininkis su dvejais ominiais kontaktais. Krentanti spinduliuotė puslaidininkyje sugeneruoja papildomų krūvininkų, dėl kurių koncentracijos pokyčio, laidumas medžiagoje padidėja. Principinė fotosignalo aptikimo schema, naudojanti fotovaržą, pavaizduota 2 paveikslėlyje.



**2 pav.** Fotovaržos jungimo schema. Čia  $R_L$  – apkrovos varža;  $w$ ,  $t$ ,  $l$  – atitinkamai fotovaržos plotis, storis, ilgis[6]

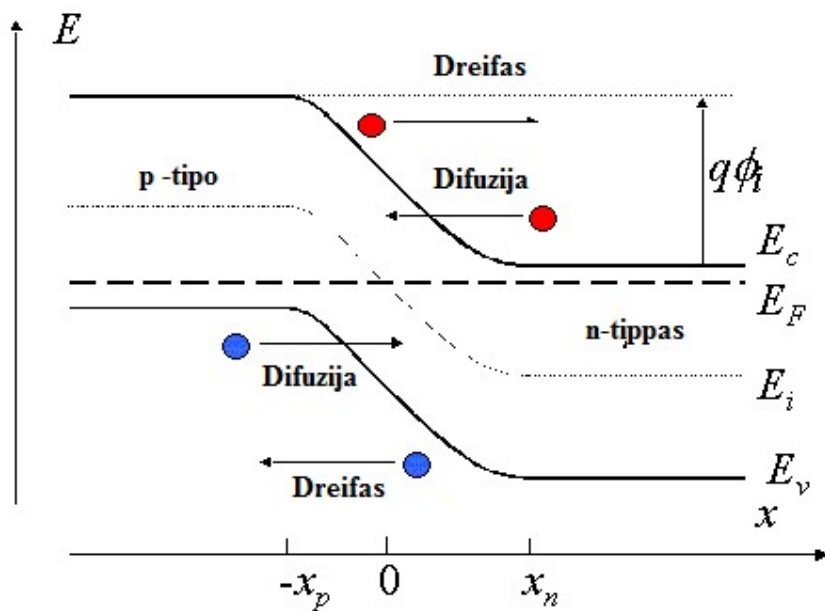
Fotovaržos stiprinimas priklauso nuo santykio tarp krūvininkų gyvavimo trukmės ir lėkio laiko [7]. Tranzito laikas priklauso nuo prijungto elektrinio lauko ir atstumo tarp kontaktų. Esant ilgom krūvininkų gyvavimo trukmėm ir mažiems atstumams tarp kontaktų galima pasiekti stiprinimą esantį  $10^6$  ribose. Esant didesniam krūvininkų gyvavimo laikui daugiau krūvininkų prisideda prie fotosrovės, tačiau dėl didesnio skylių gyvavimo laiko yra ribojama dažninė detektoriaus charakteristika. Mažinant gyvavimo trukmę tenka trumpinti atstumą tarp kontaktų, kad būtų pasiekiamas pakankamas stiprinimas, tačiau tuomet mažėja ir aktyvus plotas į kurį krenta spinduliuotė ir taip surenkama mažesnė dalis fotonų. Dar vienas didelis fotovaržų trūkumas yra jų triukšmų charakteristikos. Triukšmą fotovaržoje sudaro: terminis krūvininkų judėjimas, generacijos-rekombinacijos procesai ir šratinis triukšmas atsirandantis dėl baigtinio medžiagos laidumo nesant optiniam sužadnimui. Srovės triukšmą galima išreikšti 8 formule [8]:

$$\langle i^2 \rangle = \int_0^{\Delta f} 2q(I_D + I_p) + \frac{4q(I_D + I_p)\tau_n/\tau_t}{1 + (2\pi f\tau_n)^2} + \frac{4k_B T \Delta f}{R} \quad (8)$$

čia  $\langle i^2 \rangle$  - srovės triukšmo RMS (kvadratinio vidurkio) vertė;  $\Delta f$  – ribinis dažnis;  $I_D$  – tamsinė srovė;  $I_p$  – fotosrovė;  $\tau_t$  – elektrono tranzito laikas;  $\tau_n$  – rekombinacijos trukmė;  $k_B$  – Bolstmano konstanta;  $R$  – vidutinė fotovaržos varža;  $T$  – temperatūra. Didelis triukšmo lygis stipriai riboja fotovaržų pritaikymo sritis ir daugeliu atveju yra esminis trūkumas lyginant su kitais fotodetektorių tipais.

### 1.2.3. P-n ir p-i-n fotodetektoriai

p-n fotodiodas yra suformuojamas p-tipo ir n-tipo puslaidininkių sandūroje, tokiu būdu sukuriama barjerą pagrindinių krūvininkų judėjimui. Fotodiodui dirbant atvirkštinės įtampos režime, pagrindiniai krūvininkai negali tekėti tarp dviejų kontaktų, dėl barjero esančio p-n sandūroje. Šio barjero dydis esant nuliniai įtampai yra lygus p ir n tipo Fermi lygmenų skirtumui. p-n sandūros schema pavaizduota paveikslėlyje žemiau:



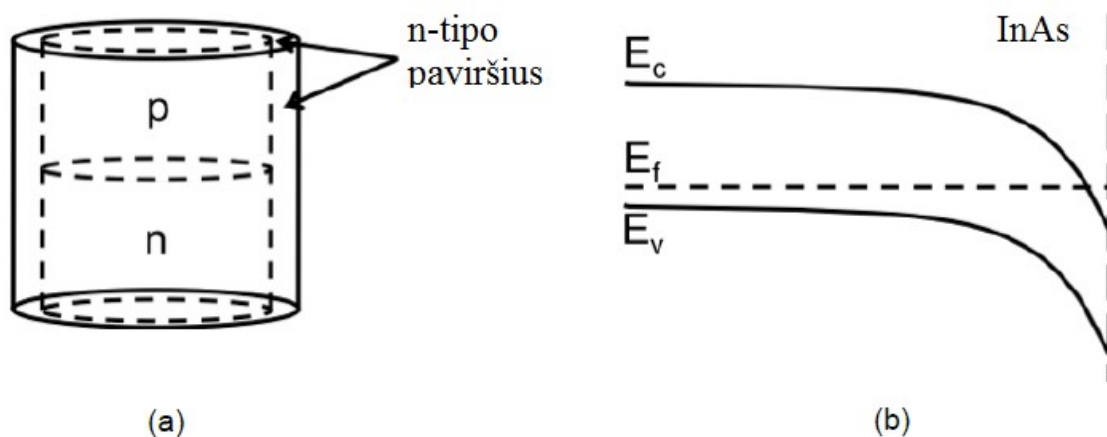
**3 pav.** p-n sandūros juostinė diagrama. Čia  $E_c$  – laidumo juostos apačia;  $E_F$  – fermi lygmuo;  $E_i$  – savitasis Fermi lygmuo;  $E_v$  – valentinės juostos viršus;  $q\phi_i$  – barjero aukštis;  $x_p$  ir  $x_n$  – nuskurdintos srities kraštai[9]

Dėl krūvininkų difuzijos sandūroje susidaro elektrinis laukas, kuris kompensuoja difuziją esant terminiai pusiausvyrai, ko pasekmėje susidaro laisvųjų krūvininkų nuskurdinta sritis. Prijungus atgalinę įtampą ši sritis auga ir neleidžia tekėti elektros srovei. Vykstant tarpjuostinei fotonų sugėrimui, elektrinis laukas selektyviai nukreipia skirtingų ženklų krūvininkus per nuskurdintą sritį link kontaktų. Kadangi skylės bendru atveju turi mažesnę judrumą medžiagoje, pravartu jį detektoriuje didžioji dalis absorbcijos vyktų netoli p-tipo srities[10].

Tamsinė srovė p-n fotodetektoriuje yra įvairių procesų suma. Pagrindiniai tamsinės srovės šaltiniai fotodiode: difuzinė srovė, Šoklio-Rido-Holo (SRH, *Shockley–Read–Hall*) srovė, baltas triukšmas (*angl. white noise*), paviršinės srovės, tuneliavimas ir tuneliavimas per defektines būsenas. Didesnė tamsinė srovė duoda prastesnį triukšmo ir signalo santykį, mažesnį fotoatsaką, o taip pat ir didesnį galios suvartojimą. Kadangi fotodiode krūvininkai yra išskiriami elektrinio lauko, kitaip nei fotovaržoje, kur vyksta generacija ir rekombinacija, p-n sandūroje dominuoja tik generacinis triukšmas. Dėl šios priežasties triukšmo lygis p-n detektoriuje dėl struktūros prigimties yra  $\sqrt{2}$  karto mažesnis nei fotovaržoje[11].

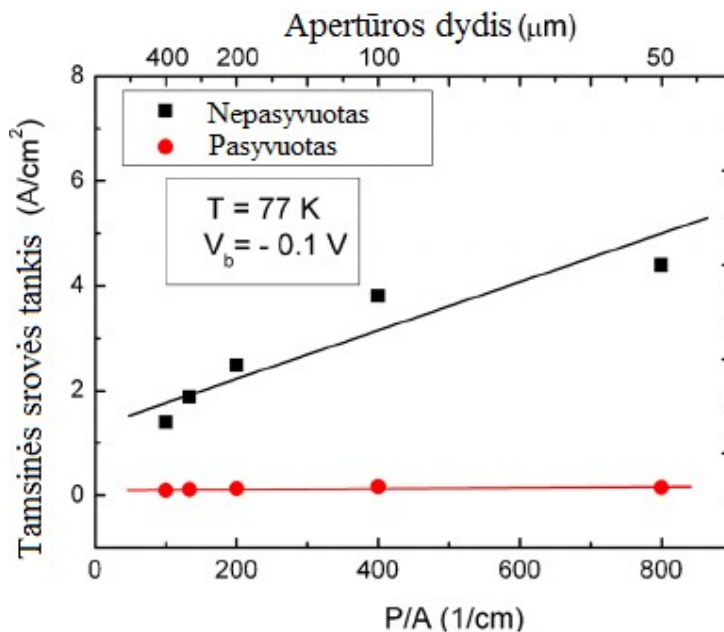
P-n fotoatsako laiką riboją trys pagrindiniai parametrai: krūvininkų difuzija, dreifo laikas nuskurdintoje srityje ir nuskurdintos srities talpa. Kadangi ne visi krūvininkai sugeneruojami nuskurdintoje srityje, krūvininkai turi difunduoti iki nuskurdintos srities taip limituodami maksimalų darbinį dažnį. Vienas iš būdų apeiti šią problema yra auginti p-i-n tipo struktūrą, kurioje nuskurdintas sluoksnio storis yra kontroliuojamas siekiant optimalaus kvantinio našumo ir dažninio atsako. Didinant nuskurdintą sluoksnį sugerama vis didesnė spinduliuotės dalis, tačiau padidėja tranzito laikas. Tačiau labai plono sluoksnio atveju, išauga fotodetektoriaus talpa C ir dažninį atsaką riboti pradeda RC laiko konstanta.

Heterosandūriniuose šaldomuose p-n detektoriuose sunku pasiekti optimalių charakteristikų dėl p-n sandūrai būdingų didelių SHR ir paviršinių srovių. Didelės paviršinės srovės siauratarpiuose puslaidininkiuose yra galimos dėl paviršinių būsenų. Puslaidininkio paviršiuje esantys atomai turi nutrūkusius ryšius arba sureagavę su aplinkoje esančiomis medžiagomis. Šiuos nuokrypius nuo tūrinio kristalo periodinės gardelės, galima laikyti kaip tam tikrus defektus, panašiai kaip ir priemaišų atveju. Šios paviršinės būsenos nustato Fermi lygmenį (*angl. Fermi level pinning*) ties tam tikra verte ir kadangi paviršinių būsenų yra daug daugiau nei legiravimu įterptų priemaišų, tiek  $p$  tiek  $n$  tipo medžiagose paviršiuje Fermi lygmuo bus fiksuotas ties tuo pačiu energetiniu lygmeniu. InAs atveju paviršius visuomet yra n-tipo (4 paveikslėlis).



**4 pav.** InAs paviršiaus inversijos sluoksnis ir energinė juostų diagrama. (a) InAs p-n sandūros schema. Visas atviras paviršius yra n tipo. (b) Fermi lygmenio pritvirtinimas laidumo juostoje ties paviršiumi tūrinėje p-tipo medžiagoje.[12]

Pritvirtintas Fermi lygmuo sukurią mažos varžos kelią aplink p-n sandūrą, taip apeinant atgalinės įtampos sudaromą barjerą. Kitaip nei difuzinė srovė, paviršinė srovė mažai priklauso nuo temperatūros, todėl bendru atveju p-n sandūra pagrįsto detektoriaus veikimą žemose temperatūrose ribos būtent paviršinės srovės. Vienas iš būdų mažinti paviršinės srovės p-n sandūroje yra chemiškai pasyvuoti paviršių. Nesant paviršinėms srovėms, didinant detektoriaus aktyvaus sluoksnio plotą, tamsinės srovės tankis išlieka pastovus (5 paveikslėlis).



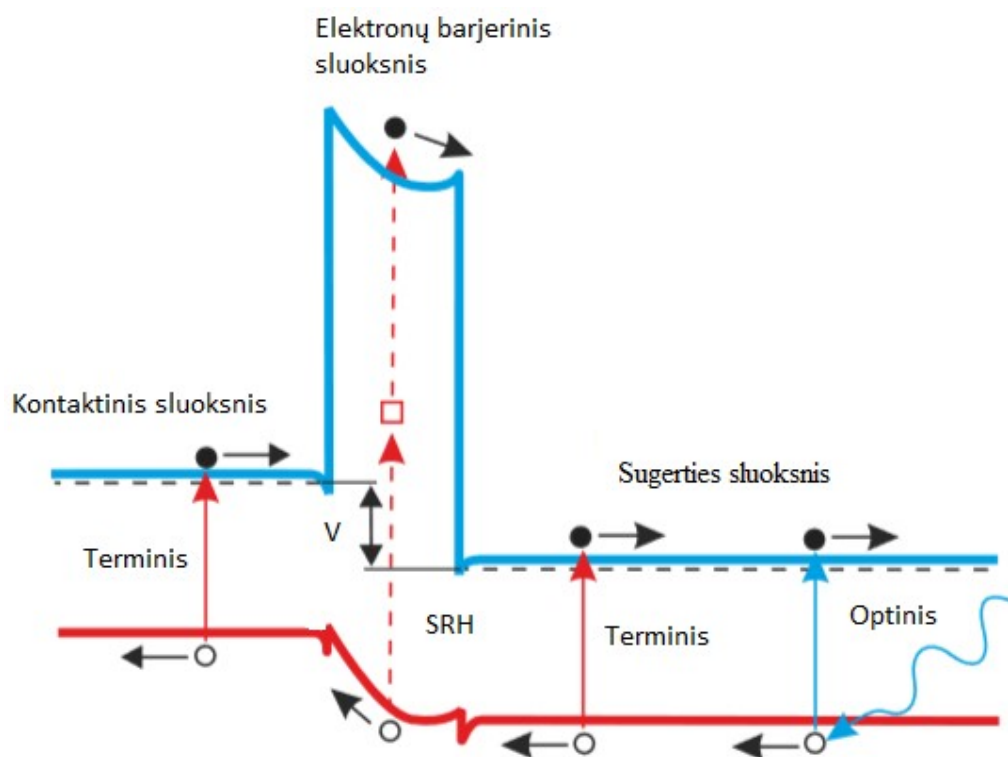
**5 pav.** Tamsinės srovės tankio priklausomybė nuo apertūros dydžio detektoriumi su pasyvuotu paviršiumi ir ne[13]

Mažėjant apertūrai perimetro ir ploto santykis ženkliai išauga, taigi ir padidėja srovės tankio skirtumas tarp pasyvuoto ir nepasyvuoto detektoriaus. Cheminis pasyvavimas yra sudėtingas, todėl

yra didelė paskata ieškoti mažiau kompleksišku struktūrų, kuriose galima realizuoti mažas tamsines sroves.

#### 1.2.4. Unipoliariniai infraraudonųjų spindulių jutikliai

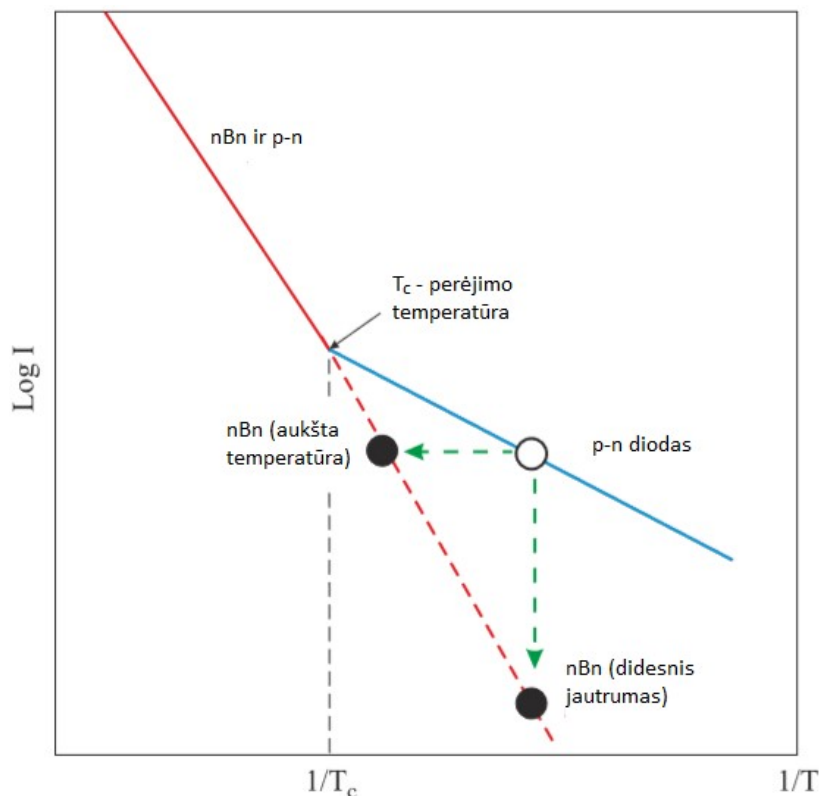
Unipoliarinių barjerų IR detektoriai, dar literatūroje vadinamų barjeriniais IR detektoriais (BIRD), pasižymi struktūroje esančiu barjeru, blokuojančiu tik vieno tipo krūvininkus (skyles arba elektronus). Šio barjero įvedimo į struktūrą tikslas buvo padidinti fotogeneruotų krūvininkų surinkimą ir sumažinti tamsinės srovės dydį, neslopinant fotogeneruotos srovės tekėjimo. Nevaržomam foto srovės laidumui, esant elektronų barjerui, būtina pasiekti kuo mažesnę barjero ir absorberio valentinės juostos poslinkį. Naudojant InSb ar HgCdTe medžiagas, tokios sąlygos realizavimas, dėl gardelių nesuderinamumo, buvo sunkiai pasiekiamas. Unipoliarinių struktūrų realizavimas tapo labiau prieinamas 21 amžiuje, kuomet buvo pradėtos nagrinėti 6,1 A III-V medžiagų struktūros. Vienas iš pagrindinių unipoliarinių struktūrų yra n-tipo, barjero, n-tipo struktūros (nBn). Principinė nBn juostinė diagrama pavaizduota 6 paveikslėlyje.



6 pav. nBn juostinė diagrama. V – prie detektoriaus prijungta įtampa [14]

Elektronų barjeras draudžia pagrindinių krūvininkų (nBn atveju elektronų) judėjimą iš vieno kontakto į kitą. Barjeras taip pat neleidžia tekėti elektronams per paviršius, nes barjeras išlieka ir paviršinėse būsenose. Tamsinės srovės pagrindinės dedamosios turėtų būti termiškai aktyvuotų krūvininkų srovė ir SRH. SRH rekombinacija stipriai priklauso nuo Fermi lygmens padėties

puslaidininkyje ir turi didžiausią spartą kuomet Fermi lygmuo yra viduryje tarp valentinės ir laidumo juostos, arba bendru atveju, nuskurdintame sluoksnyje. nBn jutikliuose absorberio sluoksnyje nėra nuskurdintos srities, todėl generacija-rekombinacija yra stipriai slopinama. Esant tik difuzinės srovės priklausomybei nuo temperatūros, nBn jutikliai yra žymiai pranašesni, nei atitinkamų medžiagų p-n jutikliai (7 paveikslėlis).



7 pav. Tamsinės srovės priklausomybė nuo temperatūros (Arėnijaus dėsnis) nBn ir p-n tipo jutikliuose [14]

Esant tai pačiai temperatūrai, nBn detektorius turės ženkliai mažesnę tamsinę srovę, dėl ko detektoriaus jautrumas išauga. Taip pat yra atvejis kuomet nBn detektorius turės tokį pat jautrumą, tačiau darbinė temperatūra galės būti daug didesnė. Šitas tamsinės srovės skirtumas atsiranda dėl SHR procesų panaikinimo nBn struktūroje ir galioja tik tuomet, kada temperatūra nukrenta žemiau perėjimo temperatūros  $T_c$ . Perėjimo temperatūra laikomas taškas, kuomet difuzinės srovės dedamoji tamsinei srovei susilygina su SHR dedamąja. 7 paveikslėlyje pavaizduota kreivė neįvertinta paviršinės srovės dedamosios, kuri yra eliminuojama nBn detektoriuose. Tai duoda pranašumą prieš p-n detektorius ne tik žemose temperatūrose, bet ir normaliomis sąlygomis.

### 1.3. Triukšmų šaltiniai fotodetektoriuose

Triukšmas IR aptikimo sistemose gali būti priskiriamas kaip nuskaitomo signalo fluktuacijos arba kaip atsitiktinių krūvių pernešančių dalelių sukūrimą lemiantys procesai, kaip terminiai procesai,

kuriuose nedalyvauja signalą nešantys fotonai. Vieni iš pagrindinių triukšmų tipų IR detektoriuose yra Džonsono-Naikvisto,  $1/f$ , generacinis-rekombinacinis(G-R) procesai, bei tuneliavimo, difuzijos ir nuotekio srovės[15]. Šiluminiai procesai IR detektoriuose yra ypač svarbūs ir bendru atveju gali būti pagrindinė priežastis ribojanti detektoriaus savybes susijusias su triukšmo lygiu. Tai lemia siaurėjantis draustinis tarpas, o tuo pačiu metu ir perėjimo energija artėjanti prie  $kT$  vertės[16]. Tai padidina atsitiktinį krūvininkų generavimą, nes elektronam kambario temperatūroje suteiktos energijos užtenka energetiniams šuoliams puslaidininkyje.

Puslaidininkyje esančiame didesnėje nei 0 K temperatūroje, visuomet egzistuoja ne tik krūvininkų generacija, bet ir chaotiškas krūvininkų judėjimas. Tai sukelia fluktuacijas atviros grandinės įtampoje. Šios fluktuacijos yra įvardijamos kaip šiluminis arba Džonsono-Naikvisto triukšmas. Šis triukšmas yra priskiriamas „baltam“ triukšmo tipui, nes triukšmo galios spektrinis tankis yra vienodas visiems dažniams. Šiluminis triukšmas priklauso nuo medžiagos temperatūros ir išreiškiamas formule:

$$V_j = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad (9)$$

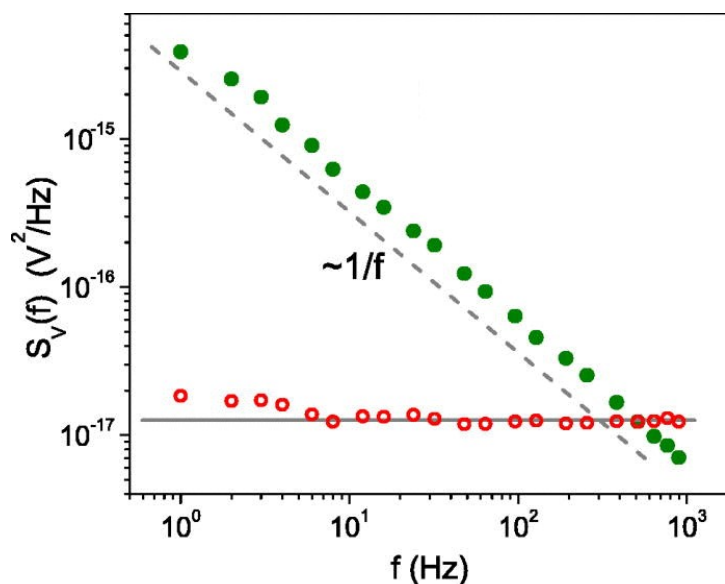
čia  $V_j$  – įtampos kvadratinis vidurkis (RMS),  $R$  – varža,  $\Delta f$  – dažnio diapazonas.  $T$  – temperatūra,  $k$  – Bolcmano konstanta. Tai pat šį triukšmą galima išreikšti per srovę:

$$i_n = \sqrt{\frac{4kT\Delta f}{R}} \quad (10)$$

Dėl griežtai apibrėžtos šiluminio triukšmo intensyvumo, varžos gali būti naudojamos kaip etaloninis triukšmų generatorius, pagal kurį galima susikalibruoti triukšmų matavimų sistemą. Taip pat iš šiluminio triukšmo galima išskaičiuoti Bolcmano konstantą, bet tai yra retai naudojama dėl didelės paklaidos.

Šiluminis triukšmas yra atsitiktinis procesas būdingas kiekvienai medžiagai, todėl norit sumažinti jo vertę reikia padidinti naudojamo prietaiso varžą arba sumažinti jo temperatūrą. Fotodetektorių atveju mažinant aktyvios srities plotą, išauga tūrinė prietaiso varža, tačiau tuo pačiu metu yra sumažinamas fotonų kiekis krentantis į aktyviąją sritį. Todėl ypač silpnų signalų fiksavimui yra pasirenkamas aktyvus detektorių šaldymas, kuris nekeičiant detektoriaus struktūros sumažina šiluminio triukšmo lygį. Žinoma tai gali įnešti kitų sisteminių fluktuacijų, kaip temperatūros nepastovumas dėl šaldymo elemento nuokrypių. Kadangi triukšmo kvadratinis vidurkis yra dažnio diapazono funkcija, triukšmo generuojamą galią signale įmanoma sumažinti naudojant žemo ir aukšto dažnio filtrus matavimo grandinėje. Pagal 9 formulę galime pastebėti jog sumažindami dažnių diapazoną nuo 1 MHz iki 10 kHz įtampos triukšmo kvadratinis vidurkis sumažėja 10 kartų.

Kitas elektriniams prietaisams būdingas triukšmas yra žemadažnis arba  $1/f$  triukšmas. Šis triukšmas atsiranda dėl atsitiktinių elektros srovės ar įtampos svyravimų, kurie sukeliama medžiagos elektrinio laidumo ar kitų elektrinių parametrų nepastovumo. Šio triukšmo galios spektrinis tankis yra atvirkščiai proporcingas dažniui.  $1/f$  triukšmas pasireiškia tiek puslaidininkiuose, metaluose, plonasluoksniuose prietaisuose, termoporose, dielektrikuose ir kitur.  $1/f$  triukšmas neturi vieno universalaus modelio, kuris jį aprašytų, todėl nėra visiškai aiški šio triukšmo kilmė. Dažniausiai didelis žemadažnis triukšmas siejamas su defektais medžiagoje, dėl blogų kontaktų, netolygios sandūros medžiagos tūryje ar neatkaitintų bandinių. Didėjant dažniui žemadažnis triukšmas yra užgožiamas šratinio arba šiluminio triukšmo, todėl išmatuoti  $1/f$  triukšmą aukštuose dažniuose neįmanoma. Žemadažnis triukšmas ne visuomet būna tiksliai atvirkščias dažniui, todėl jis aproksimuojamas funkcija  $f^\alpha$ . Bendru atveju  $0,9 < \alpha < 1,2$ , tačiau galimi atvejai kuomet  $0,7 < \alpha < 1,5$ [17]. Kadangi  $1/f$  triukšmas sparčiai mažėja augant dažniui, jo indelis į bendrą įtampos kvadratinį vidurkį yra sąlyginai mažas kuomet signalas matuojamas plačiame dažnių diapazone. Tai leidžia nepaisyti žemadažnio triukšmo dedamosios kuomet dominuoja šratinis arba šiluminis triukšmas. 8 paveikslėlyje pavaizduotas lauko tranzistoriaus  $1/f$  triukšmas. Galima pastebėti jog ties  $\sim 1$  kHz žemadažnio triukšmo tankio vertė yra mažesnė už šiluminio triukšmo. Jei tranzistorius veikia  $\sim 1$  Mhz dažnių diapazone,  $1/f$  triukšmo galia sudarys labai mažą dalį galutinio matomo triukšmo.



**8 pav.**  $1/f$  triukšmo priklausomybė nuo dažnio (pažymėta žaliai) lauko tranzistoriuje. Raudoni apskritimai žymi šiluminį triukšmą.[18]

Šratinis triukšmas matomas visuose prietaisuose per kuriuos teka elektros srovė, kaip ir anksčiau paminėtas šiluminis triukšmas yra „balto“ triukšmo pobūdžio žemuose dažniuose. Šratinis srovės skleidžiamas triukšmas susideda iš atsitiktinių nuolatinės srovės svyravimų, atsirandančių dėl to, kad srovę iš tikrųjų sudaro diskrečiųjų krūvių (elektronų) srautas. Taigi galima teigti jog šis



triukšmas kyla iš diskretinio elektros krūvio pobūdžio. Tokio pat pobūdžio yra ir šviesos triukšmas, dėl diskretinės fotonų prigimties. Iš čia ir kyla „balto“ triukšmo pavadinimas, kuris vartojamas apibūdinant nuo dažnio nepriklausančius triukšmo šaltinius.

Jei laikysime, kad krūvininkams galioja Puasono pasiskirstymas, tuomet šratinio triukšmo srovės kvadratinis vidurkis gali būti išreiktas formule:

$$I_n = \sqrt{2qI\Delta f} \quad (11)$$

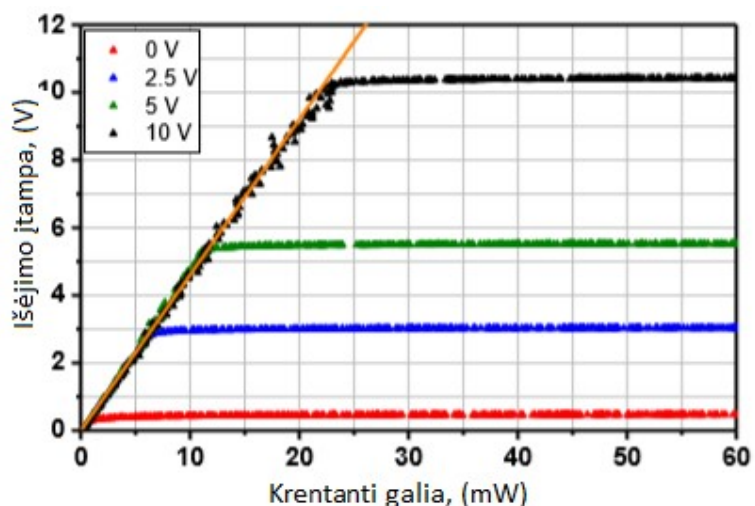
čia  $I_n$  – srovės triukšmo kvadratinis vidurkis,  $q$  – elementarusis elektrono krūvis,  $I$  – tekančios elektros srovės stipris,  $\Delta f$  – dažnių diapazonas. Šratinio triukšmo priklausomybė nuo tekančios srovės dydžio sudaro ypač didelę įtaką prietaisų veikiančių su darbine įtampa triukšmų savybėms. Parazitinės srovės detektoriuose dirbančiuose su atgaline įtampa sukelia šratinio triukšmo dedamąją, todėl tamsinės srovės sumažinimas fotodetektoriuose yra itin svarbus, norit pasiekti aukštas detektyvumo vertes. Detektoriumi veikiant fotoelektriniu režimu (darbinė įtampa lygi 0V), šratinis srovės triukšmas yra išvengiamas ir bendru atveju detektorius limituojamas šiluminio triukšmo.

#### 1.4. Pagrindinės fotodetektorių savybės

Pagrindiniai fotodetektorių parametrai siekia įvertinti kontrastą tarp krūvininkų sugeneruotų krintančio fotonų srauto ir pašalinio triukšmo procesų. Vienas iš pirminių detektoriaus kokybės parametru yra signalo ir triukšmo santykis (SNR, *angl. signal to noise ration*). SNR yra fiksuojamo signalo ir triukšmo lygio santykis. Optinės galios sąryšį su optiniu signalu nusako fotoatsako koeficientas R:

$$R_i = \frac{I_s}{P_{opt}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc} \quad (12)$$

čia  $I_s$  – optinis signalas;  $P_{opt}$  – į jutiklį krentanti optinė galia;  $\eta$  – kvantinio našumo koeficientas;  $h$  – Planko konstanta;  $\lambda$  – krentančios spinduliuotės bangos ilgis;  $c$  – šviesos greitis;  $q$  – elementarusis krūvis;  $\nu$  – krentančiais spinduliuotės dažnis. Optinio fotoatsako koeficientas priklausys nuo krentančios spinduliuotės bangos ilgio, ir bendru atveju bus maksimalus kuomet fotonų energija sutaps su jutiklio absorberio sluoksnio draustinio tarpo energija. Šis parametras dažniausiai nustatomas iš  $I_s(P_{opt})$  grafiko kreivės polinkio reikšmės. Atveju kada srovei matuoti naudojama apkrovos varža, gaunamas  $U_{i\delta}(P_{opt})$  grafikas (9 paveikslėlis).



9 pav. Fotoatsako vertės prie skirtingų atgalinės įtampos verčių.[19]

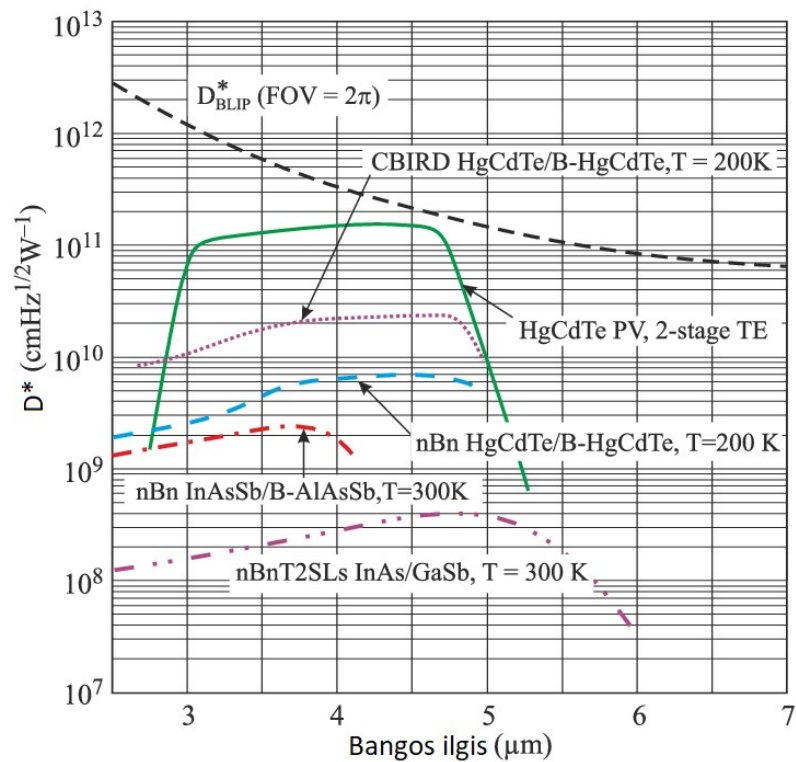
Esant mažai atgalinei įtampai, greitai pasiekiamas signalo išsotinimas, dėl per mažo elektrinio lauko bandinyje. Didinant įtampą, diapazonas, kuriame jutiklio fotoatsakas yra tiesiškai priklausantis nuo optinės galios, didėja. Nors fotoatsako koeficientas suteikia informacijos apie detektoriaus sąryšį su optine galia, tačiau šis parametras nenurodo reikalingo minimalaus optinio sužadavimo, elektriniam signalui aptikti. Tam yra naudojama triukšmui ekvivalenti galia ( $NEP$ ), kuris nusako triukšmo ir fotoatsako koeficiento santykį (9 formulė).

$$NEP = \frac{1}{D} = \frac{I_{tr}}{R_i} \quad (13)$$

čia  $D$  – detektyvumas.  $NEP$  vertė yra detektoriaus ploto ir dažnių juostos pločio funkcija. Dėl šios priežasties  $NEP$  vertė dažniausiai išreiškiama  $W/Hz^{1/2}$  vienetais. Atsižvelgiant į detektoriaus aktyvaus ploto sąryšį su triukšmų lygiu, įvedamas papildomas rodiklis  $D^*$  (angl. *specific detectivity*) (10 formulė):

$$D^* = \frac{\sqrt{A}}{NEP} \text{ Hz}^{\frac{1}{2}} \text{ cm/W} \quad (14)$$

$D^*$  leidžia įvertinti įvairių detektorių prigimtines medžiagų savybes, ir nepriklauso nuo detektoriaus dydžio ar pasirenkamo dažninio diapazono. Kai kurių detektorių  $D^*$  pavaizduoti 10 paveikslėlyje.



**10 pav.** Įvairių detektorių  $D^*$ . Punktyrinė linija – aplinkos triukšmo limituojamas detektorius[14]

Patys jautriausi detektoriai išlieka gyvsidabrio kadmio telūrido prietaisai šaldomi dviejų pakopų sistemomis. Aukštesnėse temperatūrose pakankamai dideliu  $D^*$  pasižymi unipoliariniai detektoriai. Be išvardintų charakteristikų, detektorių komponuojant su signalo stiprinimo sistema, tamsinė srovė, kuomet detektorius jungiamas su atgaline įtampa, turės įtakos šiluminės galios išsiskyrimui, o taip pat iš prigimties detektorius su didesne varža pasižymi mažesnėmis srovės triukšmo charakteristikomis.

## 2. Tyrimo metodika

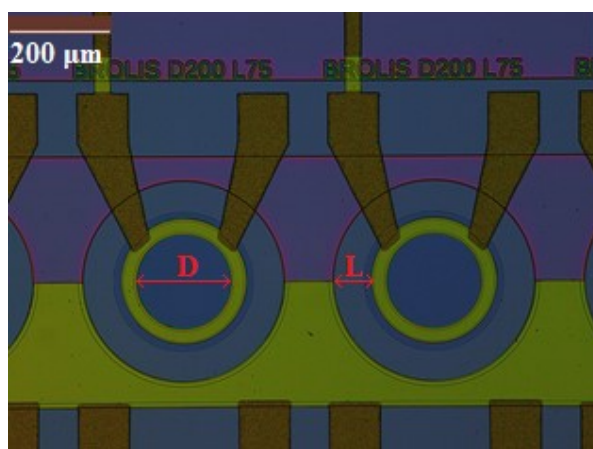
### 2.1. Tiriama bandiniai

Tiriamajame darbe buvo nagrinėjamos įvairių struktūrų fotodetektoriai. Detektorių iteracijos kodas ir atitinkamos struktūros pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. Tyrime analizuotos struktūros ir jų ypatumai

Iteracijos kodas	Struktūros tipas ir ypatumai
E1070	p-i-n struktūra
E1402	nBn struktūra
E1404	nBn struktūra, su papildomu barjeru skylėms
E1430	nBn struktūra su paaukštintu elektronų barjeru
E1433	nBn struktūra su gradientiniu barjeru
E1436	pBp struktūra
E1494	nBn struktūra su paaukštintu ir gradientiniu elektronų barjeru
E1501	nBn struktūra su padidintu buferio sluoksniu
E1503	p-i-n struktūra su padidintu buferio sluoksniu

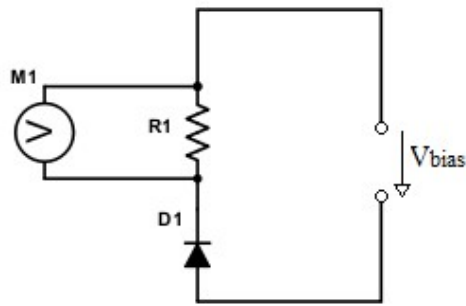
Kiekviena iteracija susideda iš detektorių su skirtingais geometriniais parametrais  $D$  ir  $L$  masyvo. Detektoriaus  $D$  ir  $L$  parametrus nusako koordinatė sudaryta iš detektorių masyvo kolonos raidės (A,B,C) ir eilės kolonoje numerio, pvz. A23.  $D$  – parametras nusako detektoriaus apertūros skersmenį, o  $L$  – atstumą nuo viršutinio kontakto iki detektoriaus šoninio paviršiaus.  $D$  ir  $L$  parametrai pavaizduoti 11 paveikslėlyje.



11 pav. Detektorių nuotrauka iš viršaus, daryta optiniu mikroskopu.

### 2.2. Detektoriaus I-V charakteristikos matavimas

Fotodetektorių srovės priklausomybė nuo išorinės įtampos charakteristika buvo matuojama naudojant tiesioginį/invazinį matavimą pagrįsta Omo dėsnio. Matavimo principinė schema pavaizduota 12 paveikslėlyje.



**12 pav.** Principinė I-V matavimo schema pagrįsta šunto varža. M1 – voltmetro; D1 – fotodetektorius; R1 – šunto varža;  $V_{bias}$  – įtampos kritimas.

Šunto varža parenkama pakankamai didelė, kad naudojamas voltmetro fiksuotą signalą bent eile didesnę nei voltmetro rezoliucija. Tačiau šunto varža pasirenkama ne per didelės vertės, nes tuomet padidėja įtampos kritimas ant jos ir suvartojamos galios kiekis, kuris išskiriamas kaip šiluma. Tiriamų detektorių varžos skyrėsi, todėl šunto varža buvo parenkama taip, kad ant šunto varžos krentanti įtampa neviršytų dešimt procentų ant visos grandinės krentančios įtampos. Pagal šią schemą, srovės tekančios per detektorius priklausomybė nuo išorinės įtampos ir sąryšis su voltmetro fiksuojama įtampa yra:

$$I_D = \frac{U_{in} - U_{shunt}}{R_D} = \frac{U_{shunt}}{R_{shunt}} = I_{shunt} \quad (15)$$

čia  $I_D$  – per detektorius tekanti srovė;  $U_{in}$  – prijungta išorinė įtampa;  $U_{shunt}$  – įtampa išmatuota voltmetro;  $R_D$  – detektoriaus varža;  $R_{shunt}$  – šunto varža;  $I_{shunt}$  – šunto varža tekanti srovė. Įtampos kritimą ant šunto varžos matuoti buvo naudojamas „LakeShore Model 355 Temperature Controller“. Pagrindiniai prietaiso duomenys pateikti 3 lentelėje.

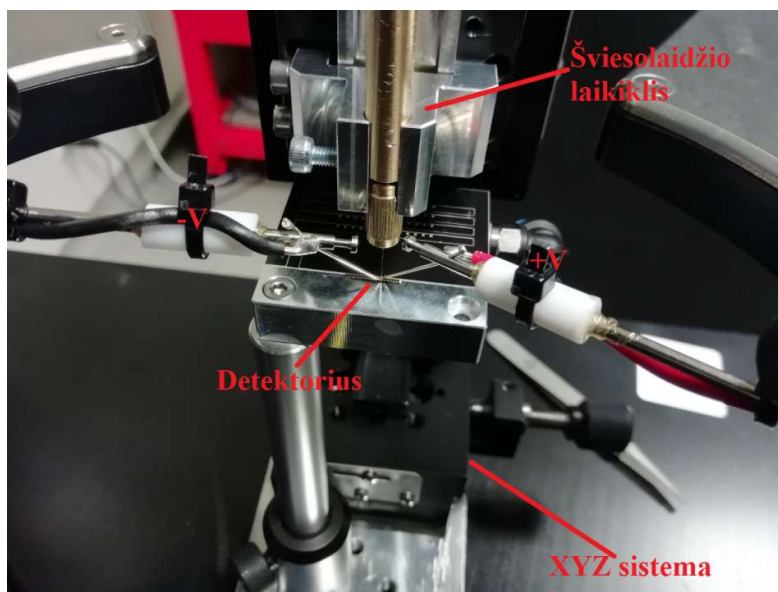
**3 lentelė.** „LakeShore Model 355 Temperature Controller“ pagrindiniai parametrai.

Parametras	Reikšmė
Atnaujinimo sparta	10/s
Diapazonas	$\pm 10$ V
Rezoliucija	16 bitų, 0,3 mV
Tikslumas	$\pm 2,5$ mV
Triukšmas	0,3 mV RMS

Išorinės įtampos kontroliavimui naudotas „TENMA 72-2550“ programuojamas vieno išėjimo galios šaltinis. Šaltinio įtampos rezoliucija 10 mV. Matavimas atliekamas naudojant Python programine kalba parašytu kodu, kuris užtikrina prietaisų sąsają su kompiuterine įranga, atlieka voltmetro duomenų vidurkinimą ir įrašo duomenis į kompiuterį (priedas 1).

### 2.3. Fotodetektoriaus fotoatsako ir temperatūriniai matavimai

Fotoatsako matavimui, fotodetektoriaus srovės išmatavimui buvo naudojama ta pati schema kaip ir IV matavimui. Optinė galia į detektoriaus apertūrą buvo nukreipiama vienmodžiu šviesolaidžiu „THORLABS SM2000-CUSTOM-MUC“. Šviesolaidžio šerdies skersmuo  $11 \pm 1 \mu\text{m}$ , apvalkalo –  $125 \pm 1 \mu\text{m}$ , apsauginio sluoksnio –  $245 \pm 10 \mu\text{m}$ . Šerdies medžiaga – germaniu legiruotas silicis, apvalkalo – grynas silicis. Optinė galia matuojama su „Ophir“ LED galios jutikliu 3A. Tai terminio tipo galios matuoklis, kurio matuojamas spektrinis diapazonas siekia  $0.19 - 20 \mu\text{m}$ . Matuojamos galios diapazonas  $10\text{pW} - 3\text{W}$ ; rezoliucija –  $100 \text{ nW}$ . Spinduliuotės šaltinis –  $2184 \text{ nm}$  bangos ilgio lazeris su išoriniu rezonatoriumi. Lazeris maitinamas „Arroyo 6340 Combo source“ lazerinio diodo kontroleriu. Matavimo metu lazerio spinduliuotė naudojant parabolinį kolimatorių suvedama į  $2 \times 2$  50:50 šviesolaidinį daliklį „THORLABS“ TW2000R5A2A. Iš daliklio vienu šviesolaidžiu spinduliuotė nuvedama į galios matuoklį, kitu į fotodetektorių. Naudojant trijų transliatorių pozicionavimo sistemą, rankiniu būdu šviesolaidis suvedamas į detektoriaus apertūros centrą, išlaikant tam tikrą atstumą tarp detektoriaus ir šviesolaidžio. Matavimo stendas pavaizduotas 13 paveikslėlyje.



**13 pav.** Tamsinės srovės ir fotoatsako matavimo stendo dalis.

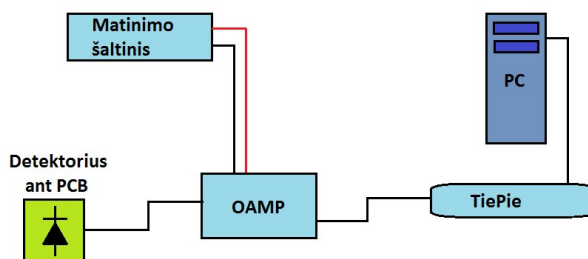
Matavimas ir duomenų išsaugojimas atliekamas pasidnaudojant Python programiniu kodu (Priedas 1).

IV charakteristikų matavimai žemose temperatūrose buvo atlikti naudojant „Advances Research Systems, Inc.“ Kriostato sistemą. Sistemą sudaro helio kompresorius, vakuuminė pompa, temperatūros kontroleris ir plėstuvus sujungtas su bandinio laikikliu. Detektorius priklijuojamas prie specialaus metalinio korpuso, naudojant nelaidžius epoksidinius klijus. Naudojant laidų sujungimo (angl. *wire bonding*) metodą, detektoriaus vienas kontaktas sujungiamas su metaliniu korpusu, o kitas kontaktas sujungiamas su specialiu nuo korpuso izoliuotu laidžiu paviršiumi. Kriostatu pasiekama

<9 K temperatūra. IV charakteristikai matuoti buvo naudojama tos pačios grandinė principas kaip ir kambario temperatūros atveju. Matavimo eigoje, didėjant detektoriaus varžai, šunto varža parenkama vis didesnė, kad įtampos kritimas ant jos būtų ne mažesnis nei naudojamo voltmetro rezoliucija.

## 2.4. Triukšmų charakteristikų matavimas

Grandinė naudota triukšmų matavimams detektoriuose pavaizduota 14 paveikslėlyje. Detektorius prijungiamas prie stiprintuvo koaksialiniu laidu. Srovės fluktuacijos yra stiprinamos žemo triukšmo operaciniu stiprintuvu. Stiprintuvo maitinimui naudojamas „TENMA 72-2550“ programuojamas vieno išėjimo galios šaltinis.



**14 pav.** Triukšmų matavimo schema. OAMP – operacinis stiprintuvas; TiePie – osciloskopas; PC – personalinis kompiuteris duomenų nuskaitymui iš osciloskopo.

Stiprintuvo įtampos signalas patenka į „TiePie Handyscope HS6 DIFF“ keturių kanalų USB osciloskopą. Srovės fluktuacijų spektrinis tankis gaunamas atliekant greitą Furje transformaciją (FTT) naudojant „Multi Channel oscilloscope software“ programą, duomenys yra suvidurkinami ir išsaugomi dBV reikšmėmis. Norint apskaičiuoti absoliutinį srovės triukšmo spektrinį tankį, gautus duomenis reikia perskaičiuoti į įtampos vertes, atimti fono triukšmą, padalinti iš stiprintuvo stiprinimo koeficiento ir padalinti iš naudotos dažnio skiriamosios gebos:

$$I_{DUT} = \frac{10^{\frac{i_{DUT}}{20} - 1} \frac{i_{BC}}{20}}{G \cdot RBW} \quad (16)$$

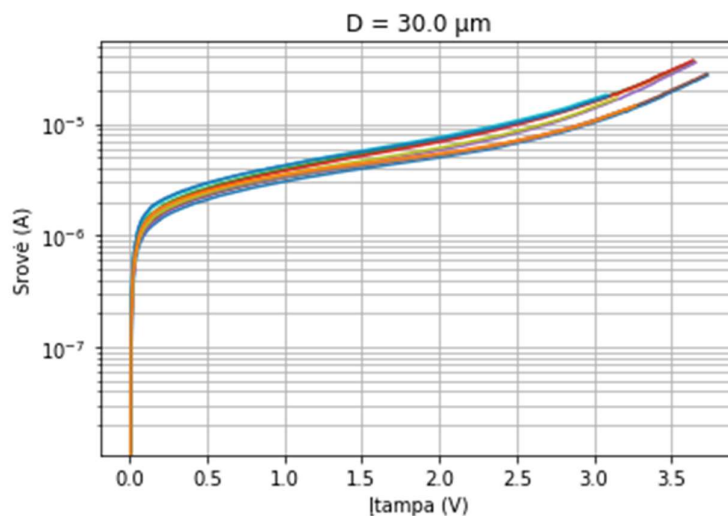
čia  $I_{DUT}$  – tiriamo objekto srovės triukšmo vertė,  $i_{DUT}$  – stiprintuvo išėjimo įtampos fluktuacijos spektro vertė dBV skalėje esant prijungtam detektoriumi,  $i_{BC}$  – stiprintuvo išėjimo įtampos fluktuacijos spektro vertė dBV skalėje esant atvirai grandinei stiprintuvo įėjime,  $G$  – stiprintuvo stiprinimo koeficientas,  $RBW$  – dažninė skiriamoji geba. Detektorių matavimams prie įtampos buvo naudojama stiprintuve įkomponuota apkrovos ir parazitinės srovės kompensavimo grandinė.

Taip pat buvo palygintos stiprinamų detektorių dažninės charakteristikos. Signalu generatoriumi lazerio maitinimo šaltinis buvo moduluojamas sinusiniu signalu, didinant sinuso dažnį. Dažnis kuriame signalo intensyvumas sumažėja 3dB (2 kartus), lyginant su žemo dažnio signalo amplitudė, atitinka detektoriaus ir stiprintuvo bendrą ribinį veikimo dažnį.

### 3. Rezultatai ir jų aptarimas

#### 3.1. Tamsinių srovių ir fotoatsako matavimai

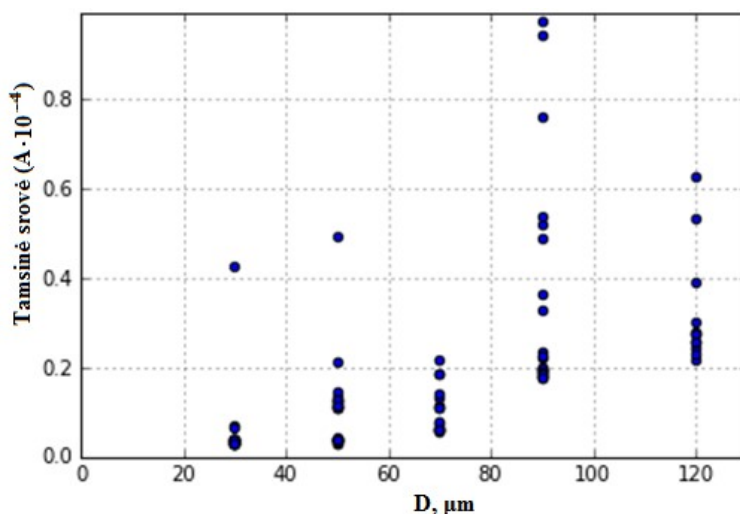
Pirmajai detektorių iteracija E1070 buvo pasirinkta išbandyti tradicinės p-i-n struktūros detektorius, kurių sugerties sluoksnis pritaikytas 2,2 – 2,3  $\mu\text{m}$  bangos ilgio spinduliutei. Pradžioje buvo pasirinkta pagaminti mažesnių (120  $\mu\text{m}$ ) apertūrų detektorius, o  $L$  parametą išlaikyti pastovų 40  $\mu\text{m}$ . Pasirinktos  $D$  vertės buvo: 30, 50, 70, 90 ir 120  $\mu\text{m}$ . Pirmaisiais matavimais buvo įvertinamas duomenų atsikartojamumas ir ar pagaminti prietaisai pasižymi diodinėmis savybėmis. Pamatuočių E1070 detektorių srovės dydžio priklausomybė nuo atgalinės įtampos pateikta 14 paveikslėlyje. Galima pastebėti jog IV charakteristikos pasižymi būdinga diode kreive ir tai leidžia manyti jog prijungus atgalinę įtampą detektoriuje susidaro užtvarinis barjeras. Iš 15 paveikslėlyje pateiktų kreivių, galima teigti, kad detektorių, esančių vienoje masyvo eilėje, atsikartojamumas yra tenkinamas.



**15 pav.** E1070 B12  $D = 30 \mu\text{m}$ ,  $L = 40 \mu\text{m}$  IV tamsinės srovės priklausomybė nuo atgalinės įtampos. Pradiniam duomenų atsikartojamumui įvertinti pamatuota dvylika detektorių.

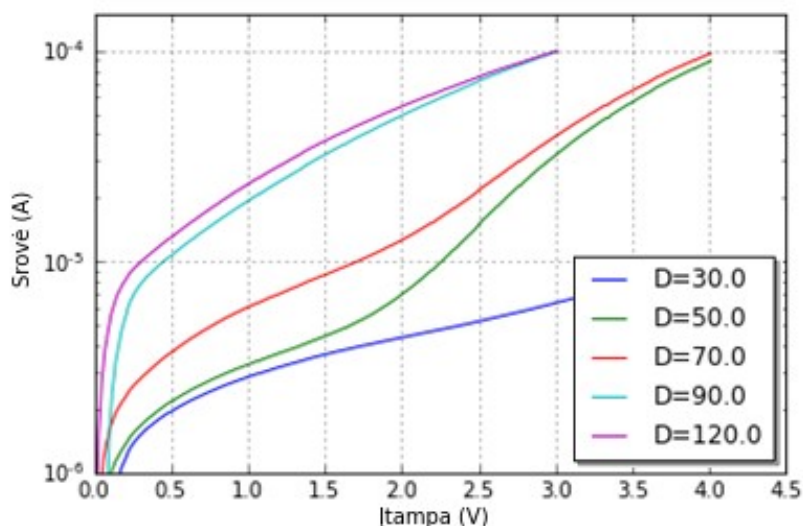
Detalesnei tamsinių srovių analizei buvo selektyviai pamatuoti kiti E1070 detektoriai, su skirtingais apertūros dydžiais. Visų pamatuočių detektorių tamsinės srovės esant 1 V atgalinei įtampai pavaizduotos 16 paveikslėlyje. Pagal duomenis matoma tendencingas tamsinės srovės didėjimas, didėjant detektoriaus apertūros plotui, tačiau dėl didelės duomenų sklaidos negalima įvertinti, kuri srovė labiau dominuoja p-i-n struktūroje: difuzinė ar paviršinė.





**16 pav.** E1070 detektorių tamsinės srovės ties 1 V atgaline įtampa.

Detektorių parametrų sklaidą taip pat patvirtina išmatuotų skirtingų apertūros dydžių detektorių IV kreivių formos nesutapimas (17 paveikslėlis). Skirtingo pobūdžio IV charakteristikos leidžia manyti, kad keičiantis geometriniam detektoriaus parametrams, galimai atsiranda skirtingi srovės pernešimo mechanizmai. Tai sukelia didelę problemą plačiame detektorių taikyme, dėl nekontroliuojamų tamsinių srovių.



**17 pav.** Skirtingų apertūros dydžių (mikrometrais) tamsinės srovės priklausomybė nuo atgalinės įtampos.

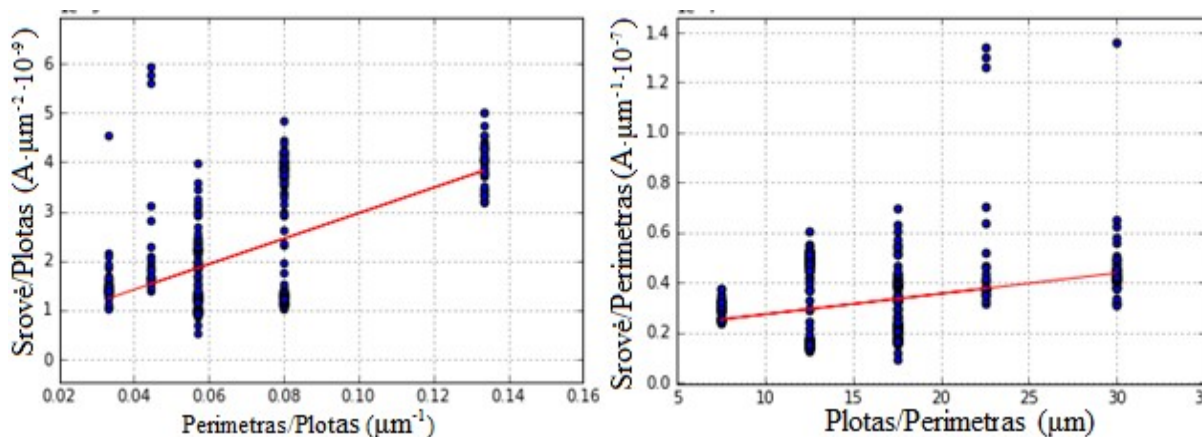
Bendru atveju galima teigti jog detektoriuje dominuoja dviejų rūšių tamsinės srovės: paviršinės ir tūrinė. Tokiu atveju tamsinė srovė:

$$I_{dark} = P * j_{surf} + S * j_{bulk} \quad (17)$$

čia  $I_{dark}$  – suminė tamsinė srovė;  $P$  – detektoriaus aktyvios srities perimetras;  $S$  – detektoriaus aktyvios srities plotas;  $j_{surf}$  ir  $j_{bulk}$  – atitinkamai paviršinės srovės tankis ir tūrinės srovės tankis. Iš šios lygties galime gauti dvi išraiškas:

$$\frac{I_{dark}}{P} = j_{surf} + \frac{S}{P} * j_{bulk}; \quad \frac{I_{dark}}{S} = \frac{P}{S} * j_{surf} + j_{bulk} \quad (18)$$

Pagal šias išraiškas, jei tamsinės srovės ir perimetro santykį atidėsime grafike nuo ploto ir perimetro santykio, gautos kreivės polinkis bus lygus tūrinės srovės tankiui. Panašiai galima gauti ir paviršinės srovės tankio reikšmę. Pasinaudojus šiuo modeliu, buvo bandoma įvertinti E1070 detektorių tamsinės srovės tankių reikšmes. Tam įgyvendinti buvo išmatuota didelė apimtis pagamintų detektorių ir, naudojant mažiausių kvadratų metodą, nustatytos vidutinės paviršinės ir tūrinės srovės tankių reikšmės (18 paveikslėlis).



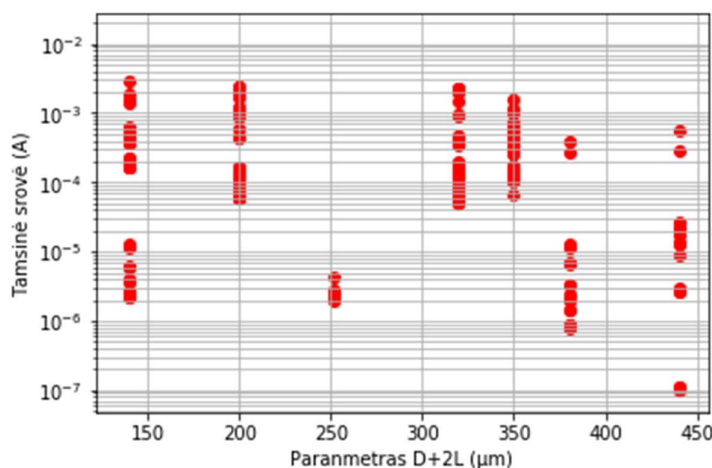
**18 pav.** Mažiausio kvadrato metodo taikymas, naudotas įvertinti paviršinių ir tūrinių srovių tankiui. Atidėtos srovių reikšmės prie 0,5 V atgalinės įtampos. Raudonos linijos žymi tendencijos kreivę, o jų polinkis yra lygus srovės tankiui.

Iš surinktų duomenų nustatytas tūrinės srovės tankis lygus  $8,24 \cdot 10^{-10} \text{ A}/\mu\text{m}^2$ , o paviršinės srovės tankis  $2,58 \cdot 10^{-8} \text{ A}/\mu\text{m}$ . Pagal nustatytus srovių tankius, skirtingų dydžių detektoriams suskaičiuotos tamsinės srovės vertės pateiktos 4 lentelėje. Akivaizdu jog nustatytas paviršinės srovės tankis detektoriuose yra keliomis eilėmis didesnis, nei tūrinės srovės tankis. Tai yra tikėtina, nes dėl Fermi lygmens prikabinimo puslaidininkio paviršiuje, susidaro mažesnės varžos kelias srovei tekėti iš vieno kontakto į kitą.

**4 lentelė.** Pagal gautus srovių tankius suskaičiuotos tamsinių srovių vertės E1070 detektoriams.

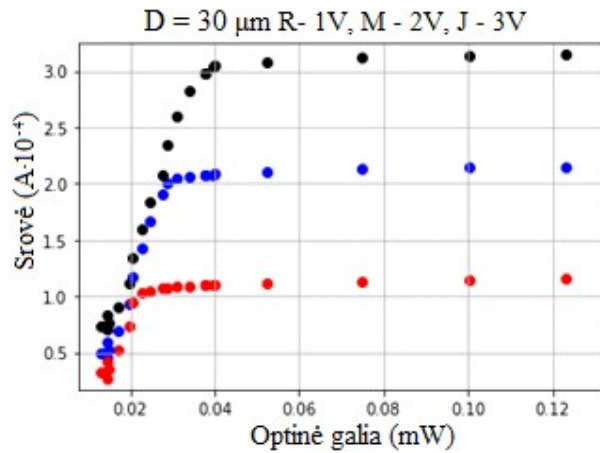
$j_{surf}$ (A/ $\mu\text{m}$ )	$j_{bulk}$ (A/ $\mu\text{m}^2$ )	D ( $\mu\text{m}$ )	S ( $\mu\text{m}^2$ )	P ( $\mu\text{m}$ )	$I_D$ (A)
$2,58 \cdot 10^{-8}$	$8,24 \cdot 10^{-10}$	30	706,5	94,2	$3,01 \cdot 10^{-6}$
		50	1962,5	157	$5,67 \cdot 10^{-6}$
		70	3846,5	219,8	$8,84 \cdot 10^{-6}$
		90	6358,5	282,6	$1,25 \cdot 10^{-5}$
		120	11304	376,8	$1,90 \cdot 10^{-5}$
		200	31400	628	$4,21 \cdot 10^{-5}$

Su tikslu sumažinti paviršinę srovę p-i-n (E1070) detektoriuose, buvo išbandyti tos pačios struktūros nauji detektoriai su skirtingais  $D$  ir  $L$  parametrais.  $L$  atstumo padidinimas detektoriuje turėtų blokuoti paviršines sroves, kurios vyksta dėl elektronų difuzijos iki detektoriaus krašto, pro kurį vyksta paviršinis laidumas. Naujai išmatuotų E1070 detektorių tamsinės srovės pateiktos 19 paveikslėlyje. Pagal gautus duomenis matome jog tamsinės srovės detektoriuose yra daug didesnės nei vertės paskaičiuotos naudojantis tamsinių srovių tankiais (išmatuotos srovės  $\sim 0,5\text{-}2$  mA, o apskaičiuotos  $4,21 \cdot 10^{-5}$  A). Taip pat tokių pačių  $D$ ,  $L$  parametrų detektorių tamsinės srovės gali skirtis beveik daugiau nei dešimt kartų, kas lemia prastą detektorių išeią.



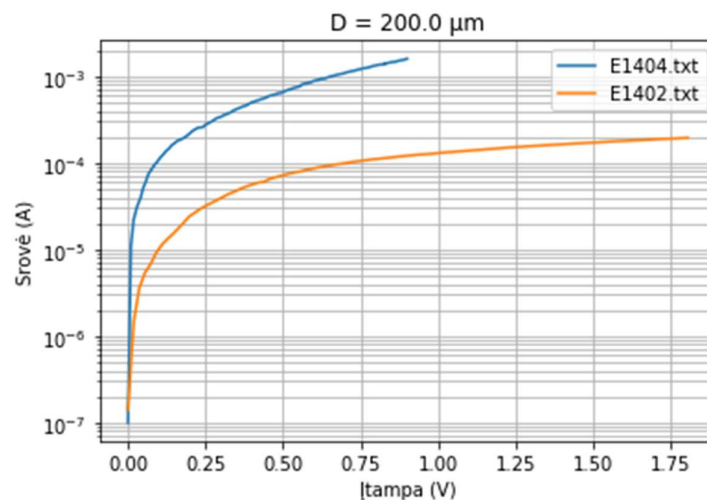
**19 pav.** E1070 antros iteracijos fotodetektorių tamsinės srovės priklausomybė nuo detektoriaus skersmens ( $D+2L$ ).

Norint įvertinti E1070 detektorių fotojautrumą, buvo pamatuotas jutiklių fotoatsakas prie skirtingų atgalinės įtampos verčių. Gauti duomenys pavaizduoti 20 paveikslėlyje. Didinant įtampą srovės įsistotinio taškas slenkasi link didesnės optinės galios reikšmės, taip padidindamas tiesinio režimo diapazonas. Svarbu atkreipti dėmesį, kad didinant įtampą, padidėja ne tik tiesiško režimo diapazonas, bet ir padidėja tamsinė srovė, kas prastina fotodetektoriaus veikimą. Dėl staigiai augančios tamsinės srovės, didinant apertūros plotą p-i-n (E1070) detektoriuose, jų fotoatsakas tai pat sparčiai prastėja.



20 pav. E1070 detektoriaus fotoatsako kreivė prie skirtingų įtampų.

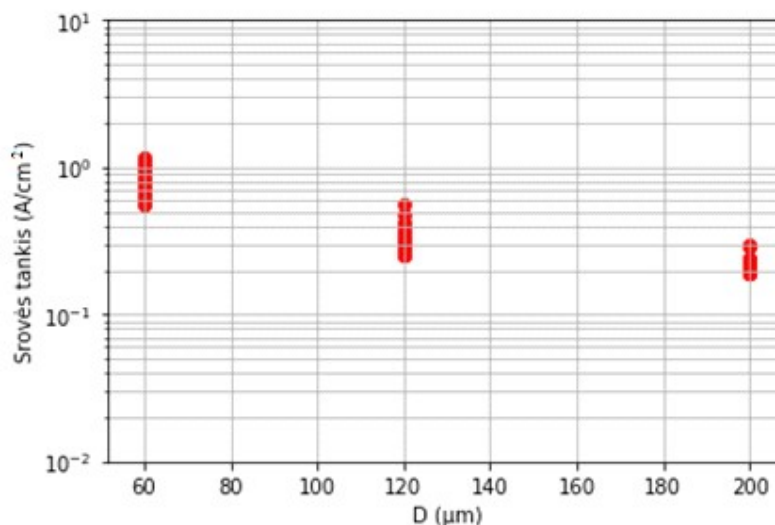
Didelės tamsinės srovės, kurios p-i-n struktūroje gali atsirasti dėl didelės paviršinės srovės dedamosios, paskatino išbandyti mažiau tradicinę fotojutiklio struktūra – nBn. Naujiems detektoriams pasirinkta išbandyti nBn ir CBIRD (*angl. complementary barrier IR detector*) struktūras. nBn detektoriuose bendru atveju mažinama SHR srovė, o CBIRD struktūroje sumažinama šalutinių krūvininkų tamsinė srovė, įvedant barjerą skylėms valentinėje juostoje. IV charakteristikos buvo išmatuotos dviem naujoms struktūrom E1402 (nBn) ir E1404 (CBIRD) (21 paveikslėlis). Lyginant su E1070 iteracija, E1402 detektoriai pasižymėjo ~10 kartų mažesne tamsinės srovės verte. Tai leidžia teigti jog pasirenkant nBn (E1402) struktūrą, buvo stipriai sumažinamos parazitinės srovės. CBIRD (E1404) detektoriai pasižymėjo eile didesnėmis tamsinės srovės vertėmis negu tų pačių parametru nBn (E1402) detektoriai, todėl tolimesniems matavimams E1404 detektoriai nebuvo nagrinėjami.



21 pav. E1402 ir E1404 detektorių IV charakteristikų palyginimas.

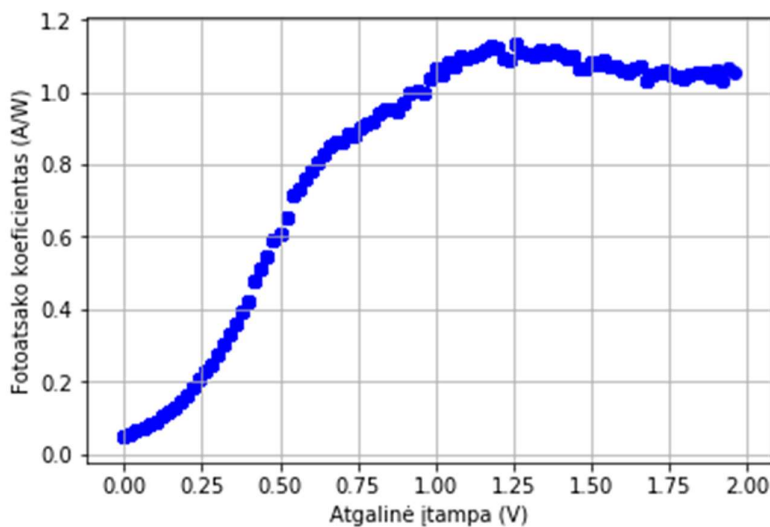
Atlikus didesnės apimties matavimus E1402 detektoriams, buvo pastebėta jog srovės tankis, didinant apertūros diametrą santykinai mažėja (22 paveikslėlis). Tai leidžia daryti prielaidą, kad E1402 struktūroje paviršinės srovės dedamoji įvairių apertūros dydžių detektoriuose yra pastovi ir nekinta, didinant aktyvios srities perimetrą. Tokiu atveju detektoriaus paviršiuje susidaro erdvinė

tuščiaidurio cilindro formos sritis, kurioje lokalizuotos paviršinės būsenos dalyvaujančios tamsinės srovės krūvininkų pernešime. Taip pat iš pamatuotų duomenų galima pastebėti daug geresnį detektoriaus savybių atsikartojamumą, ko nebuvo galima pasiekti naudojant p-i-n (E1070) struktūrą.



**22 pav.** Tamsinė srovės tankis E1402 detektoriams, esant 0,5 V atgalinei įtampai.

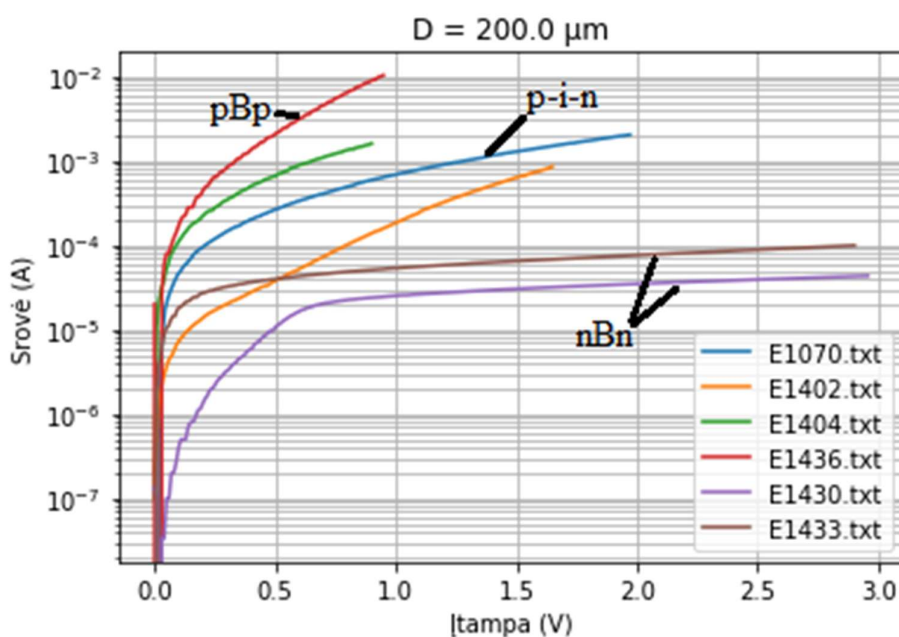
E1402 detektorių fotojautrumui ištirti, buvo išmatuotas B27 detektoriaus fotoatsakas 0,06 - 0,14 mW optinės galios diapazone ir naudojant mažiausių kvadratų metodą buvo apskaičiuotas fotoatsako koeficientas prie skirtingų atgalinės įtampos verčių (23 paveikslėlis). Maksimalus fotoatsako koeficientas pasiekiamas prie ~1,25 V. Didinant įtampą, didėja tamsinės srovės dedamoji ir fotoatsakas mažėja. Esant maksimaliam fotoatsakui, tamsinė srovė E1402 detektoriuje siekia apie 150 μA.



**23 pav.** E1402 B27 fotoatsako koeficiento priklausomybė nuo atgalinės įtampos vertės.

Bendru atveju fotodetektorių įkomponuojant į sistemą, siekiama mažesnių tamsinių srovių, bet tuo pačiu metu nemažinant fotoatsako koeficiento. Padidinti fotoatsako koeficientą, esant mažesnėms

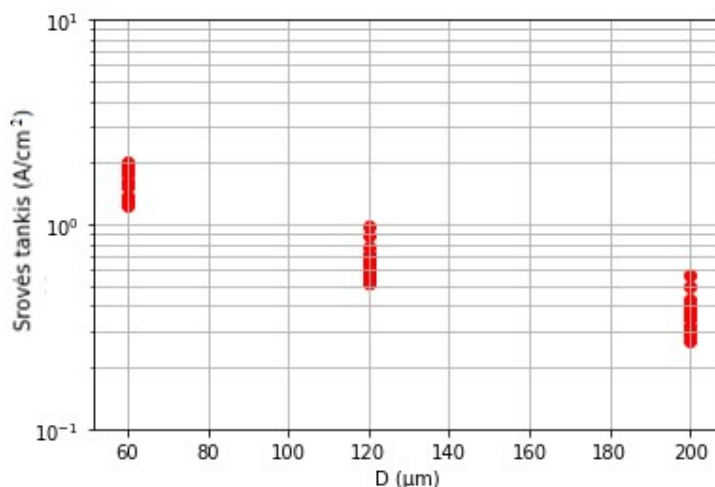
atgalinės įtampos vertėm ir sumažinti tamsinės srovės dedamąją, buvo pagamintos naujų nBn struktūrų detektoriai E1430, E1433, E1436. E1430 struktūroje buvo padidintas nBn barjero aukštis, su tikslu sumažinti tamsinę srovę. E1433 iteracijoje buvo realizuotas gradientinio barjero nBn struktūra, kurioje tarp absorberio sluoksnio ir barjero sluoksnio turėtų susidaryti tolydus laidumo juostos gradientas. Tai ne tik panaikina galimybę B-n sandūroje susidaryti elektronų potencialinei duobei, bet taip pat sukuria vidinį elektrinį lauką, kuris iš prigimties turėtų didinti fotoatsaką. Trečioji E1436 iteracija – pBp struktūra, kurioje formuojamas barjeras blokuoja skyles, o absorberis yra p tipo laidumo. Tai turėtų leisti išvengti p-n sandūros paviršiuje, kadangi naudojamo puslaidininkio Fermi lygmuo prikabintas arčiau valentinės juostos. Struktūrų tamsinių srovių palyginimas tarpusavyje ir su ankstesnėmis detektorių iteracijomis pateiktas 24 paveikslėlyje.



**24 pav.** E1070, E1402, E1404, E1430, E1433, E1436 struktūrų IV charakteristikų palyginimas.

Iš tamsinės srovės verčių galime pastebėti jog pBp (E1436) detektoriai, kurių tamsinės srovės siekia 1-2 mA, pasižymėjo beveik 100 kartų didesnėmis srovės vertėmis nei pirmieji nBn (E1402) detektoriai ir yra net prastesni už p-i-n struktūros detektorius. Tai gali būti pasekmė nesusidariusio p-tipo barjero, kas yra tikėtina įvertinant sudėtingą penkianario barjero auginimą. Padidinto barjero struktūroje (E1430) tamsinė srovė sumažėjo beveik 10 kartų, o gradientinio barjero (E1433) atveju tai pat matomas srovės sumažėjimas lyginant su E1402. Kaip ir E1402 atveju, E1430 ir E1433

struktūrose pastebėta panaši tendencija, kuomet tamsinės srovės tankis mažėja didėjant detektoriaus apertūros dydžiui (25 paveikslėlis).



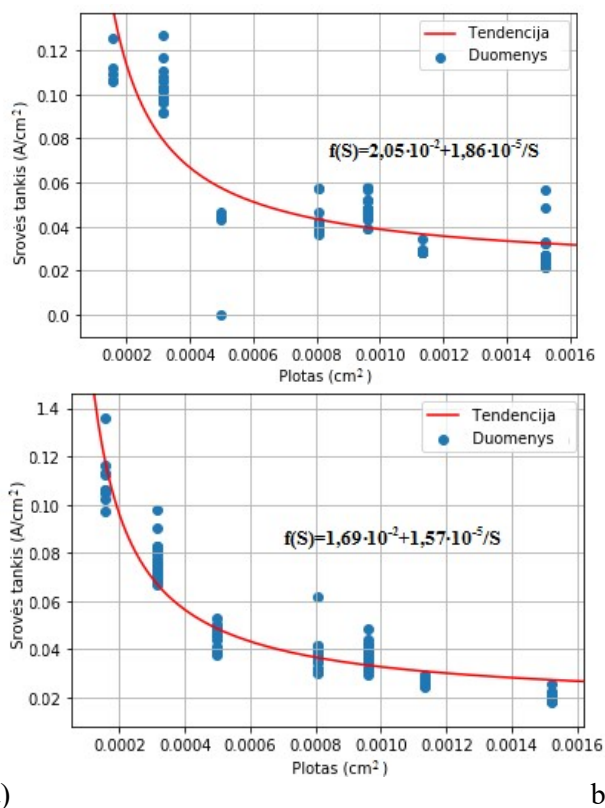
**25 pav.** E1433 detektorių tamsinės srovės priklausomybė nuo apertūros dydžio esant 1 V atgalinei įtampai.

Tai patvirtina anksčiau iškeltą hipotezę, kad tirtuose nBn detektoriuose paviršinės srovės dedamoji yra pastovaus dydžio. Pagal šią hipotezę, tamsinė srovė detektoriuje yra lygi:

$$I_{dark} = S * j_{bulk} + j_{surf} \rightarrow \frac{I_{dark}}{S} = j_{bulk} + \frac{j_{surf}}{S} \quad (19)$$

Pritaikius mažiausių kvadratų metodą netiesinei funkcijai, iš srovės priklausomybės nuo detektoriaus apertūros diametro galime išgauti tūrinės tamsinės srovės tankio ir paviršinės tamsinės srovės dedamosios reikšmes (26 paveikslėlis). Svarbu pabrėžti, kad skaičiuojant detektoriaus plotą, diametras buvo skaičiuojamas kaip  $D+2*L$ . Tokiu būdu įskaičiuojamas ne tik apertūros plotas, bet visas plotas, kuriame gali tekėti tūrinė tamsinė srovė. Tokiu būdu taikomas modelis labiau atitinka eksperimentiškai gautus duomenis. Iš tendencijos kreivių koeficientų gautos tūrinės srovės tankio vertės: E1430 –  $2,05 \cdot 10^{-2}$  A/cm<sup>2</sup> ir E1433 –  $1,69 \cdot 10^{-2}$  A/cm<sup>2</sup>. Akivaizdu jog tūrinės srovės tankis nBn su paaukštintu barjeru (E1430) bus didesnis, dėl didesnės atgalinės įtampos. Tačiau paviršinės srovės

dedamosios abejose struktūrose yra apytiksliai lygios  $\sim 1,65 \cdot 10^{-5}$  A. Tai tik patvirtina, kad paviršinė srovė detektoriuose yra pastovaus dydžio ir yra vienoda tarp skirtingų nBn struktūrų.

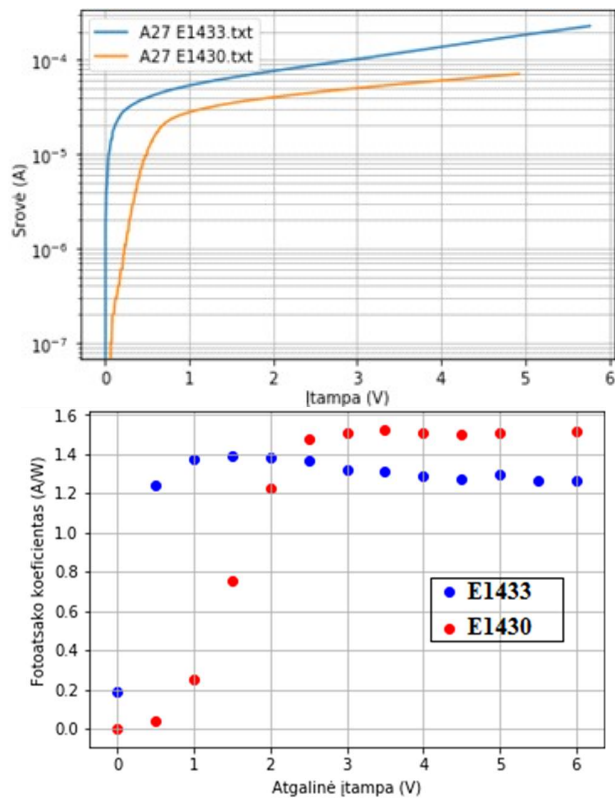


**26 pav.** a) E1430 srovės tankio priklausomybė nuo detektoriaus ploto esant 2,5 V atgalinei įtampai b) E1433 srovės tankio priklausomybė nuo detektoriaus ploto esant 0,5 V atgalinei įtampai. Čia  $f(S)$  – tendencingos kreivės funkcija.

Fotoatsako įvertinimui buvo išmatuotos fotoatsako ir IV charakteristikos dviem E1433 (gradientinis barjeras) ir E1430 (paaukštintas barjeras) struktūrų detektoriams, kurių  $D = 200 \mu\text{m}$  ir  $L = 75 \mu\text{m}$ , (27 paveikslėlis). Aukštesnio barjero detektorius pasižymi mažesnėmis tamsinėmis srovėmis, tačiau šio detektoriaus atsakas yra sąlyginai mažas (iki 0,3 A/W), esant nedidelėms atgalinės įtampos vertėm (iki 1 V). Tuo tarpu E1433 detektorius su gradientiniu barjeru kaip ir manyta, turėjo itin gerą fotoatsaką prie mažų atgalinės įtampos verčių (26 paveikslėlis b)). Matome jog maksimalų fotoatsako koeficientą E1430 detektorius pasiekia prie  $\sim 2,5$  V ir siekia apie 1,5 A/W. Nors maksimalus fotoatsakas koeficientas E1433 detektoriumi yra mažesnis (apie 1,4 A/W), šis detektorius pasižymi 0,2 A/W fotoatsako koeficientu, esant 0 V atgalinei įtampai. Aukštas fotoatsakas

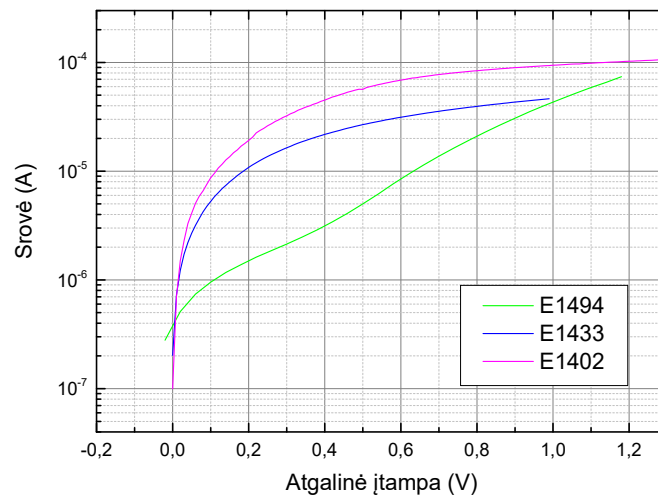


prie mažos atgalinės įtamos leidžia detektoriumi dirbti ties mažesnėmis atgalinėmis srovėmis, ko pasekoje šratinis ir 1/f triukšmas bendru atveju yra pakankamai mažas.



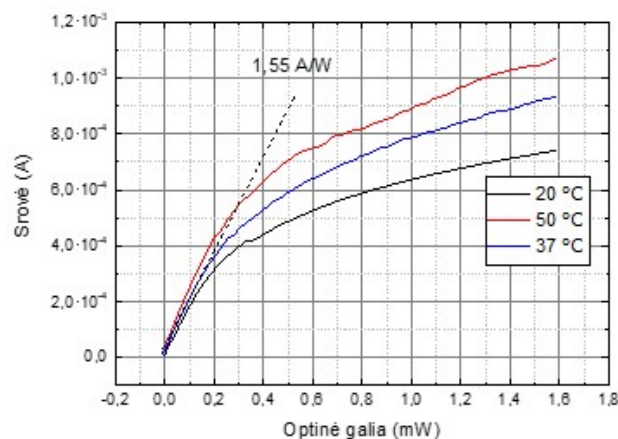
a) b)  
**27 pav.** E1430 ir E1433 A27 detektoriaus a) tamsinių srovių b) fotoatsako koeficiento palyginimas

E1494 iteracijoje buvo įkomponuoti E1433 ir E1430 struktūrų privalumai tikintis jog naujos iteracijos detektoriai pasižymės sumažėjusiomis tamsinėmis srovėmis, tuo pačiu metu išlaikydami pakankamai aukštą fotoatsako koeficientą esant mažesnei nei 0,5 V atgalinei įtampai. E1494 struktūros detektoriaus IV charakteristika pavaizduota 28 paveikslėlyje.



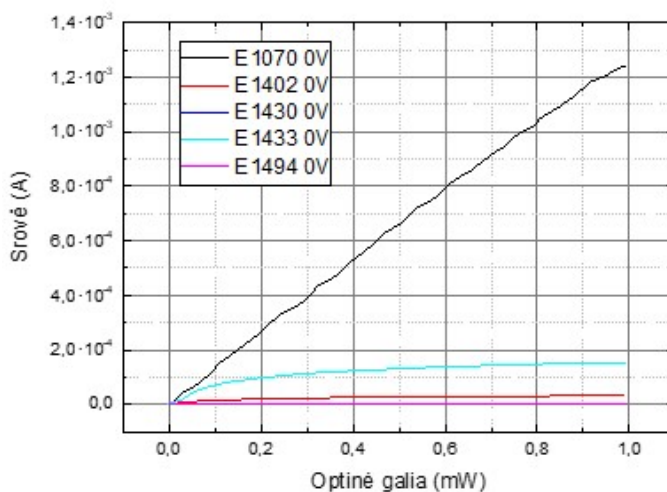
**28 pav.** E1402, E1433 ir E1494 nBn struktūrų IV charakteristikų palyginimas.

Padidinus gradientinio barjero aukštį, tamsinė srovė sumažėjo apie 5 kartus, lyginant su E1433 (žemas barjeras, gradientinis), įtampos režiuose tarp 0 ir 0,5 V. E1494 (aukštas barjeras, gradientinis) detektorių fotoatsako koeficientas siekė 1,5 A/W, esant 1 V atgalinei įtampai. Tokios fotoatsako vertės E1430 struktūroje buvo pasiektos prie 2,5 V atgalinės įtampos. Tai leidžia daryti prielaidą jog gradiento įkomponavimas į barjerą ženkliai sumažino atgalinės įtampos vertes, prie kurių pasiekiamas fotoatsakas viršijantis 1 A/W. Tačiau reikia pabrėžti jog šios fotoatsako vertės galioja tik kuomet optinė galia neviršija daugiau nei 0,2 mW. Didėjant krentančiai optiniai galiai abiejų iteracijų (E1433 ir E1494) detektorių fotoatsakas pradeda sotintis. Padidinti detektoriaus tiesišką fotoatsako diapazoną galima didinant atgalinę įtampa, tačiau tai didina tamsinę srovę. E1494 atveju tiesiškos priklausomybės diapazoną galima padidinti ir keliant puslaidininkio temperatūrą (29 pavaizduota), suteikiant skylėms papildomos energijos, leidžiančios perlipti valentinėje juostoje atsiradusį barjerą, dėl draustinių tarpo nesuderinamumo.



**29 pav.** E1494 detektoriaus fotoatsako priklausomybė nuo temperatūros prie 1 V atgalinės įtampos. Punktyrine linija pažymėtas fotoatsakas sekantis tiesišką priklausomybę.

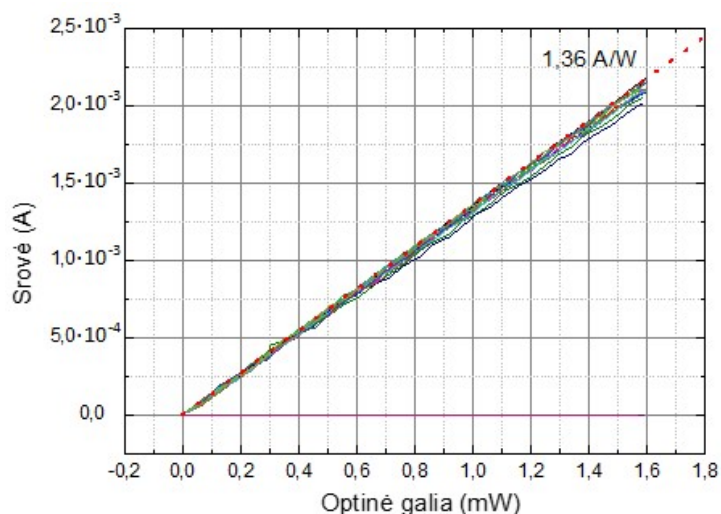
Netiesiškas nBn detektorių fotoatsakas apriboja jų pritaikymą signalo aptikimo grandynuose, kuriuose naudojami srovės stiprintuvai. Dėl atgalinės įtampos sudaroma tamsinė srovė turi būti kompensuojama stiprinimo grandinėje, kas bendru atveju yra sunkiai pasiekama esant kintamoms aplinkoms sąlygoms. Dėl šios priežasties dažniausiai siekiama, jog stiprinimo grandinėje detektorius veiktų 0 V įtampos režime. nBn struktūros (E1402, E1430, E1433, E1494) pasižymėjo beveik nuliniu fotoatsaku (30 paveikslėlis) esant nuliniai atgalinei įtampai, išskyrus E1433 (žemas, gradientinis barjeras) iteraciją, kurios fotoatsako koeficientas siekė  $0,8 \text{ A/W}$  0 – 0,1 mW ribose.



**30 pav.** Skirtingų iteracijų detektorių fotoatsakas esant 0 V atgalinei įtampai.

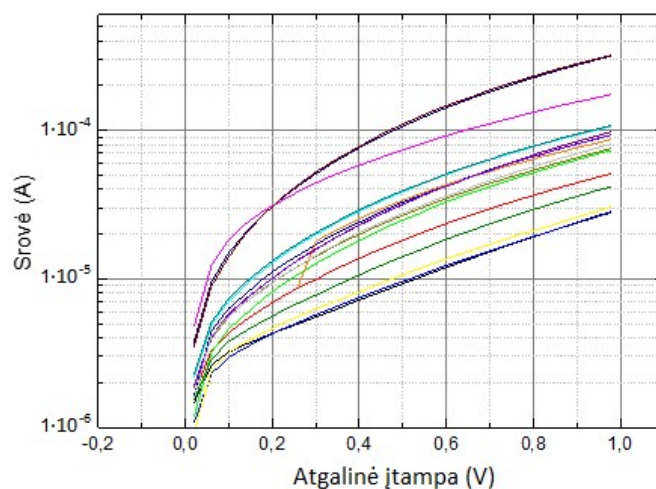
Akivaizdu jog nBn struktūros detektoriuose sudaromos barjeras apriboja šių detektorių veikimą be prijungtos atgalinės įtampos. Viena iš darbe analizuojamų detektorių būsima naudojimo paskirtis – optinio signalo aptikimas sugerties/atspindžio spektroskopijoje. Tam reikalingas ne tik detektoriaus veikimas fotoamperiniu režimu, bet platus dinaminis diapazonas. Kadangi darbe nagrinėtos nBn struktūros neišpildo šių reikalavimų, buvo nuspręsta grįžti prie p-i-n struktūros, kurios fotoatsakas

esant 0 V atgalinei įtampai siekė 1,3 A/W 0-1,5 mW ribose (31 paveikslėlis).



**31 pav.** E1070 iteracijos devyniolikos detektorių fotoatsakas esant 0 V atgalinei įtampai. Raudona punktyrinė linija žymi tiesinį optinės galios ir srovės ryšį 1,36 A/W fotoatsako koeficiento atveju.

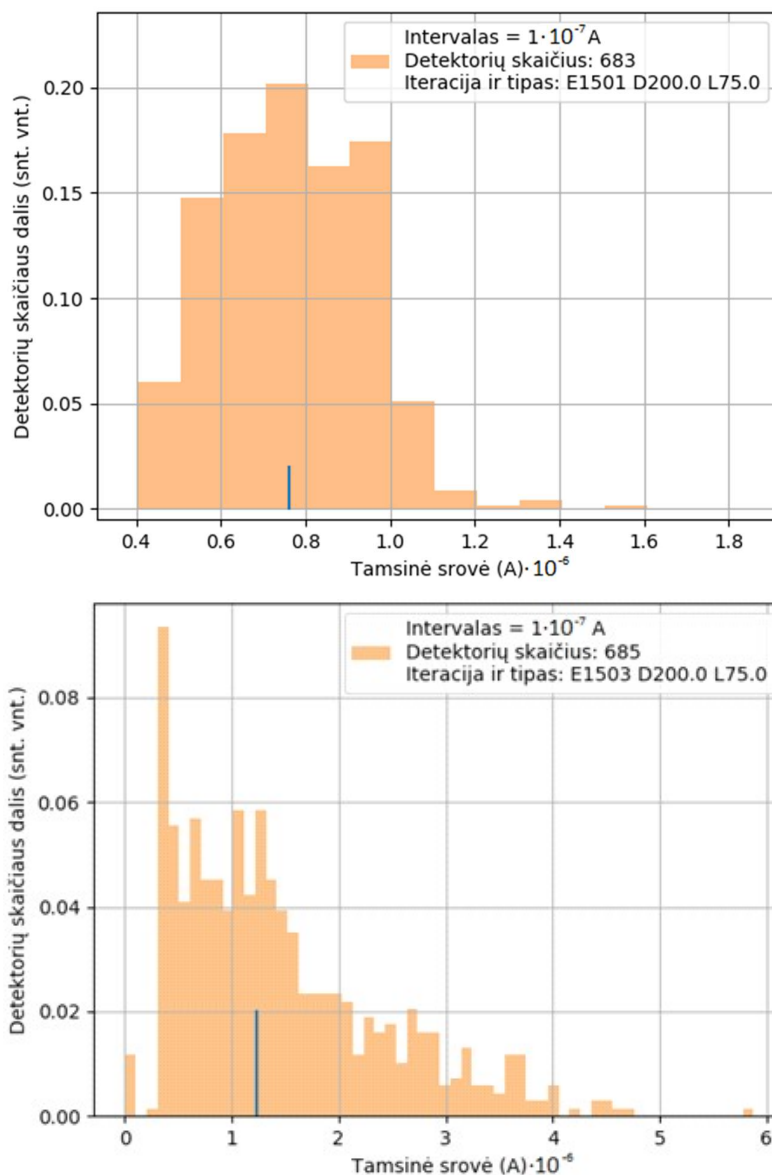
Iš 31 paveikslėlio matome, kad iš išmatuotų detektorių, tik vienas detektorius turėjo nulinį fotoatsaką (detektoriaus apertūra buvo neatverta apdirbimo metu), o kitų fotoatsako koeficientas buvo 1,25 – 1,36 A/W ribose. Tai leistų teigti, kad detektorių išeiga yra didelė (virš 90 procentų), tačiau pamatuotos šių detektorių IV charakteristikos srovių vertės prie tos pačios įtampos kito iki 5 – 10 kartų (32 paveikslėlis).



**32 pav.** E1070 iteracijos detektorių IV charakteristikų sklaida

Tai patvirtina ir anksčiau padarytą išvadą dėl didesnio p-i-n detektorių tamsinės srovės verčių išsibarstymo. Pagerinti p-i-n detektorių išeigą, kas užtikrina stabilesnį detektorių pasirodymą vertinant elektrinį triukšmą, buvo nuspręsta padidinti buferinį sluoksnį auginamoje struktūroje. Taip

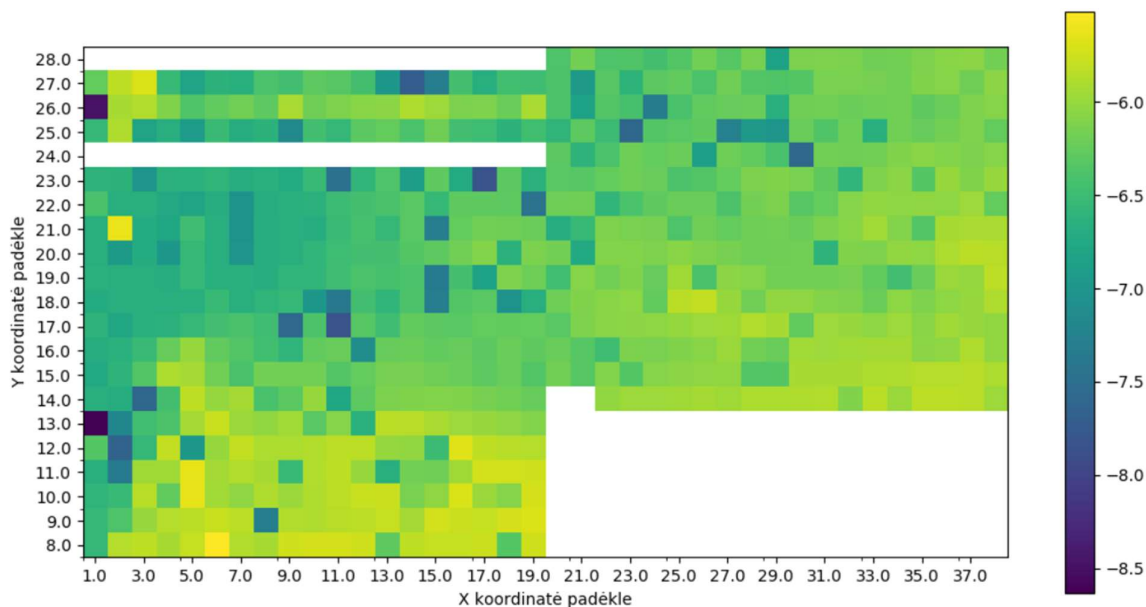
pat buferinis sluoksnis buvo padidintas ir nBn struktūroje. Abejuose E1501 (nBn) ir E1503 (p-i-n) struktūrose su padidintu buferiniu sluoksniu pagerėjo detektorių fotoatsako koeficientas – nBn apie 1,3 A/W, p-i-n struktūroje apie 1,5 A/W. Padidintas buferinis sluoksnis, detektorių dinaminiam diapazonui įtakos neturėjo. E1501 ir E1503 iteracijos detektorių tamsinės srovės histogramos pavaizduotos 33 paveikslėlyje.



**33 pav.** Detektorių tamsinės srovės histogramos esant 10 mV atgalinei įtampai. Mėlyna linija žymi medianos vertę. Legendoje nurodytas pasirinktas intervalas histogramai sudaryti, išmatuotų detektorių skaičius ir detektoriaus iteracija, bei geometriniai parametrai.

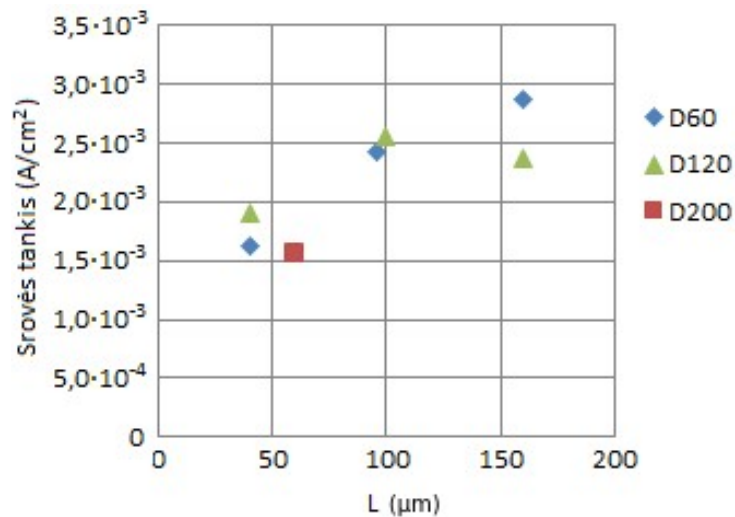
Akivaizdu, kad nBn(E1501) detektoriuose tamsinė srovės sklaida yra ganėtinai maža ir virš 70 procentų detektorių tamsinė srovė yra 0,4 – 1  $\mu$ A ribose. Tuo tarpu p-i-n (E1503) detektorių savybės išsibarstymas panašus į logaritminį pasiskirstymą, o vertės yra diapazone tarp 0,3 – 4  $\mu$ A. Kiekvienam

detektoriumi priskiriant koordinatę epitaksijos padėkle, galima tamsinės srovės duomenis atvaizduoti ir skaliariniame žemėlapyje (34 paveikslėlis).



**34 pav.** E1503 iteracijos detektorių tamsinės srovės logaritmo verčių, esant 10 mV atgalinei įtampai, skaliarinis žemėlapis. Baltos zonos – nėra duomenų.

Žemėlapyje koordinatė (1, 28) atitinka padėklo ketvirčio kampą esanti padėklo centre. Galima stebėti tendenciją, kuomet padėklo kraštuose tamsinės srovės vertės yra didesnės link padėklo vidurio, kas bendru atveju yra įprastą puslaidininkinių prietaisų gamyboje. Ketvirčio viduryje matomas tam tikras verčių pasiskirstymas, kuriam nebūdinga apskritimo forma, kas leidžia daryti prielaidą, kad pasiskirstymas tikriausiai neatsiranda dėl epitaksijos. Labiau tikėtina, kad toks pasiskirstymas atsiranda dėl padėklo kokybės prieš epitaksiją arba dėl litografijai skirtų prietaisų nehomogeniškumo. L parametro įtaka E1503 (p-i-n) detektorių tamsinės srovės tankiui, pavaizduota 35 paveikslėlyje.



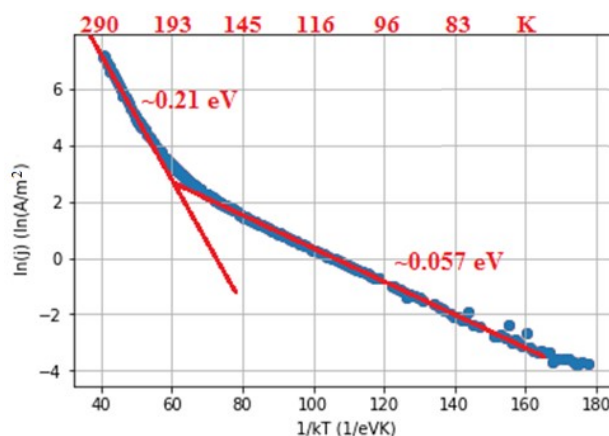
**35 pav.** E1503 detektorių tamsinės srovės esant 10 mV atgalinei įtampai priklausomybė nuo parametro L. Grafike atidėtos medianos vertės iš visų turimų detektoriaus tipų.

Galima teigti, kad esant beveik nulinei įtampai (10 mV) paviršinės srovės detektoriuje yra nykstamai mažos, todėl L parametro didinimas neturi reikšmės paviršinėms srovėms, tačiau padidina detektoriaus tūrį, dėl kurio padidėja ir bendra tamsinės srovės vertė. Taip pat reikia atsižvelgti, kad medianos vertės gali būti ne visiškai tikslios, kadangi vertės buvo gaunamos iš skirtingų apimties matavimų ( D200 atveju apimtis 670 vnt., D60 ir D120 apimtis – iki 150 vnt.), o taip pat detektorių pozicija padėklo ketvirtyje nėra išskirstyta homogeniškai.

Iš gautų tamsinės srovės ir fotoatsako verčių galima, teigti jog abi darbe nagrinėtos struktūros turi savų privalumų. nBn atveju derinant elektronų barjero aukštį bei formą, buvo pasiektas 1,3 A/W fotoatsakas nuo 0 iki ~ 0,1 mW optinės galios ribose. nBn detektoriai pasižymėjo daug mažesniu( iki 10 kartų) diferencialinės varžos išsibarstymu, lyginant su p-i-n detektoriais. Tuo tarpu p-i-n detektoriai turėjo beveik 20 procentų didesnę fotoatsako koeficientą ir sugebėjo išlaikyti tiesinį fotoatsaką net virš 1,6 mW. nBn detektorių didesnė diff. varža esant 10 mV atgalinei įtampai duoda pranašumą prieš p-i-n detektorius lyginant srovės triukšmą prietaisuose, tačiau p-i-n detektoriaus platus dinaminis diapazonas yra pageidautina savybė integruojant prietaisą į optinę sistemą.

### 3.2. Aktyvacijos energija

Aktyvacijos energijai apskaičiuoti buvo pasirinktas E1402 A22 detektorius, kurio  $D = 200 \mu\text{m}$  ir  $L = 75 \mu\text{m}$ . Tamsinė srovė išmatuota esant  $0,5 \text{ V}$  atgalinei įtampai. Žemiausiai siekta temperatūra buvo apie  $70 \text{ K}$ , nes žemesnėse temperatūrose srovės tampa itin mažos (keli nA) ir jų tikslus matavimas tampa sudėtingas dėl naudojamos įrangos apribojimų. Srovės tankio natūrinio logaritmo priklausomybė nuo  $1/kT$ , pavaizduota 35 paveikslėlyje. Aukštoje temperatūroje dominuoja procesai, kurių aktyvacijos energija yra apie  $0,21 \text{ eV}$ . Tai rodo jog laidumas detektoriuje vyksta per defektines būsenas, nes aktyvacijos energija atitinka apytiksliai pusę draustinio tarpo energijos. Temperatūrai mažėjant, aktyvacijos energija nukrenta iki  $0,057 \text{ eV}$ , kuri tikėtina yra dėl krūvininkų terminės aktyvacijos iš seklių paviršinių lygmenų.



**35 pav.** E1402 A22 detektorius srovės tankio natūrinį logaritmo priklausomybė nuo  $1/kT$ . Raudonos linijos žymi duomenų polinkį, kurių vertė atitinka aktyvacijos energiją eV. Viršutinė ašis žymi atitinkamą temperatūrą Kelvinais.



### 3.3. Srovės triukšmų matavimai

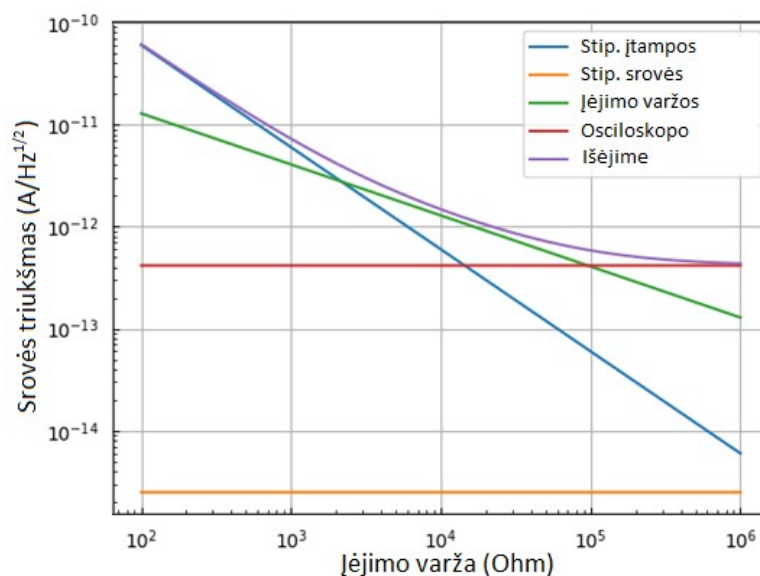
Prieš išmatuojant detektorių triukšmus buvo įvertintas triukšmų matavimo sistemos patikimumas. Tai buvo atlikta išmatuojant šešias skirtingas varžas, naudojant tą pačią matavimo schemą, kuri vėliau buvo naudojama detektorių matavimui. Išmatuotos srovės triukšmų vertės buvo palygintos su teorinėmis varžų triukšmų vertėmis. Išmatuotų varžų vertės buvo: 1, 3, 5, 10, 20, 100 kOhm. Atlikus pirmus matavimus buvo pastebėta, kad išmatuota ir teorinė triukšmų vertė sutapo tik 20 kOhm varžai. Mažesnių verčių už 20 kOhm varžose išmatuotas triukšmas buvo didesnis nei teorinis, o didesnių verčių – mažesnis. Tai išskėlė prielaidą jog triukšmo matavimo tikslumui įtakos turi įėjimo varža.

Bendru atveju operaciniame stiprintuve vyrauja du triukšmų šaltiniai: srovės triukšmas ir įtampos triukšmas. Srovės triukšmas jungiamųjų vartų lauko tranzistorių (JFET) stiprintuvuose sąlyginai mažas, todėl dažniausiai šių stiprintuvų tikslumas yra ribojamas įtampos triukšmo. Matavime naudoto stiprintuvo srovės ir įtampos triukšmo vertės nurodytos gamintojų atitinkamai  $2,5\text{fA/Hz}^{1/2}$ ,  $6\text{nV/Hz}^{1/2}$ . Triukšmo lygį stiprintuvo išėjime galime išreikšti formule:

$$I_{i\bar{s}} = \sqrt{\left(\frac{e_n}{R}\right)^2 + i_n^2 + \frac{4kT}{R}} \quad (20)$$

čia  $I_{i\bar{s}}$  – srovės triukšmas stiprintuvo išėjime,  $e_n$  – stiprintuvo įtampos triukšmas,  $i_n$  – stiprintuvo srovės triukšmas,  $k$  – Bolcmano konstanta,  $T$  – temperatūra,  $R$  – matuojamo objekto varža. Pirmasis šaknies narys yra srovės triukšmo komponentė dėl stiprintuvo įtampos triukšmo ir yra proporcingas  $1/R^2$ . Antroji šaknies dedamoji nepriklauso nuo  $R$  ir yra stiprintuvo srovės triukšmas. Trečioji dedamoji apibūdina matuojamo objekto (įėjimo varžos) srovės triukšmą ir turi  $1/R$  priklausomybę. Įvertinę naudojamo osciloskopo fono triukšmo lygį, galime atvaizduoti stiprintuvo išėjime matuojamo

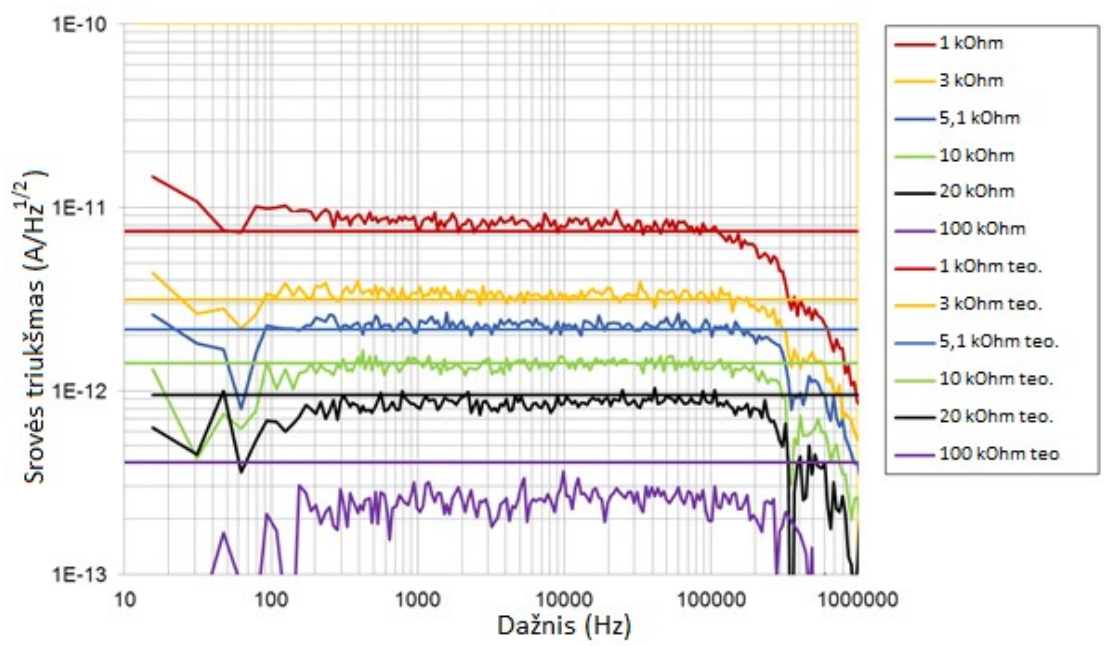
triukšmo priklausomybę nuo įėjimo varžos, bei pavaizduoti atskiras triukšmo komponentes (36 paveikslėlis).



**36 pav.** Srovės triukšmo stiprintuvo išėjime ir atskirų triukšmo komponentių priklausomybė nuo įėjimo varžos  $R$ . Legenda nusako atskirų triukšmo komponentių šaltinį

Akivaizdu jog artėjant prie žemų įėjimo varžų, išmatuojamo triukšmo stiprintuvo išėjime vertė bus lygi stiprintuvo įtampos triukšmo komponentei, o ne tiriamo objekto varžos šiluminiam triukšmui. Įėjimo varžai pasiekus vertes virš ~100 kOhm, įėjimo varžos šiluminis triukšmas yra panašios eilės kaip ir osciloskopo triukšmo. Tai apriboja matavimo tikslumą dėl padidėjusios santykinės paklaidos. Atsižvelgus į tai, galime teigti jog naudojama matavimo sistema yra tiksliausia tik kuomet įėjimo varža yra apie 20 kOhm. Eksperimentiškai išmatuoto triukšmo vertė su teorine varžos verte sutapo tik tuomet, kai teorinė vertė apskaičiuota atsižvelgiant į 20 formulę, kuri įskaičiuoja papildomus

stiprintuvo triukšmus. Pakoreguotos teorinės varžų triukšmo vertės buvo pavaizduotos kartu su eksperimentiškai gautomis vertėmis (37 paveikslėlis).



**37 pav.** Srovės triukšmo tankio spektrai esant skirtingai jėgimo varžai  $R$  ir atitinkamos teorinės varžų triukšmo vertės.

Apskaičiuotos varžų triukšmų vertės atitinka eksperimentiškai išmatuotas vertes, išskyrus 100 kOhm atvejį, kuomet osciloskopo triukšmas pasidaro kelis kartus didesnis nei jėgimo varžos, todėl išmatuojamas srovės triukšmas yra mažesnis nei teorinis, kas bendru atveju nėra įmanoma ir yra

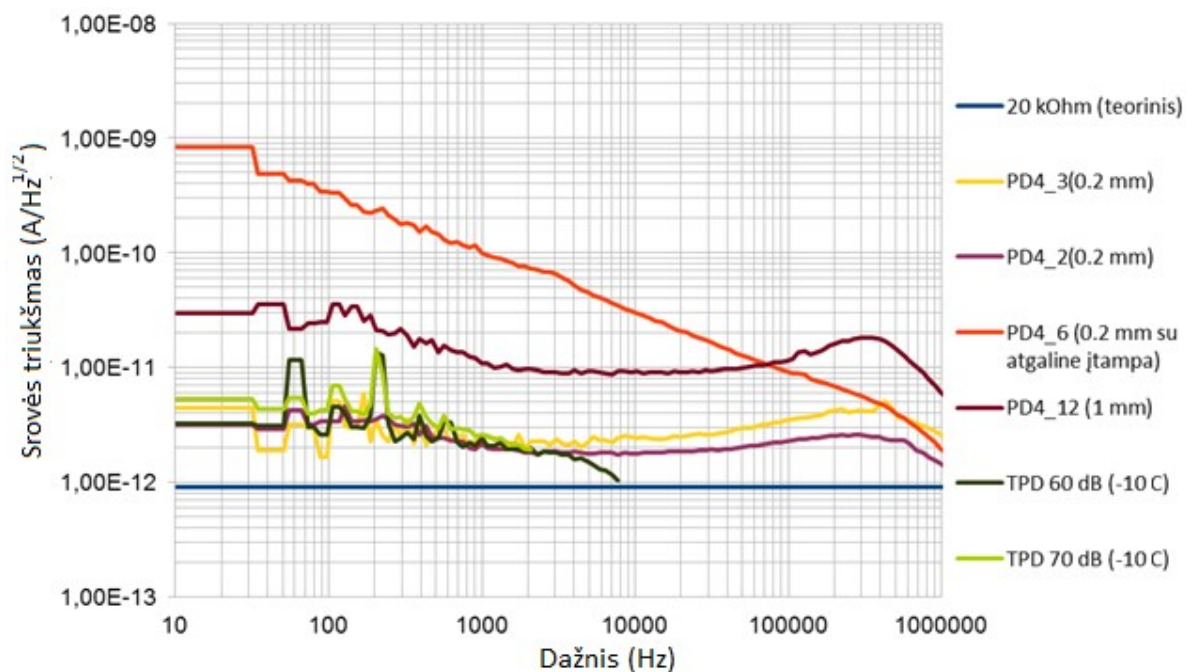
matavimo paklaidos padarinys. Tolimesniuose detektorių matavimuose buvo atsižvelgta į matavimo sistemos paklaidas.

Detektorius integravus su signalo stiprintuvu, buvo išmatuotas bendras detektoriaus ir stiprintuvo triukšmas ir palygintas su komerciniu šaldomu stiprinamu detektoriumi. Matuotų detektorių struktūros ir jų geometriniai parametrai pateikti 5 lentelėje.

**5 lentelė.** Matuotų detektorių žymėjimas

Žymėjimas	Struktūra	D, $\mu\text{m}$	L, $\mu\text{m}$	Atgalinė įtampa, V
PD4_2	E1433	200	75	0
PD4_3	E1433	200	75	0
PD4_6	E1430	200	75	0,4
PD4_12	E1433	1000	100	0
TPD	PDA10DT-EC	1000	-	0

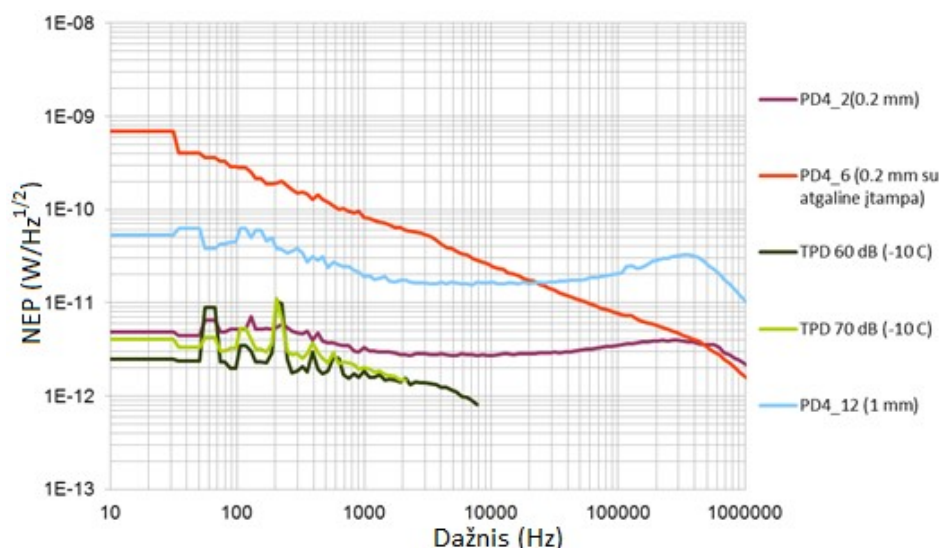
E1433 detektoriai buvo matuojami esant 0 V atgalinei įtampai. E1430 detektorius buvo matuojamas esant 0,4 V įtampai, dėl nulinio fotoatsako fotoelektros režime. TPD sistemose detektorius veikia prie 0 V įtampos. Išmatuotų detektorių srovės triukšmų tankio spektrai pavaizduoti 38 paveikslėlyje.



**38 pav.** Triukšmų tankio spektrai išmatuotiems detektoriams.

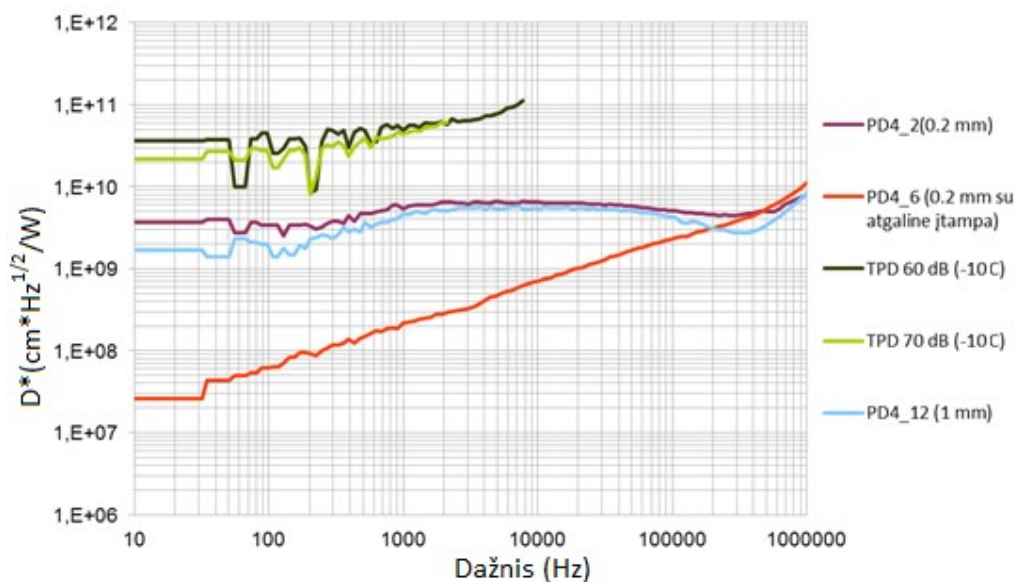
Komercinio TPD detektoriaus stiprinimas buvo pasirinktas 60 dB ir 70 dB. Tai atitinka panašų stiprinimą naudotą PD4 detektorių matavimo metu. PD4\_2 ir PD4\_3, generuoja panašų triukšmo kiekį kaip ir komercinis detektorius TPD. Stiprinimo lygis neturi didelės įtakos TPD detektoriaus generuojamo triukšmo vertei. Tai parodo jog pagrindinis triukšmo šaltinis TPD sistemoje yra detektoriaus šiluminis triukšmas ir keičiant stiprinimo grandinės elementus, suminis triukšmo lygis ženkliai nepakinta. Matuojant PD4\_6 detektoriaus triukšmą su prijungta atgaline įtampa, atsiranda

didelė  $1/f$  triukšmo dedamoji. TPD detektoriaus apertūros diametras yra 1 mm. Tokio pat dydžio PD4\_12 detektoriaus triukšmo lygis yra apie penkis kartus didesnis. 39 paveikslėlyje pavaizduotos detektorių NEP vertės.



39 pav. Detektorių NEP vertės.

Iš NEP verčių matome jog sufokusuotos šviesos fiksavimui, PD4 detektoriai siekia panašų jautrumo lygį kaip ir šaldomi TPD detektoriai. Tam, kad įvertinti detektorių jautrumą, atsižvelgiant į detektoriaus apertūros dydį, pagal NEP reikšmes buvo apskaičiuotos  $D^*$  vertės (40 paveikslėlis).

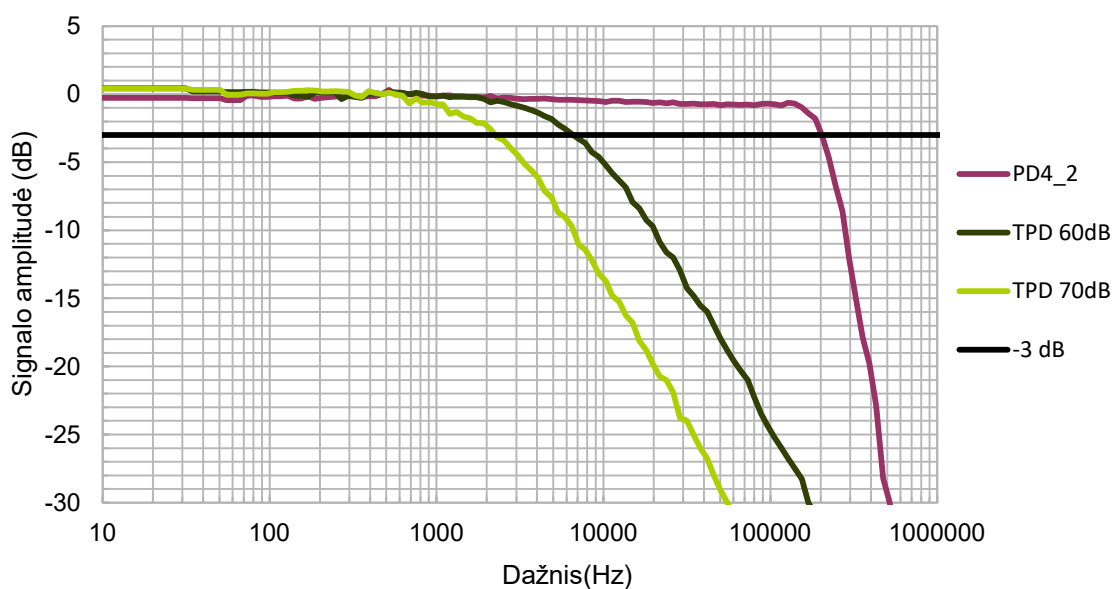


40 pav. Detektorių NEP vertės

TPD detektoriaus jautrumas žemuose dažniuose ( iki 10 kHz) apytiksliai yra 10 kartų didesnis nei išmatuotų nBn PD4 detektorių jautrumas. Tačiau reikia atsižvelgti jog TPD detektorius yra aktyviai šaldomas ir palaikomas -10 laipsnių Celsijaus temperatūroje, tuo tarpu PD4 detektoriuose nebuvo temperatūros valdymo. Didinant TPD detektoriaus stiprinimą ribinis dažnis sumažėja, bet išlaikomas

panašus jautrumas. PD4\_2 ir PD4\_22 detektoriai yra tos pačios juostinės struktūros, bet skirtingo apertūros dydžio, todėl jų NEP vertės ir išmatuotas triukšmo lygis skyrėsi.  $D^*$  vertė įvertina detektoriaus apertūros pokytį ir todėl šios vertės abiem detektoriams yra vienodos. Tai leidžia daryti prielaidą jog triukšmas detektoriuje proporcingai didėja su didėjančiais detektoriaus geometriniais parametrais ir struktūroje neatsiranda papildomų triukšmų šaltinių, keičiant jo dydį.

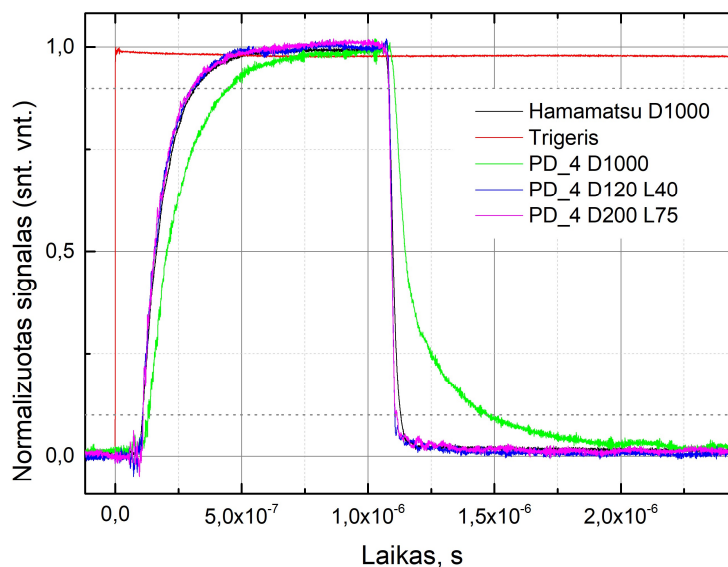
Kadangi TPD detektorius yra integruotas su kitokia signalo stiprinimo sistema nei PD4, taip pat buvo palygintos šių dviejų sistemų dažninės charakteristikos. PD4 ir TPD matavimams naudotų sistemų dažnių juostų plotis buvo nustatytas ties standartine -3dB riba. Dažninio atsako kreivės pavaizduotos 41 paveikslėlyje.



**41 pav.** Signalų amplitudės priklausomybė nuo dažnio.

Kadangi TPD detektoriaus sistema turi reguliuojamą stiprinimą, dažninis atsakas buvo išmatuotas dviem skirtingiems stiprinimams 60 ir 70 dB. Padidinus stiprinimą iki 70 dB TPD sistemos dažnių juosta nukrito nuo 6,5 kHz iki 2 kHz. PD4 sistemos dažnių juostos plotis siekė 0,2 Mhz. Įvertinti ne

bendros sistemos, o pačių fotodetektorių dažnių juostą, buvo taip pat atlikti kilimo ir kritimo trukmės matavimai, kurių rezultatai pateikti 42 paveikslėlyje.



42 pav. Detektorių fotosignalo kilimo ir kritimo trukmių kreivės.

Gautų trukmių rezultatai pateikti 6 lentelėje.

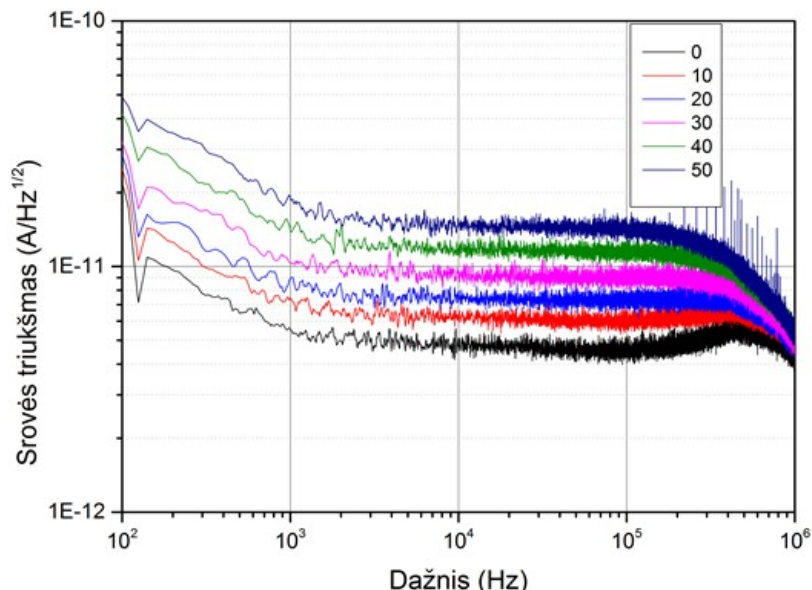
6 lentelė. PD4 ir hamamatsu detektorių dažnių juostos diapazonas

Detektorius	Kilimo trukmė (10-90), ns	Kritimo trukmė, ns	Dažnių juostos plotis, MHz
Hamamatsu	200,94	47,28	1,74
PD_4 D200 L75	200,94	29,42	1,74
PD_4 D120 L40	200,94	29,42	1,74
PD_4 D1000 L100	320,05	365,22	0,96

Pagal neiškeičiančias kilimo trukmės vertes tarp skirtingų dydžių PD\_4 detektorių, galima teigti jog signal formą įtakoja lazerio maitinimui naudota sistema. Tai reiškia, kad hamamatsu ir PD\_4 detektorių, su mažesne nei 200 μm apertūra, ribinė dažnių diapazono vertė yra didesnė nei 1,74 Mhz, o PD\_4 1 mm apertūros detektoriuose ši reikšmė siekia ~ 1Mhz.

Įvertinti stiprinamo PD4 detektoriaus triukšmo priklausomybę nuo temperatūros, detektorius buvo šaldomas, naudojant Peltjė elementą. Diapazone 0 – 50 °C, kas dešimt laipsnių, buvo išmatuotas E1433 A27 D200 L75 detektoriaus triukšmo lygis (43 paveikslėlis). Temperatūrai nukritus iki 0 °C,

triukšmo lygis nukrito beveik 2 kartus, lyginant su kambario temperatūroje išmatuotu triukšmu. Šią tendenciją galima paaiškinti didėjančia detektoriaus varža, temperatūrai krentant.



**43 pav.** E1433 A27 triukšmo tankio spektras esant 0 V atgalinei įtampai prie skirtingų detektoriaus temperatūrų. Legenda nurodo detektoriaus temperatūrą Celsijaus laipsniais.

Kadangi gauti triukšmo spektrai yra balto triukšmo pobūdžio, tai yra plačiame dažnių diapazone triukšmo lygis yra plokščias, galime manyti jog pagrindinis triukšmo šaltinis yra terminis krūvininkų triukšmas, kurio išraiška yra:

$$S_i = \frac{4kT}{R} \quad (21)$$

čia  $S_i$  – srovės triukšmas;  $R$  – detektoriaus šunto varža. Kadangi nBn struktūra bendru atveju blokuoja paviršines sroves ir SHR procesas juose sąlyginai mažas, galima priimti jog pagrindines parazitines sroves sudaro difuzinė srovė, kurios tankis  $j$  turi eksponentinę priklausomybę:

$$j = j_0 e^{-\frac{E}{kT}} \quad (22)$$

čia  $j_0$  – tamsinės srovės tankio konstanta;  $E$  – aktyvacijos energija. Tuomet detektoriaus varža  $R$  turėtų būti atvirkščiai proporcinga difuzinės srovės tankiui:

$$R \approx 1/jA \approx 1/Aj_0 e^{-\frac{E}{kT}} \quad (23)$$

čia  $A$  – detektoriaus aktyvios sritys plotas. Tokiu atveju srovės triukšmą galime susieti su temperatūros  $T$  sąryšiu:

$$S_i = 4kT * Aj_0 e^{-\frac{E}{kT}} \quad (24)$$

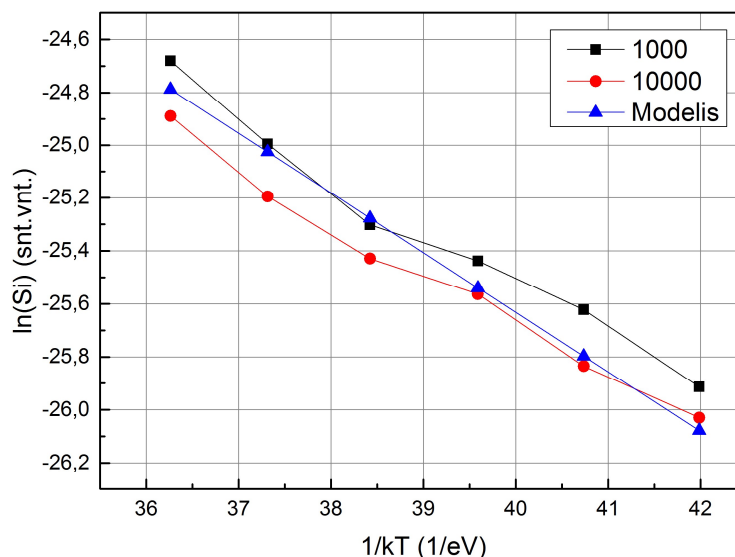


Jei užrašysime triukšmo natūrinį logaritmą  $\ln(S_i)$  gausime:

$$\ln(S_i) = \ln\left(4 * \frac{A j_0}{x}\right) - E * x \quad (25)$$

čia  $x = 1/kT$ .

Šiam modeliui patvirtinti eksperimentiniai duomenys buvo palyginami su teoriškai apskaičiuotais duomenimis, keičiant  $E$  ir  $j_0$  parametrus(44 paveikslėlis).



**44 pav.** Eksperimentinių duomenų ir modelio palyginimas. Legenda nurodo dažnį hercais, kuriame buvo paimtos triukšmo spektro vertės.

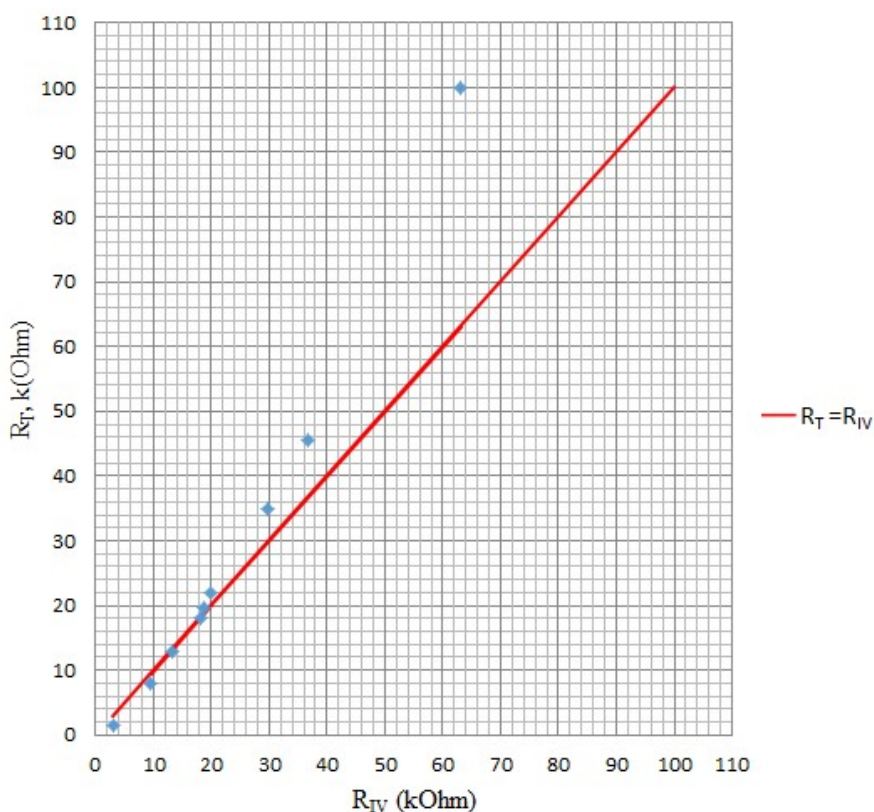
$S_i$  reikšmės fiksuotos ties 1kHz ir 10 kHz dažniu, su sąlyga jog triukšmo lygis visuose dažniuose nuo temperatūros turėtų kisti vienodai. Eksperimentiniai duomenys su teoriniais sutampa geriausiai kuomet  $E$  vertė buvo parinkta 0,2 eV, o  $j_0 = 7e-4$  A/m<sup>2</sup>. Pabrėžtina jog gauta aktyvacijos energija yra beveik lygi energijai gautai iš Arėnėjaus dėsnio skaičiavimų (0,21 eV).

Atlikti triukšmų matavimus, reikalingas ilgas bandinių paruošimas, kuris riboja galimybę analizuoti triukšmų savybes detektoriuose dideliais kiekiais per trumpą laiko tarpą. Iš triukšmų matavimų, esant skirtingoms temperatūroms, nustatyta jog tirta detektoriaus atveju pagrindinis triukšmo šaltinis detektoriuje yra šiluminis triukšmas. Tai leidžia teigti, kad detektoriaus triukšmo lygis turi koreliuoti su detektoriaus varža. Tokiu atveju triukšmų analizei galima naudoti diferencialines detektorių varžas, apskaičiuojamas iš tamsinės srovės dydžio esant 10mV atgalinei įtampai. Šio sąryšio analizei buvo paruošti 9 detektoriai: 8 vienetai E1433 iteracijos PD4 detektoriai ir vienas komercinis „Hamamatsu“ detektorius. Paruoštiems detektoriams buvo išmatuota diferencialinė varža ties 10 mV ir triukšmo tankio spektrai. 7 lentelėje pateikti matavimų rezultatų duomenys.

7 lentelė. Detektorių varžų vertės apskaičiuotos pagal IV ir triukšmų matavimų.

Detektorius	D, $\mu\text{m}$	L, $\mu\text{m}$	R iš IV mat., kOhm	R iš triukšmų mat., kOhm
PD4_21	60,0	40,0	20,0	22,0
PD4_23	120,0	100,0	9,5	8,0
PD4_24	120,0	160,0	18,9	19,5
PD4_25	120,0	40,0	36,7	45,5
PD4_27	60,0	40,0	63,1	100,0
PD4_29	60,0	160,0	29,9	35,0
PD4_30	200,0	75,0	13,4	13,0
PD4_13	1000,0	100,0	3,0	1,6
Hamamatsu	1000,0	-	18,1	18,0

Esant mažom varžų vertėms ( $<20$  kOhm), galima pastebėti koreliaciją tarp dviejų dydžių. Dėl aiškumo, vertės buvo atidėtos grafike  $R_{IV}$  nuo  $R_T$ , (45 paveikslėlis), čia  $R_{IV}$  – detektoriaus varža nustatyta iš voltamperinių matavimų,  $R_T$  – detektoriaus varža nustatyta iš srovės triukšmų matavimų.



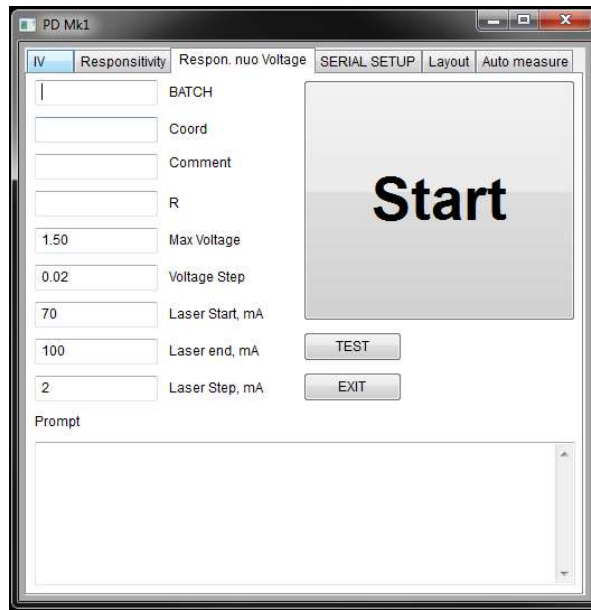
45 pav. Diferencialinės varžos palyginimas su varža apskaičiuota iš srovės triukšmų matavimų. Raudona linija žymi tendencija kuomet šie du dydžiai sutampa.

Didėjant detektoriaus diferencialiniai varžai, didėja ir netikslumas tarp skirtingais būdais išmatuotų verčių. Panašią tendenciją pastebėjome ir kalibracinių varžų matavimo metu, kuomet dėl ribotos osciloskopo rezoliucijos artėjant prie didesnių varžos verčių nei 30 – 40 kOhm triukšmo lygio nustatymo paklaida išauga, kas lemia didesnę apskaičiuojamą varžą už gamintojų nurodytą vertę.

Kuomet detektoriaus apertūros skersmuo yra didesnis nei 200 mikrometrų, detektoriaus srovės triukšmas yra ekvivalentus varžai mažesnei nei 20-30 kOhm. Esant tokioms detektoriaus triukšmų vertėms, galime pastebėti akivaizdų sutapimą tarp varžų apskaičiuojamų skirtingais būdais. Tokia tendencija leidžia spręsti apie srovės triukšmų lygi detektoriuose pagal jų diferencialinę varžą ties 10 mV.

### **3.3. Automatizuoto matavimo programos kūrimas**

Įvairių matavimų realizavimui buvo pasinaudotas Python 3.7 „Anaconda“ paketas. Programos kodas buvo testuojamas ir redaguojamas naudojantis internetinės naršyklės pagrindu sukurta programa „Jupyter Notebook“. Įrangos sąsajai su kompiuteriu buvo naudojamos RS-232 USB jungtys. Programos moduliai atsakingi už įrangos ryšį su kompiuterine įranga buvo gaunami iš atviro kodo svetainės GitHub, ir modifikuojami pagal poreikį. Programos grafinės vartotojo sąsajos sukūrimui naudota „wxFormBuilder“ programa. Sukurtos programos bendras vaizdas pateiktas 38 paveikslėlyje. Programą sudaro šeši atskiri langai atliekantys tam tikrą matavimą arba paskirtį. „SERIAL SETUP“ lange suvedami naudojamos įrangos COM kanalai ir sukuriamas jų sąsaja su kompiuteriu. „Layout“ lange pasirenkamas naudotos kaukės geometrinių parametrų išdėstymo txt. failas. Įrašinėjant duomenis į kompiuterį, priklausomai nuo įvestos detektoriaus koordinatės, automatiškai įrašomi D ir L parametrai į duomenų failą, taip išvengiant rankinio įvedimo klaidų. Pavyzdiniame lange (46 paveikslėlyje) prieš matavimą suvedami visi parametrai ir „Start“ mygtuku pradedamas matavimas. Gauti rezultatai matavimo gale įrašomi į kompiuterį ir atvaizduojami naujame lange. „TEST“ mygtukas patikrina prijungtos įrangos sąsają su kompiuteriu. Pilnas kodas su pagrindiniais moduliais pateiktas 1 priede.



46 pav. Sukurtos programos grafinės vartotojo sąsajos vaizdas.

## Išvados

- Derinant nBn struktūros medžiaginę sudėtį, galima kontroliuoti barjero aukštį, bei vidinį elektrinį lauką, kas leidžia sumažinti tamsinės srovės keliasdešimt kartų iki  $50 \mu\text{A}$ , su atitinkamu  $1,2 \text{ A/W}$  fotoatsaku.
- nBn detektorių tamsinės srovės priklausomybė nuo geometrinių parametrų parodo, kad paviršinės srovės dedamoji yra pastovaus dydžio ir nekinta, didinant detektoriaus plotą. Tai atveria galimybę gaminti didelių apertūrų fotojutiklius, kurie stipriai lenktų p-i-n tipo detektorius, kurių paviršinės srovės yra proporcingos apertūros perimetrui.
- Temperatūrinių matavimų nustatyta aktyvacijos energija  $\sim 0,21 \text{ eV}$ , leidžia manyti, kad nBn struktūroje pagrindinis triukšmo ir parazitinės srovės šaltinis susijęs su puslaidininkio tūryje vykstančiais tarpdefektiniais šuoliais.
- Sukonstruota srovės triukšmų matavimo sistema leidžia tiksliai įvertinti absoliutinę triukšmo vertę ir tiriamų detektorių detektyvumą  $D^*$ , kuris siekia  $5 \cdot 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ , optimaliame detektoriaus varžų ruože ( $1 - 30 \text{ k}\Omega$ )
- Eksperimentiniais duomenimis patvirtintas triukšmo priklausomybės nuo temperatūros modelis, parodė, kad tiriamuose detektoriuose dominuoja šiluminis triukšmas.

## Literatūros sąrašas

- [1] C. A. Wang, "Growth of Low Bandgap III–V Alloys for Mid-IR Devices," *Encycl. Mater. Sci. Technol.*, pp. 3693–3697, Jan. 2001.
- [2] R. F. Pierret, *Semiconductor device fundamentals*. Pearson Education India, 1996.
- [3] G. P. Donati, "Band Gaps and Band Offsets of GaSb Lattice Matched Alloys," University of New Mexico, 2004.
- [4] A. R. Denton and N. W. Ashcroft, "Vegard's law," *Phys. Rev. A*, vol. 43, no. 6, pp. 3161–3164, Mar. 1991.
- [5] Opi, "Intrinsic semiconductors," 2013. [Online]. Available: [http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI\\_ang\\_M05\\_C02/co/Contenu\\_03.html](http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M05_C02/co/Contenu_03.html).
- [6] M. Razeghi and A. Rogalski, *Semiconductor Ultraviolet Detectors*, vol. 79. 1996.
- [7] S. M. Sze, "Semiconductor Devices Physics and Technology, 2nd ed.," Wiley, New York, 2002.
- [8] P. Fay, "Photodetectors," *Encycl. Mater. Sci. Technol.*, pp. 6909–6923, Jan. 2001.
- [9] B. Van Zeghbroeck, "Structure and principle of operation," 2011. [Online]. Available: [https://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter4/ch4\\_2.htm#fig4\\_2\\_1](https://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter4/ch4_2.htm#fig4_2_1).
- [10] Rogalski, A., (1995), *Infrared Photon Detectors*, Bellingham, Washington: SPIE-The International Society for Optical Engineering, Chapters 2, 3, 7, 10.
- [11] Boyd, R.W., (1983), *Radiometry and the Detection of Optical Radiation*, New York: John Wiley & Sons. p.164-169
- [12] Janet Renee Pedrazzani, "Characteristics of InAs-based nBn photodetectors grown by molecular beam epitaxy," University of Rochester., 2010.
- [13] H. S. Kim et al., "Reduction of surface leakage current in InAs/GaSb strained layer long wavelength superlattice detectors using SU-8 passivation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 14, p. 143512, Oct. 2010.
- [14] P. Martyniuk, M. Kopytko, and A. Rogalski, "Barrier infrared detectors," *Opto-Electronics Rev.*, vol. 22, no. 2, pp. 127–146, Jun. 2014.
- [15] Boreman GD, Dereniak EL, "Infrared detectors and systems," Wiley, New York, 1996
- [16] Piotrowski, J. "Uncooled operation of IR photodetectors." *Opto-Electron. Rev* 12.1 (2004): 111-122
- [17] Palenskis, V., "Fliktuacijų elektroninėse sistemose" Vilnius: VU FF Radiofizikos katedra, 1998
- [18] K.R Amin, A. Bid, "Effect of ambient on the resistance fluctuations of graphene", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, no. 18, p. 183105, 2015.
- [19] THORLABS, "Photodiode Saturation and Noise Floor," 2019. [Online]. Available: [https://www.thorlabs.com/images/TabImages/Photodetector\\_Lab.pdf%0D](https://www.thorlabs.com/images/TabImages/Photodetector_Lab.pdf%0D).

## Santrauka

Darbą atliko: Valentinas Andrulis

Darbo vadovas: Dr. Arūnas Miasojedovas

### TRUMPABANGIŲ INFRARAUDONŲJŲ SPINDULIŲ GaInAsSb/GaSb FOTODETEKTORIŲ TECHNOLOGIJŲ TYRIMAS

Optoelektronikos prietaisai dirbantys MIR(vidutinio bangos ilgio infraraudonosios spinduliuotės) ruože tarp 2  $\mu\text{m}$  ir 5  $\mu\text{m}$  yra plačiai nagrinėjami cheminių reagentų, taršalų detektavime, mažo nuostolio optinių skaidulų ryšiuose, karinių atsakomųjų priemonių sistemose bei energijos gamyboje. Kuriamų fotodetektorių optimizavimui sukurta eksperimentinė ir metodinė bazė, skirta tikslingai įvertinti detektorių savybes kaip: tamsinė srovė, fotoatsakas, tamsinių srovių tankiai, aktyvacijos energija ir elektrinis triukšmas. p-i-n detektoriuose nustatytos tamsinės srovės siekia  $>0,1$  mA, dėl paviršiumi tekančių krūvininkų. Panaudojus nBn struktūrą, realizuotos mažesnės tamsinė srovės (50  $\mu\text{A}$ ) ir aukštas fotoatsakas (0,5-0,8 a/W) prie atgalinės įtampos verčių neviršijančių  $\sim 0,3$  V. Temperatūrinė triukšmo priklausomybė patvirtina šiluminio triukšmo dominavimą nBn detektoriuose, kurių nustatytas  $D^*$  siekia  $5 \cdot 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ . Gauta  $\sim 0,21$  eV aktyvacijos energija, nustatyta naudojant tamsinės srovės priklausomybę nuo temperatūros, leidžia daryti prielaidą jog nBn parazitinės srovės susijusios su puslaidininkio tūryje vykstančiais tarpdefektiniais šuoliais. Puikios minėtos nBn detektorių savybės leidžia tikėtis tokią struktūrą panaudoti plataus masto jautrių aukštatemperatūrių detektorių gamybai.

## Summary

Prepared by: Valentinas Andrusis

Research advisor: Dr. Arūnas Miasojedovas

### **SWIR GaInAsSb/GaSb Photodetector Technology Development**

Optoelectronic devices operating in the MIR (medium-wavelength infrared) range between 2  $\mu\text{m}$  and 5  $\mu\text{m}$  are extensively studied in the detection of chemical reagents, contaminants, low-loss optical fibers, military countermeasure systems, and power generation. An experimental and methodological base has been developed to measure and optimize the detector properties such as: dark current, response, leakage current density, activation energy and electrical noise. p-i-n detectors have high dark currents of  $\sim 0.1$  mA, due to surface charge carriers. Using the nBn structure, lower dark currents (50  $\mu\text{A}$ ) and high response (0.5-0.8 A/W) were realized at reverse voltage values of  $\sim 0.3$  V. The electrical noise dependence on temperature confirms the predominance of thermal noise in nBn detectors with a  $D^*$  of  $5 \cdot 10^9$   $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ . From  $\sim 0.21$  eV activation energy, determined using dark current dependence from the temperature, it can be assumed that the nBn leakage currents are related to trap assisted processes which scale with photodetector's volume. The remarkable properties of the nBn detectors allow the structure to be used for the production of large-scale sensitive high temperature detectors.



## Priedai

Priedas 1

Grafinės vartotojo sąsajos kodas:

```
1. import wx          #grafinės vartotojo sąsajos modulis
2. import Measure1   #matavimus atliekančių funkcijų rinkinys
3. import Arroyo     #lazerio maitinimo šaltinio klasė
4. import Lakeshore  #voltmetro klasė
5. import Tenma      #įtampos šaltinio klasė
6. import layout
7. from time import sleep
8.
9. from noname import MyFrame2
10.
11. class MainFrame(MyFrame2):
12.
13.     def __init__(self, parent):
14.         MyFrame2.__init__(self, parent)
15.         self.m_button3.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.StartIV)
16.         self.m_button5.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.Exit)
17.         self.m_button51.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.Exit)
18.         self.m_button52.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.Exit)
19.         self.m_button11.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.LaunchEq)
20.         self.m_button12.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.TEST)
21.         self.m_button4.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.TEST)
22.         self.m_button41.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.TEST)
23.         self.m_button42.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.TEST)
24.         self.m_button121.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.getdicts)
25.         self.m_button31.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.StartResponsitivity)
26.         self.m_button32.Bind(wx.EVT_BUTTON, self.StartResponVOL)
27.         self.m_textCtrl154.Bind(wx.EVT_TEXT, self.CopyTEXT)
28.
29.     def CopyTEXT(self, event):
30.         text = self.m_textCtrl154.GetValue()
31.         self.m_textCtrl25.SetValue(text)
32.         self.m_textCtrl251.SetValue(text)
33.         self.m_textCtrl252.SetValue(text)
34.
35.     def TEST(self, event):
36.         try:
37.             self.m_textCtrl154.AppendText("Testing...\n")
38.             sleep(1)
39.             self.m_textCtrl154.AppendText("Setting voltage to 0.5 V...\n")
40.             sleep(1)
41.             try:
42.                 self.tenma.set_voltage(0.5)
43.                 self.tenma.set_output(1)
44.                 self.m_textCtrl154.AppendText("Voltage seted!!\n")
45.             except:
46.                 self.m_textCtrl154.AppendText("ERROR:Could not set the voltage!!\n")
47.                 sleep(1)
48.             if self.m_checkBox1.GetValue():
49.                 self.m_textCtrl154.AppendText("Testing laser source...\n")
50.                 self.arroyo.set_output_current(0)
51.                 self.arroyo.enable_LAS_output(1)
52.                 self.m_textCtrl154.AppendText("Conection working!!\n")
53.                 self.m_textCtrl154.AppendText("TEST COMPLETE!!\n")
54.
55.         except:
56.             self.m_textCtrl154.AppendText("EROR:Could not connect to laser source!!\n")
```

```

57.
58.
59.     def LaunchEq(self, event):
60.         try:
61.             self.tenma = Tenma.TenmaBase(self.m_textCtrl151.GetValue())
62.             self.lake = Lakeshore.Lakeshore()
63.             if self.m_checkBox1.GetValue():
64.                 try:
65.                     self.arroyo = Arroyo.CurrentSource(self.m_textCtrl152.GetValue())
66.                 except:
67.                     self.arroyo.close()
68.             self.m_textCtrl154.AppendText("Equipment setup complete\n")
69.         except:
70.             self.m_textCtrl154.AppendText("ERROR:Could not launch equipment!!!\n")
71.         try:
72.             self.tenma.close()
73.         except:
74.             pass
75.         try:
76.             if self.m_checkBox1.GetValue():
77.                 return(self.tenma,self.lake,self.arroyo)
78.             else:
79.                 return(self.tenma,self.lake)
80.         except:
81.             pass
82.
83.     def StartIV(self, event):
84.         dicts = layout.ReadLayout(self.m_filePicker1.GetPath())
85.         BATCH = self.m_textCtrl119.GetValue()
86.         Coord = self.m_textCtrl120.GetValue()
87.         Comment = self.m_textCtrl129.GetValue()
88.         try:
89.             D = dicts[Coord][0]
90.             L = dicts[Coord][1]
91.         except:
92.             self.m_textCtrl154.AppendText("ERROR:Coord doesn't exist in layout file!!!\n"+"
Check the Coord field.\n")
93.             return
94.             R = float(self.m_textCtrl23.GetValue())
95.             VStart = float(self.m_textCtrl24.GetValue())
96.             VEnd = float(self.m_textCtrl26.GetValue())
97.             VStep = float(self.m_textCtrl27.GetValue())
98.         try:
99.             Measure1.IVcurve(BATCH,Coord + ' ' + Comment,D,L,R,VStep,VStart,VEnd,self.tenma,
a,self.lake)
100.        except:
101.            self.m_textCtrl154.AppendText("ERROR:Could not start measurement!!!\n")
102.
103.        def StartResponsitivity(self, event):
104.            dicts = layout.ReadLayout(self.m_filePicker1.GetPath())
105.            BATCH = self.m_textCtrl191.GetValue()
106.            Coord = self.m_textCtrl201.GetValue()
107.            Comment = self.m_textCtrl130.GetValue()
108.            try:
109.                D = dicts[Coord][0]
110.                L = dicts[Coord][1]
111.            except:
112.                self.m_textCtrl154.AppendText("ERROR:Coord doesn't exist in layout file!!
!\n"+"Check the Coord field.\n")
113.                return
114.                R = float(self.m_textCtrl231.GetValue())
115.                Voltage = float(self.m_textCtrl241.GetValue())
116.                Laser_start = float(self.m_textCtrl261.GetValue())
117.                Laser_end = float(self.m_textCtrl271.GetValue())
118.                Laser_step = float(self.m_textCtrl28.GetValue())
119.            try:
120.                Measure1.Responsitivity(BATCH,Coord + ' ' + Comment,D,L,R,Voltage,Laser_
start,Laser_end,Laser_step,self.tenma,self.lake,self.arroyo)
121.            except:

```

```

122.         self.m_textCtrl154.AppendText("ERROR:Could not start measurement!!!\n")
123.         self.arroyo.enable_LAS_output(0)
124.
125.     def StartResponVOL(self, event):
126.         errorcount = 0
127.         dicts = layout.ReadLayout(self.m_filePicker1.GetPath())
128.         BATCH = self.m_textCtrl1911.GetValue()
129.         Coord = self.m_textCtrl2011.GetValue()
130.         Comment = self.m_textCtrl131.GetValue()
131.         try:
132.             D = dicts[Coord][0]
133.             L = dicts[Coord][1]
134.         except:
135.             self.m_textCtrl154.AppendText("Coord doesn't exist in layout file\n")
136.             return
137.         R = float(self.m_textCtrl12311.GetValue())
138.         MaxVoltage = float(self.m_textCtrl12411.GetValue())
139.         StepVoltage = float(self.m_textCtrl147.GetValue())
140.         Laser_start = float(self.m_textCtrl12611.GetValue())
141.         Laser_end = float(self.m_textCtrl12711.GetValue())
142.         Laser_step = float(self.m_textCtrl1281.GetValue())
143.         xVoltage = 0
144.         while xVoltage <= MaxVoltage:
145.             try:
146.                 Measure1.Responsitivity(BATCH,Coord + ' ' + Comment,D,L,R,xVoltage,L
147.                 aser_start,Laser_end,Laser_step,self.tenma,self.lake,self.arroyo)
148.                 xVoltage = xVoltage+StepVoltage
149.                 sleep(1)
150.             except:
151.                 if errorcount > 10:
152.                     break
153.                 self.m_textCtrl154.AppendText("Error in measurement\n"+"Restarting Eq
154.                 m...\n")
155.                 self.RestartEqm()
156.                 errorcount = errorcount + 1
157.                 self.arroyo.enable_LAS_output(0)
158.                 self.tenma.set_output(0)
159.
160.     def getdicts(self, event):
161.         dicts = layout.ReadLayout(self.m_filePicker1.GetPath())
162.         for i in dicts:
163.             a = i + " D= " + str(dicts[i][0]) + " L= " +str(dicts[i][1]) + "\n"
164.             self.m_textCtrl134.AppendText(a)
165.         return(dicts)
166.
167.     def Exit(self,event):
168.         self.Close()
169.
170.     def RestartEqm(self):
171.         try:
172.             self.tenma.close()
173.             self.arroyo.close()
174.         except:
175.             pass
176.         sleep(5)
177.         self.LaunchEq(event=None)
178.
179. app = wx.App(False)
180. main_frame = MainFrame(None)
181. app.SetTopWindow(main_frame)
182. main_frame.Show()
183. app.MainLoop()

```

Matavimo funkcijų kodas „Measure 1“:

```

1. # In[1]:
2. from __future__ import unicode_literals, print_function
3. import os

```

```

4. import inspect
5. from datetime import datetime
6. import winsound
7. import numpy as np
8. import pandas as pd
9. import matplotlib.pyplot as plt
10. import time
11. import visa
12. import sys
13. import serial
14. import logging
15. from time import sleep, time
16. from functools import wraps
17. from serial import Serial
18. import socket
19. import win32com.client
20. import traceback
21. from visa import constants
22. import winsound
23.
24. import wx
25. import Measure1
26. import noname
27.
28. st = 0.5 # sleep time after commands
29. def IVcurve(BATCH,Coordinates,D1,L1,R1,Vstep,Vstart,Vend,tenma,lake):
30.     #TESTED DIODE information
31.     koordin = Coordinates
32.     D = D1 #in micrometers
33.     L = L1 #in micrometers
34.     R = R1 #used resistor in ohms
35.     Filt = 3 # filtering counts
36.
37.     # PARAMETERS FOR IV CURVE aka 0==1
38.     voltage_step = Vstep #in (V)
39.     voltage_start = Vstart #in (V)
40.     voltage_end = Vend #in (V)
41.     flname = Coordinates
42.     mydir = os.path.join(„directory“)
43.
44.     if not os.path.exists(mydir):
45.         os.makedirs(mydir)
46.
47.     filename = flname + '_' + datetime.now().strftime('%H-%M-%S') + '.txt'
48.     date_time = datetime.now().strftime('%Y-%m-%d') + ' ' + datetime.now().strftime('%H:%M:%S')
49.
50.     #Writing info and colums names
51.     csv_file = open(os.path.join(mydir,filename), 'w')
52.     csv_file.write(koordin+'\n')
53.     csv_file.write(date_time + '\tD: ' + str(D) + '\tL: ' + str(L) + '\tR: ' + str(R) + '\tFiltering: ' + str(Filt)+'\n')
54.     csv_file.write(os.linesep)
55.     csv_file.write('Voltage(V)\tCurrent(A)\n')
56.
57.
58.     Y_set = []
59.     X_set = []
60.
61.     try:
62.         #Turns on power suply
63.         V = voltage_start
64.         tenma.set_voltage(V)
65.         tenma.set_output(1)
66.         sleep(1)
67.     except:
68.         print ("could not set voltage")
69.     csv_file.close()
70.     #Measurement

```

```

71.     try:
72.         while V <= voltage_end:
73.             #Lakeshore filtering
74.             Bias_set = []
75.             for i in range(Filt):
76.                 Bias_set.append(lake.voltA())
77.
78.                 I = -np.average(Bias_set)/R
79.                 V = tenma.get_voltage()
80.                 Y_set.append(I)
81.                 X_set.append(V)
82.                 csv_file.write(str(V) + '\t' + str(I))
83.                 csv_file.write(os.linesep)
84.                 V = V + voltage_step
85.                 tenma.set_voltage(V)
86.                 if V/voltage_step>5:
87.                     sleep(st)
88.                 else:
89.                     sleep(0.1)
90.             #plots graph
91.             plt.plot(X_set,Y_set)
92.             plt.xlabel("Reverse Bias (V)")
93.             plt.ylabel("Current (A)")
94.             plt.ticklabel_format(axis='y',style='sci',scilimits=(0,0))
95.             plt.grid()
96.             plt.show()
97.         except:
98.             print("Error while measuring")
99.             csv_file.close()
100.            finally:
101.                csv_file.close()
102.                tenma.set_voltage(0)
103.                frequency = 2500 # Set Frequency To 2500 Hertz
104.                duration = 500 # Set Duration To 1000 ms == 1 second
105.                winsound.Beep(frequency, duration)
106.
107.
108.    def Responsitivity(BATCH,Coordinates,D1,L1,R1,Reversebias,lstart,lend,lstep,tenma,la
ke,arroyo):
109.        D = D1 #in micrometers
110.        L = L1 #in micrometers
111.        koordin = Coordinates
112.        R = R1 #used resistor in ohms
113.        Filt = 5 # filtering counts
114.        # PARAMETERS FOR RESPONSITIVITY aka 0==2
115.        RevB = Reversebias #Reverse Bias for responsitivity measuraments in
(V)
116.        laser_start = lstart #laser start current in (mA)
117.        laser_end = lend #laser end current in (mA)
118.        laser_step = lstep #laser current step in (mA)
119.        #Turns on power suply
120.        tenma.set_voltage(RevB)
121.        tenma.set_output(1)
122.
123.        #Turns on laser suply
124.        arroyo.enable_TEC_output(1)
125.        sleep(1)
126.        laser_I = laser_start
127.        arroyo.set_output_current(laser_I)
128.        arroyo.enable_LAS_output(1)
129.        arroyo.enable_TEC_output(1)
130.
131.        #file creation
132.        flname = koordin
133.        mydir = os.path.join(\\Photodiodu matavimai\\'+BATCH+'\\Responsitivity\\', datet
ime.now().strftime('%Y-%m-%d'))
134.
135.        if not os.path.exists(mydir):
136.            os.makedirs(mydir)

```

```

137.
138.     filename = fname + '_' + datetime.now().strftime('%H-%M-%S') + '.txt'
139.     date_time = datetime.now().strftime('%Y-%m-
    %d') + ' ' + datetime.now().strftime('%H:%M:%S')
140.
141.     #Writing info and cols names
142.     csv_file = open(os.path.join(mydir,filename), 'w')
143.     csv_file.write(koordin+'\n')
144.     csv_file.write(date_time + '\tD: ' + str(D) + '\tL: ' + str(L) + '\tR: ' + str(R) +
    '\tFiltering: ' + str(Filt) + '\tReverse Bias: ' + str(RevB) + '\n')
145.     csv_file.write('Optical Power(mW)\tCurrent(A)\n')
146.
147.     #Ophir power detector
148.     try:
149.         OphirCOM = win32com.client.Dispatch("OphirLMMeasurement.CoLMMeasurement")
150.         # Stop & Close all devices
151.         OphirCOM.StopAllStreams()
152.         OphirCOM.CloseAll()
153.         # Scan for connected Devices
154.         DeviceList = OphirCOM.ScanUSB()
155.         #print(DeviceList)
156.         for Device in DeviceList: # if any device is connected
157.             DeviceHandle = OphirCOM.OpenUSBDevice(Device) # open first device
158.             exists = OphirCOM.IsSensorExists(DeviceHandle, 0)
159.             if exists:
160.                 # An Example for Range control. first get the ranges
161.                 ranges = OphirCOM.GetRanges(DeviceHandle, 0)
162.                 newRange = ranges[0] # [0] == AUTO ; [0]+3 == 30mW range
163.                 # set new range
164.                 OphirCOM.SetRange(DeviceHandle, 0, newRange)
165.                 OphirCOM.StartStream(DeviceHandle, 0) # start measuring
166.                 print('Ophir connected OK')
167.
168.                 # Measurement
169.                 sleep(5)
170.                 pow_set = []
171.                 I_set = []
172.                 i = 1
173.                 while laser_I <= laser_end:
174.                     arroyo.set_output_current(laser_I)
175.                     sleep(0.1)
176.                     #Lakeshore filtering
177.                     Bias_set = []
178.                     for i in range(Filt):
179.                         Bias_set.append(lake.voltA())
180.
181.                     I = -np.average(Bias_set)/R
182.                     sleep(st) #wait for power detector to stabilize
183.                     data = OphirCOM.GetData(DeviceHandle, 0)
184.                     if len(data[0]) > 0:
185.                         csv_file.write(str(data[0][0]*1000)+'\t' + str(I) + '\n')
186.                         pow_set.append(data[0][0]*1000)
187.                         I_set.append(I)
188.                         laser_I = laser_I + laser_step
189.                         if i<5:
190.                             sleep(1)
191.                             i=i+1
192.
193.
194.                 #Plots graph
195.                 plt.plot(pow_set,I_set)
196.                 plt.xlabel("Optical power (mW)")
197.                 plt.ylabel("Current (A)")
198.                 plt.ticklabel_format(axis='y',style='sci',scilimits=(0,0))
199.                 plt.grid()
200.                 # calculates responsitivity coefficient
201.                 x = np.asarray(pow_set)
202.                 y = np.asarray(I_set)
203.                 A = np.vstack([x, np.ones(len(x))]).T

```

```

204.             m, c = np.linalg.lstsq(A, y, rcond=None)[0]
205.             print('Coefficient ' + str(-m*1000) + 'A/W')
206.
207.             # code for erros
208.             else:
209.                 print('\nNo Sensor attached to {0} !!!'.format(Device))
210.         except OSError as err:
211.             print("OS error: {0}".format(err))
212.
213.         except KeyboardInterrupt:
214.             pass
215.         except:
216.             traceback.print_exc()
217.         finally:
218.             csv_file.close()
219.             arroyo.set_output_current(0)
220.
221.     def ResponsitivityVol(BATCH,Coordinates,D1,L1,R1,MaxV,cyclestep,lstart,lend,lstep,te
nma,lake,arroyo):
222.         voltage = 0 # voltage start, usually 0
223.         R_set = []
224.         koordin = Coordinates
225.         Vol_set = []
226.         D = D1 #in micrometers
227.         L = L1 #in micrometers
228.         R = R1 #used resistor in ohms
229.         Filt = 5 # filtering counts
230.         # PARAMETERS FOR RESPONSITIVITY aka 0==3
231.         maxvoltage = MaxV #maximum voltage in (V)
232.         cycle_step = cyclestep #voltage steps in (V)
233.         laser_startb = lstart #laser start current in (mA)
234.         laser_endb = lend #laser end current in (mA)
235.         laser_stepb = lstep #laser current step in (mA)
236.
237.         try:
238.             while voltage <= maxvoltage:
239.                 tenma.set_voltage(voltage)
240.                 tenma.set_output(1)
241.
242.                 laser_I = laser_startb
243.                 arroyo.set_output_current(laser_I)
244.                 arroyo.enable_LAS_output(1)
245.
246.                 #file creation
247.                 filename = koordin
248.                 mydir = os.path.join(\\Photodiodu matavimai\\'+BATCH+'\\Responsitivity\\
', datetime.now().strftime('%Y-%m-%d'))
249.
250.                 if not os.path.exists(mydir):
251.                     os.makedirs(mydir)
252.
253.                 filename = filename + '_' + datetime.now().strftime('%H-%M-%S') + '.txt'
254.                 date_time = datetime.now().strftime('%Y-%m-
%d') + ' ' + datetime.now().strftime('%H:%M:%S')
255.
256.                 #Writing info and cols names
257.                 csv_file = open(os.path.join(mydir,filename), 'w')
258.                 csv_file.write(koordin+'\n')
259.                 csv_file.write(date_time + '\tD: ' + str(D) + '\tL: ' + str(L) + '\tR: ' + s
tr(R) + '\tFiltering: ' + str(Filt) + '\tReverse Bias: ' + str(voltage) + '\n')
260.                 csv_file.write('Optical Power(mW)\tCurrent(A)\n')
261.
262.                 #Ophir power detector
263.                 try:
264.                     OphirCOM = win32com.client.Dispatch("OphirLMMeasurement.CoLMMMeasurem
ent")
265.
266.                     # Stop & Close all devices
267.                     OphirCOM.StopAllStreams()
268.                     OphirCOM.CloseAll()

```

```

268.         # Scan for connected Devices
269.         DeviceList = OphirCOM.ScanUSB()
270.         #print(DeviceList)
271.         for Device in DeviceList: # if any device is connected
272.             DeviceHandle = OphirCOM.OpenUSBDevice(Device) # open first device
273.             exists = OphirCOM.IsSensorExists(DeviceHandle, 0)
274.             if exists:
275.                 # An Example for Range control. first get the ranges
276.                 ranges = OphirCOM.GetRanges(DeviceHandle, 0)
277.                 newRange = ranges[0] # [0] == AUTO ; [0]+3 == 30mW range
278.                 # set new range
279.                 OphirCOM.SetRange(DeviceHandle, 0, newRange)
280.                 OphirCOM.StartStream(DeviceHandle, 0) # start measuring
281.                 sleep(5)
282.
283.                 #MEASUREMENT
284.                 pow_set = []
285.                 I_set = []
286.                 while laser_I <= laser_endb:
287.                     arroyo.set_output_current(laser_I)
288.                     #Lakeshore filtering
289.                     Bias_set = []
290.                     for i in range(Filt):
291.                         Bias_set.append(lake.voltA())
292.
293.                     I = -np.average(Bias_set)/R
294.                     sleep(st) #wait for power detector to stabilize
295.                     data = OphirCOM.GetData(DeviceHandle, 0)
296.                     if len(data[0]) > 0:
297.                         csv_file.write(str(data[0][0]*1000)+'\t' + str(I) +
'\n')
298.                         pow_set.append(data[0][0]*1000)
299.                         I_set.append(I)
300.                         laser_I = laser_I + laser_stepb
301.
302.                         #calculates responsitivity coeficient
303.                         x = np.asarray(pow_set)
304.                         y = np.asarray(I_set)
305.                         A = np.vstack([x, np.ones(len(x))]).T
306.                         m, c = np.linalg.lstsq(A, y, rcond=None)[0]
307.                         print('Coeficient ' + str(-
m*1000) + ' A/W'+ ' at reverse bias' + str(voltage))
308.                         R_set.append(-m*1000)
309.                         Vol_set.append(voltage)
310.
311.                 else:
312.                     print('\nNo Sensor attached to {0} !!!'.format(Device))
313.             except OSError as err:
314.                 print("OS error: {0}".format(err))
315.
316.             except KeyboardInterrupt:
317.                 pass
318.             except:
319.                 traceback.print_exc()
320.                 voltage = voltage + cycle_step
321.         except:
322.             print("error in measurement")
323.         finally:
324.             csv_file.close()
325.             arroyo.set_output_current(0)
326.             arroyo.enable_LAS_output(0)
327.             # Laser power OFF
328.             arroyo.set_output_current(0)
329.             arroyo.enable_LAS_output(0)
330.             #Plots graph
331.             plt.plot(Vol_set,R_set)
332.             plt.xlabel("Reversia Bias (V)")
333.             plt.ylabel("Responsitivity (A/W)")

```



```
334. plt.ticklabel_format(axis='y', style='sci', scilimits=(0,0))
335. plt.grid()
```