



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

KOMPIUTERIŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Giedrius Sinkevičius

POKELSO NARVELIŲ DAŽNINIŲ CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS
INVESTIGATION OF POCKELS CELL FREQUENCY RESPONSE CHARACTERISTICS

Baigiamasis magistro darbas

Kompiuterių inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H69001

Kompiuterių technologijos specializacija

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2017

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Elektronikos fakultetas Kompiuterių inžinerijos katedra	ISBN ISSN Egz. sk. Data-.....-.....
---	--

Antrosios pakopos studijų Kompiuterių inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas 4	
Pavadinimas	Pokelso narvelių dažninių charakteristikų tyrimas
Autorius	Giedrius Sinkevičius
Vadovas	Algirdas Baškys

Kalba: lietuvių

Anotacija Baigiamajame magistro darbe apžvelgti lazerio šviesos optiniai modulatoriai. Darbe tiriama elektrooptinis modulatorius, realizuotas naudojant Pokelso narvelį, pasižymintis dideliu optiniu kontrastu. Šviesos, sklindančios per Pokelso narvelį, poliarizacijos kampas yra keičiamas elektriniu lauku. Elektrinis laukas formuojamas naudojant aukštos įtampos impulsus, kurie yra tiekiami į tam skirtus Pokelso narvelio elektrodus. Aukštos įtampos impulsai Pokelso narvelyje sukelia pjezoelektrinį efektą, t. y. mechanines narvelio kristalo deformacijas. Dėl šios priežasties susidaro virpesiai, kurie blogina Pokelso narvelio pagrindinį parametą – optinį kontrastą. Baigiamajame magistro darbe tiriama Pokelso narvelio kristalų optinio kontrasto priklausomybė nuo aukštos įtampos impulsų dažnio įvairiems kristalo matmenims. Tyrimai atlikti su dviem elektrooptinėmis medžiagomis: kalio dideuterio fosfatu (DKDP) ir beta bario boratu (BBO). Ištirta Pokelso narvelio su DKDP kristalu pjezoelektrinių virpesių įtakos optiniam kontrastui priklausomybė nuo kristalo matmenų ir aukštos įtampos impulsų trukmės. Ištirtas pjezoelektrinių virpesių aktyvusis slopinimas. Ištirta Pokelso narvelio su BBO kristalu optinio kontrasto priklausomybė nuo aukštos įtampos impulsų amplitudės, kristalo ašies nuokrypio bei pozicijos. Darbą sudaro: 10 dalių: Įvadas; Literatūros apžvalga; Pokelso narvelis; Pokelso narvelių tyrimo stendo projektavimas; Valdymo programos kūrimas tyrimo stendui naudojant Labview paketą; Pokelso narvelių kontrasto tyrimas; Pokelso narvelių dažninių charakteristikų tyrimas; Pokelso narvelių temperatūrinių charakteristikų tyrimas; Išvados, Naudotos literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 56 p. teksto be priedų, 78 iliustr., 2 lent., 29 bibliografiniai šaltiniai. Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: Pokelso narvelis, elektrooptinis elementas, beta bario boratas, kalio dideuterio fosfatas, medžiagos kontrastas, dažninės charakteristikos, pjezoelektriniai virpesiai.
--

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Electronics Department of Computer Engineering	ISBN _____ ISSN _____ Copies No. Date-.....-.....
Master Degree Studies Computer Engineering study programme Master Graduation Thesis 4 Title Investigation of Pockels Cell Frequency Response Characteristics Author Giedrius Sinkevičius Academic supervisor Algirdas Baškys	
Thesis language: Lithuanian	
Annotation The optical modulators of laser light are reviewed. The electro-optical modulator based on the Pockels cell, which has high optical contrast ratio, has been investigated in the master thesis. The polarization angle of the light, which travels through the Pockels cell crystal, is controlled by the electric field that is produced using high-voltage pulses supplied to the Pockels cell. High-voltage pulses cause piezoelectric ringing, which reduces optical contrast ratio of the Pockels cell. The dependence of the contrast ratio of Pockels cell crystals on the high-voltage pulse frequency has been investigated in the work. Investigations were carried out with two electro-optical materials: potassium dideuterium phosphate (DKDP) and beta-barium borate (BBO). The impact of piezoelectric ringing on the optical contrast ratio for various crystal sizes and high-voltage pulse widths was investigated with DKDP Pockels cell crystals. The dependence of optical contrast ratio on the high-voltage amplitude, the crystal axis deviation and position were investigated for BBO Pockels cell crystals. Structure: Introduction; Literature review; Pockels cell; Pockels cells experimental set-up design; Program for Pockels cells frequency response characterization developed using LabVIEW platform; Investigation of Pockels cells frequency response characteristics; Investigation of Pockels cells temperature response characteristics; Conclusions; References. Thesis consist of: 56 pages text without extras, 78 pictures, 2 tables, 29 bibliographic entries. Appendixes included.	
Keywords: Pockels cell, electro-optical element, beta barium borate, potassium dideuterium phosphate, contrast ratio, frequency response, piezoelectric ringing.	

TURINYS

SANTRUMPOS	2
ĮVADAS	3
1. LITERATŪROS APŽVALGA	5
1.1. Lazerio šviesos išoriniai modulatoriai	5
1.1.1. Elektroabsorbcijos modulatorius	5
1.1.2. Akustooptinis modulatorius	6
2.1.3. Elektrooptinis modulatorius	7
2. POKELSO NARVELIS	10
2.1. Pokelso narvelio principas	10
2.2. Elektrooptinės medžiagos Pokelso narvelio realizavimui	11
3. POKELSO NARVELIŲ TYRIMO STENDO PROJEKTAVIMAS	16
4. VALDYMO PROGRAMOS KŪRIMAS TYRIMO STENDUI NAUDOJANT LABVIEW PAKETĄ	22
4.1 Naudojama įranga	22
4.2 Įrangos valdymas LabVIEW programa	22
5. POKELSO NARVELIŲ KONTRASTO TYRIMAS	27
6. POKELSO NARVELIŲ DAŽNINIŲ CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS	31
6.1. Kalio dideuterio fosfato pjezoelektrinių virpesių tyrimas	32
6.2. Beta Barium Borate pjezoelektrinių virpesių tyrimas	39
7. POKELSO NARVELIŲ TEMPERATŪRINIŲ CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS	49
IŠVADOS	54
NAUDOTOS LITERATŪROS SĄRAŠAS	55

SANTRUMPOS

λ – bangos ilgis

d – spindulio diametras

f – dažnis

f_c – centrinis dažnis

Δf – pralaidumas

V – akustinis greitis

L – sąveikaujantis elektrodo plotas

H – aktyvios diafragmos (elektrodo) aukštis

CR – kontrastas (ang. *contrast ratio*)

VCR – kontrastas esant įtampai (ang. *voltage contrast ratio*)

BBO – beta bario boratas

AOM – akustooptinis moduliatorius (ang. *acousto optic modulator*)

DKDP – kalio dideuterio fosfatas

AR – atspindžius mažinanti danga (ang. *anti-reflection coating*)

IVADAS

Lazerių pramonės rinka sparčiai plečiasi. Lazerinės sistemos tampa kompaktiškesnės, didėja vidutinė galia ir dažnis. Didelės galios lazerinės sistemos naudojamos apdirbant įvairias medžiagas. Lazerinių sistemų tobulinimas didina medžiagų apdirbimo greitį ir atveria galimybes naujų apdirbimo technologijų plėtrai.

Lazerių veikimas pagrįstas energijos kaupimu. Yra du veikimo tipai: nuolatinis ir impulsinis. Nuolatiname režime lazerio išspinduliuota šviesa yra tolygi laiko atžvilgiu. Impulsiniame režime generuojami šviesos impulsai, kuriems suformuoti naudojami optiniai modulatoriai. Šiais laikais labiausiai paplitę trijų tipų modulatoriai: akustooptiniai, sugerties ir elektrooptiniai. Magistriniame darbe tyriami elektrooptiniai modulatoriai, kurie veikia Pokelso efekto pagrindu (Novikov et al. 2016: 849–856) ir yra vadinami Pokelso narveliais.

Šviesa, sklindanti Pokelso narvelyje keičia poliarizacijos kampą, kuris tiesiškai priklauso nuo elektrinio lauko stiprio. Elektrinis laukas formuojamas naudojant aukštos įtampos impulsus, kurie yra tiekami į tam skirtus Pokelso narvelio elektrodus. Šviesos poliarizacijos fazės (pasukimo) kampas nulemtas aukštos įtampos impulsų amplitudės, o moduliacijos dažnis – impulsų dažniu. Kuo aukštesnis moduliacijos dažnis, tuo sudėtingiau užtikrinti elektrinio lauko stiprio stabilumą.

Elektrooptiniai kristalai, kurie yra naudojami Pokelso narvelių realizavimui, pasižymi pjezoelektriniu efektu, t. y. kristalas veikiamas aukštos įtampos impulsų pradeda mechaniškai deformuotis. Dėl šios priežasties susidaro virpesiai, kurie blogina Pokelso narvelio pagrindinį parametą – optinį kontrastą.

Yra pastebėta, kad pjezoelektrinio efekto įtaka optiniam kontrastui priklauso nuo Pokelso narvelio kristalo medžiagos ir aukštos įtampos impulsų dažnio. Tačiau ir kristaluose, pasižyminčiuose mažu pjezoelektriniu efektu, prie tam tikrų impulsų dažnių gali būti stebimi žymūs optinio kontrasto sumažėjimai. Tai nutinka tada, kai mechaninių virpesių ir aukštos įtampos impulsų dažniai sutampa.

Darbo tikslas – ištirti Pokelso narvelio, realizuoto naudojant beta bario borato (BBO) kristalą, kontrasto ir kristalo temperatūros priklausomybes nuo aukštos įtampos impulsų dažnio.

Darbo uždaviniai:

- Išanalizuoti Pokelso narvelių veikimo principus.
- Suprojektuoti Pokelso narvelių tyrimo stendą.
- Suprojektuoti valdymo programą tyrimo stendui, naudojant LabVIEW programos paketą.

- Išanalizuoti kontrasto pasiskirstymą kristalo darbiname paviršiuje, kai Pokelso narvelis nėra veikiamas elektrinio lauko.
- Ištirti Pokelso narvelio optinio kontrasto priklausomybę nuo aukštos įtampos impulsų amplitudės.
- Nustatyti Pokelso narvelio kontrasto priklausomybę nuo elektrinio lauko ir lazerio spindulio poliarizacijos krypties.
- Ištirti kontrasto pasiskirstymą kai Pokelso narvelį veikia elektrinis laukas.
- Ištirti Pokelso narvelių kontrasto priklausomybes nuo aukštos įtampos impulsų dažnio.
- Išanalizuoti Pokelso narvelių temperatūrines charakteristikas.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

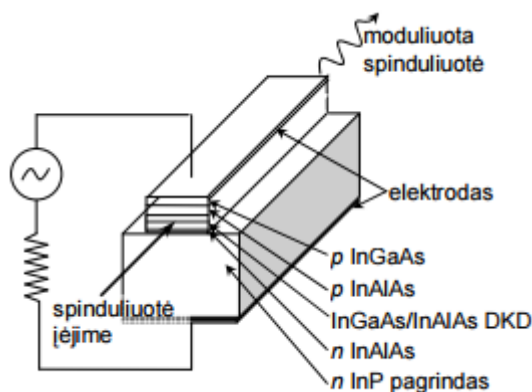
Šiais laikais, dėl padidėjusios paklausos bei technologinio progreso, kuris leidžia didinti lazerio išėjimo galią ir mažinti lazerio spinduliuojamos šviesos impulsų trukmes, sparčiai auga lazerinės įrangos gamyba. Lazeriai yra plačiai naudojami pramonėje ir moksliniams tyrimams.

1.1. Lazerio šviesos išoriniai modulatoriai

Išorinei lazerio šviesos moduliacijai naudojami šie modulatoriai: elektroabsorbcijos, akustooptinis ir elektrooptinis.

1.1.1. Elektroabsorbcijos modulatorius

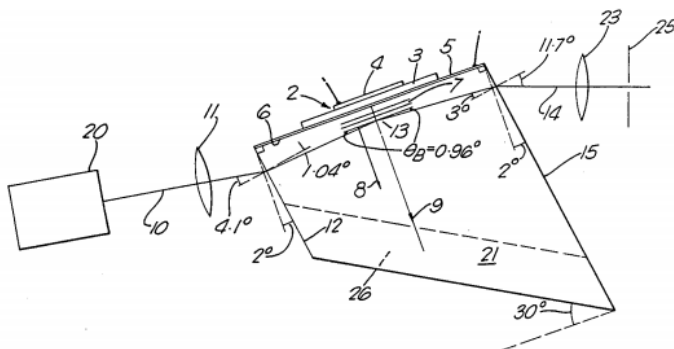
Elektroabsorbcijos modulatorius – puslaidininkinis elementas, skirtas lazerio spindulio intensyvumui valdyti (1.1 paveikslas). Veikimo principas paremtas Franz-Kelvyšo, Štarko (*Stark*) ir Vanje-Štarko (*Wannier-Stark*) elektrooptiniais efektais. Elektrinis laukas sugerties modulatoriuose sukuriama statmenai p-n sandūrai. Moduliuojamos spinduliuotės bangos ilgis turi būti arti sugerties krašto. Sugerties koeficientas priklauso nuo elektrinio lauko pokyčių – taip moduliuojama sklindanti spinduliuotė. Sugerta šviesa virsta fotosrove (Guina et al. 2003: 43).



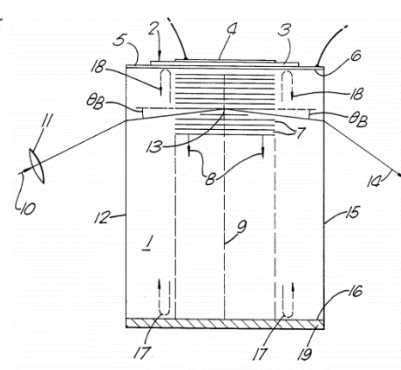
1.1 pav. Elektrooptinio sugerties modulatoriaus ir keterinio bangolaidžio darinys (S. Pralgauskaitė 2010)

1.1.2. Akustooptinis modulatorius

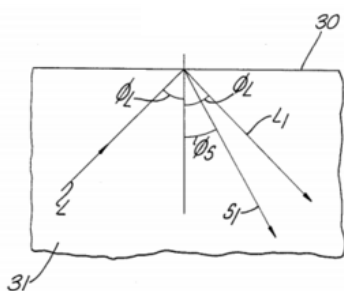
Akustooptinis modulatorius (AOM) sudarytas iš modulatoriaus valdymo bloko, kuris generuoja aukšto dažnio signalą, ir modulatoriaus, kuriame sukuriama akustinė banga. AOM veikimo analizei naudotas „Philips“ įmonės patentas (1.2–1.5 paveikslai) (Fox 1988).



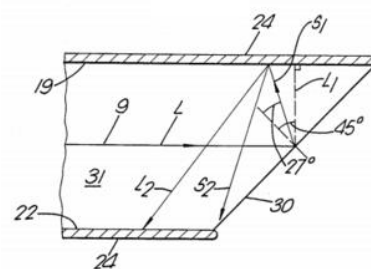
1.2 pav. AOM schema



1.3 pav. AOM vidaus sandara



1.4 pav. AOM vidaus sandara



1.5 pav. AOM vidaus sandara

Paveikslų 1.2–1.5 rodyklių paaiškinimai: 1 – monochromatinis germanio blokas; 2 – išilginis elektroakustinis keitiklis; 3 – pjezoelektrinė plokštelė; 4,5 – metalizuoti elektrodai; 6 – monochromatinio germanio bloko paviršius; 7 – lygiagrečiai keliaujančios akustinės bangos; 8 – išilginės akustinės bangos judėjimo kryptis; 9 – suformuojamos difrakcinės struktūros kelias; 10 – optinės radiacijos spindulys; 11 – lęšis; 12 – optinis šoninis monochromatinio germanio paviršius; 13 – regionas, sąveikaujantis su lazerio spinduliu ir akustine banga; 14 – moduluojamas spindulys; 15 – optinis šoninis monochromatinio germanio paviršius; 16 – tolیمasis bloko paviršius; 17, 18 – atspindėjusios akustinės bangos grįžimo kelias; 19 – akustinio slopintuvo paviršius; 20 – CO₂ lazeris; 21 – nupjautas modulatoriaus blokas; 22 – akustinio slopintuvo paviršius; 23 – lęšis; 24 – akustinis slopintuvas (ličio); 25 – diafragma; 26 – bloko pabaigos plokštuma, nupjauta; 27 – atspindėjusios akustinės bangos laipsnis; 30 – monochromatinio germanio bloko nupjovimo kampas; 31 – monochromatinio germanio blokas.

Išilginis elektroakustinis keitiklis, integruotas šalia pjezoelektrinės plokštelės. Jis suformuotas, pavyzdžiui, iš monokristalinio ličio niobato, abiejų pusių metalizuotas elektrodais ir yra pritaisytas prie monokristalio germanio bloko paviršiaus. Keitiklis pradamas virpinti atitinkamu aukšto pasikartojimo dažniu, pavyzdžiui, kelių MHz, sukuria lygiagrečias akustines bangas. Vidiniai kristalo stresai keičia kristalo lūžio rodiklį, kartu suformuojama difrakcinė struktūra, kuri kinta sklindant akustinei banga.

Sugeneruota akustinė banga, pasiekusi tolimesnį bloko paviršių, gali atsispindėti, todėl dalis bangos gali grįžti atgal į keitiklį. Kadangi banga grįžta priešinga kryptimi per sąveikaujančią plotą, ji gali išsklaidyti spindulį. Atsispindinti banga plėsis, kol bus pasiektas keitiklio paviršius. Užlaikytas signalas, kurio užlaikymas priklauso nuo atspindžių, nėra pageidaujamas, nes gali neigiamai paveikti moduliatoriaus darbą.

1.4, 1.6 paveiksluose pavaizduotas moduliatorius, kurio galinė siena yra padengta akustiniu slopintuvu, sumažinančiu akustinės bangos atspindėjimą. Germanio kristalo akustooptiniame moduliatoriuje akustiniams slopintuvams yra naudojamas indis ir švinas. Slopintuvams medžiagos pasirenkamos pagal medžiagų akustinę varžą.

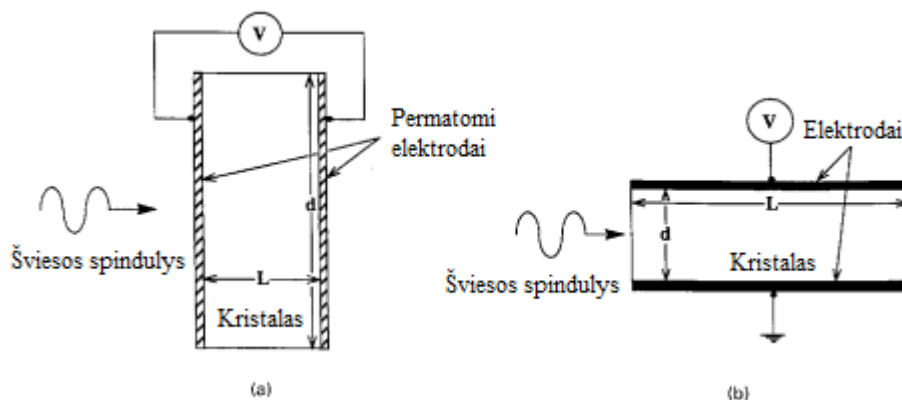
Norint sumažinti tiesioginį atspindėjimą nuo galinio paviršiaus, yra daromas nuolydis galiniame kristalo paviršiuje akustinės bangos atžvilgiu, kad akustinė banga būtų atspindėta į neoptinę bloko pusę, prie kurios yra pritvirtintas akustinis slopintuvas. Modeliuojant tokį kampą, svarbiausia atsižvelgti į tai, kad kampas nebūtų 45 laipsnių, nes tokiu atveju akustinė banga būtų nukreipta tiesiai į šoninį paviršių, o tai sukurtų idealias sąlygas kelių atspindžių akustinės bangos patekimui atgal į elektroakustinį keitiklį. Praktiškai paviršius būna nupjautas 30 laipsnių kampu, kad akustinė energija, kuri nebuvo sugerta akustinių slopintuvų būtų atspindėta nuo paviršių keletą kartų ir visiškai nusloptų.

1.3 paveiksle pavaizduotas akustooptinio moduliatoriaus schemos elementų išdėstymas. CO₂ lazeris generuoja lazerinę spinduliuotę, kurios bangos ilgis $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$, o spindulio skersmuo 2 mm. Germanio lęšis naudojamas fokusuojant spindulį, kad susidūrimo plote spindulio skersmuo būtų apie 200 μm , norint pasiekti mažesnės trukmės optinės moduliacijos impulsų frontus (Fox 1988).

2.1.3. Elektrooptinis moduliatorius

Elektrooptinis moduliatorius – elementas, naudojamas lazerinės šviesos šaltinio poliarizacijos kampo valdymui. Elektrooptiniai moduliatoriai skirstomi į dvi grupes: skersinius ir išilginius (1.7 paveikslas). Jeigu elektrinis laukas sukuriamas lygiagrečiai kristalo optinei ašiai, tai

bus išilginis elektrooptinis moduliatorius, jeigu statmenai – skersinis. Išilginiam elektrooptiniam moduliatoriui tam pačiam fazės pokyčiui sukurti reikia daug didesnės valdymo įtampos, nei skersiniam. Elektrooptinis kristalas, įmontuotas tarp dviejų elektrodų, todėl jį galima modeliuoti kaip kondensatorių (1.7 paveikslas).



1.7 pav. Skersinis (a) ir išilginis (b) elektrooptiniai moduliatoriai

Šviesos sklaidimo kryptis turi būti statmena kristalo darbiniam paviršiui, kad prijungus įtampą, būtų keičiama lazerio spindulio poliarizacijos fazė.

Skersinio elektrooptinio moduliatoriaus konfigūracijoje elektrinis laukas turi būti sukuriamas lygiagrečiai lazerio spindulio kryptčiai, įtampa prijungiama ties kristalo darbiniais paviršiais (1.7, a paveikslas). Elektrodai būna skaidrūs (paviršiai užgarinti medžiaga, kuri praleidžia lazerio spindulį ir yra laidūs, pavyzdžiui, metalo oksido dangos: SnO, InO, CdO) arba paliekama apartūra (laidininkas aplink kristalą). Išilginio elektrooptinio elemento fazės poslinkis skaičiuojamas pagal formulę:

$$\Gamma = \frac{\pi n_o^3 r_{63} E L}{\lambda}, \quad (1.1)$$

čia E – elektrinis laukas, L – kristalo ilgis, r_{63} – elektrooptinis koeficientas, n_o – įprastasis lūžio rodiklis, λ – bangos ilgis.

Formulėje matyti, kad fazės poslinkis priklauso nuo įtampos:

$$U = E * L. \quad (1.2)$$

Poliarizacijos pasukimas priklauso nuo įtampos, prijungtos prie elektrooptinio moduliatoriaus, kristalo ilgio ir lazerio šviesos bangos ilgio λ . Tokie kristalai formuojami didelio darbinio paviršiaus (apartūros) ir tinka didelės galios lazerinėse sistemose, kai lazerio šviesos intensyvumas paskirstomas per visą kristalo plotą, norint išvengti medžiagos pramušimo.

Išilginėje elektrooptinio moduliatoriaus konfigūracijoje (1.7, b paveikslas) įtampa turi būti prijungiama lygiagrečiai lazerio spindulio kryptčiai. Lazerio šviesa nesklinda per elektrodus

(priešingai nei skersinio elektrooptinio moduliatoriaus konfigūracijoje). Pasiekiamas didelis šviesos pralaidumas. Elektrinio lauko stiprumas kristalo medžiagoje aprašomas:

$$E = \frac{V}{d}. \quad (1.3)$$

Tarpas tarp elektrodų gali būti mažinamas, norint nekeičiant įtampos sustiprinti elektrinį lauką. Ilginant elektrodą taip pat stiprėja ir elektrinis laukas, dėl ko mažėja įtampos vertė, reikalinga šviesos, sklindančios per kristalą, poliarizacijai atitinkamu kampu pasukti. Mažinant atstumą tarp kristalų, didėja elektrooptinio elemento talpa, kuri ilgina elemento įsijungimo ir išsijungimo laikų trukmes.

Šviesa vienašiaame kristale per optinę ašį sklinda tuo pačiu faziniu greičiu, nepriklausomai nuo jos poliarizacijos krypties:

$$v_o = \frac{c}{n_o}, \quad (1.4)$$

čia n_o – aplinkos lūžio rodiklis, c – šviesos greitis, v_o – fazinis greitis.

Kuo terpė, kuria sklinda šviesa, yra optiškai tankesnė, tuo šviesos greitis mažesnis. Jei kristalas neturi simetrijos centro, išoriniame elektriniame lauke per šią ašį ortogonalios poliarizacijos krypčių bangų faziniai greičiai tampa skirtingi. Tokių bangų fazinių greičių skirtumas proporcingas lauko stipriui – tiesinis Pokelso reiškinys. Šis reiškinys neįvertinamas, todėl plačiai naudojamas aukšto dažnio šviesos moduliatoriams kurti. Elektrooptinių moduliatorių realizavimui naudojamos ličio niobato, kalio dideuterio fosfato, rubidžio titanilo fosfato ir beta bario borato medžiagos. Statmenai optinei ašiai išpjauta kalio dideuterio fosfato (DKDP) plokštelė elektriniame lauke dedama tarp sukryžiuotų poliarizatorių. Pokelso narvelio praleistos šviesos intensyvumas I priklauso nuo išorinio lauko stiprio U :

$$I = I_o \sin^2 \left(\frac{\pi U}{2U_{\lambda/2}} \right), \quad (1.5)$$

čia $U_{\lambda/2}$ – mažiausias stipris, kuriam ortogonalios poliarizuotų bangų fazių postūmis lygus π (Šalna 2004).

2. POKELSO NARVELIS

Plačiausiai lazerių sistemose yra naudojami elektrooptiniai modulatoriai paremti Pokelso efektu, kuris remiasi kristalinėse optinėse medžiagose pasireiškiančiu paprastuoju ir nepaprastuoju spindulio lūžio rodiklio pokyčiu, sukeliama išoriniu elektriniu lauku. Kristalas tarp paprastojo ir nepaprastojo spindulių sukuria fazės poslinkį. Šis pokytis yra proporcingas elektrinio lauko stipriui. Elektrooptinis efektas yra patogus būdas sklindančios spinduliuotės fazei ir intensyvumui kontroliuoti (Sirutkaitis et al. 2008).

2.1. Pokelso narvelio principas

Dėl Pokelso efekto išorinis elektrinis laukas keičia kristalo koeficientų vertes. Koeficientų verčių pokytis tiesiogiai proporcingas lauko stipriui kristalografinėmis kryptimis. Lūžio rodiklio pokyčio Δn ir išorinio elektrinio lauko priklausomybė išreiškiama trečio rango elektrooptiniu tenzoriumi r :

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^3 r_{ij} E_j, \quad (2.1)$$

čia r_{ij} – elektrooptiniai koeficientai, $i = 1, \dots, 6$ ir $j = 1, 2, 3$.

Tenzorių r sudaro 18 r_{ij} koeficientų, bet nepriklausomų r_{ij} elementų skaičius priklauso nuo kristalo simetrijos grupės. Medžiagos lūžio rodiklio anizotropinis pasiskirstymas užrašomas taip:

$$\left[\frac{1}{n_x^2} + \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_1\right] x^2 + \left[\frac{1}{n_y^2} + \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_2\right] y^2 + \left[\frac{1}{n_z^2} + \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_3\right] z^2 + 2\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 yz + 2\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 xz + 2\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 xy = 1. \quad (2.2)$$

Matyti, kad išorinis elektrinis laukas keičia medžiagos lūžio rodiklio elipsoido pagrindinių ašių vertes ir kartu sukuria papildomus skersinius lūžio rodiklio pokyčius xy, xz, yz ašyse. Šis elipsoidas keičia formą pagrindinių ašių kryptimis, o skersiniai lūžio rodiklio pokyčiai daro įtaką elipsoido sukimuisi erdvėje. Paveikus išoriniu elektriniu lauku E_0 , koordinatės x, y, z nesutampa su pagrindinėmis elipsoido kryptimis. Lūžio rodiklis pakinta x ir y kryptimis, dėl to kristale susidaro dvejopas lūžio rodiklis $\Delta n = n_o - n_e$. Kristalas tampa dviašiu, o spinduliuotės sklaidimo greitis priklauso nuo poliarizacijos (Sirutkaitis et al. 2008).

Optinis medžiagos kontrastas yra vienas iš pagrindinių Pokelso narvelio parametrų. Jis yra apibrėžiamas kaip naudingąjo ir nuostolingąjo lazerio šviesos intensyvumo verčių santykis. Kontrastas matuojamas, kai Pokelso narvelis yra tarp dviejų sukryžiuotų poliarizatorių [23] ir skaičiuojamas pagal formulę:

$$CR = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}, \quad (2.3)$$

čia $I_{\max}$ ir $I_{\min}$ – didžiausias ir mažiausias optinis išėjimo signalo intensyvumas.

Pokelso narveliams matuojami du kontrastai: kai į narvelio elektrodus yra tiekama įtampa ir kai įtampa yra netiekama. Kontrastas esant įtampai matuojamas tik esant standartinėms įtampos vertėms vadinamomis pusės bangos arba ketvirčio bangos įtampomis. Jos nurodo kokia įtampa reikalinga norint pasukti šviesos sklindančios per Pokelso narvelį fazę 45 arba 90 laipsnių kampų. Pusės bangos įtampa LiNbO_3 ir BBO Pokelso narvelių kristalams skaičiuojama taip (Mat Nashim et al. 2017: 9–20):

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda d}{2r_{ij}n_o^3l}. \quad (2.4)$$

Pusės bangos įtampa DKDP Pokelsų narvelių kristalams skaičiuojama (Andreev et al. 2011: 1219–1224):

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{2r_{ij}n_o^3}, \quad (2.5)$$

čia $U_{\lambda/2}$ – pusės bangos įtampa (V), n_o – įprasto atspindžio rodiklis, r_{ij} – elektrooptinis koeficientas ($\mu\text{m/V}$), λ – bangos ilgis (μm), d – atstumas tarp elektrodų, ir l – kristalo ilgis.

2.2. Elektrooptinės medžiagos Pokelso narvelio realizavimui

Pokelso narvelio realizavimui yra naudojami Kalio dideuterio fosfatas, beta bario boratas, rubidžio titanilo fosfatas ir ličio niobatas, pasižymintys Pokelso efekto savybe.

Ličio niobato (LiNbO_3) kristalas pasižymi maža sugertimi infraraudonųjų spindulių spektro ruože (2.1 lentelė). Slenkstinė pramušimo galia – 350 MW/cm^2 . Šis kristalas nėra higroskopiškas, todėl jam nebūtina papildoma apsauga nuo drėgmės, pasižymi stipriais pjezoelektriniais virpesiais, naudojamas iki 100 W vidutinės galios lazeriuose, kurių spindulio diametras $< 6 \text{ mm}$. Lyginant su kitais kristalais, reikalinga labai maža įtampa ($9 \times 9 \times 25 \text{ mm}$ matmenų kristalui, naudojant ties 1064 nm lazerio bangos ilgiu, norint šviesos poliarizaciją pasukti 45° , reikia $1,5 \text{ kV}$).

Kalio dideuterio fosfato (DKDP / KH_2PO_4) kristalas pasižymi maža sugertimi ultravioletinių, matomų ir netoli infraraudonųjų spindulių spektro ruože (2.1 lentelė). Slenkstinė pramušimo galia – 850 MW/cm^2 . Kristalas higroskopiškas ir turi būti apsaugotas nuo aplinkos

poveikio. Tai įgyvendinama sandariai uždariant kristalą narvelyje. Pokelso narvelio šonuose įtaisomi langeliai. Pokelso narvelis pripildomas skysčio, kurio medžiagos lūžio rodiklis būtų kuo artimesnis kristalo medžiagos lūžio rodikliui. Tokiu būdu išvengiama atspindžių nuo nupoliruotų paviršių. Kas pasižymi stipriais pjezoelektriniais virpesiais.

Rubidžio titanilo fosfato (RbTiOPO_4) kristalas pasižymi maža sugertimi matomų ir infraraudonųjų spindulių spektro ruože (2.1 lentelė). Slenkstinė pramušimo galia – 950 MW/cm^2 . Kristalas nėra hidroskopiškas, pasižymi labai silpnais pjezoelektriniais virpesiais, reikalauja nedidelės įtampos ($4 \times 4 \times 20 \text{ mm}$ kristalui ketvirčio bangos ilgio reikia mažiau nei 1 kV naudojant ties 1064 nm bangos ilgį).

Beta bario borato ($\text{BBO} / \text{BaB}_2\text{O}_4$) kristalas pasižymi maža sugertimi matomų ir netoli infraraudonųjų spindulių spektro ruože (2.1 lentelė). Kristalas yra mažai hidroskopiškas, pasižymi silpnais pjezoelektriniais virpesiais, reikalauja didesnės įtampos nei KD^*P ir RTP . Įtampa neturi viršyti 1 kV/mm tarp elektrodų, kitaip gali įvykti išlydis tarp elektrodų.

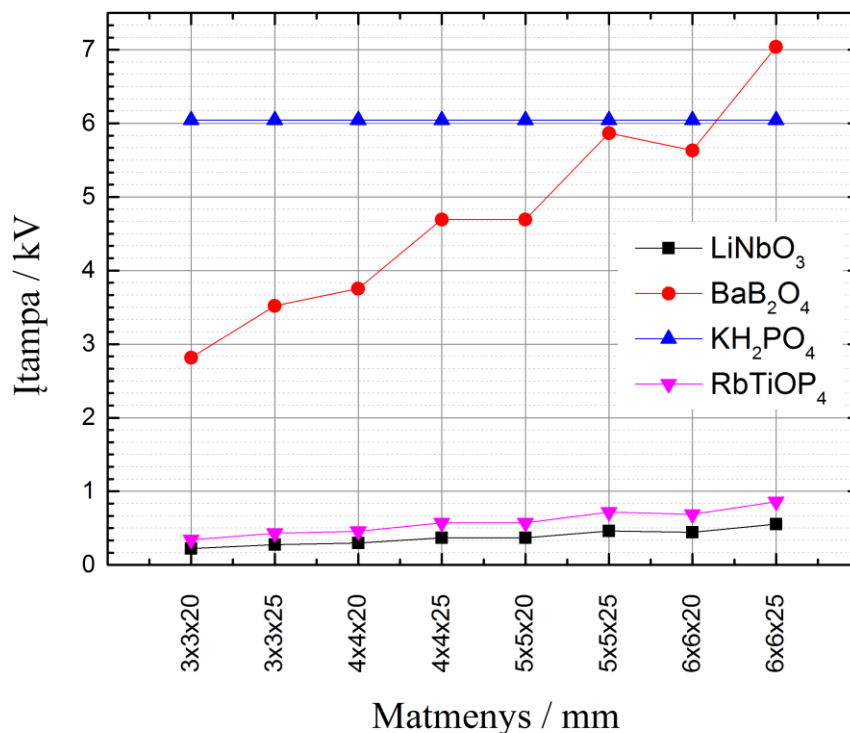
2.1 lentelė. Elektrooptinių elementų medžiagų parametrai

Medžiaga	Elektrooptinis koeficientas (pm/V)	Lūžio rodiklis @ 1064 nm	Specifinė varža (Ω/cm) @ 200°C	Optinis pralaidumas (μm)
LiNbO_3	$r_{13} = 10$ $r_{22} = 6,8$ $r_{33} = 32,2$ $r_{51} = 32$	$n_o = 2,2321$ $n_e = 2,1555$	2×10^{10}	0,85–3,5
BaB_2O_4	$r_{22} = 2,5$	$n_o = 1,6551$ $n_e = 1,5390$	$10,15 \times 10^8$	0,5–1,1
KH_2PO_4	$r_{63} = 26,4$	$n_o = 1,4938$ $n_e = 1,4599$	20×10^6	0,25–1,70
RbTiOPO_4	$r_{33} = 33$ $r_{13} = 10,9$ $r_{23} = 15$	$n_\alpha = 1,7710$ $n_\beta = 1,7770$ $n_\gamma = 1,8580$	1×10^{12}	0,35–4,5

(Carvajal et al. 2007: 116214; Zelmon et al. 1997: 3319; Zernike 1964: 1215; Zhang et al. 2000: 485–491; Sun E. et al. 2011: 549–552; Fedorov et al. 2002: 651; Mueller et al. 1988: 162–163)

Tiriamas Pokelso narvelis, realizuotais naudojant BBO ir DKDP medžiagų kristalus. BBO Pokelso narvelis yra išilginis elektrooptinis modulatorius. Ši medžiaga naudojama tada, kai reikia aukšto dažnio, nes pasižymi silpnu pjezoelektriniu efektu ir aukštu medžiagos kontrastu, bet yra mažos darbinio paviršiaus ploto.

Pasinaudojant pateikta informacija, galima apskaičiuoti Pokelso narvelio pusės bangos įtampą. BBO Pokelso narvelis bus naudojamas 1064 nm bangos ilgio lazeriu. Buvo skaičiuojama pagal kristalų dydžius: 3x3x20 mm, 3x3x25 mm, 4x4x20 mm, 4x4x25 mm, 5x5x20 mm, 6x6x20 mm, 6x6x25 mm. Suskaičiuota pusės bangos įtampa pasirinktiems kristalams pateikta 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Pokelso efektu pasižyminčių medžiagų pusės bangos įtampos priklausomybė nuo kristalo matmenų

Pastaba: KH₂PO₄ (DKDP) įtampos skaičiuotos 2.5 formule

Iš grafiko matyti, kad BBO kristalų pusės bangos įtampa labiausiai priklauso nuo kristalo matmenų, lyginant su kitų tipų Pokelso narvelių medžiagomis. DKDP pusės bangos įtampa nepriklauso nuo kristalo matmenų (Andreev et al. 2011: 1219–1224) (skaičiuotas kaip skersinis elektrooptinis moduliatorius, toks tipas naudojamas plačiausiai).

Pokelso narvelių dažninių charakteristikų tyrimo dažnių ruožas nuo 1 kHz iki 1 MHz. Norint žinoti reikalingos įrangos galią, reikia atsižvelgti į Pokelso narvelio vartojamą galią. Pokelso narvelis gali būti modeliuojamas kaip kondensatorius, todėl galima pasinaudoti formule:

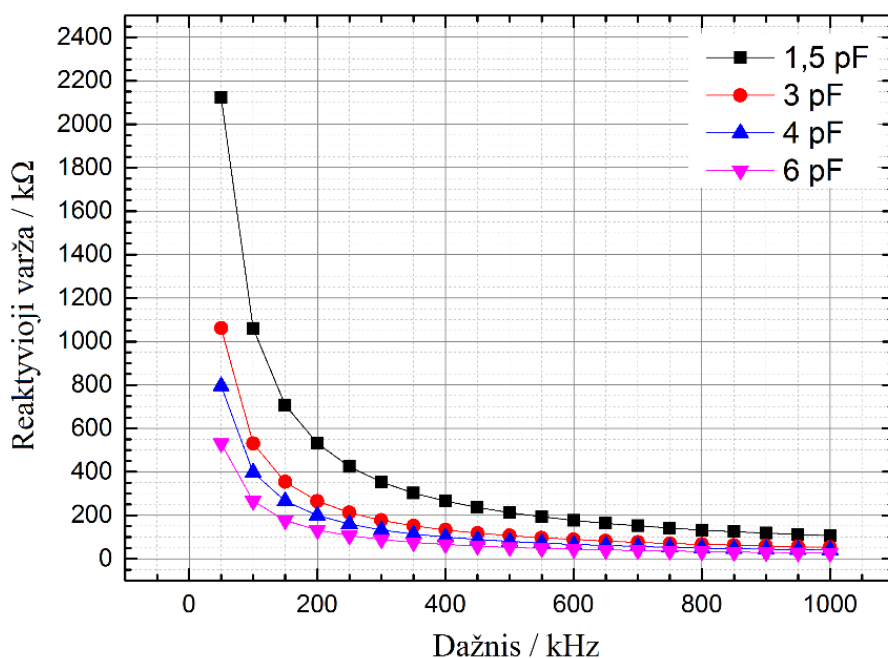
$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}, \quad (2.5)$$

čia X_c – reaktyvioji varža, f – pasikartojimo dažnis, C – talpa. Pokelso narvelių talpas pateikia jas gaminančios įmonės. Skirtingų modelių Pokelso narvelių parametrai nurodyti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. UAB „Eksma Optics“ siūlomų Pokelso narvelių parametrai

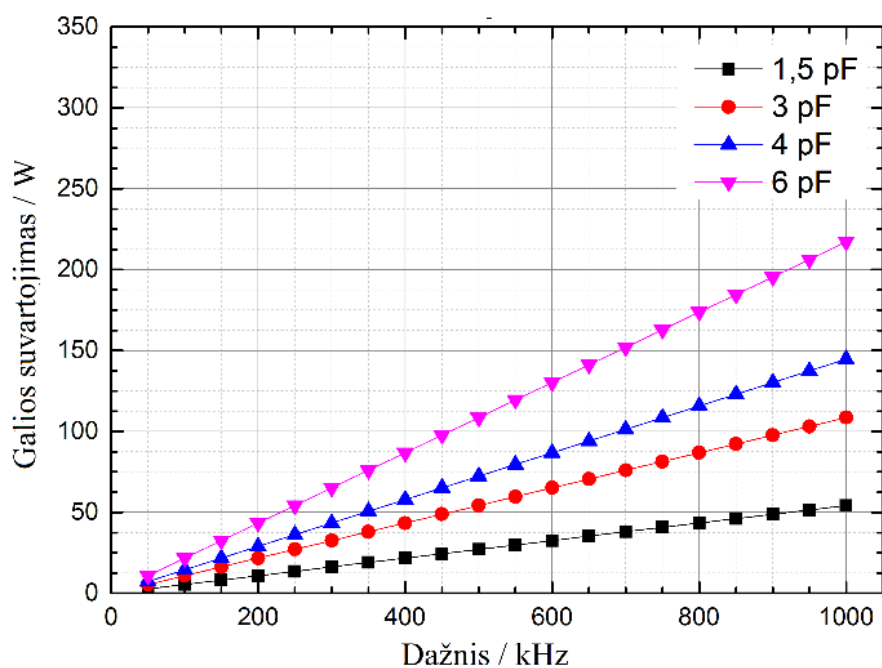
Pokelso narvelio modelis	Kristalų dydis, mm	Kristalų kiekis	Talpa, pF
PCB3S	3x3x20	1	4
PCB3D	3x3x20	2	6
PCB3S/25	3x3x25	1	4
PCB3D/25	3x3x25	2	6
PCB4S	4x4x20	1	3
PCB4D	4x4x20	2	6
PCK4	4x4x10	2	4
PCK6	6x6x10	2	6
D-Compact/ 9	Ø9x20	1	6
PC12SR	Ø12x24	1	6
PC5S	5x5x16	1	1,5

Žinodami Pokelso narvelių talpas galima apskaičiuoti apkrovos reaktyviąją varžą kiekvienam iš Pokelso narvelių skirtinguose dažniuose. Skaičiavimo rezultatai pateikti 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Pokelso narvelio reaktyviosios varžos priklausomybė nuo dažnio su skirtingomis talpomis

Pokelso narvelio suvartojamos galios priklausomybė nuo aukštos įtampos impulsų dažnio (2.3 paveikslas).

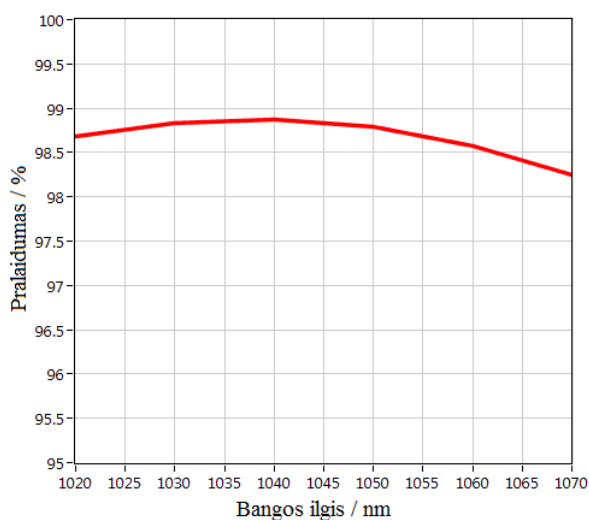


2.3 pav. Pokelso narvelio suvartojamos galios priklausomybė nuo dažnio skirtingoms narvelio talpoms

Iš rezultatų galima teigti, kad įrenginėjant stendą, reikia naudoti aukštos įtampos generatorių kurio galia viršytų 220 W, nes stendas bus ruošiamas darbui su įvairių matmenų ir medžiagų Pokelso narvelių kristalais.

3. POKELSO NARVELIŲ TYRIMO STENDO PROJEKTAVIMAS

Pokelso narvelių dažninių charakteristikų stendo projektavime numatomi kokie elementai tiriami ir pagal tai parenkama optinė schema. Pokelso narvelių paviršiai padengti daugiasluoksnėmis, skaidrinančiosiomis (angl. *anti-reflection*) dangomis. Pokelso narvelių pralaidumas ties 1064 nm bangos ilgiu > 99,5 %. Todėl lazerio spindulio energija yra efektyviau perduodama per optinę sistemą. Kitu atveju, dalis lazerio spindulio galios būtų prarasta atspindžiuose. Standartinio Pokelso narvelio pralaidumo grafikas pavaizduotas 3.1 paveiksle.

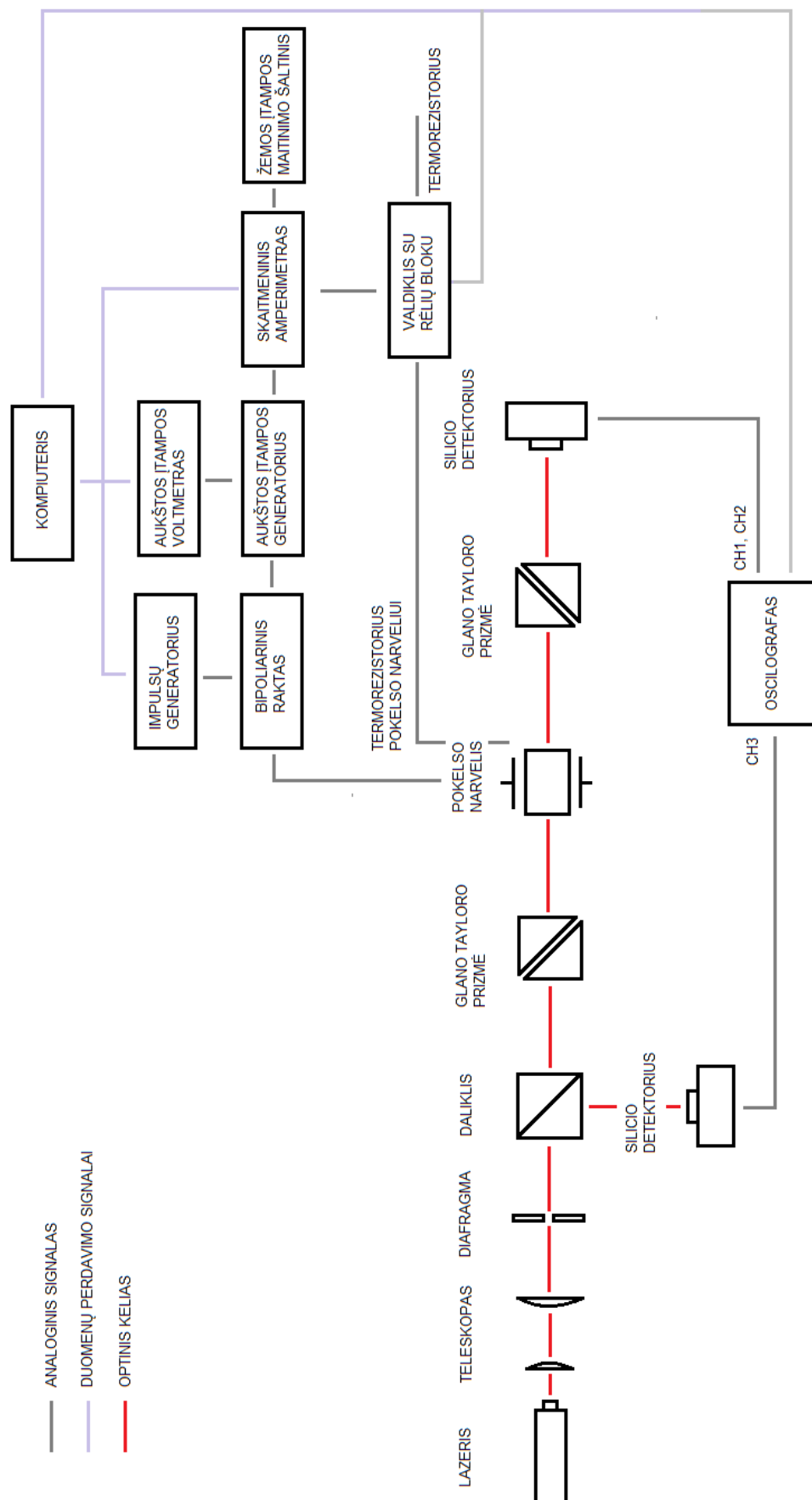


3.1 pav. Pokelso narvelio S/N 16.0376 pralaidumo priklausomybė nuo bangos ilgio

1064 nm bangos ilgio lazeris, kurio vidutinė galia siekia 2 W, naudojamas tyrimo stende (3.2 paveikslas). Jo šviesa sklinda į teleskopą, kuris išplečia spindulį 3 kartus ir sukolimuoja. Po Iris diafragmos gauname norimo diametro spindulį, mažiausias diametras 0,5 mm.

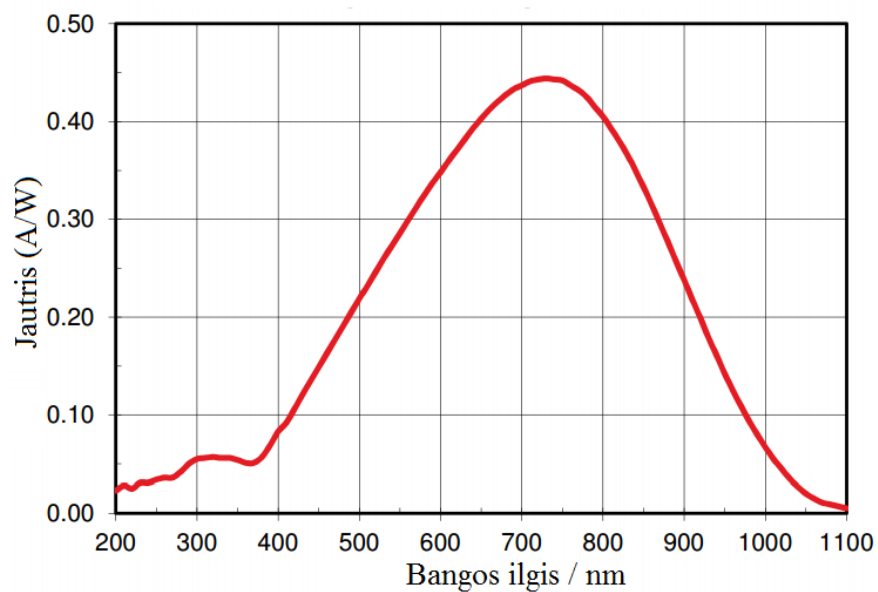
Pluošto daliklis pritaikytas 1064 nm bangos ilgiui, pusę įėjimo galios atspindi į šoninį kubo paviršių. Tai suteikia galimybę matuoti lazerio galią schemos įėjime silicio detektoriumi, kas leidžia sumažinti matavimo paklaidą, atsirandančią dėl lazerio intensyvumo svyravimo.

Pirmoji Glano-Tayloro prizmė pritaikyta 1064 nm bangos ilgiui, praleidžia p-poliarizaciją ir atspindi s-poliarizaciją. Antroji Glano-Tayloro prizmė praleidžia 90° pasuktą šviesos polarizaciją po Pokelso narvelio ir atspindi kitas dedamąsias.



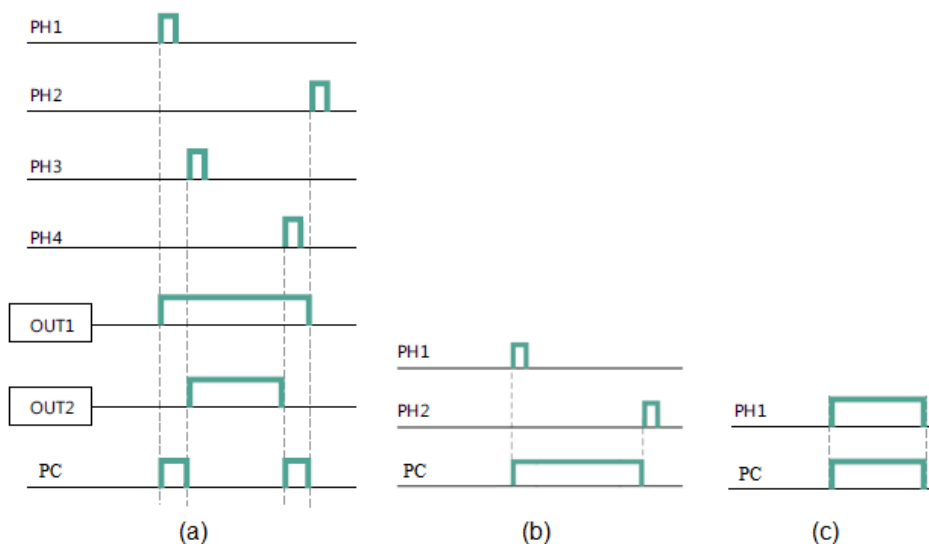
3.2 pav. Pokelso narvelių tyrimo stendo struktūrinė schema

Pokelso narvelio kristalas gali būti su prijungtu arba išjungtu elektriniu lauku. Nuo to priklauso už Pokelso narvelio išeinančios poliarizacijos vektoriaus dedamosios. Jeigu elektrinis laukas neprijungtas, poliarizacijos dedamosios nesikeičia ir antroji Glano-Tayloro prizmė tokią poliarizaciją atspindi. Į DET10A/M silicio detektorių (ThorLabs 2015) šviesa nepatenka ir detektoriuje fiksuojamas žemas signalo lygis. Detektoriaus jautrio priklausomybė nuo optinės bangos ilgio pavaizduota 3.3 paveiksle. Jeigu elektrinis laukas pridėtas prie Pokelso narvelio kristalo, poliarizacijos vektorių dedamosios pasukamos 90° . Tokios poliarizacijos šviesa praleidžiama Glano-Tayloro prizmės ir ji patenka į silicio detektorių. Matuojamas užfiksuotos šviesos intensyvumas.



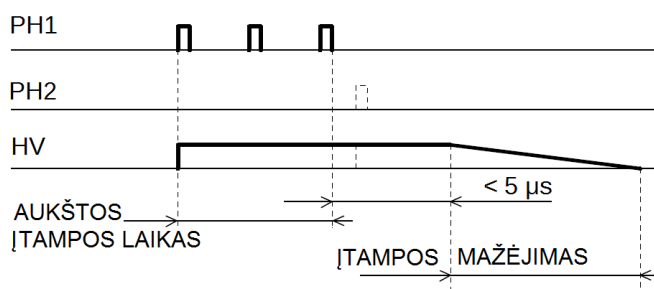
3.3 pav. Detektoriaus DET10A/M jautrio priklausomybė nuo optinės bangos ilgio

Kompiuteris siunčia komandas į BNC 575 impulsų generatorių (BNC) naudojant CAN protokolą. Komandos keičia generatoriaus išėjimo impulsų plotį, dažnį bei kanalų užlaikymo trukmes vienas kito atžvilgiu. Tokie parametrai reikalingi aukštos įtampos bipoliarinio rakto valdymui (Ekspla; Melnikov et al. 2011: 1–5; Melnikov et al. 2013: 425–428). Valdymo impulsai bipoliariniam raktui suformuojami pagal 3.4,b paveiksle nurodytą diagramą.



3.4 pav. Pokelso narvelio bipoliarinio rakto valdymo impulsai

Keičiant vėlinimo trukmes tarp impulsų generatoriaus kanalų PH1, PH2, PH3 ir PH4 nustatoma aukštos įtampos impulso trukmė bipoliarinio rakto išėjime, sukurianti elektrinį lauką Pokelso narvelyje. Aukštos įtampos raktas generuoja impulsus, kurių trukmė nuo 130 ns iki 5 μ s. Norint suformuoti ilgesnės trukmės impulsus, naudojamas regeneracinis metodas (3.5 paveikslas).

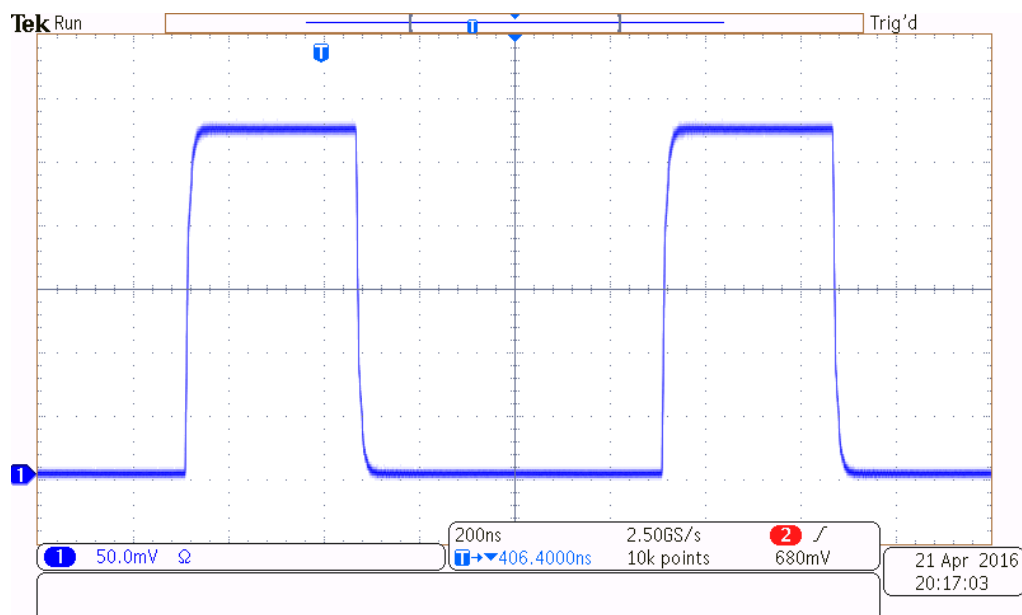


3.5 pav. Aukštos įtampos rakto regeneracinis metodas

Kadangi bipoliarinio rakto išėjime po 5 μ s aukštos įtampos lygis pradeda mažėti, nusiunčiame dar vieną atidarymo impulsą, norint pratęsti aukštos įtampos trukmę išėjime. Tokiu metodu galima aukštos įtampos impulso trukmę didinti neribotai.

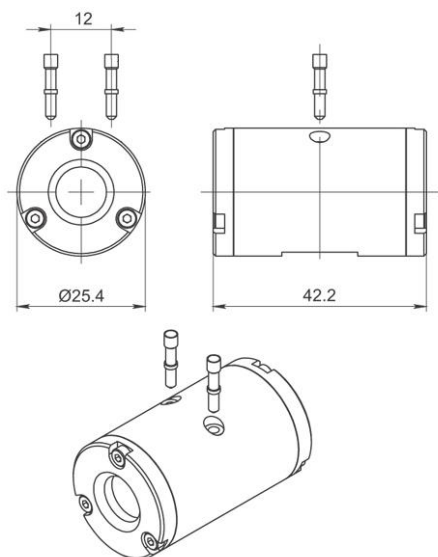
Aukštos įtampos maitinimo šaltinis, pasirinktas pagal anksčiau atliktus skaičiavimus, maitinamas iš žemos įtampos šaltinio. Stebimi aukštos įtampos šaltinio srovė ir įtampa. Valdiklis matuoja Pokelso narvelio vidinę temperatūrą matavimo metu bei stebi aplinkos temperatūrą. Pokelių narvelių temperatūros fiksavimas gali padėti rūšiuoti Pokelso narvelius pagal šilumos išsiskyrimą ir ieškoti sprendimo būdų šilumos išsiskyrimui mažinti.

Oscilografas „Tektronix MSO4104B“ registruoja silicio fotodiodo išėjimo signalą. Elektros signaluose pavaizduotas optinių šviesos impulsų intensyvumas (3.6 paveikslas).

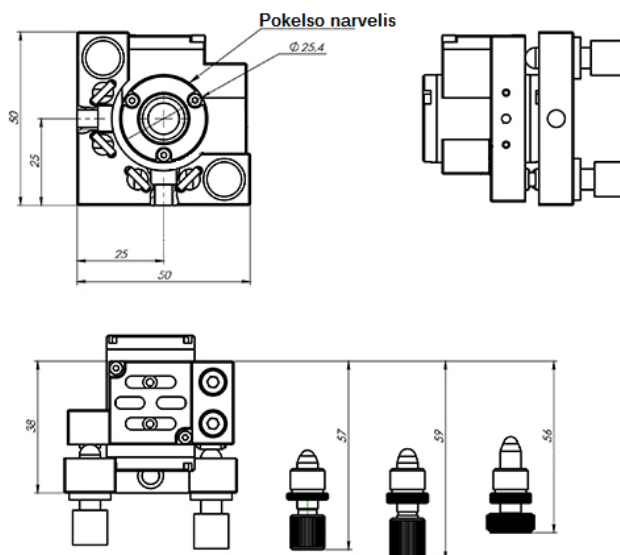


3.6 pav. Pokelso narveliu suformuoti optiniai impulsai, užfiksuoti detektoriumi DET10A/M.

Norint sujustiruoti Pokelso narvelį (3.7 paveikslas), į kristalą įeinanti šviesos poliarizacija turi būti lygiagreti arba statmena elektrodams. Jeigu narvelis išstatomas neteisingai, Pokelso efekto naudingumas (kontrastas) mažėja. Pokelso narvelio justiravimui naudojamo laikiklio brėžinys pateiktas 3.8 paveiksle.



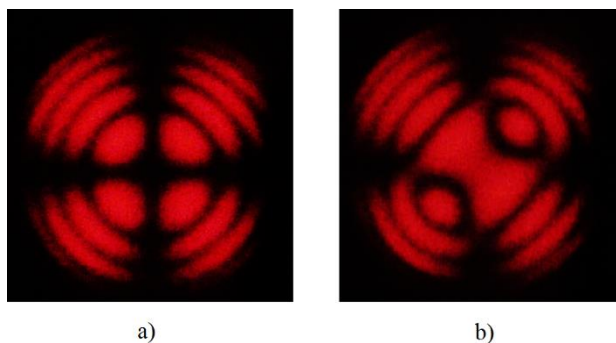
3.7 pav. Pokelso narvelio brėžinys



pav. 3.8 Pokelso narvelio laikiklio brėžinys

Norint tinkamai sujustiruoti Pokelso narvelį, lazerio spindulys turi sklirti per narvelio centrą neliesdamas apartūrų. Padedamas pažymimas lazerio spindulio centras. Žymeklis nėra nejudinamas. Pokelso narvelio išlygiavimui reikalingi poliarizatoriai, sukryžiuoti 90° kampu vienas

kito atžvilgiu. Prieš Pokelso narvelį pastatyta barstančioji (skaidri matinė) plokštelė, ant vizualizatoriaus matyti konoskopinė figūra (ang. *isogyre*) (Punin et al. 2005: 297–307) (3.9 paveikslas). Kryžiaus centras išlygiuotas ties lazerio spindulio centru (tašku, kuris pažymėtas ant vizualizatoriaus). Tai įgyvendinama orientuojant Pokelso narvelį išilgai, naudojant reguliavimo varžtus. Prie Pokelso narvelio prijungus aukštą įtampą, matoma kaip keičiasi konoskopinė figūra (3.9 paveikslas) (Robert 2009).



3.9 pav. Pokelso narvelio konoskopinės figūros: a) kuomet įtampa 0 V; b) kuomet įtampa 4,4 kV

Pokelso narvelio konoskopinės figūros skirsis priklausomai nuo kristalo optinės ašies kampo. Jeigu naudojamos kitos medžiagos kristalai, konoskopinė figūra gali būti kitokios formos.

4. VALDYMO PROGRAMOS KŪRIMAS TYRIMO STENDUI NAUDOJANT LABVIEW PAKETĄ

LabVIEW programos paketas – tai integruota grafinio programavimo aplinka paruošta inžineriniam darbui.

4.1 Naudojama įranga

Startavus programą atliekama naudojamų prietaisų patikra:

- BNC 575 impulsų generatoriaus;
- Tektronix MDS3014 oscilografo;
- Arduino Nano mikrovaldiklio modulio;

BNC 575 impulsų generatorius suderinamas su bipoliariniu raktu ir generuoja 4.4 paveiksle pavaizduotus valdymo impulsus.

4.2 Įrangos valdymas LabVIEW programa

Siunčiamos konfigūracinės komandos į impulsų generatorių, norint paruošti aukštos įtampos bipoliarinį raktą valdymui:

- :PULSE0:ICLOCK:MODE\sINT – darbo metu naudosime vidinį impulsų generatoriaus laikrodį;
- PULSEx:CMOD\sNORMAL – kanalai dirbs normaliu (pasikartojančių impulsų) režimu (x – įrašomi kanalų numeriai);
- :PULSEx:WIDT\s120e-09 – nustatomi impulsų pločiai (pagal naudojamo bipoliarinio rakto specifikacijas, valdymo impulsai turi būti > 100 ns)
- :PULSE0:STATE\sOFF – įsitikinama, kad impulsų generatorius sustabdytas.

Nurodomas matavimo pavadinimas (jis toliau bus naudojamas kaip pavadinimas išsaugotiems duomenims) ir nurodoma vieta kur bus saugomi duomenys 4.1 paveikslas.

Measurement name

Save path

Set

4.1 pav. Matavimo pavadinimas ir duomenų saugojimo adresas

Programoje nurodytos parametrų tyrimo pasirinktys. Keičiame dažnį, impulsų plotį arba dirbama 50% periodo režimu (4.2 paveikslas).

Increasing/Decreasing parameter

Frequency

Constant pulse width

200 ns

Measure temperature

Yes

Channels

4

Set

4.2 pav. Programos pasirinktys

Nurodžius kintantį parametą, reikia įvesti nekintančio parametro reikšmę (impulso plotis arba dažnis). Papildoma pasirinktis leidžia išjungti arba įjungti temperatūros registravimą bei pasirinkti bipoliarinio rakto valdymo kanalų kiekį. UAB „Ekspla“ siūlo 1,2,4 kanalų bipoliarinius raktus, kurių valdymo impulsų diagramos pavaizduotos 3.4 paveiksle. Programa paruošta visų tipų bipoliariniams raktams.

Sekančiame nustatymų lange pasirenkami mažiausias ir didžiausias dažnis (arba impulso plotis) kuriame atliksime matavimą (4.3 paveikslas).

Min frequency: 10 kHz

Max frequency: 40 kHz

Times cycled: 3

Cycle mode: Increasing/decreasing

Set

4.3 pav. Didžiausio ir mažiausio dažnio/impulso pločio pasirinktys

Nustatymuose yra numatytas parametras matavimo pakartojimui. Jis nurodo kiek kartų bus atliktas matavimas prieš visiškai sustabdant sistemą. Viena iš pasirinkčių nustato, ar bus dažnis (arba impulsų plotis) didinamas nuo minimalios nurodytos iki maksimalios nurodytos vertės ir po to mažinamas iki minimalios vertės. Tai yra numatyta norint iširti ar matuojami parametrai kinta darbo metu.

Nustatomas dažnio žingsnis, žingsnio trukmė ir kiek kartų vienam žingsnyje fiksuojamos imtys (4.4 paveikslas).

Frequency step: 10 kHz

Step every: 300 ms

Sample in frequency: 10

Set

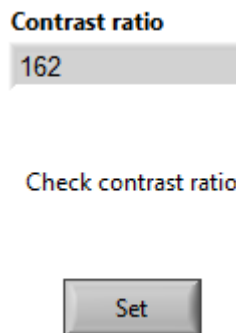
4.4 pav. Matavimo parametrai

Nuspaudus „Set“ mygtuką, priklausomai nuo matuojamo parametro komandos nusiunčiamos į BNC 575 impulsų generatorių. Programos lange galimi šie pasirinkimai:

- Dažnis:
 - :PULSE1:DEL\s0 – pirmo kanalo užlaikymo trukmė, formuojanti aukštos įtampos atidarymą. Nustatomas 0;
 - :PULSE2:DEL\sX – antro kanalo užlaikymas, formuojantis aukštos įtampos uždarymą, nustatomas pagal įvedamą reikšmę (X);
 - :PULSE0:STATE\sON – įjungiamas impulsų generavimas.

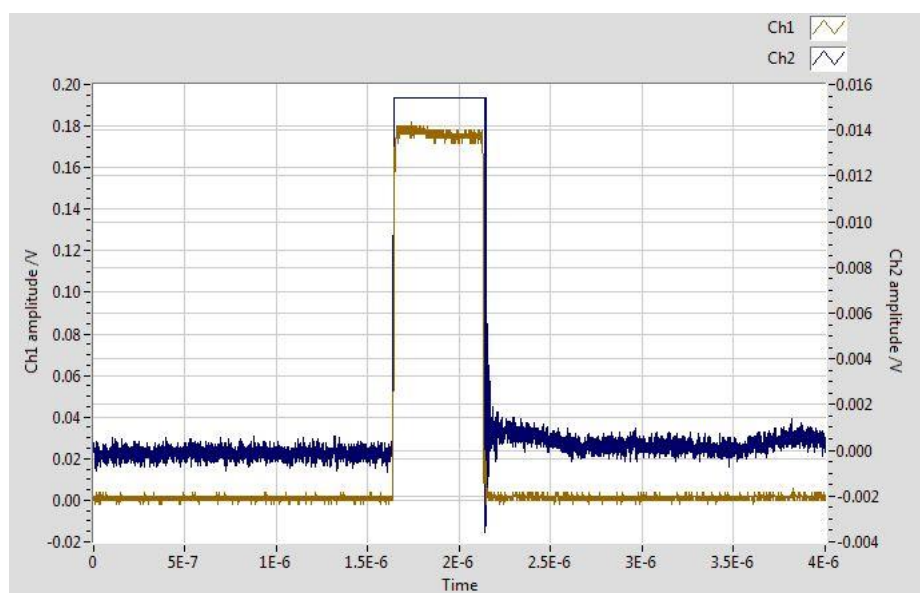
- Impulsų plotis:
 - :PULSE0:PER/sX – nustatoma periodo trukmė (X – įvedama reikšmė);
 - :PULSE0:STATE\sON – įjungiamas impulsų generavimas.

Impulsų generatorius įjungiamas ir sekančiam lange (4.5 paveikslas) matomas Pokelso narvelio kontrastas veikiant mažiausiu nustatytu dažniu. Reguluojant Pokelso narvelio laikiklio (3.8 paveikslas) reguliavimo varžtus, randama didžiausia Pokelso narvelio kontrasto vertė. Nuspaudus „Set“ mygtuką (4.5 paveikslas) pradedamas matavimas.



4.5 pav. Kontrastas Pokelso narvelio kalibracijai

Pokelso narvelis dirba mažiausiu nustatytu dažniu. Oscilogramoje (4.6 paveikslas) abiejų kanalų impulsai yra persidengę. Tai tas pats optinis impulsas dviejuose skirtinguose kanaluose. To reikia norint gauti didesnę optinio signalo skiriamąją gebą, esant mažoms amplitudės vertėms. Kontrasto matavimo tikslumas, stipriai priklauso nuo minimalios intensyvumo vertės matavimo paklaidos.



4.6 pav. Pokelso narveliu suformuotas optinis impulsas, užfiksuoti detektoriumi DET10A/M, pavaizduotas LabVIEW programos lange.

Kontrastas skaičiuojamas surenkant detektoriaus signalo reikšmių masyvą laiko intervaluose nuo 0,5 μ s iki 1,5 μ s ir nuo 2,5 μ s iki 3,5 μ s ir apskaičiuojant masyvo vidurkį. Taip gaunama mažiausia signalo vertė Pokelso narvelio kontrasto skaičiavimui. Impulso viršūnės masyvo vidurkis, fiksuojamas kaip didžiausia signalo vertė kontrasto skaičiavimui.

Suskaičiuojamos imtys per kurias bus keičiamas dažnis/impulsų plotis, pagal įvestus duomenis. Kiekvienos imties metu išsaugojami šie parametrai:

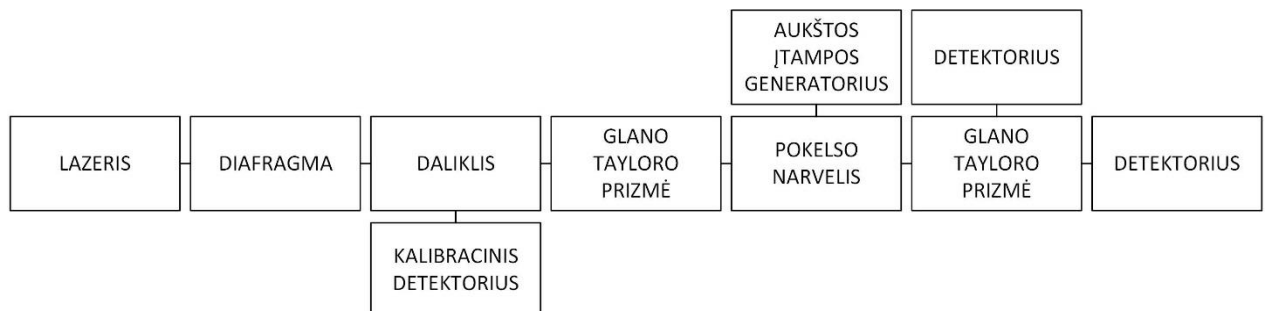
- Matavimo laikas;
- Imtis;
- Dažnis;
- Pokelso narvelio kontrastas;
- Lazerio galia;
- Maitinimo šaltinio suvartojama srovė;
- Aukštos įtampos generatoriaus išėjimo amplitudė;
- Kambario temperatūra.

Kiekvieną kartą keičiant dažnį, papildomai išsaugoma:

- Pokelso narvelio temperatūra;
- Impulsų oscilograma.

5. POKELSO NARVELIŲ KONTRASTO TYRIMAS

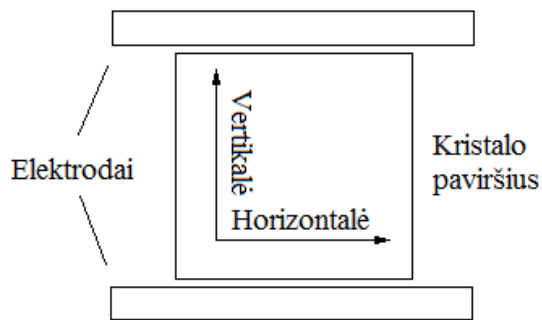
Pokelso narvelių kontrasto tyrimo stendas yra sudarytas iš helio-neono lazerio (spindulio diametras 1,5 mm), diafragmos su 1 mm skersmens skyde, nepoliarizuojančio pluošto daliklio, dviejų tarpusavyje sukryžiuotų Glano-Tayloro prizmių, Pokelso narvelio, aukštos įtampos generatoriaus ir trijų detektorių. Lazerio šviesa spinduliuojama per diafragmą, kuri užtikrina, kad spindulio diametras būtų 1 mm. Nepoliarizuotas pluošto daliklis dalina lazerio spindulio intensyvumą per pusę, viena spindulio dalis nukeliauja į kalibracinį detektorių, kita – į Glano-Tayloro prizmę. Kalibracinis detektorius skirtas lazerio galios svyravimams kompensuoti. Į Glano-Tayloro prizmę patenkanti lazerio spindulio p-polarizacija nufiltruojama, o s-polarizacija praleidžiama ir keliauja į Pokelso narvelį. Jeigu prie Pokelso narvelio neprijungta aukšta įtampa, spindulio poliarizacija nepasikeičia, o s-polarizacija yra atspindėta į šoninį detektorių. Jeigu aukšta įtampa prijungta prie Pokelso, iš Pokelso išeina p-polarizuota šviesa, kuri keliauja pro Glano-Tayloro prizmę ir pataiko tiesiai į priešais esantį detektorių. Pokelso narvelis įdėtas į dviejų ašių pozicionavimo laikiklį. Visi trys detektoriai tiesiškai stiprina signalą. Žinant kiekvienos poliarizacijos intensyvumą, galima apskaičiuoti Pokelso narvelio kontrastą (2.3 formulė).



5.1 pav. Pokelso narvelio kristalo kontrasto matavimo stendas

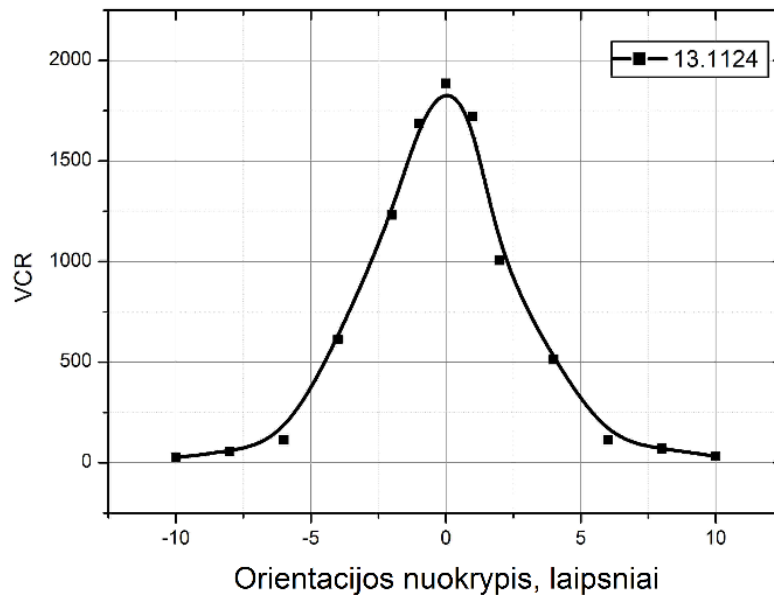
Kiekvienam Pokelso narveliui matuojami du kontrastai: be įtampos (ICR) ir esant įtampai (VCR). Pokelso narvelis išstatomas pagal 3 skyriuje nurodytą metodiką.

Tyrimas atliktas keičiant lazerio spindulio poziciją, vertikalčiai ir horizontalčiai į Pokelso narvelio kristalą, statmenai darbiniam paviršiui (5.2 paveikslas). Fiksuojant I_{min} ir I_{max} (2.3 formulė) bei vertikalės ir horizontalės koordinatas, atlikti ICR ir VCR matavimai.



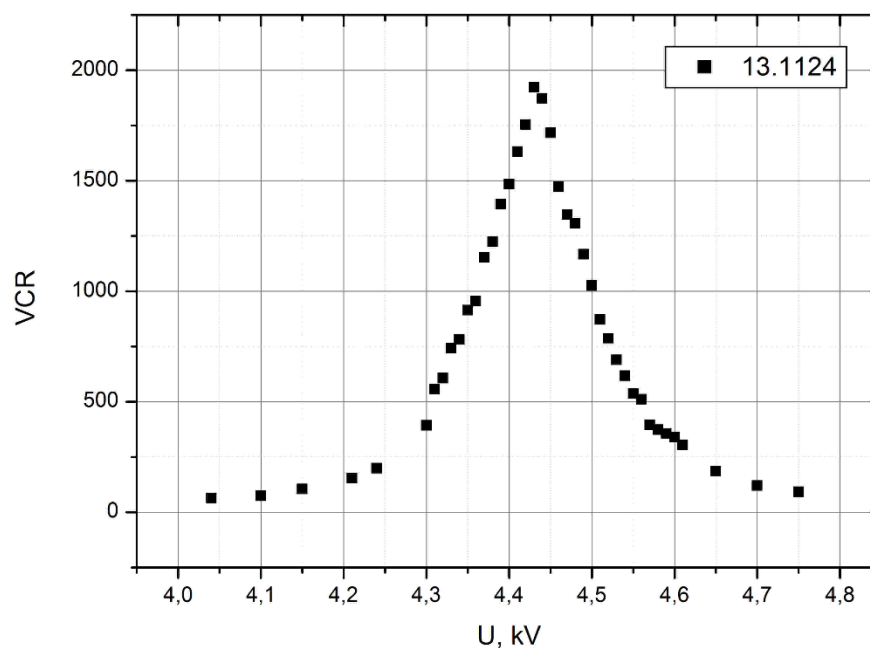
5.2 pav. Lazerio pozicionavimas į kristalo paviršių.

Norint rasti geriausią $\lambda/2$ įtampos kontrastą, reikia įsitikinti, kad lazerio poliarizacija yra statmena arba lygiagreti elektriniam laukui. Tai daroma suskaičiavus įtampą pagal aukščiau nurodytą 2.4 formulę. Gauta reikšmė – $U_{\lambda/2} = 4,345 \text{ kV}$. Buvo išmatuota kontrasto priklausomybė nuo Pokelso narvelio orientacijos nuokrypio, sukant narvelį aplink optinę ašį (5.3 paveikslas).



5.3 pav. Eksma optics S/N 13.1124 Pokelso narvelio kontrasto priklausomybė nuo orientacijos nuokrypio

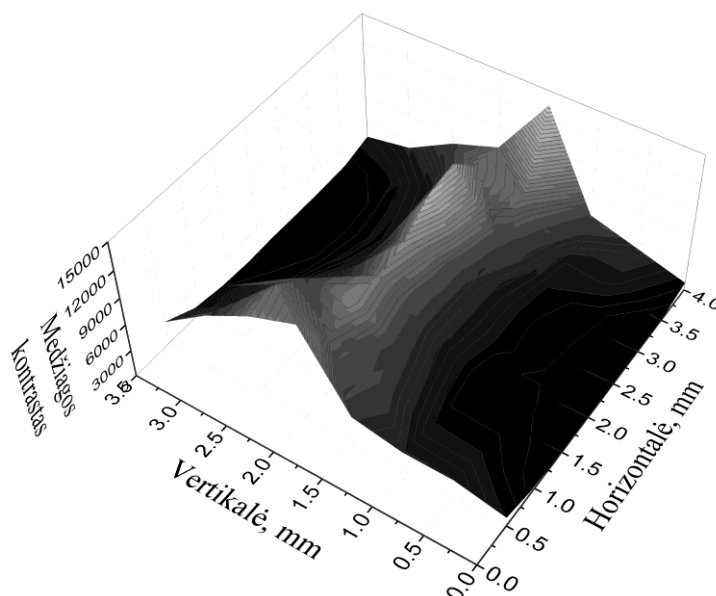
Nustačius Pokelso narvelio orientacijos nuokrypį į poziciją su didžiausiu kontrastu, keičiama įtampa nuo 4,05 kV iki 4,75 kV. Fiksuotos kontrasto vertės (5.4 paveikslas) (G. Sinkevičius et al. 2016).



5.4 pav. Eksma optics S/N 13.1124 Pokelso narvelio VCR priklausomybė nuo įtampos ties 1064 nm bangos ilgiu

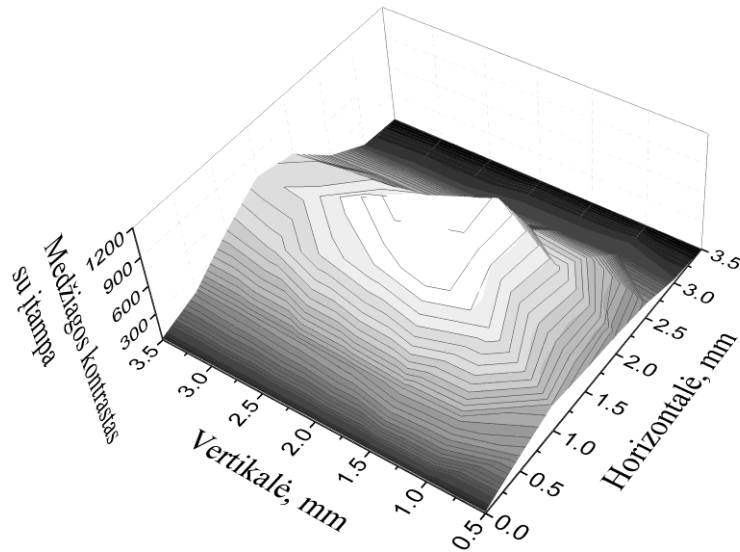
Iš grafiko matyti, kad didžiausias kontrastas gaunamas ties 4,43 kV, o ne ties mūsų suskaičiuota verte. Taip galėjo nutikti dėl kristalo matmenų paklaidų, netolygiai padengto ant kristalo šoninio paviršiaus elektrodo ar kristale esančių priemaišų.

Teisingai pozicionuojant narvelį pagal optinį kryžių, įsitikinama, kad lazeris kerta Pokelso narvelio kristalus per centrą. Keičiant koordinates, fiksuojamos medžiagos kontrasto vertės (įtampa netiekama). Gautas kontrasto intensyvumo grafikas (5.5 paveikslas).



5.5 pav. Pokelso narvelio kontrasto (įtampa netiekama) priklausomybė nuo įeinančio į kristalą lazerio spindulio pozicijos

Nustačius įtampą, kai yra didžiausias kontrastas, keičiamos vertikalios ir horizontalios Pokelso narvelio pozicijos bei fiksuojamos kontrasto vertės (5.6 paveikslas).

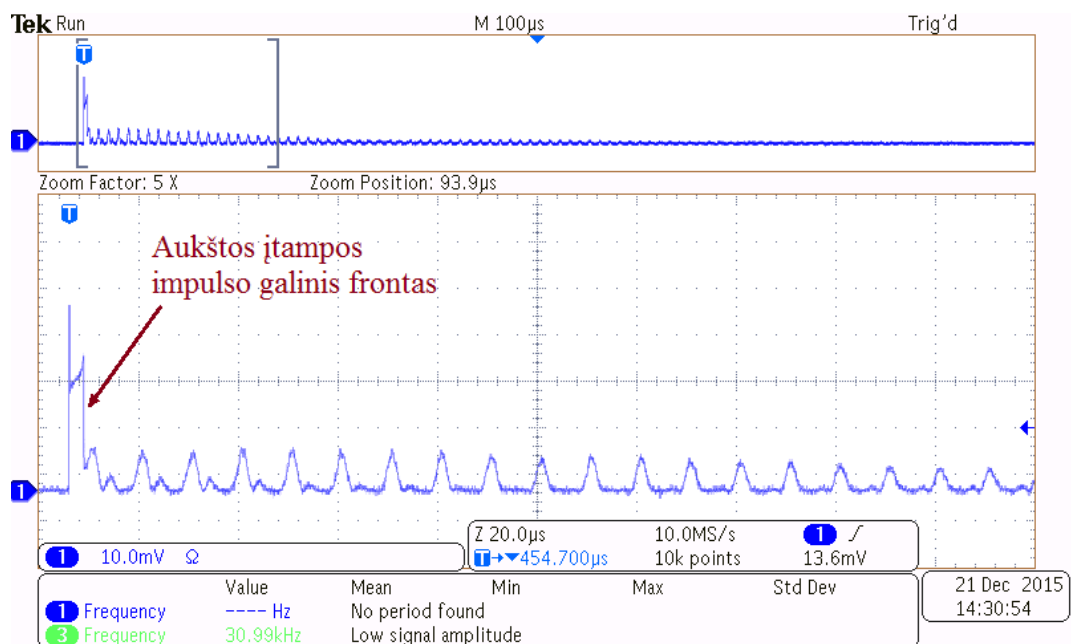


5.6 pav. Medžiagos kontrasto pasiskirstymas Pokelso narvelyje esant pusės bangos įtampai

Grafike matyti, kad Pokelso narvelio medžiagos kontrasto esant įtampai pasiskirstymas yra kitoks, nei kontrasto be įtampos. Didžiausi kontrastai yra ties centrine linija statmenai elektrodams. Taip yra todėl, kad elektrinis laukas statmenas centre ir užsilenkia ties kristalo šonais. Pokelso efektas optimaliai veikia tada, kai į kristalą įeinančio lazerio spindulio poliarizacija yra statmena elektriniam laukui. Kitu atveju – kontrastas mažėja. Šis tyrimas pagrindžia Pokelso narvelio naudojimą, kuomet per elektrooptinį elementą šviesa pereina kelis kartus (Maji et al. 2012: 1079–1081). Tai leidžia sumažinti pusės bangos įtampos reikalavimą, keliamą Pokelso narveliui.

6. POKELSO NARVELIŲ DAŽNINIŲ CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS

Atliktas įvairių Pokelso narvelio medžiagų kontrasto priklausomybių nuo aukštos įtampos impulsų, tiekiamų į narvelį, dažnio, tyrimas. DKDP medžiaga, kaip minėta anksčiau, pasižymi stipriais, o BBO kristalas silpnais pjezoelektriniais virpesiais. Šis efektas turi stiprų poveikį kuomet Pokelso narvelis yra veikiamas pasikartojančių aukštos įtampos impulsų. 6.1 paveiksle pavaizduota Tektonix MDO3000 oscilograma, kurioje matomi pjezoelektriniai virpesiai veikiantys lazerio spindulio intensyvumą. Pjezoelektriniai virpesiai nėra pageidautini, nes kaip matyti iš 6.1 paveikslo, virpesiai keičia per Pokelso narvelį sklindančios šviesos poliarizacijos kampą, todėl matome virpesius net po aukštos įtampos impulso galinio fronto (kuomet Pokelso narvelis jau nėra veikiamas elektrinio lauko).

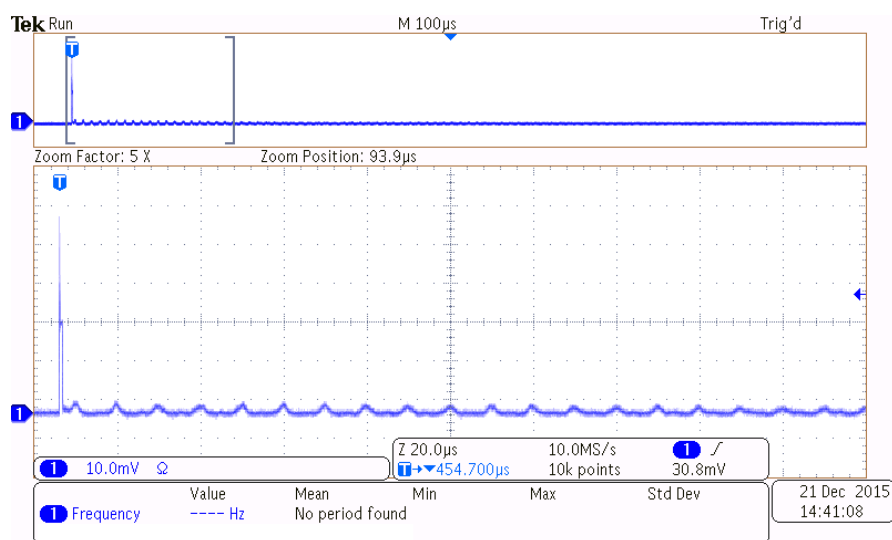


6.1 pav. Pokelso narvelio su DKDP kristalu pjezoelektrinių virpesių oscilogramos

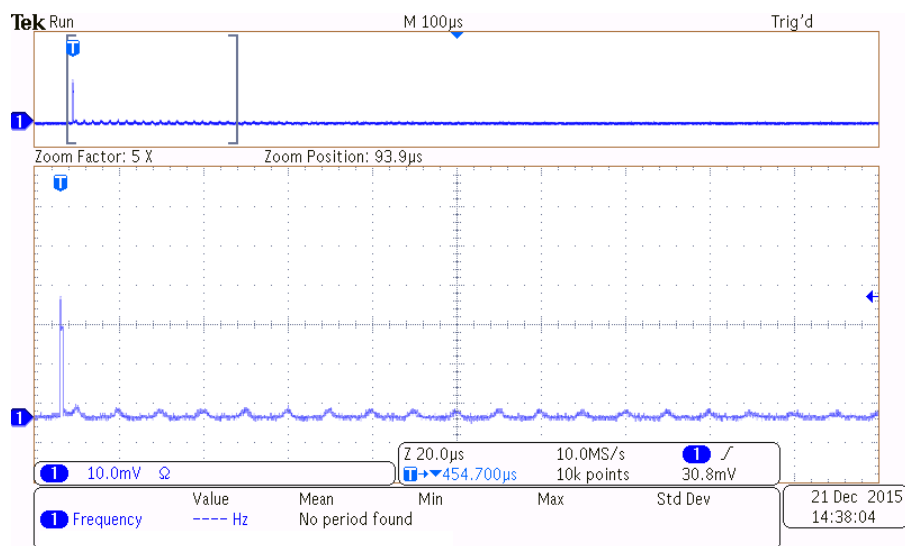
Pjezoelektriniai virpesiai pasireiškia tuomet, kai Pokelso narvelis su DKDP kristalu yra veikiamas stačių frontų didelės amplitudės impulsais (6 kV per 6 ns). Fiziškai kristale yra sužadinami mechaniniai virpesiai – susitraukimo ir išsiplėtimo efektas. Pjezoelektriniai virpesiai atsiranda po kiekvieno impulso frontų. Šiuos virpesius galima slopinti papildomai suderinus impulsą, kuris sektų po pirmojo, kurio tikslas – kompensuoti pjezoelektrinius virpesius.

6.1. Kalio dideuterio fosfato pjezoelektrinių virpesių tyrimas

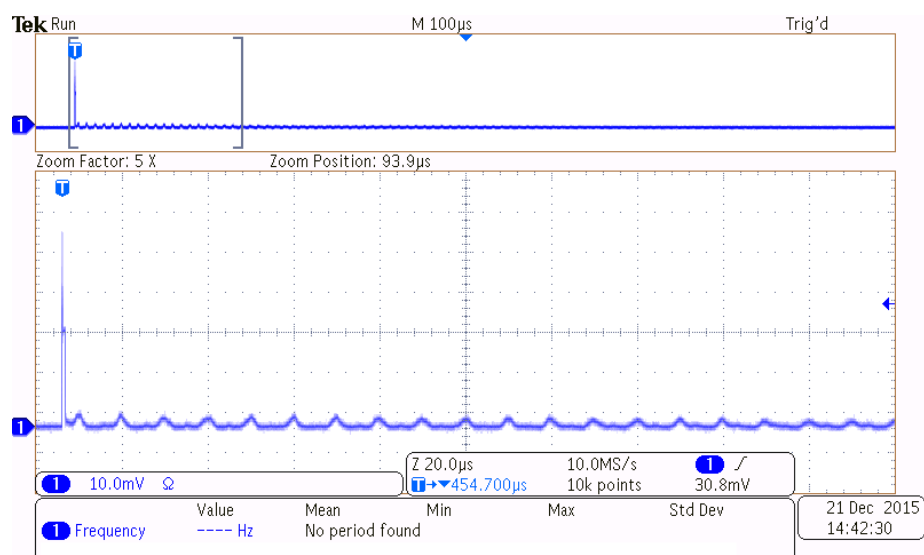
Pirmoje tyrimo dalyje, tiriamo medžiagą, kurioje pasireiškia stiprūs pjezoelektriniai virpesiai. Eksperimento metu naudojama 3.2 paveiksle nurodyta optinė schema. Schemoje pavaizduotas aukštos įtampos generatorius dirba impulsiniu režimu. Keičiant aukštos įtampos impulsų plotį ir dažnį, stebimi silicio detektoriaus parodymai (6.2–6.5 paveikslai). Jame idealiau atveju matomi tokios pačios trukmės ir dažnio impulsai kaip ir aukštos įtampos generatoriaus išėjime.



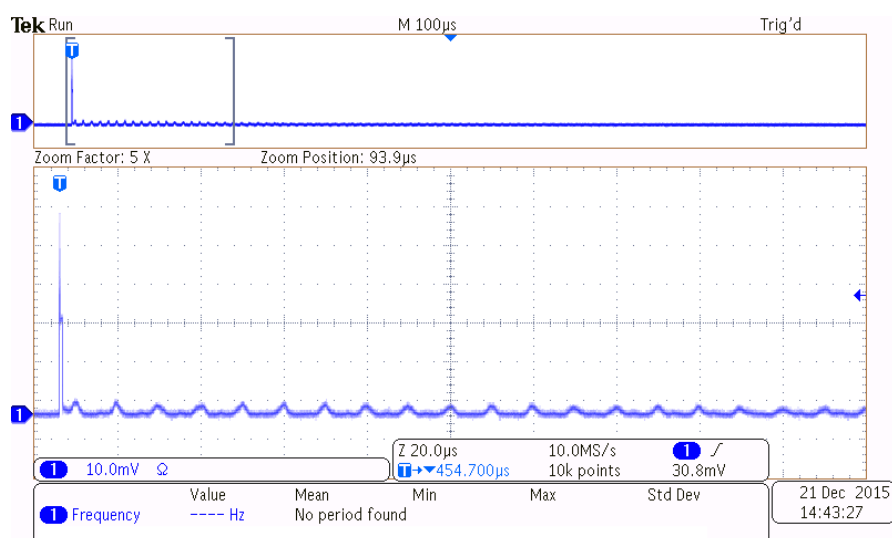
6.2 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 700 ns, dažnis 100 Hz



6.3 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 700 ns, dažnis 300 Hz



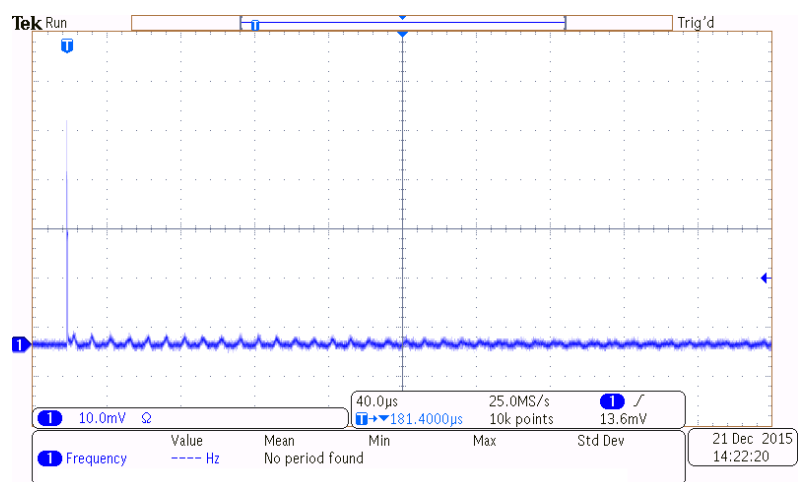
6.4 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 700 ns, dažnis 700 Hz



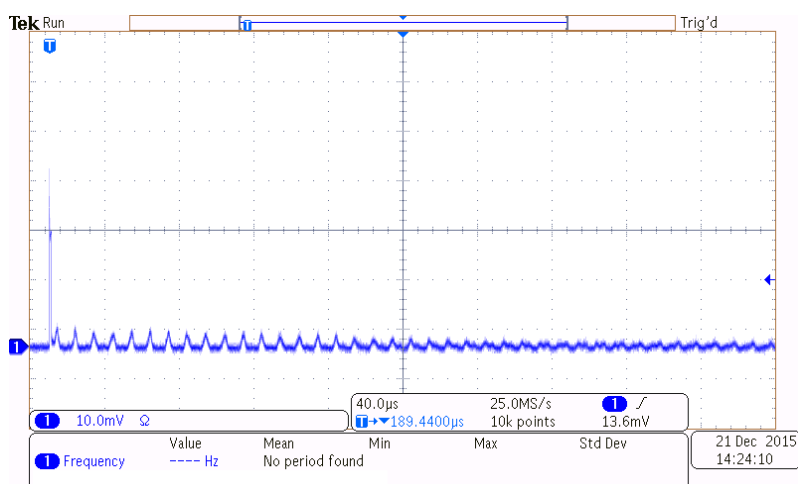
6.5 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 700 ns, dažnis 1 kHz

Pirmo tyrimo metu keičiamas pasikartojimo dažnis ir fiksuojamas optinis signalas (6.2–6.5 paveikslai). Oscilogramose matomas 700 ns impulsas ir jį sekanti pjezoelektrinių virpesių seka, kuri trunka apie 0,4 ms. Keičiant dažnį, nėra matoma akivaizdžių kitimų virpesiuose. Galima teigti, kad dažnių diapazone 1 Hz–1 kHz pjezoelektrinių virpesių amplitudė Pokelso narvelyje su DKDP kristalu nepriklauso nuo dažnio.

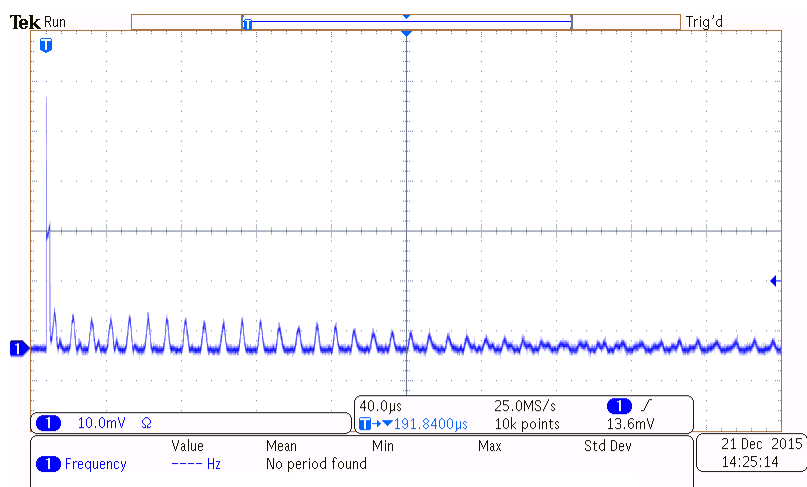
Antroje tyrimo etapo eigoje, keičiamas impulsų plotis ir fiksuojamas optinis signalas (6.6–6.9 paveikslai).



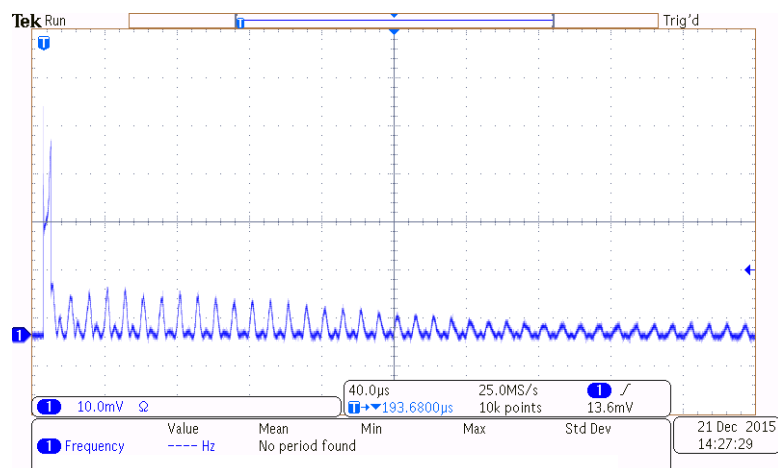
6.6 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 500 ns



6.7 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 1 µs

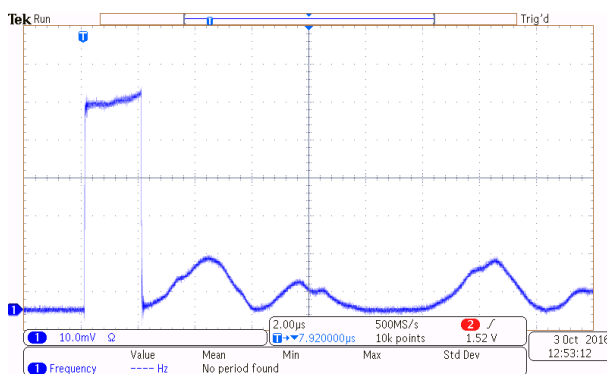


6.8 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 2 µs

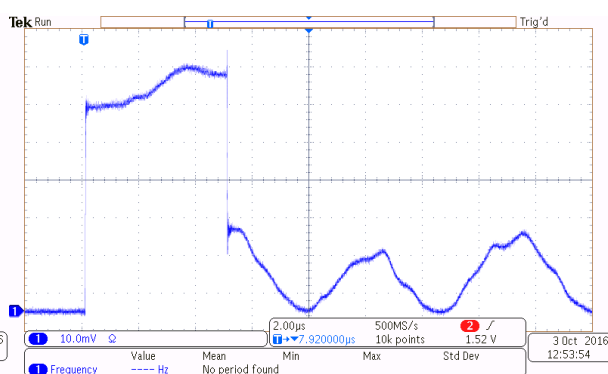


6.9 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 4 μ s

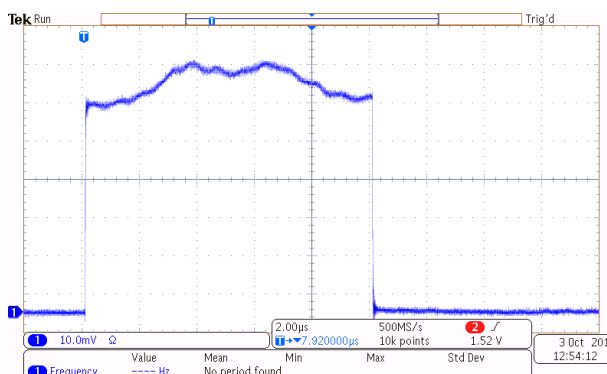
Oscilogramose (6.6–6.9 paveiksai) matomi impulsai ir juos sekančių pjezoelektrinių virpesių seka. Virpesių amplitudės kinta. Iš gautų rezultatų galima teigti, kad kuo didesnis impulso plotis, tuo stipresni pjezoelektriniai virpesiai. Jeigu aukštos įtampos impulso plotis ir pjezoelektrinio virpesio harmonikų periodas sutampa, tuomet pjezoelektriniai virpesiai už impulso galinio fronto tampa nykstamai maži (6.10–6.14 paveiksai).



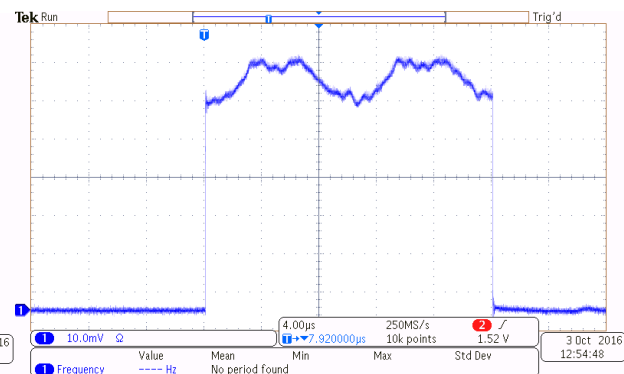
6.10 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 2 μ s



6.11 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 5 μ s



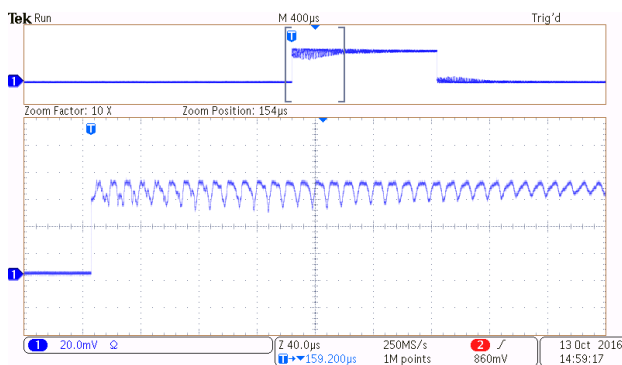
6.12 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 10 μ s



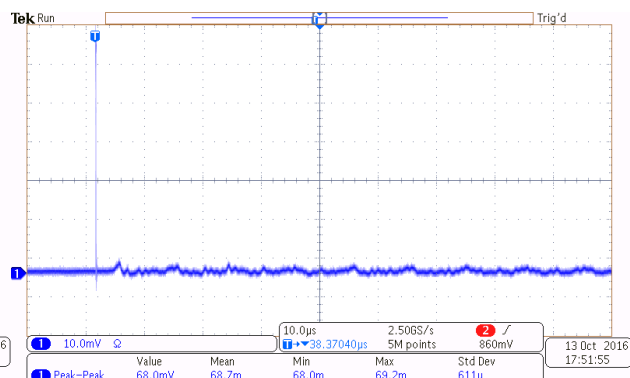
6.13 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 20 μ s

Oscilogramose (6.11–6.13 paveikslai) matyti impulsai ir jų pjezoelektriniai virpesiai. Virpesių periodas apie 10 μ s. Jeigu ilginame impulsą, virpesių amplitudė stiprėja iki tol, kol impulso trukmė tampa lygi virpesių periodui. Kai tai nutinka, uždarymo frontas nuslopina virpesius po impulso, taip gaunamas signalas be virpesių. Toks pats efektas pasireiškia, kai impulso plotis yra lygus virpesių harmonikų periodui.

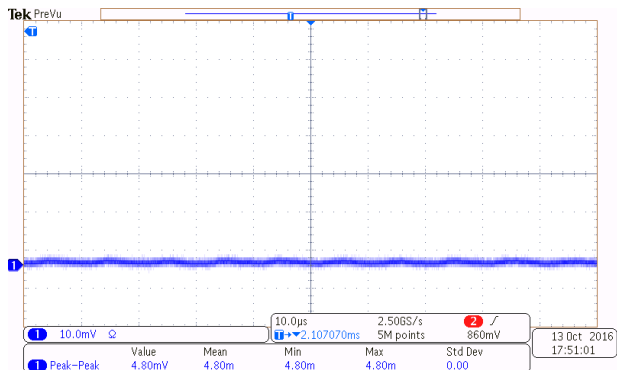
Analizuojant šį efektą buvo generuojami 1 ms trukmės impulsai. Taip galima nustatyti kiek trunka sužadinti pjezoelektriniai virpesiai (6.14–6.17 paveikslai).



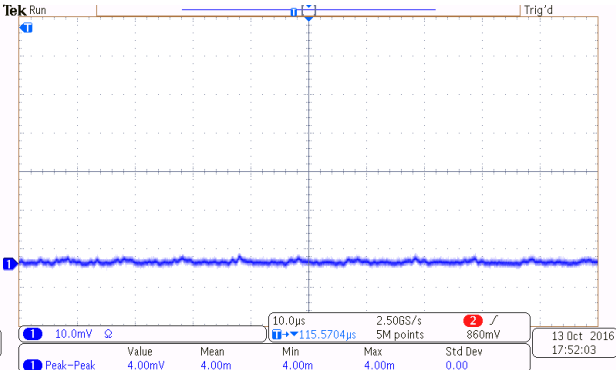
6.14 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 1 ms



6.15 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 130 ns



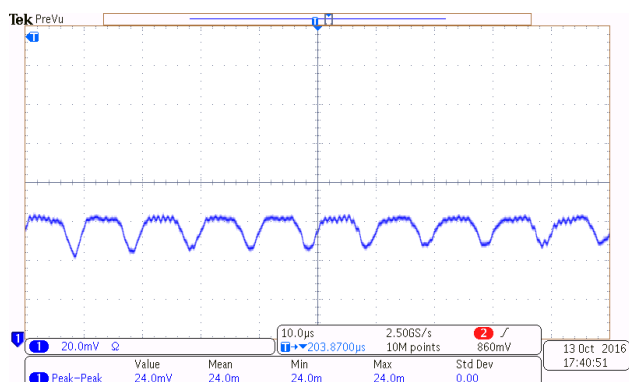
6.16 pav. Nuslopę pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 1 ms



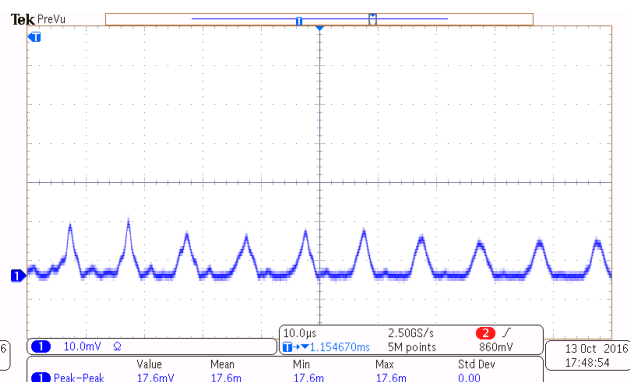
6.17 pav. Nuslopę pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 130 ns

Oscilogramose (6.14–6.17 paveikslai) pateikti tyrimų rezultatai naudojant dviejų skirtingų ilgių impulsus: 1 ms ir 130 ns. Iš jų matyti, kad virpesių amplitudė priklauso nuo impulso trukmės. Kiekvienu momentu, kuomet įtampa yra įjungiamo ar išjungiamo pasireiškia pjezoelektriniai virpesiai. Iš gautos oscilogramos matyti, kad 1 ms impulso pločio virpesiai nuslopsta iki 4 mV reikšmės po 2,1 ms, o 130 ns impulso pločio virpesiai nuslopsta iki 4 mV reikšmės po 115,6 μ s. Pjezoelektriniai virpesiai iššaukti priekinio ir galinio aukštos įtampos impulso

frontų pateikti 6.18, 6.19 paveiksluose. Kaip matyti, priekinio ir galinio fronto pjezoelektriniai virpesiai yra priešingų fazių. Jeigu galinis ir priekinis frontai suvedami taip, kad 6.18 paveikslo mažiausios vertės viršūnė būtų ties 6.19 paveikslo didžiausios vertės viršūne, bus gaunamas tolimesnių virpesių užslopinimas. Priekinio ir galinio fronto virpesiai kompensuos vienas kitą ir nuslops kaip parodyta 6.12 ir 6.13 paveiksluose.

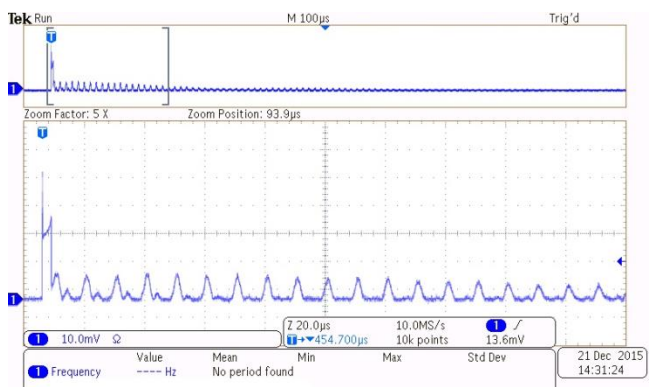


6.18 pav. Pjezoelektriniai virpesiai iššaukti priekinio aukštos įtampos impulso fronto

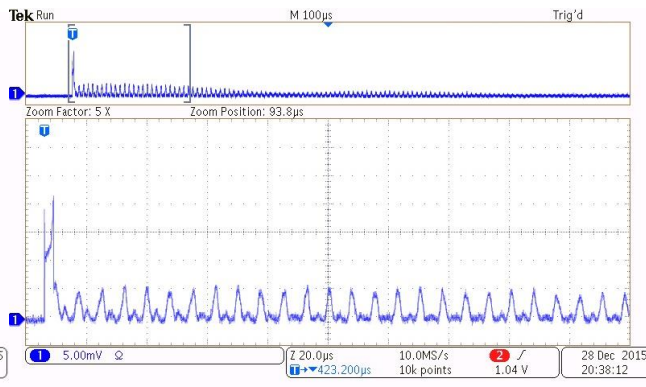


6.19 pav. Pjezoelektriniai virpesiai iššaukti galinio aukštos įtampos impulso fronto

Žinant, kaip nuslopinti DKDP kristalų virpesius, galima tyrinėti skirtingų dydžių kristalus ir stebėti, ar matoma pakitimų pjezoelektriniuose virpesiuose (6.20, 6.21 paveikslai).



6.20 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 3 µs. Pokelso narvelio modelis – PC12SR

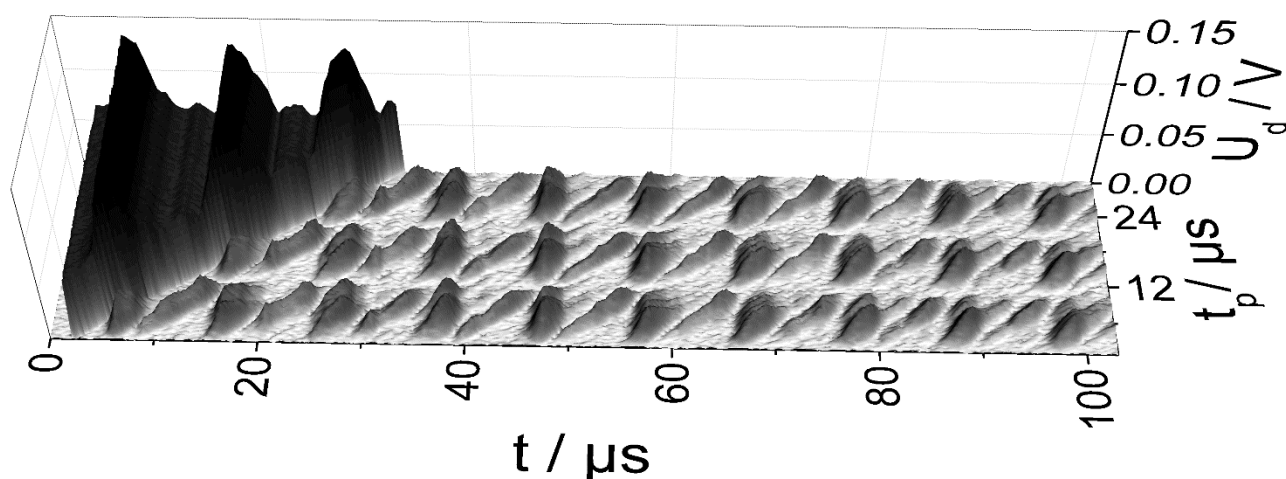


6.21 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 3 µs. Pokelso narvelio modelis - PC9SR

Oscilogramose (6.20, 6.21 paveikslai) matyti, kad naudojant skirtingus Pokelso narvelių modelius gaunami skirtingi pjezoelektrinių virpesių dažniai ir amplitudės. Pokelso narvelių modeliai PC12SR ir PC9SR skiriasi kristalo darbinio paviršiaus plotu (PC12SR – Ø12 mm, o PC9SR – Ø9 mm). Kristalų ilgiai nesiskiria. 12 mm diametro apartūros kristalo virpesių periodas

yra $10\ \mu\text{s}$. $9\ \text{mm}$ diametro apartūros kristalo virpesių periodas – apie $7,5\ \mu\text{s}$. Iš to galima teigti, kad nuo kristalo dydžio, priklauso DKDP kristalų virpėjimo dažnis.

Iš oscilogramos pavaizduotos 6.22 paveiksle matomi optinio signalo svyravimai, sąlygojami DKDP kristalo patiriamų pjezoelektrinių virpesių. Juos sukelia staigus įtampos, tiekiamos į narvelį, pokytis (įtampos impulsų fronto trukmė $\sim 6\ \text{ns}$). Virpesiai veikdami kristalą keičia Pokelso narvelio optinę ašį lazerio spindulio atžvilgiu, dėl to svyruoja optinio signalo amplitudė.



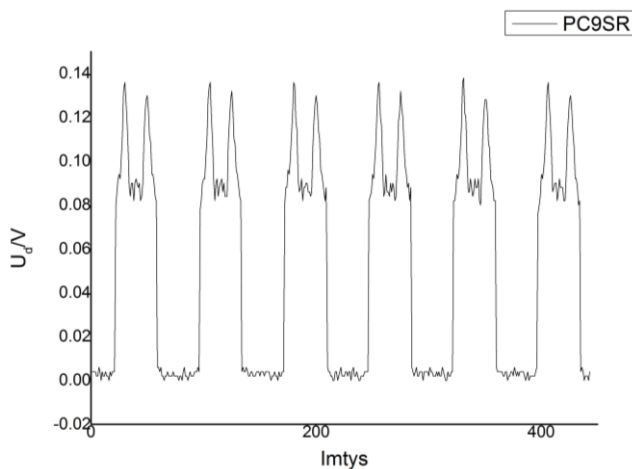
6.22 pav. Pokelso narvelio su DKDP kristalu (PC12SR modelio) pjezoelektriniai virpesiai prie skirtingų aukštos įtampos impulso pločių. U_d – įtampa užfiksuota detektoriuje, t_p – aukštos įtampos impulso trukmė, lygi optinio impulso laikui, t – laikas.

Iš gautų rezultatų (6.22 paveikslas) (G. Sinkevičius et al. 2017b) galima teigti, kad kuo kristalo virpesių harmonikų periodas yra artimesnis Pokelso narvelio kristalą žadinančios aukštos įtampos impulso trukmei, tuo silpnesni yra virpesiai atsirandantys po aukštos įtampos galinio fronto. Tai atsitinka dėl to, kad galinio fronto sukelti pjezoelektriniai virpesiai yra slopinami pradinio fronto sukeltais virpesiais.

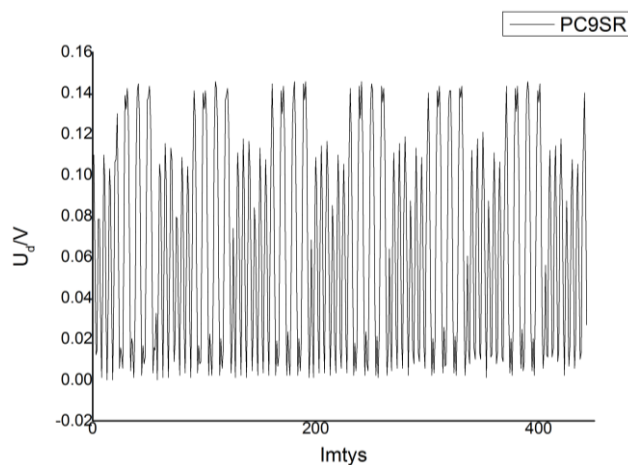
Šiuo atveju, PC12SR virpesių periodas yra $10\ \mu\text{s}$. Eksperimentas atliktas generuojant impulsus žemais dažniais t.y. impulsų trukmė keičiama nuo $0,2\ \mu\text{s}$ iki $30\ \mu\text{s}$ esant pastoviam $100\ \text{Hz}$ dažniui. Tokie parametrai buvo pasirinkti, kad pjezoelektrinio efekto sužadinti virpesiai būtų nuslopinti iki verčių, kurios nepaveiktų sekančio periodo impulso.

Jeigu DKDP kristalas Pokelso narvelyje yra žadinamas aukšto dažnio impulsais, sukeliami didelės amplitudės virpesiai (6.24 paveikslas). Taip nutinka, nes virpesiai nespėja nuslopti po pirmo impulso galinio fronto ir jie sustiprinami sekančio aukštos įtampos impulso. Jeigu naudojamas aktyvus virpesių slopinimas, aukštos įtampos impulso plotis apribojamas taip, kad jo

trukmė būtų lygi DKDP kristalo Pokelso narvelyje savųjų pjezoelektrinių virpesių pasikartojimo periodui, tuomet gaunamas stabilesnis optinis signalas (6.23 paveikslas).



6.23 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų dažnis 33 kHz. Pokelso narvelio modelis – PC9SR



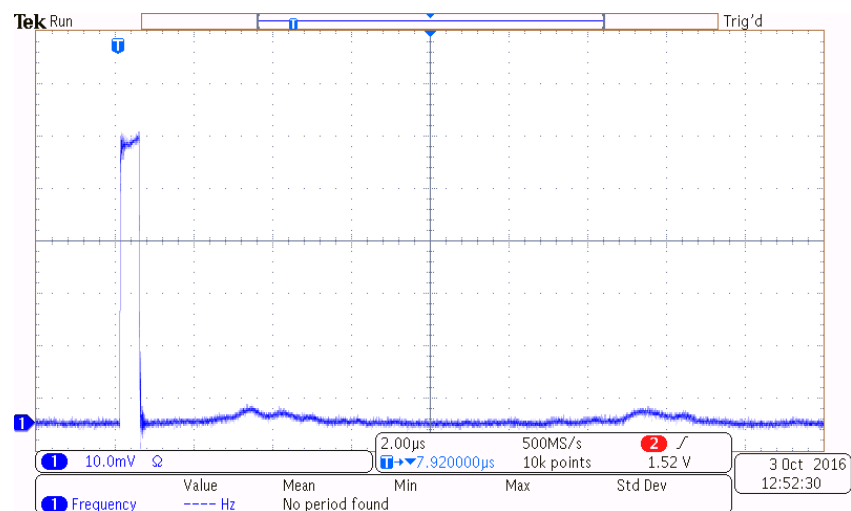
6.24 pav. Pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų dažnis 37 kHz. Pokelso narvelio modelis – PC9SR

Norint sumažinti DKDP kristalų pjezoelektrinio virpėjimo amplitudę, turime:

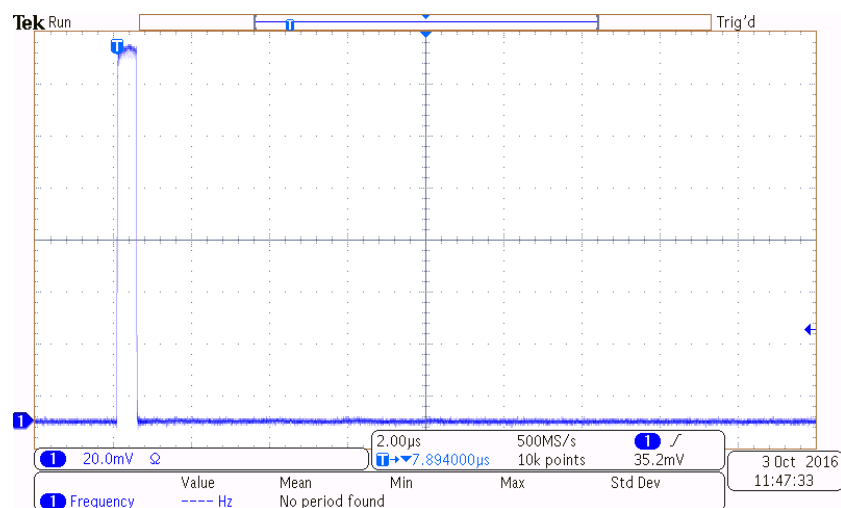
1. Pasirinkti kristalo dydį pagal aukštos įtampos impulso plotį, kuriam esant galinio fronto sukelti virpesiai geriausiai slopina priekinio fronto sąlygotus virpesius (6.18, 6.19 paveikslai). Tai leidžia dirbti esant didesnėms aukštos įtampos impulsų dažniams (kas prieš tai nebūtų įmanoma dėl virpesių).
2. Pasirinkti didesnę kristalą ir dirbti trumpesniais impulsais, kurie nespėtų sužadinti pjezoelektrinių virpesių elektrooptiniame kristale. Kaip matyti iš pateiktų eksperimentų, kuo didesnis kristalas, tuo mažesnis pjezoelektrinių virpesių pasikartojimo dažnis (6.20, 6.21 paveikslai), o trumpesnis impulsas sužadina silpnesnius pjezoelektrinius virpesius (6.22 paveikslas).

6.2. Beta Barium Borate pjezoelektrinių virpesių tyrimas

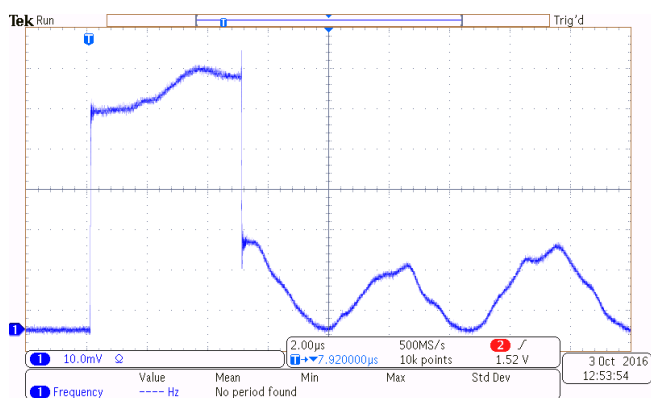
Tyrimo metu lyginami DKDP kristale (6.25, 6.27, 6.29 paveikslai) užfiksuoti virpesiai su BBO kristalų (6.26, 6.28, 6.30 paveikslai) pjezoelektriniais virpesiais. Vienodai užduotais stendo parametrais, lyginamos dviejų elektrooptinių medžiagų oscilogramos.



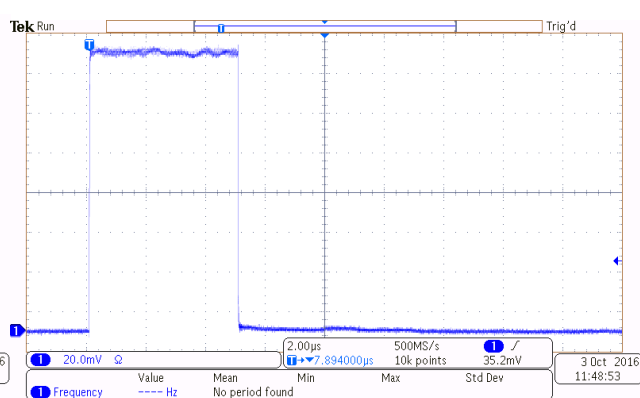
6.25 pav. Pokelso narvelio su DKDP kristalu pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 500 ns



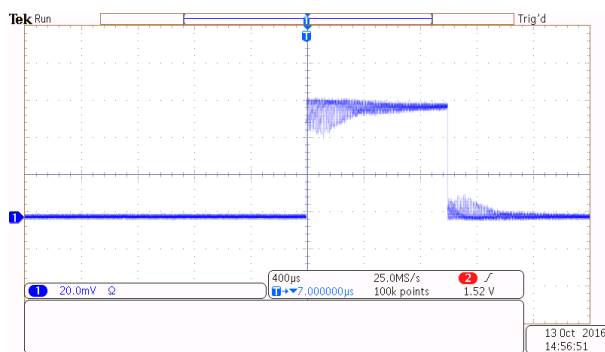
6.26 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 500 ns



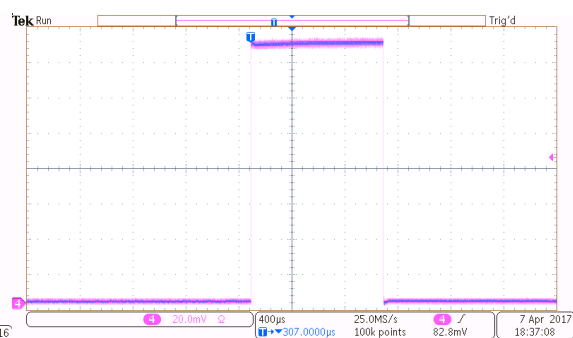
6.27 pav. Pokelso narvelio su DKDP kristalu pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 5 µs



6.28 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 5 µs

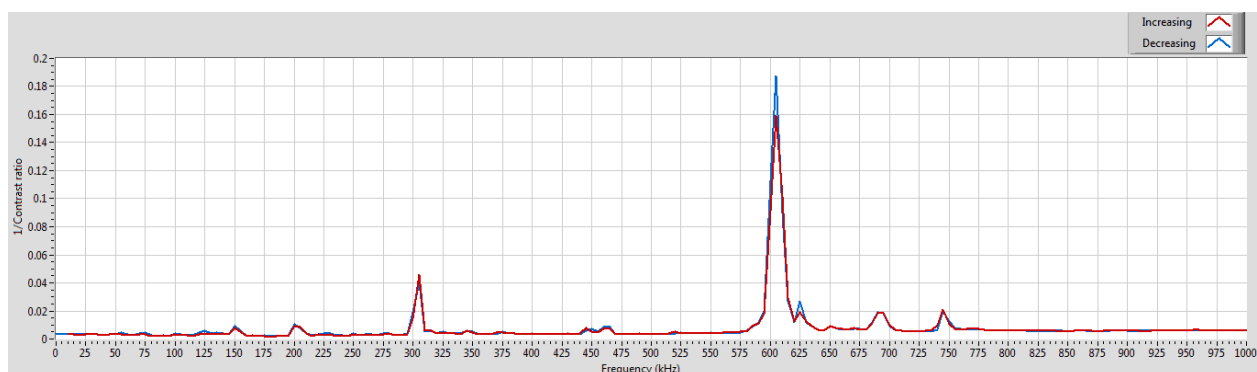


6.29 pav. Pokelso narvelio su DKDP kristalu pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 1 ms



6.30 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų plotis 1 ms

Eksperimento rezultatuose (6.25–6.30 paveikslai) matyti, kad BBO, kristale, pjezoelektriniai virpesiai nepasireiškia. Tolimesniame tyrimo etape naudojama įrangos valdymui sukurta LabVIEW programa, tyrimo objektas – 3x3x25 mm BBO Pokelso narvelis. Keičiant aukštos įtampos impulsų pasikartojimo dažnį tiekiamą į Pokelso narvelį matuojamas kontrastas (6.31 paveikslas).



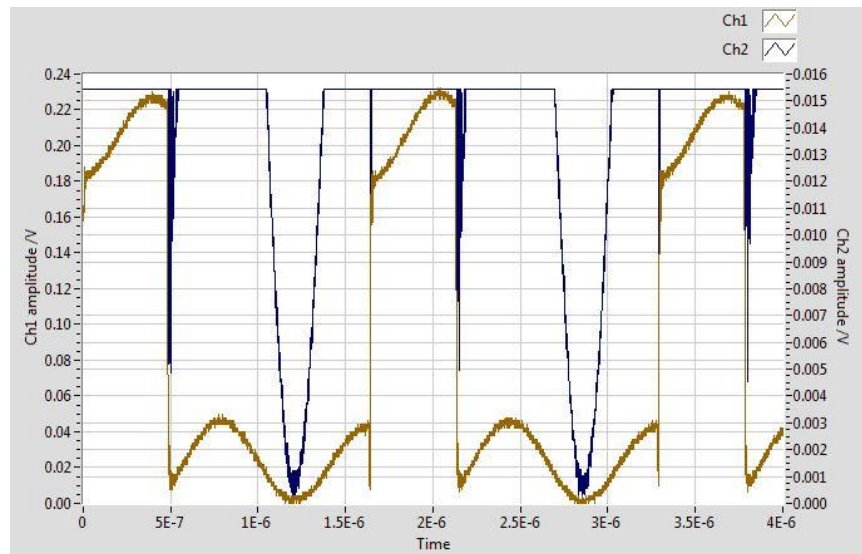
6.31 pav. 3x3x25mm BBO kristalo kontrasto priklausomybė nuo aukštos įtampos impulsų dažnio

Iš grafiko (6.31 pav.) matyti, kad kontrasto vertė sumažėja ties 305 kHz, 610 kHz, 690 kHz ir 745 kHz dažniais. Galima teigti, kad BBO kristalai pasižymi pjezoelektriniais virpesiais, bet jie nėra tokios didelės amplitudės kaip DKDP. Norint sužadinti kristalo svyravimus reikia, kad svyravimai nespėtų nuslopti. Signalas veikiantis kristalą yra stačiakampis (impulsinis), todėl dažnių spektre jis turi harmoninių dažnių.

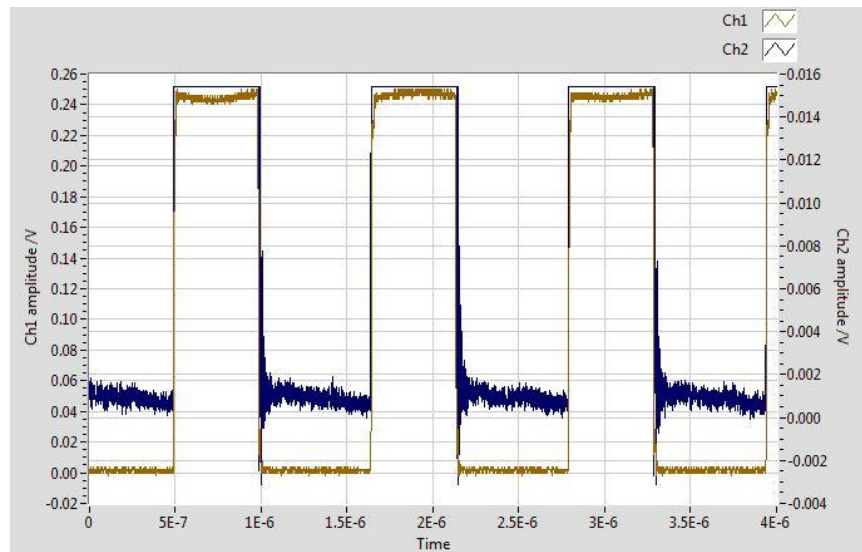
Parametrai su kuriais testuojamas Pokelso narvelis:

- Pokelso narvelio įtampa 2,73 kV;
- Impulsų plotis 500 ns;
- Dažnis nuo 1 Hz iki 1 MHz

6.32 ir 6.33 paveiksluose pateiktos optinio signalo oscilogramos. Jeigu aukštos įtampos impulsų, tiekiamų į BBO kristalą, dažnis neapima sričių, kuriuose pasireiškia pjezoelektrinis efektas, optinio impulso signalas fiksuojamas detektoriumi yra stabilus (6.33 paveikslas). Kintant signalo periodui, virpesių amplitudė didėja kuomet artėjama prie 600 kHz dažnio, atitolstant nuo jo – mažėja. Kuo arčiau rezonansinio dažnio dirba BBO kristalas tuo greičiau kinta pjezoelektrinių virpesių fazė. Eksperimento metu ištirtas 3x3x25 mm BBO kristalų virpesių periodas – 750 ns.

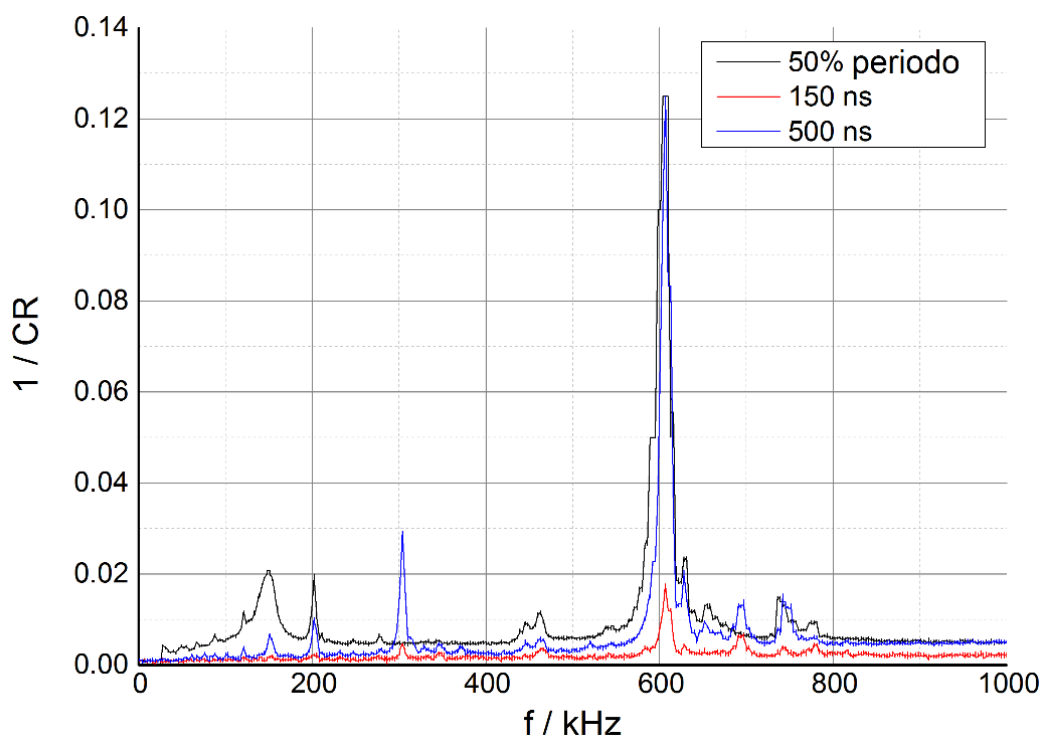


6.32 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų dažnis 605 kHz



6.33 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų dažnis 860 kHz

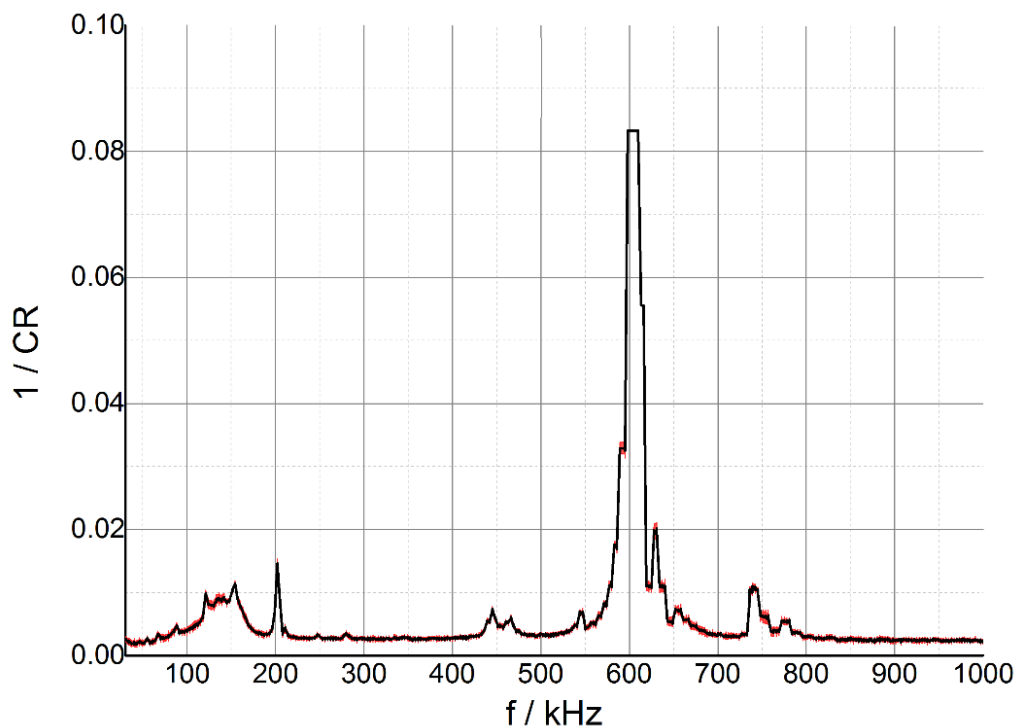
Kito tyrimo etapo metu, tiriama BBO Pokelso narvelio rezonansų priklausomybė nuo impulsų pločio (6.34 paveikslas).



6.34 pav. . 3x3x25mm BBO kristalo kontrasto priklausomybė nuo aukštos įtampos impulsų dažnio prie skirtingų impulso pločių

Atlikti matavimai kuomet impulso plotis yra fiksuotas ir lygus 150 ns ir 500 ns bei kuomet impulso plotis kinta priklausomai nuo dažnio t.y. impulso plotis lygus 50% periodo. Iš šių matavimo rezultatų galima teigti, kad dažninių kontrasto charakteristikų vertės priklauso nuo aukštos įtampos impulso trukmių (G. Sinkevičius et al. 2017a). Kuo trumpesnė BBO Pokelso narvelio aukštos įtampos impulso trukmė, tuo mažesnė pjezoelektrinio rezonanso virpesių amplitudė. Taip pat, iš grafiko matyti, kad prie skirtingų impulso pločių susidaro pjezoelektrinių rezonansų harmonikos. Iš atlikto tyrimo rezultatų, galime teigti, kad tiksliausi rezonansinių dažnių matavimai gaunami tuomet, kai BBO Pokelso narvelio kristalas yra žadinamas impulsais kurių plotis 50% signalo periodo. Tokiu atveju nėra harmoninių dažnių, o rezonansiniai dažniai gaunami platesnio spektro.

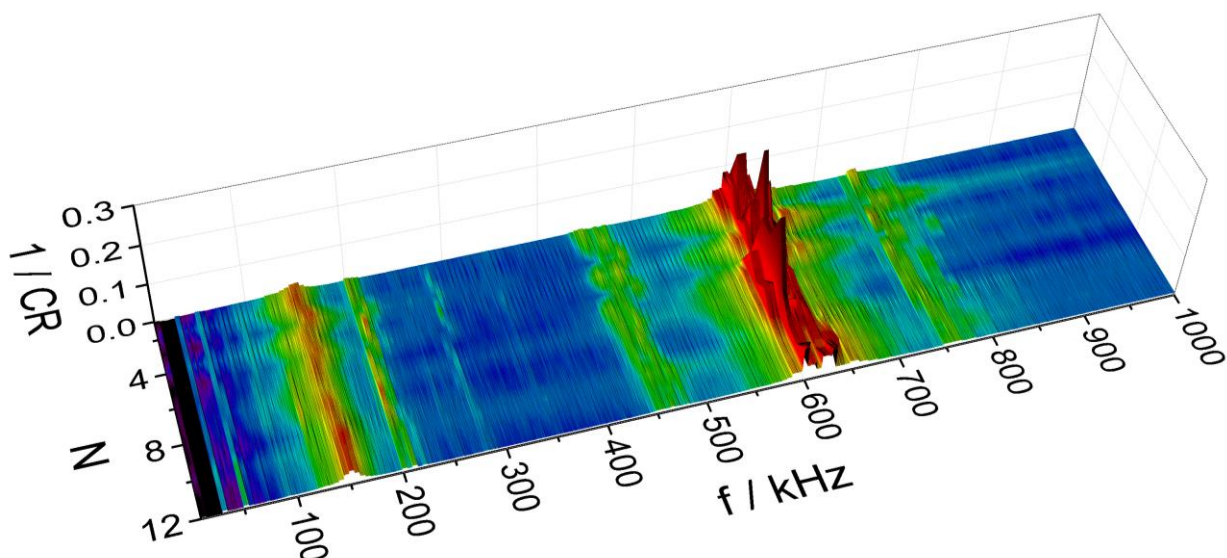
Kito tyrimo metu lyginamos skirtingos 3x3x25 mm BBO Pokelso narvelio kristalų dažninės charakteristikos. Tačiau prieš šį tyrimo etapą, reikia patikrinti kristalų dažninių charakteristikų atsikartojamumą. Tai atliekama kartojant tą patį matavimą su tuo pačiu 3x3x25 mm BBO Pokelso narvelio kristalu (6.35 paveikslas).



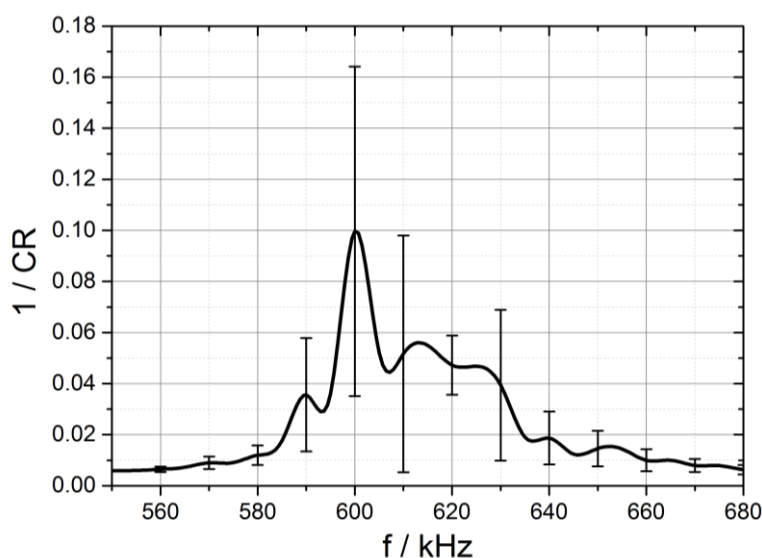
6.35 pav. 3x3x25 mm BBO kristalo kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų dažnio atsikartojamumas: juoda spalva – suvidurkinta priklausomybė; raudona spalva – per standartinį nuokrypį nuo suvidurkintos kreivės nukrypusi priklausomybė.

Aukščiau pateiktas 3x3x25 mm BBO kristalo dažninės kontrasto charakteristikos atsikartojamumo grafikas. Eksperimento metu buvo atlikti 7 matavimai su tuo pačiu BBO Pokelso narveliu. Grafike juoda spalva pateikta suvidurkinta priklausomybė, o raudonai – per standartinį nuokrypį nuo suvidurkintos kreivės nukrypusi priklausomybė. Standartinis nuokrypis siekia vos 1% viso signalo amplitudės. Iš gautų dažninių charakteristikų matyti, kad rezonansinėse zonose matavimas atliekamas per dideliu žingsniu ir nėra aptinkamos dažninių charakteristikų rezonansų viršūnės. Taip nutinka, kai impulsų generatoriaus periodai yra parenkami 10 ns diskretiškumu. Naudojant impulso plotį kuris lygus 50% periodo visuose dažniuose, bipoliarinių raktų valdymui naudojamas regeneracinis metodas (3.5 paveikslas). Dėl impulsų generatoriaus architektūros, regeneraciniam metodui naudojami du impulsų generatoriaus periodai, vienam aukštos įtampos periodui gauti. Tai Pokelso narvelių matavimo periodų tikslumą sumažina iki 20 ns.

Ištyrus sistemos stabilumą, atliekami tolimesni BBO Pokelso narvelių tyrimai tokių pačių matmenų kristalams. Eksperimento metu ištirta 12 vienetų 3x3x25 mm BBO Pokelso narvelių kristalų (6.36 paveikslas). paveiksle pateikta 12 BBO Pokelso narvelių dažninės kontrasto charakteristikos.



6.36 pav. Dvylikos 3x3x25 mm BBO kristalų kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų dažnio

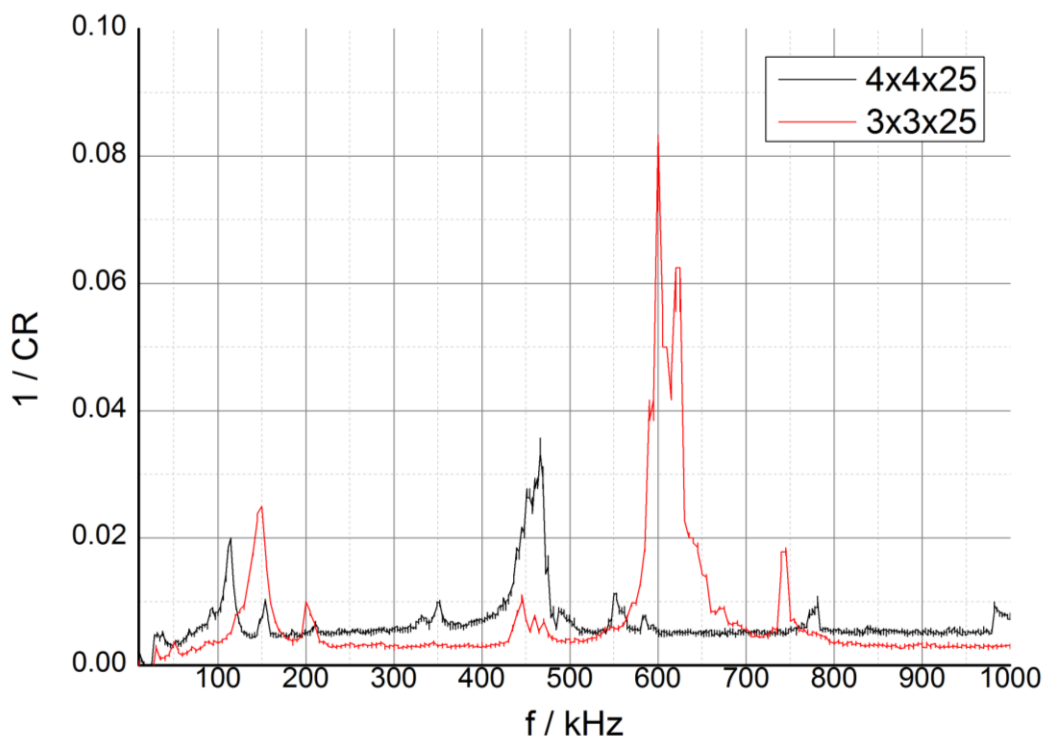


6.37 pav. Dvylikos 3x3x25 mm BBO kristalų kontrasto suvidurkinta priklausomybė nuo aukštos įtampos impulsų dažnio ir standartinio nuokrypio vertės.

Iš grafiko pateikto 6.37 paveikslas matyti, kad didžiausias kontrasto nuokrypis yra ties tais aukštos įtampos impulsų dažniais, ties kuriais pasireiškia pjezoelektriniai virpesiai (žr. 6.36 paveikslą). Matavimų žingsnis 3 kHz per platus, kad būtų užfiksuotas detalus rezonanso pasiskirstymas todėl, gaunami nuokrypiai dėl staigaus pjezoelektrinių virpesių kitimo dažnių juostoje. Iš 6.37 paveiksle pateiktų rezultatų galime teigti, kad 3x3x25 mm BBO Pokelso narvelio kristale pjezoelektrinių rezonansų dažnių zonos nekinta – svyruoja tik virpesių amplitudė.

Kito eksperimento metu tiriama dažnių kontrasto charakteristikų priklausomybė nuo BBO Pokelso narvelio kristalų dydžio (6.38 paveikslas). Tyrimo objektai: 3x3x25 mm ir 4x4x25 mm BBO Pokelso narvelių kristalai. Kristalų dydžiai skiriasi, todėl signalų amplitudės taip

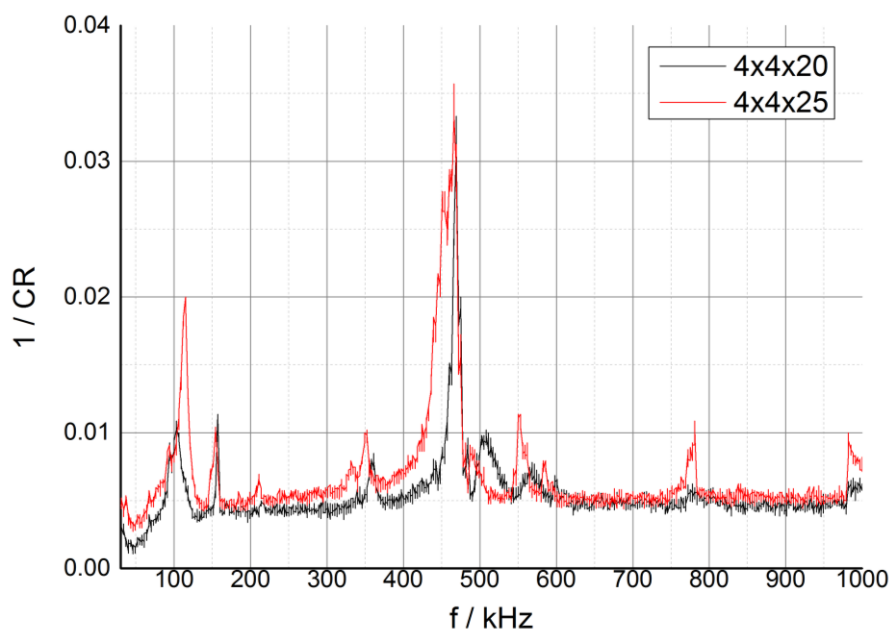
pat skirsis. Pokelso narvelio su 4x4x25 mm BBO kristalu pusės bangos įtampa pagal 2.4 formulę siekia 3.6 kV. Tyrime naudojamas aukštos įtampos raktas, kurio maksimali formuojamų impulsų amplitudė 2.8 kV, todėl nėra pilnai įgyvendinamas pusės bangos įtampos reikalavimas Pokelso narveliui. Dėl šios priežasties kontrastas gautas matavimo metu yra mažesnis (6.38 paveikslas) negu realus su darbine pusės bangos įtampa.



6.38 pav. 3x3x25 mm ir 4x4x25 mm BBO kristalų kontrasto priklausomybė nuo aukštos įtampos impulsų dažnio

Iš atlikto tyrimo matyti, kad abiejų kristalų rezonansiniai dažniai skiriasi. Didesnių matmenų kristalo rezonansinių dažnių zonos pasislenka į žemesnių dažnių ruožą. Iš 6.38 paveikslo matyti, kad rezonansiniai dažniai mažiau pakito žemų dažnių ruože, nei aukštų dažnių ruože.

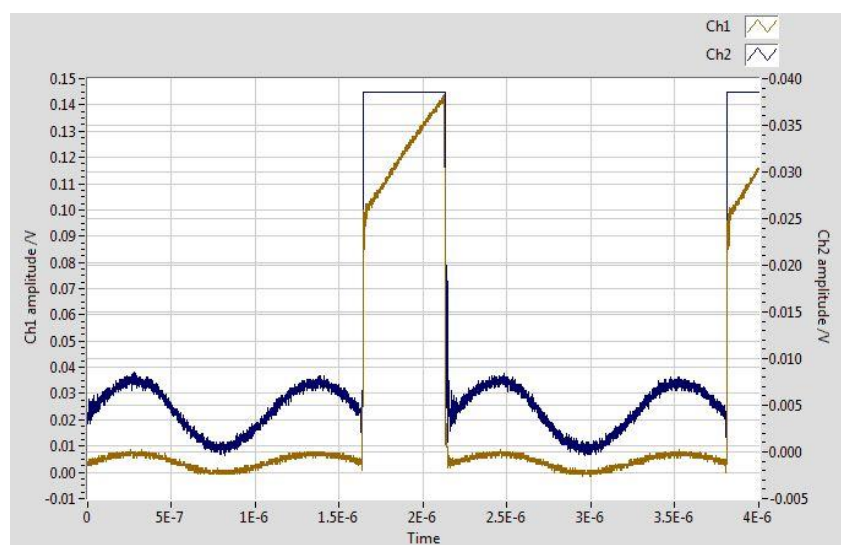
Tolimesniame tyrime lyginamos dviejų skirtingų dydžių BBO Pokelso narvelių kristalų dažninės charakteristikos, tačiau šiuo atveju lyginami kristalai skiriasi ilgiu. Matavimo rezultatai pateikti 6.39 paveiksle.



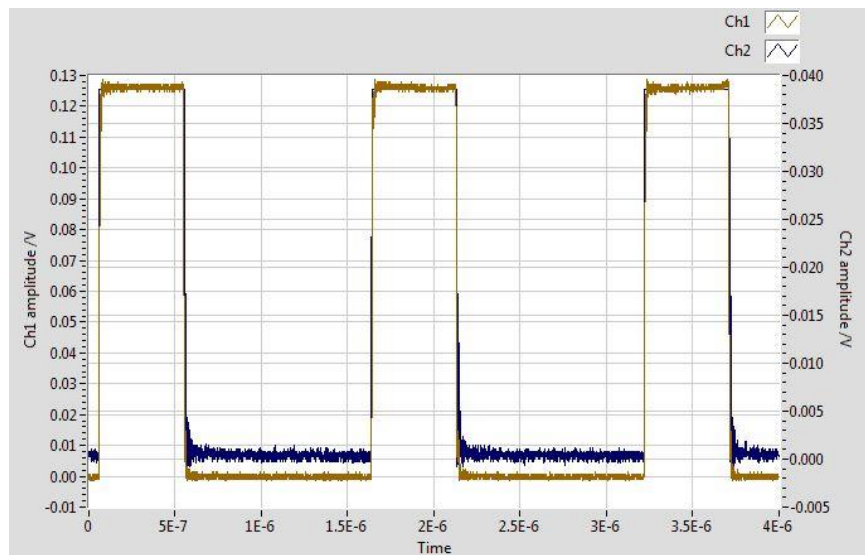
6.39 pav. 4x4x20 mm ir 4x4x25 mm BBO kristalų kontrasto priklausomybė nuo aukštos įtampos impulsų dažnio

Iš tyrimo rezultatų matyti (6.39 paveikslas), kad BBO Pokelso narvelių kristalų ilgis nekeičia dažninių charakteristikų lyginant su apartūros dydžio kitimu (6.38 paveikslas). Iš gautų rezultatų sunku teigti, kad kristalų ilgis keičia dažnines charakteristikas. Tai reikalauja daugiau matavimų.

Galime daryti prielaidą, kad kaip ir DKDP kristaluose, BBO kristalų dydis lemia virpesių pasikartojimo dažnį.



6.40 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų dažnis 465 kHz



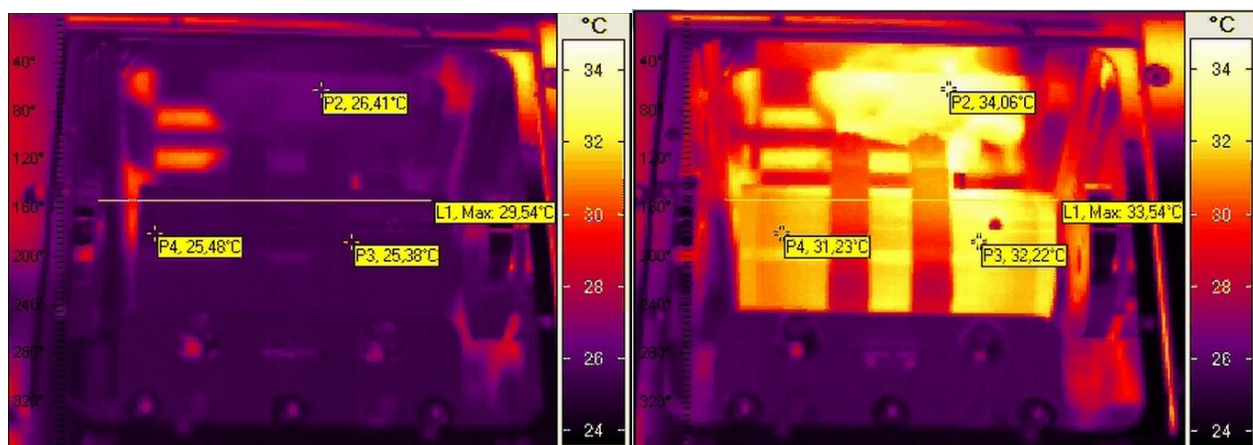
6.41 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu pjezoelektriniai virpesiai užfiksuoti detektoriumi, kai aukštos įtampos impulsų dažnis 635 kHz

Oscilogramose (6.40, 6.41 paveikslai) matyti atsiradę pjezoelektriniai virpesiai dirbant 465 kHz dažniu (6.40 paveikslas). Lyginant su 3x3x25 mm BBO kristalo virpesiais matome, kad virpesių periodas yra ilgesnės trukmės. Iš gautų rezultatų nustatyta, kad BBO kristalo 4x4x20 mm virpesių periodas yra apie 1,05 μ s.

7. POKELSO NARVELIŲ TEMPERATŪRINIŲ CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS

BBO Pokelso narvelio kristalai yra veikiami didelio (iki 1 MHz) dažnio ir aukštos (iki 4.6 kV) įtampos impulsais. Nors kristalai yra didelės varžos (2.1 lentelė), maži srovės nuotėkiai galimi per kristalo paviršius, kadangi 4x4x20 mm matmenų kristalui reikalinga 4.43 kV (5.4 paveikslas) įtampa. Dėl to elektrooptinis elementas gali pradėti šilti. Papildomi šilumą generuojantys šaltiniai gali būti ir didelio intensyvumo šviesa sklindanti per Pokelso narvelio kristalą, dėl medžiagos ir paviršių sugerties.

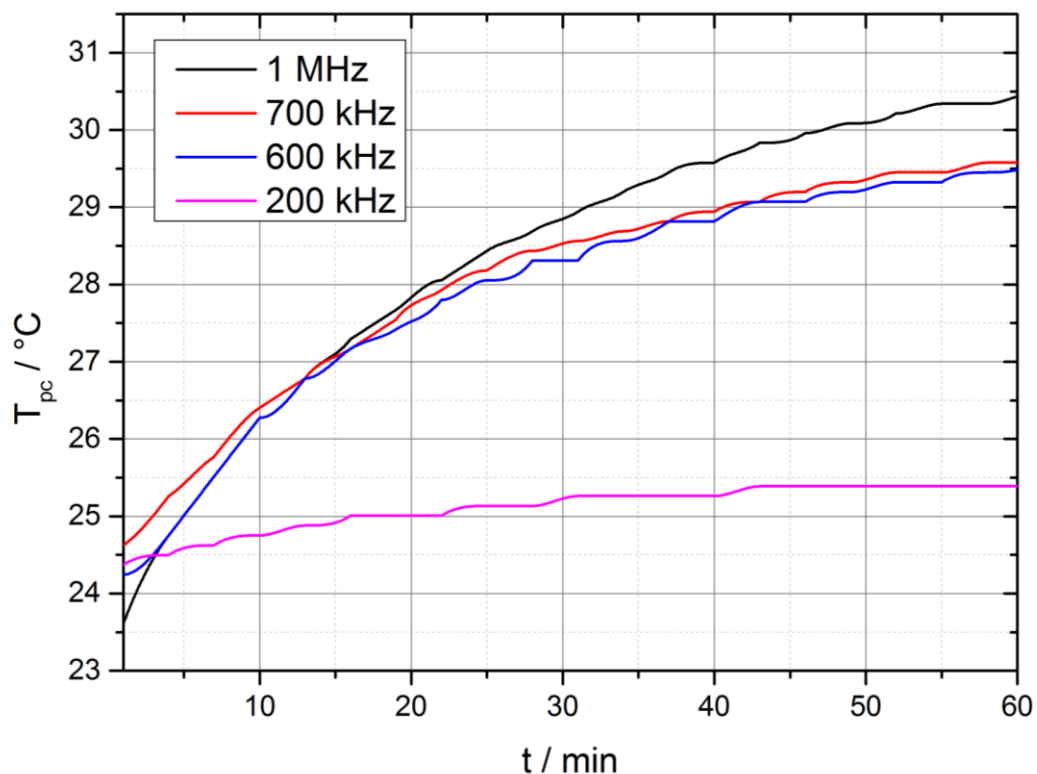
Pokelso narvelio temperatūra buvo registruojama termokamera (7.1, 7.2 paveikslai). 7.1 paveiksle pavaizduota Pokelso narvelio ir elementų aplink jį temperatūros pasiskirstymas prieš matavimą. 7.2 paveiksle pavaizduotas to paties Pokelso narvelio su aplinkos elementais temperatūros pasiskirstymas matavimo metu. Matyti, kad Pokelso narvelio temperatūra darbo metu didėja.



7.1 pav. Pokelso narvelio temperatūra prieš eksperimentą

7.2 pav. Pokelso narvelio temperatūra eksperimento metu

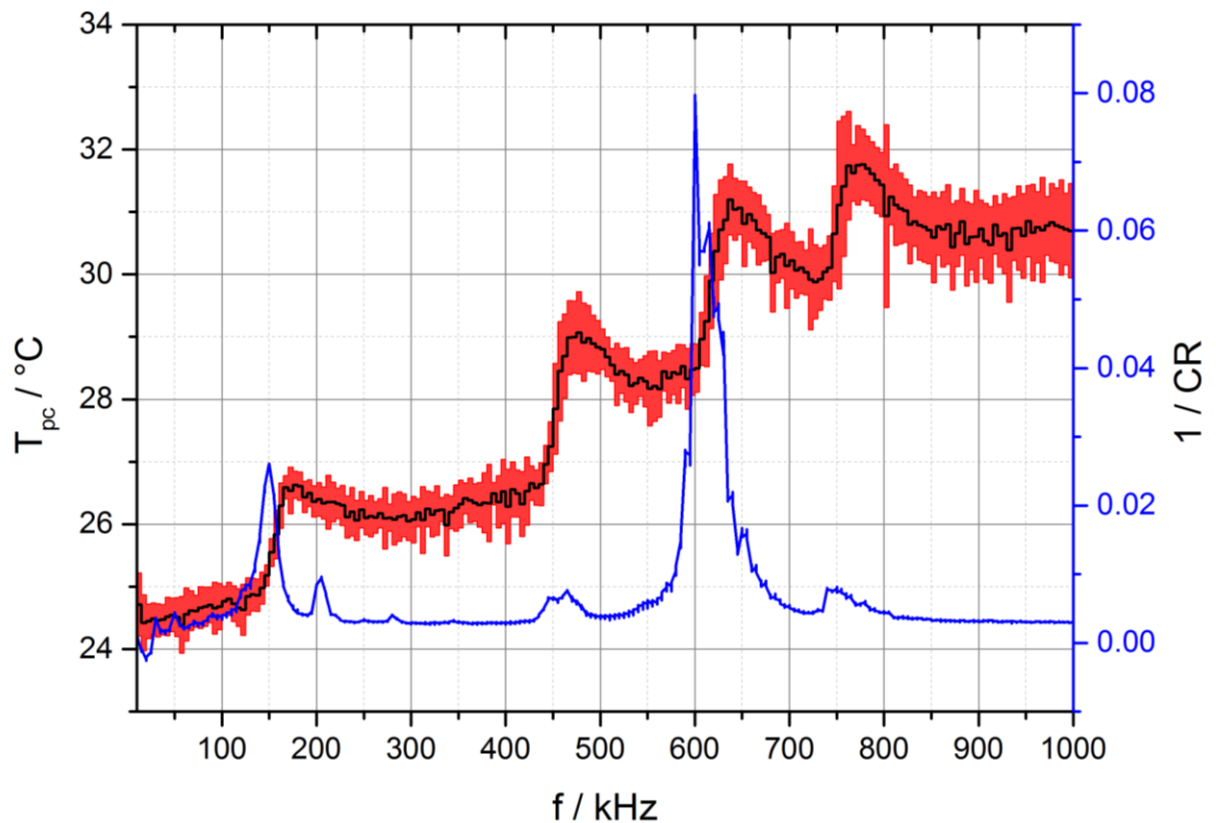
Buvo tiriamas nuo išorinių temperatūrinių veiksnių izoliuotas Pokelso narvelis veikiamas aukštos įtampos impulsais. Registruojama temperatūra jo viduje. Gauti matavimo rezultatai pavaizduoti 7.3 paveiksle. Matavimas atliktas su 4x4x20 mm Pokelso narveliu keturiose darbo zonose: 200 kHz, 600 kHz, 700 kHz ir 1 MHz. Impulso plotis nebuvo keičiamas – 200 ns.



7.3 pav. 4x4x20 mm BBO Pokelso narvelio temperatūros pereinamoji charakteristika, prie skirtingų aukštos įtampos impulsų dažnių

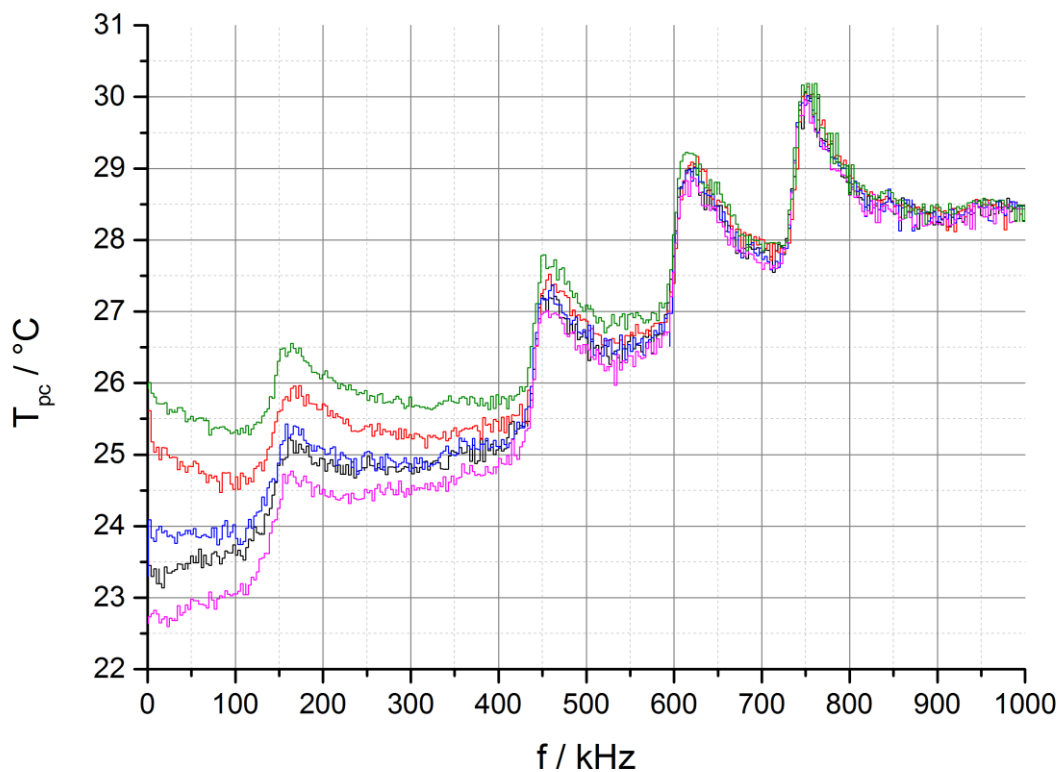
Iš gautų rezultatų matomas sąryšis tarp darbinio dažnio ir temperatūros (7.3 paveikslas) (G. Sinkevičius et al. 2015). Kuo didesnis darbinis dažnis, tuo greičiau kyla Pokelso narvelio BBO kristalo temperatūra. Sekantis tyrimas atliekamas, kai 3x3x25 mm BBO Pokelso narvelis dirba skirtinguose dažniuose. Didinant darbinį dažnį fiksuojamas Pokelso narvelio kontrastas ir temperatūra. Impulso plotis yra lygus 50% periodo trukmės. Žingsnis 3 kHz, matavimo trukmė viename dažnyje 2 s.

Gauti matavimo rezultatai pateikti 7.4 paveiksle. Iš jų matyti 3x3x25 mm BBO Pokelso narvelio kontrasto dažninės charakteristikos pasiskirstymas. Yra 5 dažninės zonos, kuriose kristalo kontrastas sumažėja. Temperatūros pasiskirstymo grafike matomos keturios zonos, kuriose Pokelso narvelio temperatūra pradeda didėti greičiau nei įprastai. Matyti, kad staigus temperatūros kilimas dažninėse zonose kuriose Pokelso narvelio kontrastas sumažėja. Kadangi kristalui įšilti reikia laiko, negalime tiksliai užfiksuoti momento nuo kurio prasideda intensyvus Pokelso narvelio šilimas. Galime teigti, kad rezonansinėse zonose mažėja BBO Pokelso narvelio kontrastas ir dėl intensyvių aukšto dažnio virpesių pradeda šilti Pokelso narvelio kristalas. 7.4 paveiksle juodai pavaizduotas dvylikos 3x3x25 mm BBO Pokelso narvelių temperatūros vidurkis, raudona zona – standartinis nuokrypis.



7.4 pav. 3x3x25 mm BBO Pokelso narvelio kontrasto ir temperatūros priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų dažnio

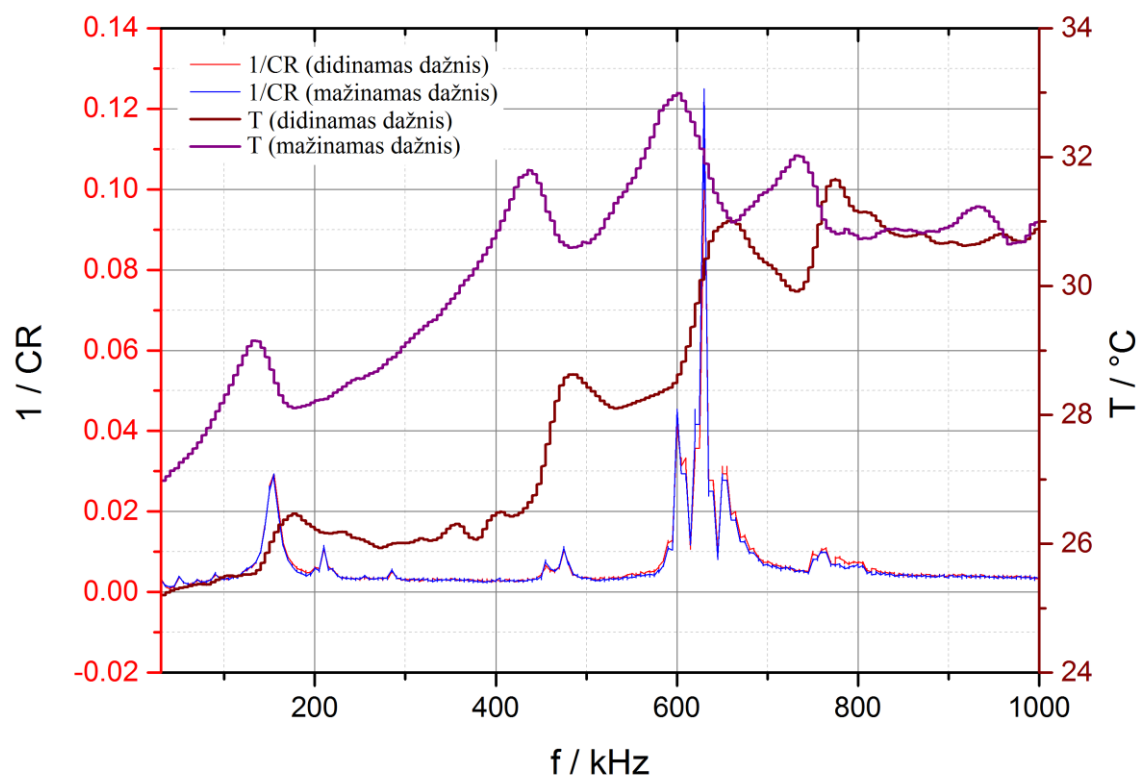
Atliktas to paties 3x3x25 mm BBO Pokelso narvelio temperatūros matavimo atsikartojamumo tyrimas (7.5 paveikslas). Atlikti penki matavimai su vienodais matavimo stendo parametrų nustatymais. Iš gautų rezultatų matyti, kad pradinėje pozicijoje temperatūra nėra vienoda. Taip galėjo nutikti, nes kristalas nespėdavo pilnai atvėsti iki sekančio matavimo. Iš tolimesnių rezultatų matyti, kad temperatūra vienodai kildavo kuomet dažnis buvo didinamas. Temperatūra visų matavimų metu susilygindavo kai pasiekdavo 600 kHz ribą. Iš rezultatų galima teigti, kad temperatūrą įtakoja daug veiksnių, bet visi BBO Pokelso narvelio kristalai įkaito žymiai ties dažniais, prie kurių reiškiasi pjezoelektriniai virpesiai.



7.5 pav. 3x3x25 mm BBO Pokelso narvelio temperatūros priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų dažnio

Kito tyrimo metu buvo tiriama 3x3x25 mm BBO Pokelso narvelio temperatūra ir medžiagos kontrastas, kai dažnis didinamas nuo 10 kHz iki 1 MHz, 3 kHz žingsniu, kas 2 s. Pasiekus didžiausią dažnį, jis žeminamas iki tol, kol pasiekia mažiausią dažnį. Viso matavimo metu registruojama kristalo temperatūra ir medžiagos kontrastas. Gauti rezultatai pateikti 7.6 paveiksle. Iš gautų rezultatų matyti, kad temperatūra kyla kai dažnis didėja, ypač tuomet, kada dirbama ties rezonansiniais dažniais. Dažniui mažėjant, temperatūra mažėja. Ji padidėja tik ties dažniais, prie kurių reiškiasi pjezoelektriniai virpesiai.

Dėl mažesnės sistemos skiriamosios gebos negalime užfiksuoti 3 °C poveikio 3x3x25 mm BBO Pokelso narvelio medžiagos kontrastui. Kristalo temperatūros pokyčiai keičia dielektrinę konstantą (Takeuchi et al. 2008: 32-61). Kintant dielektrinei konstantai, kinta medžiagos elektros krūvis. Kintat krūviui, kinta poliarizacijos pasukimo kampas, kas dviejų Glano-Tayloro prizmių sistemoje keičia šviesos intensyvumą, dėl to kinta kontrastas.



7.6 pav. 3x3x25 mm BBO Pokelso narvelio temperatūros ir kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų dažnio

Iš gautų rezultatų galima teigti, kad norint stabilizuoti pjezoelektrinius virpesius BBO Pokelso narvelio kristale, reikia stabilizuoti kristalo temperatūrą (McWright 1986: 89–91; Takeuchi et al. 2008: 32–61), nes aktyvus virpesių slopinimas gali sukelti papildomą šilimą kristale.

IŠVADOS

1. Maksimaliai medžiagos optinei kontrasto vertei pasiekti būtina, kad Pokelso narvelio elektrinio lauko linijos būtų galimai artimesnės 90° arba 0° kampui lazerio poliarizacijos atžvilgiu.
2. BBO Pokelso narvelio kristalo medžiagos kontrastas, neveikiant elektriniam laukui, yra netolygiai pasiskirstęs medžiagos paviršiuje.
3. Didžiausios optinio kontrasto vertės, neveikiant elektriniam laukui, yra pasiskirsčiusios centre lygiagrečiai elektrodams.
4. BBO Pokelso narvelio kristalo medžiagos optinis kontrastas, veikiant elektriniam laukui, yra pasiskirstęs netolygiai Pokelso narvelio paviršiaus atžvilgiu. Didžiausias kontrastas yra ties kristalo centru statmenai elektrodams. Tokius rezultatus lemia elektrinio lauko pasiskirstymas tarp elektrodų.
5. Pokelso narveliai su DKDP kristalais, lyginant su BBO kristalais, pasižymi didesnės amplitudės pjezoelektriniais virpesiais.
6. Kuo didesnis Pokelso kristalas, tuo pjezoelektrinių virpesių periodas yra ilgesnis.
7. Pjezoelektriniai virpesiai Pokelso narvelyje su DKDP kristalu, sąlygojami aukštos įtampos impulso galinio fronto, yra tuo silpnesni, kuo kristalą žadinančio aukštos įtampos impulso trukmė yra artimesnė kristalo virpesių periodui.
8. Pokelso narveliuose su DKDP kristalu aktyvus pjezoelektrinių virpesių slopinimas galimas tik tuo atveju, kai naudojami vienodo dydžio kristalai. Kitais atvejais slopinimas nebus efektyvus.
9. BBO Pokelso narvelio kristalo pjezoelektriniai virpesiai, pasireiškiantys dažnių ruože nuo 10 kHz iki 1 MHz, sumažina medžiagos kontrastą iki 15 kartų.
10. BBO kristalų Pokelso narvelyje temperatūra padidėja kai aukštos įtampos impulsų dažnis sutampa su dažniu, prie kurio pasireiškia kristalų pjezoelektriniai virpesiai.

NAUDOTOS LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Andreev N.F., Babin A.A., Davydov V.S., Matveev A.Z., Garanin S.G., Dolgoplov Y.V., Kulikov S.M., Sukharev S.A., Tyutin S.V. 2011. Wide-aperture plasma-electrode pockels cell, *Plasma Physics Reports* 37(13): 1219–1224.
- BNC 575 Series Pulse Generator Operating Manual, Prieiga per internetą: http://www.berkeleynucleonics.com/sites/berkeleynucleonics/files/products/resources/575_manual.pdf.
- Carvajal J.J., Segonds P., Peřa A., Zaccaro J., Boulanger B., Dřaz F., Aguilř M. 2007. Structural and optical properties of RbTiOPO 4 :Nb crystals, *Journal of Physics: Condensed Matter* 19(11): 116214.
- Ekspla Optoelectronics Drivers for Pockels Cells, Prieiga per internetą: <http://www.ekspla.com/wp-content/uploads/2011/05/pockels-cell-drivers-pcd-uhr-series-for-cavity-dumping.pdf>.
- Fedorov P.P., Kokh A.E., Kononova N.G. 2002. Barium borate β -BaB₂O₄ as a material for nonlinear optics, *Russian Chemical Reviews* 71(8): 651.
- Fox A.J. 1988. *Acousto-optic modulator* Google Patents, Prieiga per internetą: <https://www.google.com/patents/US4759613>.
- G. Sinkevičius, A.Baškys 2017a. 2017 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), *Investigation of frequency response of pockels cells based on beta barium borate crystals*.
- G. Sinkevičius, A.Baškys 2016. Science – Future of Lithuania / Mokslas – Lietuvos Ateitis, *Medžiagos kontrasto pasiskirstymo pokelso narvelio kristale tyrimas*.
- G. Sinkevičius, A.Baškys 2017b. Science – Future of Lithuania / Mokslas – Lietuvos Ateitis, *Pjezoelektrinių virpesių pokelso narvelio kalio dideuterio fosfato kristale tyrimas*.
- G. Sinkevičius, V.Taluntis, R.Urbonavičius 2015. Mokslo taikomųjų tyrimų įtaka šiuolaikinių studijų kokybei, *Elektrooptinių elementų patikros ir charakterizavimo standas*.
- Guina M., Vainionpää A., Harkonen A., Orsila L., Lyytikäinen J., Okhotnikov O.G. 2003. Vertical-cavity saturable-absorber intensity modulator, *Optics Letters* 28(1): 43.
- Maji R., Mukhopadhyay S. 2012. A method of reducing the half wave voltage ($V\pi$) of an electro-optic modulator by multi passing a light through the modulator, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 123(12): 1079–1081.
- Mat Nashim N., Al-Tarawni M.A.M., Aziz A.M., Abdullah S., A. Bakar A.A. 2017. Optimizing low half-wave voltage electro-optic polymer modulator for optical waveguide sensor, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 134: 9–20.
- McWright G.M. 1986. Cooled pockels cell for laser fusion applications, *Optical and Quantum Electronics* 18(1): 89–91.
- Melnikov K., Biryuchinskiy S., Melnikov V., Churayev S. 2011. Optimization Method for High Voltage Electro-Optic Shutter 2011 2nd International Conference on Photonics. 2011 2nd International Conference on Photonics.

- Melnikov K., Biryuchinskiy S., Melnikov V. 2013. Improvement of Q-switch operation for medical solid-state laser systems 2013 *IEEE Business Engineering and Industrial Applications Colloquium (BEIAC)*. 2013 IEEE Business Engineering and Industrial Applications Colloquium (BEIAC).
- Mueller C.T., Duong N.D., Adams P.M. 1988. The Electro-optic Effect In Beta Barium Borate *Conference Proceedings LEOS Lasers and Electro-Optics Society*. Conference Proceedings LEOS Lasers and Electro-Optics Society.
- Novikov M.A., Stepanov A.A., Khyshov A.A. 2016. Electro-optical effects in anisotropic crystals: I. The Pockels effect, *Crystallography Reports* 61(5): 849–856.
- Punin Y.O., Shtukenberg A.G. 2005. Anomalous crystal optics of heterogeneous crystals, *Crystallography Reports* 50(2): 297–307.
- Robert L.G. 2009. User's guide for BBO 'KD*P' RTP & Lithium niobate q-switches & modulators for q-switching 'chopping' & pulse extraction Prieiga per internetą: <http://www.fastpulse.com/pdf/eomgenl.pdf>.
- S. Pralgauskaitė 2010. *Optoelektronikos įtaisai telekomunikacijų sistemose*, Vilnius.
- Sirutkaitis V., Gaižauskas E. 2008. *Kietojo kūno lazeriai*, Vilniaus universiteto leidykla.
- Sun E., Wang Z., Zhang R., Cao W. 2011. Reduction of electro-optic half-wave voltage of 0.93Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O₃–0.07PbTiO₃ single crystal through large piezoelectric strain 3. *Opt Mater (Amst)*. , Harbin., Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925346710004945>.
- Šalna V. 2004. *Optika*, Vilnius: Fizikos olimpas.
- Takeuchi Y., Yoshida A., Tokita S., Fujita M., Kawanaka J. 2008. New design of the temperature controlled pockels cell for IFE driver, *Journal of Physics: Conference Series* 112(3): 032061.
- ThorLabs 2015. DET10A(M) Si Biased Detector User Guide Prieiga per internetą: https://www.thorlabs.com/drawings/c68efeead75e6f2b-A515F93F-5056-0103-79ECD9DA33F5B7A2/DET10A_M-Manual.pdf.
- Zelmon D.E., Small D.L., Jundt D. 1997. Infrared corrected Sellmeier coefficients for congruently grown lithium niobate and 5 mol% magnesium oxide –doped lithium niobate, *Journal of the Optical Society of America B* 14(12): 3319.
- Zernike F. 1964. Refractive Indices of Ammonium Dihydrogen Phosphate and Potassium Dihydrogen Phosphate between 2000 Å and 15 μ, *Journal of the Optical Society of America* 54(10): 1215.
- Zhang D., Kong Y., Zhang J. 2000. Optical parametric properties of 532-nm-pumped beta-barium-borate near the infrared absorption edge, *Optics Communications* 184(5–6): 485–491.