

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS,
VALSTYBINIS MOKSLINIŲ TYRIMŲ INSTITUTAS FIZINIŲ IR
TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Giedrius SINKEVIČIUS

PJEZOELEKTRINIŲ VIRPESIŲ SLOPINIMO POKELSO NARVELIUOSE TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS INŽINERIJA (T 001)

Vilnius, 2021

Disertacija rengta 2017–2021 metais Valstybiniame mokslinių tyrimų institute Fizinių ir technologijos mokslų centre.

Vadovas

prof. dr. Algirdas BAŠKYS (Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, elektros ir elektronikos inžinerija – T 001).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. dr. Dalius NAVAKAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – T 001).

Nariai:

doc. dr. Aidan MATIJOŠIUS (Vilniaus universitetas, fizika – N 002),
prof. dr. Jurij NOVICKIJ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – T 001),
dr. Ioulia SKLIAROVA (Aveiro universitetas, Portugalija, elektros ir elektronikos inžinerija – T 001),
prof. dr. Algirdas SUŽIEDĖLIS (Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, fizika – N 002).

Disertacija bus ginama viešame Elektros ir elektronikos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2021 m. lapkričio 9 d. 10 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vilniustech.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2021 m. spalio 8 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto talpykloje <http://dspace.vgtu.lt>, Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva) bei Lietuvos mokslų akademijos Vrublevskių bibliotekoje (Žygimantų g. 1, LT-01102 Vilnius, Lietuva).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto 2021-045-M mokslo literatūros knyga
doi: 10.20334/2021-045-M

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2021

© Giedrius Sinkevičius, 2021

giedrius.sinkevicius@ftmc.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY,
STATE RESEARCH INSTITUTE CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES
AND TECHNOLOGY

Giedrius SINKEVIČIUS

RESEARCH OF PIEZOELECTRIC RINGING SUPPRESSION IN POCKELS CELLS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (T 001)

Vilnius, 2021

Doctoral dissertation was prepared in State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology in 2017–2021.

Supervisor

Prof. Dr Algirdas BAŠKYS (State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology, Electrical and Electronic Engineering – T 001).

The Dissertation Defense Council of Scientific Field of Electrical and Electronic Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Dalius NAVAKAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – T 001).

Members:

Assoc. Prof. Dr Aidas MATIJOŠIUS (Vilnius University, Physics – N 002),

Prof. Dr Jurij NOVICKIJ (Vilnius Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – T 001),

Dr Iouliia SKLIAROVA (Aveiro University, Portugal, Electrical and Electronic Engineering – T 001),

Prof. Dr Algirdas SUŽIEDĖLIS (State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology, Physics – N 002).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defense Council of Electrical and Electronic Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **10 a. m. on 9 November 2021.**

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vilniustech.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 8 October 2021.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at Vilnius Gediminas Technical University repository <http://dspace.vgtu.lt>, at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania.) and the Wroblewski Library of the Lithuanian Academy of Sciences (Žygimantų st. 1, LT-01102, Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje atliekami tyrimai ir siūlomi sprendimai, skirti Pokelso narvelių optinio kontrasto didinimui, slopinant pjezoelektrinius virpesius sukeliamus aukštos įtampos impulsų, kuriais yra valdomas narvelis. Eksperimentiškai ištirta Pokelso narvelių optinio kontrasto priklausomybė nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio. Aptikti rezonansiniai dažniai ir ištirtas akustinių bangų sklaidimas Pokelso narvelio kristale. Pasiūlytas aktyvusis pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodas ir sukurtas aukštos įtampos aukšto dažnio impulsų generatorius šiam metodui realizuoti.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros šaltinių ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas.

Įvadiniam skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje analizuojami didelės galios lazerinėse sistemose taikomų šviesos moduliatorių tipai ir jų savybės. Apžvelgiamos Pokelso narveliuose naudojamų kristalų medžiagos, optinį kontrastą mažinantys reiškiniai ir optinės schemos. Analizuojamos aukštos įtampos impulsų generatorių topologijos, aptariami jų privalumai ir trūkumai.

Antrame skyriuje aprašomas sukurtas optinio kontrasto tyrimo stendas. Atliekami Pokelso narvelių su beta bario borato (BBO) ir kalio dideuterio fosfato (DKDP) kristalais optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio tyrimai. Ištirtas pjezoelektrinio reiškinių sukeltų akustinių bangų sklaidimas Pokelso narvelio kristaluose. Ištirtas pasyvusis pjezoelektrinių virpesių slopinimas Pokelso narvelyje su BBO kristalu.

Trečiame skyriuje pasiūlytas aktyvusis pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodas Pokelso narveliams su DKDP kristalu bei aprašytas aukštos įtampos impulsų generatorius, sukurtas šio metodo realizavimui. Aprašytas sukurtas pjezoelektrinių virpesių slopinimo sąlygų modelis ir eksperimentiškai ištirtas aktyvusis pjezoelektrinių virpesių slopinimas.

Pagrindiniai disertacijos rezultatai paskelbti 9 mokslinėse publikacijose, iš kurių 6 paskelbtos recenzuojamuose mokslo žurnaluose, turinčiuose cituojamumo rodiklį *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazėje, 2 – kituose mokslo žurnaluose ir 1 – konferencijos darbų leidinyje. Atliktų tyrimų rezultatai buvo pristatyti 12 mokslinių konferencijų, iš kurių 7 respublikinės ir 5 tarptautinės konferencijos.

Abstract

The dissertation conducts research and proposes solutions to increase the optical contrast of Pockels cells by suppressing the piezoelectric ringing caused by the high voltage pulses, which are used for the control of the cell. The dependence of the optical contrast of Pockels cells on the duration and frequency of high voltage pulses was investigated experimentally. Resonant frequencies were detected and the propagation of acoustic waves in the Pockels cell crystal was investigated. An active piezoelectric oscillation suppression method is proposed and a high voltage high frequency pulse generator is developed to implement this method. The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, references and the list of author's publications on the topic of the dissertation.

The introductory chapter discusses the research problem, the relevance of the work, describes the object of research, formulates the aim and objectives of the work, describes the research methodology, scientific novelty of the work, the practical significance of the results, defended statements. At the end of the introduction, the author's publications and conference papers on the topic of the dissertation and the structure of the dissertation are presented.

The first chapter analyzes the types of light modulators used in high power laser systems and their properties. The materials of the crystals used in Pockels cells, the phenomenon reducing the contrast ratio and main optical schemes are reviewed. Topologies of high voltage pulse generators, used for the control of Pockels cells, are analyzed, their advantages and disadvantages are discussed.

The second chapter presents the investigation of the dependence of the optical contrast of Pockels cells with beta barium borate (BBO) and potassium dideuterium phosphate (DKDP) crystals on the duration and frequency of high voltage pulses. The propagation of acoustic waves caused by a piezoelectric phenomenon in Pockels cell crystals was investigated. Passive suppression of piezoelectric ringing in a Pockels cell with a BBO crystal was investigated.

The third chapter proposes an active piezoelectric ringing suppression method for Pockels cells with a DKDP crystal and describes a high voltage pulse generator developed for the implementation of this method. Experimental investigation of active piezoelectric ringing suppression method was performed.

The main results of the dissertation have been published in 9 articles: 6 in scientific journals included in *Clarivate Analytics Web of Science* database, 2 in other scientific journals and 1 in conference proceedings.

Dissertation research results were presented in 12 scientific conferences, including 7 national and 5 international conferences.

Žymėjimai

Simboliai

d_{mk}	–	pjezoelektrinis koeficientas;
E	–	elektrinio lauko stipris;
f	–	dažnis;
I	–	šviesos intensyvumas;
L	–	induktyvumas;
n	–	lūžio rodiklis;
p_{ij}	–	elastooptinis koeficientas;
Q	–	krūvis;
r_{ij}	–	elektrooptinis koeficientas;
t	–	trukmė;
U	–	įtampa;
ε	–	santykinė dielektrinė skvarba;
ε_0	–	vakuomo dielektrinė skvarba;
Λ	–	akustinės bangos ilgis;
λ	–	šviesos bangos ilgis;
μ	–	magnetinė skvarba;
v	–	greitis;
ρ	–	tankis;
ω	–	kampinis dažnis.

Santrumpos

- BBO – beta bario boratas (angl. *beta barium borate*);
- CR – optinis kontrastas (angl. *contrast ratio / extinction ratio*);
- DKDP – kalio dideuterio fosfatas (angl. *potassium dideuterium phosphate*);
- ESL – ekvivalentinis nuoseklus induktyvumas (angl. *equivalent series inductance*);
- ESR – ekvivalentinė nuosekli varža (angl. *equivalent series resistance*);
- GaN FET – galio nitrido lauko tranzistorius (angl. *gallium nitride field-effect transistor*);
- ICR – Pokelso narvelio optinis kontrastas narvelį neveikiant įtampa (angl. *intrinsic contrast ratio*);
- KDP – kalio divandenilio fosfatas (angl. *potassium dihydrogen phosphate*);
- KTP – kalio titanilo fosfatas (angl. *potassium titanyl phosphate*);
- LGS – lantano galio silikatas (angl. *lanthanum gallium silicate*);
- LNB – ličio niobatas (angl. *lithium niobate*);
- LTA – ličio tantalitas (angl. *lithium tantalate*);
- MOSFET – metalo oksido puslaidininkio struktūros lauko tranzistorius (angl. *metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*);
- PC – Pokelso narvelis (angl. *Pockel's cell*);
- RTP – rubidžio titanilo fosfatas (angl. *rubidium titanyl phosphate*);
- SiC – silicio karbidas (angl. *silicon carbide*);
- VCR – Pokelso narvelio optinis kontrastas narvelį veikiant su įtampa (angl. *voltage contrast ratio*).

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	3
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	6
Padėka	6
1. POKELSO NARVELIŲ VEIKIMO PRINCIPO IR PROBLEMŲ APŽVALGA	7
1.1. Pokelso narvelio paskirtis ir principas	7
1.2. Pokelso narvelių kristalinių medžiagų apžvalga.....	12
1.3. Pokelso narvelių optinių schemų apžvalga	15
1.4. Pokelso narvelių optinį kontrastą mažinančių reiškinių analizė	17
1.4.1. Pokelso narvelio įtampos ir lazerio bangos ilgio įtaka optiniam kontrastui	17
1.4.2. Pokelso narvelio šilimo įtaka optiniam kontrastui	18
1.4.3. Spindulio nuokrypio optinės ašies atžvilgiu įtaka optiniam kontrastui	19

1.4.4. Lazerio spindulio pozicijos įtaka optiniam kontrastui	20
1.4.5. Pjezoelektrinių virpesių įtaka optiniam kontrastui.....	21
1.5. Pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodų Pokelso narveliuose analizė	24
1.6. Aukštos įtampos impulsų generatoriai Pokelso narvelių valdymui	25
1.6.1. Aukštos įtampos impulsų generatorių apkrovos jungimo grandinės.....	25
1.6.2. Aukštos įtampos impulsų generatoriai pikosekundinių-nanosekundinių trukmių impulsų formavimui.....	26
1.6.3. Aukštos įtampos impulsų generatoriai nanosekundinių- milisekundinių trukmių impulsų formavimui.....	29
1.6.4. Komercinių aukštos įtampos impulsų generatorių apžvalga	30
1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	31
 2. POKELSO NARVELIO OPTINIO KONTRASTO PRIKLAUSOMYBĖS NUO AUKŠTOS ĮTAMPOS IMPULSŲ TRUKMĖS IR DAŽNIO TYRIMAS	33
2.1. Optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio tyrimų stendas	33
2.2. Pokelso narvelių su beta bario borato kristalu tyrimai	40
2.2.1. Pjezoelektrinių virpesių analizė	40
2.2.2. Pjezoelektrinių virpesių pasiskirstymo kristale tyrimas	46
2.2.3. Optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulso trukmės tyrimas	51
2.2.4. Optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio tyrimas	53
2.3. Pokelso narvelių su kalio dideuterio fosfato kristalu tyrimai	57
2.3.1. Pjezoelektrinių virpesių analizė	57
2.3.2. Pjezoelektrinių virpesių pasiskirstymo kristale tyrimas.....	59
2.4. Antrojo skyriaus išvados	64
 3. AKTYVUSIS POKELSO NARVELIŲ PJEZOELEKTRINIŲ VIRPESIŲ SLOPINIMAS IR TAM SKIRTO AUKŠTOS ĮTAMPOS IMPULSŲ GENERATORIAUS KŪRIMAS	65
3.1. Pokelso narvelio su kalio dideuterio fosfato kristalu pjezoelektrinių virpesių aktyvusis slopinimo metodas	66
3.1.1. Pjezoelektrinių virpesių aktyvusis slopinimo principas	66
3.1.2. Pjezoelektrinių virpesių aktyviojo slopinimo tyrimas modeliuojant.....	69
3.2. Aukštos įtampos impulsų generatorius Pokelso narvelių valdymui su aktyviuoju pjezoelektrinių virpesių slopinimu.....	71
3.2.1. Pokelso narvelio kaip talpuminės apkrovos impulsų generatoriui analizė.....	71
3.2.2. Aukštos įtampos impulsų generatoriaus Pokelso narvelių valdymui kūrimas	73
3.2.3. Aukštos įtampos impulsų generatoriaus išėjimo impulso parametrai	76
3.3. Pokelso narvelio pjezoelektrinių virpesių aktyviojo slopinimo eksperimentinis tyrimas	78
3.4. Trečiojo skyriaus išvados	82

BENDROSIOS IŠVADOS	85
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	87
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	99
SUMMARY IN ENGLISH.....	101
PRIEDAI ¹	115
A priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija	118
B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	119

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the Problem.....	1
Relevance of the Thesis.....	2
The Object of Research	2
The Aim of the Thesis	2
The Tasks of the Thesis	2
Research Methodology	3
Scientific Novelty of the Thesis	3
Practical Significance of the Research Findings.....	3
Defended Statements.....	4
Approval of the Research Findings	4
The Structure of the Dissertation.....	6
Acknowledgements	6
1. OVERVIEW OF THE PRINCIPLE AND PROBLEMS OF POCKELS CELL	7
1.1. Purpose and Principle of the Pockels Cell	7
1.2. An Overview of the Crystalline Materials of Pockels Cell.....	12
1.3. Overview of the Optical Schemes	15
1.4. Analysis of Phenomena Reducing the Contrast Ratio of Pockels Cell.....	17
1.4.1. Influence of Voltage and Laser Wavelength on Contrast Ratio of Pockels Cell	17
1.4.2. Influence of Temperature on Contrast Ratio of Pockels Cell	18
1.4.3. Influence of Beam Angle Deviation on Contrast Ratio of Pockels Cell	19

1.4.4. Influence of Laser Beam Position on Contrast Ratio of Pockels Cell.....	20
1.4.5. Influence of Piezoelectric Ringing on Contrast Ratio of Pockels Cell	21
1.5. Analysis of Piezoelectric Ringing Suppression Methods Used in Pockels Cells.....	24
1.6. High Voltage Pulse Generators for Control of Pockels Cell	25
1.6.1. Load Circuits for High Voltage Pulse Generators	25
1.6.2. High Voltage Pulse Generators for Picosecond-Nanosecond Pulse Generation	26
1.6.3. High Voltage Pulse Generators for Nanosecond-Millisecond Pulse Generation	29
1.6.4. Review of Commercial High Voltage Pulse Generators.....	30
1.7. Conclusions of the First Chapter and Formulation of the Dissertation Tasks	31
 2. INVESTIGATION OF THE CONTRAST RATIO OF POCKELS CELL ON THE DURATION AND FREQUENCY OF HIGH VOLTAGE PULSES.....	 33
2.1. Contrast Ratio Dependence on High Voltage Pulse Duration and Frequency Measurement Stand	33
2.2. Investigation of Beta Barium Borate Pockels Cells.....	40
2.2.1. Analysis of Piezoelectric Ringing.....	40
2.2.2. Investigation of the Distribution of Piezoelectric Ringing.....	46
2.2.3. Investigation of the Dependence of Contrast Ratio on High Voltage Pulse Duration	51
2.2.4. Investigation of the Dependence of Contrast Ratio on the Duration and Frequency of High Voltage Pulses	53
2.3. Investigation of Potassium Dideuterium Phosphate Pockels Cells.....	57
2.3.1. Analysis of Piezoelectric Ringing.....	57
2.3.2. Investigation of the Distribution of Piezoelectric Ringing.....	59
2.4. Conclusions of the Second Chapter.....	64
 3. ACTIVE PIEZOELECTRIC RINGING SUPPRESSION IN POCKELS CELLS AND DEVELOPMENT OF A DEDICATED HIGH VOLTAGE PULSE GENERATOR.....	 65
3.1. Method for Active Piezoelectric Ringing Suppression in Potassium Dideuterium Phosphate Pockels Cells	66
3.1.1. Principle of Active Piezoelectric Ringing Suppression	66
3.1.2. Simulation of Active Piezoelectric Ringing Suppression	69
3.2. High Voltage Pulse Generator for Control of Pockels Cell with Active Piezoelectric Ringing Suppression	71
3.2.1. Analysis of Pockels Cell as a Capacitive Load for a Pulse Generator.....	71
3.2.2. Development of a High Voltage Pulse Generator for Control of Pockels Cell	73
3.2.3. Output Pulse Parameters of Developed High Voltage Pulse Generator	76
3.3. Experimental Investigation of Active Piezoelectric Ringing Suppression in Pockels Cells.....	78
3.4. Conclusions of the Third Chapter.....	82

GENERAL CONCLUSIONS	85
REFERENCES	87
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	99
SUMMARY IN ENGLISH.....	101
ANNEXES ²	115
Annex A. The author's declaration of academic integrity	118
Annex B. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation.....	119

²The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Ivadas

Problemos formulavimas

Didelės galios lazerio impulsams formuoti yra plačiai naudojami elektrooptiniai modulatoriai – Pokelso narveliai. Pokelso narveliai yra valdomi elektriniu lauku, sukuriamu aukštos įtampos impulsais. Elektrinis laukas pakeičia narvelio kristalo lūžio rodiklį, dėl ko pakinta per jį sklindančio lazerio spindulio poliarizacija. Spindulys iš Pokelso narvelio patenka į poliarizatorių, iš kurio išėjusio spindulio intensyvumo pokytis yra apsprendžiamas poliarizacijos pokyčiu. Santykinis lazerio spindulio intensyvumo pokytis vadinamas optiniu kontrastu ir yra pagrindinis Pokelso narvelio parametras, kurio vertė turi būti galimai didesnė. Tačiau Pokelso narveliuose egzistuoja reiškiny, vadinamas pjezoelektriniais virpesiais, kuris mažina optinį kontrastą. Dėl pjezoelektrinių kristalo savybių ši reiškinį sudaro akustinės bangos sukeltos aukštos įtampos impulsų, kurie naudojami impulsiniam elektriniam laukui Pokelso narvelyje sudaryti. Akustinė banga daro įtaką kristalo lūžio rodikliui ir tokiu būdu moduliuoja lazerio spindulio poliarizaciją, dėl ko mažėja Pokelso narvelio optinis kontrastas.

Apibendrinant, galima suformuluoti šią, didelės galios lazerių impulsams formuoti naudojamų elektrinių optinių moduliatorių – Pokelso narvelių, problemą, kuri sprendžiama disertacijoje: Pokelso narvelių optinio kontrasto sumažėjimas, sąlygojamas pjezoelektrinių virpesių reiškinio.

Darbo aktualumas

Per pastaruosius penkis metus Lietuvos lazerinių technologijų sektorius kas metus vidutiniškai išaugo 13 % ir lenkia pasaulinės lazerių rinkos augimą, kuris siekia 5–6 %. Lietuvos lazerinių technologijų sektorius pirmauja pasaulyje tiekiant moksliniams tyrimams skirtus lazerius. Pagal 2014–2020 m. Lietuvos sumanios specializacijos valstybės paramos moksliniams tyrimams ir inovacijoms strategiją, kryptyje „Nauji gamybos procesai, medžiagos ir technologijos“ pirmojoje vietoje įtrauktas prioritetas „Fotoninės ir lazerinės technologijos“. Kadangi lazerinių technologijų rinkos augimas priklauso ne tik nuo vis didėjančio tokių technologijų poreikio, bet yra sąlygojamas ir nuolatinio jų tobulinimo, tyrimai, leidžiantys kurti tobulesnes lazerines sistemas ir jų komponentus, yra aktualūs ir turi praktinę vertę.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – pjezoelektrinių virpesių slopinimas kalio dideuterio fosfato (DKDP) ir beta bario borato (BBO) kristalų Pokelso narveliuose.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – sukurti metodą bei jam įgyvendinti skirtą aukštos įtampos impulsų generatorių, aktyviajam pjezoelektrinių virpesių slopinimui Pokelso narveliuose.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Ištirti Pokelso narvelio kristalo pjezoelektrinių virpesių įtakos optiniam kontrastui priklausomybę nuo narvelio valdymui naudojamų aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio.
2. Sukurti ir modeliuojant ištirti aktyvųjį Pokelso narvelių pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodą.
3. Sukurti generatorių trumpiems aukštos įtampos impulsams formuoti ir, jį naudojant, eksperimentiškai ištirti aktyvųjį pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodą Pokelso narveliuose.

Tyrimų metodika

Darbe taikomi analitiniai metodai, modeliavimas ir eksperimentiniai tyrimai. Pokelso narvelių kristale susidarančių įtempimų analizė atlikta naudojant sukurtus matematinius modelius „Autodesk Nastran In-CAD“ ir „LabVIEW“ programinei įrangai. Eksperimentiniai tyrimai atlikti naudojant sukurtą aukštos įtampos impulsų generatorių bei stendą Pokelso narvelių optinio kontrasto tyrimui. Impulsų generatoriaus ir oscilografo valdymo algoritmai įgyvendinami naudojant „LabVIEW“ programinę įrangą.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie elektros ir elektronikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Pasiūlytas Pokelso narvelių optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų dažnio ir trukmės tyrimo metodas, leidžiantis aptikti pjezoelektrinių virpesių sąlygojamas sumažinto optinio kontrasto zonas.
2. Sukurtas naujas aukštos įtampos impulsų generatorius, skirtas Pokelso narvelių valdymui, kurio generuojamų impulsų frontų trukmė yra trumpesnė, lyginant su žinomais šios topologijos aukštos įtampos impulsų generatoriais.
3. Sukurtas naujas aktyvusis pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodas Pokelso narveliams.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Gauti disertacijos rezultatai gali būti taikomi lazerinių sistemų, kuriuose yra naudojami Pokelso narveliai, tobulinimui. Planuojama gautus tyrimų rezultatus panaudoti įmonėje EKSMA Optics, UAB kuriant modernius Pokelso narvelius ir juos valdančios elektronikos prototipus. Tyrimo rezultatai, pasiekti doktorantūros procese, buvo pritaikyti įgyvendinant projektą „Prototipas valdomos trukmės impulsų paketų išskyrimui iš didelio pasikartojimo dažnumo nuolatinio kaupinimo femtosekundinių lazerių“ Nr. TPP-01-048 (2017–2018) m., kurį vykdė aukštųjų technologijų įmonė „Optolita“ (EKSMA Optics, UAB) kartu su Vilniaus universiteto Fizikos fakulteto Lazerinių tyrimų centru. Projektas buvo programos technologinės plėtros projektų TPP-01, finansuojamos Mokslo, inovacijų ir technologijų agentūros, dalis.

Ginamieji teiginiai

1. Pasiūlytas Pokelso narvelių optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų dažnio ir trukmės tyrimo metodas leidžia aptikti pjezoelektrinių virpesių sąlygojamas mažo optinio kontrasto zonas, apimančias impulsų dažnius nuo 1 kHz iki 1 MHz ir trukmes nuo 130 ns iki 5 μ s.
2. Naudojant Pokelso narvelio valdymui trumpų impulsų vorą, vietoje ištisinio aukštos įtampos impulso, vorą sudarančių impulsų teigiamų ir neigiamų frontų sukeltos akustinės bangos slopina viena kitą, todėl aktyvųjų pjezoelektrinių virpesių slopinimą galima įgyvendinti naudojant impulsų voras.
3. Sukurtas aukštos įtampos impulsų generatorius Pokelso narvelių valdymui leidžia formuoti impulsus, kurių mažiausia frontų trukmė yra 3,4 ir 7,6 ns, kai impulso amplitudė neviršija, atitinkamai 1,9 ir 2,9 kV, o Pokelso narvelio talpa yra 6 pF.
4. Sukurtas aktyvusis pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodas, paremtas trumpų aukštos įtampos impulsų seka, leidžia Pokelso narveliuose su kalio dideuterio fosfatu 5 kartus sumažinti lazerio spindulio intensyvumo pulsacijas, lyginant su atveju kai Pokelso narvelis valdomas įprastai, naudojant ilgą ištisinį aukštos įtampos impulsą.

Darbo rezultatų aprobavimas

Darbai atlikti 2017–2021 m. Valstybinio mokslinių tyrimų instituto Fizinių ir technologijos mokslų centro Funkcinių medžiagų ir elektronikos skyriuje ir aukštųjų technologijų įmonės EKSMA Optics, UAB tyrimų laboratorijose. Taip pat dalis tyrimų buvo atliekama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedroje ir Vilniaus universiteto Fizikos fakulteto Lazerinių tyrimų centre. Disertacijos tema yra atspausdinti 9 moksliniai straipsniai, iš kurių 6 paskelbti recenzuojamuose mokslo žurnaluose, turinčiuose cituojamumo rodiklį *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazėje, 2 – kituose mokslo žurnaluose ir 1 – konferencijos darbų leidinyje. Atliktų tyrimų rezultatai buvo pristatyti 12 mokslinių konferencijų pranešimų, iš kurių 7 respublikinėse ir 5 tarptautinėse konferencijose, iš kurių viena užsienyje:

- 19-oji respublikinė Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „*Mokslas – Lietuvos ateitis. Elektronika ir elektrotechnika*“, 2016 m. kovo 16 d., Vilnius, Lietuva. Pranešimo tema: „Medžiagos kontrasto pasiskirstymo Pokelso narvelio kristale tyrimas“;

- 20-oji respublikinė Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „*Mokslas – Lietuvos ateitis. Elektronika ir elektrotechnika*“, 2017 m. kovo 17 d., Vilnius, Lietuva. Pranešimo tema: „Pjezoelektrinių virpesių Pokelso narvelio kalio dideuterio fosfato kristale tyrimas“;
- Tarptautinė konferencija „*Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*“, 2017 m. balandžio 27 d., Vilnius, Lietuva. Pranešimo tema: „Investigation of frequency response of Pockels cells based on beta barium borate crystals“;
- 21-oji respublikinė Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „*Mokslas – Lietuvos ateitis. Elektronika ir elektrotechnika*“, 2018 m. kovo 16 d., Vilnius, Lietuva. Pranešimo tema: „Medžiagos kontrasto priklausomybės nuo optinės ašies nuokrypio kampo beta barium borato kristale tyrimas“;
- Tarptautinė konferencija „*Advanced Properties and Processes in Optoelectronic Materials and Systems – APROPOS-16*“, 2018 m. spalio 10 d., Vilnius, Lietuva. Pranešimo tema: „Investigation of contrast ratio dependance on angular deviation of optical axis of beta barium borate crystals“;
- 8-oji respublikinė doktorantų ir jaunųjų mokslininkų konferencija „*FizTech2018*“, 2018 m. spalio 18 d., Vilnius, Lietuva. Pranešimo tema: „Pokelso narvelių su beta barium borato kristalais kontrastų dažninių charakteristikų tyrimas“;
- 22-oji respublikinė Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „*Mokslas – Lietuvos ateitis. Elektronika ir elektrotechnika*“, 2019 m. kovo 15 d., Vilnius, Lietuva. Pranešimo tema: „Aukštos įtampos rakto Pokelso narvelių valdymui kūrimas ir tyrimas“;
- 62-oji tarptautinė fizinių bei gamtos mokslų studentų ir jaunųjų mokslininkų konferencija „*Open Readings 2019*“, 2019 m. kovo 19 d., Vilnius, Lietuva. Pranešimo tema: „Investigation of resonance effects in Pockels cells with BBO crystals“;
- 62-oji tarptautinė fizinių bei gamtos mokslų studentų ir jaunųjų mokslininkų konferencija „*Open Readings 2019*“, 2019 m. kovo 19 d., Vilnius, Lietuva. Pranešimo tema: „Investigation of the properties of different construction DKDP Pockels cells“;
- 9-oji respublikinė doktorantų ir jaunųjų mokslininkų konferencija „*FizTech2019*“, 2019 m. spalio 23 d., Vilnius, Lietuva. Pranešimo tema: „Pokelso narvelių pjezoelektrinių virpesių slopinimo tyrimas“;
- 7-oji tarptautinė konferencija „*IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE'2019)*“, 2019 m. lapkričio

- 15 d., Liepoja, Latvija. Pranešimo tema: „High voltage driver for the Pockels cell“;
- 23-oji respublikinė Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „*Mokslas – Lietuvos ateitis. Elektronika ir elektrotechnika*“, 2020 m. balandžio 30 d., Vilnius, Lietuva. Pranešimo tema: „Aukštos įtampos rakto pjzoelektrinių virpesių slopinimui Pokelso narveliuose kūrimas ir tyrimas“;
 - 10-oji respublikinė doktorantų ir jaunųjų mokslininkų konferencija „*FizTech2020*“, 2020 m. spalio 22 d., Vilnius, Lietuva. Pranešimo tema: „Pokelso narvelių dažninių kontrasto charakteristikų tyrimas“;

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados. Darbo pabaigoje pateiktas literatūros šaltinių ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas.

Darbo apimtis yra 113 puslapių, neskaitant priedų, tekste panaudotos 30 numeruotų formulių, 65 paveikslai ir 2 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 143 literatūros šaltiniai.

Padėka

Nuoširdžiai dėkoju darbo vadovui prof. dr. Algirdui Baškiui už vertingus patarimus, konsultacijas ir pagalbą rašant disertaciją.

Dėkoju Valstybinio mokslinių tyrimų instituto Fizinių ir technologijos mokslų centro Funkcinių medžiagų ir elektronikos skyriui, Vilniaus Gedimino technikos universiteto Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedrai ir Vilniaus universiteto Lazerinių tyrimų centrui už suteiktą galimybę tobulėti ir vykdyti mokslinę veiklą.

Dėkoju EKSMA Optics, UAB kolegoms už įtraukimą į profesinę ir mokslinę veiklą, vertingas diskusijas ir motyvaciją.

Dėkoju savo šeimai – tėvams, seneliams, broliams – už tikėjimą ir palaikymą. Ypač dėkoju mylimai žmonai Aušrai už kantrybę, supratingumą ir visokeriopą palaikymą.

Pokelso narvelių veikimo principo ir problemų apžvalga

Skyriuje pateikiama Pokelso reiškiniu paremtų elektrinių optinių moduliatorių veikimo principo ir jų problemų apžvalga bei šių moduliatorių valdymui skirtų aukštos įtampos impulsų generatorių topologijų analizė. Skyriaus pabaigoje pateikiamos pirmojo skyriaus išvados ir formuluojami disertacijos uždaviniai. Skyriaus rezultatai paskelbti dvejose publikacijose (Sinkevičius ir kt. 2019; Sinkevičius ir kt. 2017)

1.1. Pokelso narvelio paskirtis ir principas

Pokelso narvelis yra elektrooptinis moduliatorius, skirtas sklindančios spindulio poliarizacijos moduliavimui. Jo veikimas paremtas Pokelso reiškiniu. Pokelso narveliu paremtas lazerio spindulio moduliatorius, lyginant su kitais koherentinės šviesos moduliatoriais, pasižymi trumpu atsako laiku, kuris siekia 100 fs (Liu ir kt. 2015; Xiaojie ir kt. 1997). Aukštas Pokelso narvelių kristalų lazerinio pramušimo slenkstis leidžia juos taikyti didelės galios lazerinėse sistemose (Träger 2012; Starobor ir kt. 2016; Liu ir kt. 2015). Pokelso narvelis yra sudarytas iš dielektrinės netiesinės anizotropinės kristalinės medžiagos prie kurios šonų pritvirtinti elektrodai. Optinė anizotropija – optinių savybių skirtumas įvairiomis

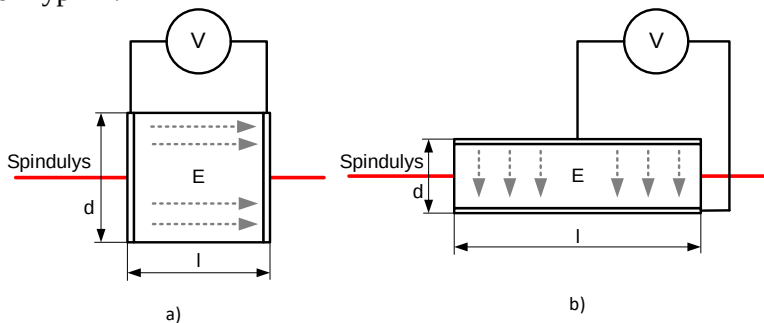
kryptimis. Medžiagoje su optine anizotropija spindulys pasidalina į du spindulius, kurių sklaidimo greičiai ir lūžio rodikliai skiriasi, o spindulio poliarizacija yra statmena viena kitos atžvilgiu (Pečar ir kt. 2015). Šie spinduliai vadinami paprastuoju (angl. *ordinary*) ir nepaprastuoju (angl. *extraordinary*). Priklausomai nuo anizotropinės medžiagos, yra kelios išskirtinės kryptys, kuriomis nepasireiškia dvejopas spindulių lūžis. Šios kryptys vadinamos optinėmis ašimis.

Šviesos spindulys sklindantis per Pokelso narvelį moduluojamas pridėdam aukštą įtampą prie Pokelso narvelio kristalo elektrodų. Tokiu būdu sukuriamas elektrinis laukas statmenas elektrodams. Elektrinio lauko stipris apskaičiuojamas:

$$E = \frac{U}{d}, \quad (1.1)$$

čia U – tarp Pokelso narvelio kristalo elektrodų sudaryta įtampa, d – atstumas tarp elektrodų.

Pokelso narveliai skirstomi į du tipus priklausomai nuo sukuriama elektrinio lauko krypties šviesos spindulio atžvilgiu (1.1 paveikslas): skersinį ir išilginį. Išilginiame Pokelso narvelyje elektrinis laukas yra lygiagretus spindulio sklaidimo kryptčiai. Skersiniame Pokelso narvelyje elektrinis laukas yra statmenas spindulio sklaidimo kryptčiai.



1.1 pav. Pokelso narvelių tipai: a) išilginis, b) skersinis
Fig. 1.1. Types of Pockels cell: a) longitudinal, b) transverse

Sukuriant elektrinį lauką kristale, pakeičiami paprastojo ir nepaprastojo spindulio lūžio rodikliai, dėl to pakinta ir šviesos spindulio, praėjusio per narvelį, poliarizacija. Pokelso narvelio kristalo lūžio rodiklio priklausomybė nuo elektrinio lauko stiprio matematiškai aprašoma lūžio rodiklių elipsoidu. Dekarto koordinatų sistemoje elipsoidas apibrėžiamas (Anon 1970; Wu ir kt. 2020):

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1, \quad (1.2)$$

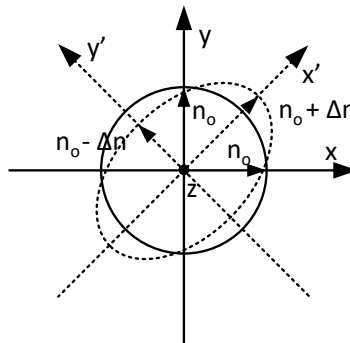
čia n yra lūžio rodikliai x , y ir z ašimis. Tiesinė elektrinio lauko įtaka optinei kristalo anizotropijai išreiškiama lūžio rodiklio pokyčiu:

$$\Delta\left(\frac{1}{n_i^2}\right) = \sum_{j=1}^3 r_{ij} E_j, \quad (1.3)$$

čia n_i – lūžio rodiklis, E_j – elektrinio lauko stipris ir r_{ij} elektrooptinis koeficientas. Elektrinis laukas medžiagoje iššaukia lūžio rodiklių elipsoido formos, dydžio ir orientacijos pokytį. Elipsoido formos kitimas aprašomas (Roth ir kt. 2005):

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{n_x^2} + r_{1j} E_j\right) x^2 + \left(\frac{1}{n_y^2} + r_{2j} E_j\right) y^2 + \left(\frac{1}{n_z^2} + r_{3j} E_j\right) z^2 \\ + 2r_{4j} E_j yz + 2r_{5j} E_j zx + 2r_{6j} E_j xy = 1. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Bendruoju atveju, Pokelso narvelio kristalą paveikus elektriniu lauku, lūžio rodiklių elipsoidas pakinta iš apskritiminio į elipsinį aplink kristalo optinę ašį. Pavyzdžiui kalio divandenilio fosfato (KDP) kristalo lūžio rodiklių elipsoidas pateiktas vienoje plokštumoje kuri yra statmena kristalo optiniai ašiai z (1.2 paveikslas).



1.2 pav. Lūžio rodiklio elipsoidas KDP kristale kai elektrinis laukas yra lygiagretus optiniai ašiai z . Spindulys sklinda z kryptimi ir poliarizuotas x kryptimi. x ir y kristalografines ašys, x' ir y' elektriniu lauku paveiktos ašys (Anon 1970)

Fig. 1.2. Change of the index ellipsoid in a KDP crystal when an electric field is applied parallel to the z -axis. Incident wave traveling in z direction is polarized in the x direction, x and y are the crystallographic axes, and x' and y' are the electrically induced axes

Kai kristalas nėra paveiktas elektriniu lauku taisyklingos formos apskritimas parodo, kad kristalas nepasižymi dvigubu šviesos lūžimu kai spindulys sklinda optine ašimi z . Kai elektrinis laukas sukuriama kristale, elipsoido skerspjūvis tampa elipsiniu x' ir y' ašių kryptimis kurios yra orientuotos 45° kampų kristalografinių ašių x ir y atžvilgiu. Šis kampas nėra priklausomas nuo elektrinio lauko stiprio (Koechner 2006).

Dažniausiai kristalai turi apie 18 elektrooptinių koeficientų r_{ij} . Tačiau kristaluose pasižyminčiuose simetrija dauguma jų yra nuliniai. KDP kristale r_{63} yra vienintelis nepriklausomas elektrooptinis koeficientas kuris aprašo elipsoido pokyčius kai elektrinis laukas yra lygiagretus kristalo optinės ašies kryptčiai. Lūžio rodiklio pokyčiai x' ir y' kryptimis yra:

$$n_{x'} = n_0 + \frac{1}{2} n_0^3 r_{63} E_z, \quad n_{y'} = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 r_{63} E_z, \quad (1.5)$$

čia n_0 – paprastojo spindulio lūžio rodiklis. Šių dviejų statmenų komponenčių lūžio rodiklio skirtumas (Eichler ir kt. 2018; Koechner 2006):

$$\Delta n_0 = n_0^3 r_{63} E_z. \quad (1.6)$$

Lūžio rodiklio skirtumas per kristalo ilgį l įneša fazių skirtumą tarp dviejų, viena kitos atžvilgiu statmenai poliarizuotų, šviesos spindulių. Šis fazių skirtumas apskaičiuojamas (Svelto 2010; Koechner 2006):

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_0 l. \quad (1.7)$$

Fazių skirtumas $\Delta\varphi$ kristalo ilgyje l yra susijęs su kristalą veikiančia įtampa:

$$U_z = E_z l. \quad (1.8)$$

Tuomet fazių skirtumą apibūdiname:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{63} U_z. \quad (1.9)$$

Kai kristale sukuriama elektrinio lauko kryptis yra lygiagreti lazerio spindulio sklaidimo kryptčiai (išilginio tipo Pokelso narvelis), fazių skirtumas $\Delta\varphi$ nepriklauso nuo kristalo matmenų. Kitu atveju fazių skirtumas priklauso nuo šviesos atstumo sklindančio per Pokelso narvelio kristalą. Bendruoju atveju, statmenos komponentės dėl fazių skirtumo sukuria eliptiškai poliarizuotas bangas, t. y. spindulys tampa eliptiškai poliarizuotas. Poliarizatoriai naudojami kartu su Pokelso narveliais norint atskirti šias dvi šviesos poliarizacijas, t. y. vieną iš jų praleisti, o kitą atspindėti. Jeigu eliptiškai poliarizuota šviesa sklinda per poliarizatorių, šviesos intensyvumas tampa šio eliptiškumo funkcija ir kartu priklausys nuo kristalą veikiančios įtampos. Kai Pokelso narvelio kristalas

patalpintas tarp dviejų poliarizatorių sukryžiuotų vienas kito atžvilgiu, galime apskaičiuoti spindulio šviesos intensyvumo priklausomybę nuo komponenčių fazių skirtumo (Sun ir kt. 2011):

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}, \quad (1.10)$$

čia I_0 įeinančio spindulio intensyvumas. Matome (1.10), jei fazių skirtumas yra lygus nuliui, šviesos intensyvumas išėjime irgi bus lygus nuliui. Jei paskutinis poliarizatorius (analizatorius) pasukamas 90° taip, kad jis būtų nesukryžiuotas pirmojo poliarizatoriaus atžvilgiu, tada intensyvumas išėjime:

$$I = I_0 \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2}. \quad (1.11)$$

Kokybės moduliacijoje paremtoje Pokelso narveliais, narvelio valdymui naudojamos dvi įtampos vertės: pusės bangos ir ketvirčio bangos. Pokelso narvelio įtampos vertė, kuri sukuria elektrinį lauką leidžiantį gauti $\Delta\varphi = \pi/2$ fazių skirtumą, vadinama ketvirčio bangos įtampa (angl. *quarter-wave voltage*), o $\Delta\varphi = \pi$ fazių skirtumą – pusės bangos įtampa (angl. *half-wave voltage*). Remiantis (1.9) galime apskaičiuoti įtampą kurią pridėjus susidarytų $\Delta\varphi = \pi$ fazių skirtumas išilginio tipo Pokelso narvelių kristaluose (Andreev ir kt. 2011):

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{2n_0^3 r_{ij}}. \quad (1.12)$$

Išilginio Pokelso narvelio atveju atstumas tarp elektrodų priklauso nuo kristalo ilgio per kurį sklinda spindulys, todėl pusės bangos įtampa nepriklauso nuo kristalo matmenų. Elektrodai šios konfigūracijos Pokelso narveliuose yra montuojami kartu su kristalų optinių paviršių danga arba žiedų pavidalu prie kristalų optinio paviršiaus. Pagrindinis žiedų trūkumas, kad jie nesuformuoja tolygaus elektrinio lauko per visą kristalo tūrį, todėl pusės arba ketvirčio bangos įtampos tokios konstrukcijos Pokelso narveliuose būna didesnės (Koechner 2006)

Skersinio tipo Pokelso narvelių kristaluose elektrinis laukas sukuriamas statmenai lazerio spindulio sklaidimo kryptimi. Pusės bangos įtampa šio tipo Pokelso narveliams apskaičiuojama (Mat Nashim ir kt. 2017):

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda d}{2n_0^3 r_{ij} l}, \quad (1.13)$$

čia l – kristalo ilgis ir d – atstumas tarp elektrodų. Skersiniuose Pokelso narveliuose elektrinis laukas yra statmenas lazerio spindulio sklaidimo kryptimi, todėl pusės bangos įtampa yra tiesiškai proporcinga atstumui tarp elektrodų ir atvirkščiai proporcinga kristalo ilgiui. Šios savybės išnaudojamos integruotuose elektriniuose optiniuose modulatoriuose. Suformuojat labai mažą atstumą tarp

elektrodų, lyginant su kristalo ilgiu, galima sumažinti pusės bangos įtampą iki 4,5 V. Dėl mažesnės įtampos supaprastėja Pokelso narvelio valdymui skirta elektros grandinė todėl pasiekiamas 40 GHz moduliacijos dažnis (Mercante ir kt. 2018; Tang ir kt. 2004; Ren ir kt. 2019; Huang ir kt. 2012).

1.2. Pokelso narvelių kristalinių medžiagų apžvalga

Pokelso narvelių kristalų medžiagos turi pasižymėti aukšta optine kokybe, aukštu lazerinio pramušimo slenksčiu ir aukštu elektrooptiniu koeficientu spinduliui sklindant kristalo optine ašimi. Iš (1.12) ir (1.13) matyti, kad pusės bangos įtampa priklauso nuo lazerio spindulio bangos ilgio, medžiagos lūžio rodiklio ir elektrooptinio koeficiento. Skersinio tipo Pokelso narvelių pusės bangos įtampa taip pat priklauso nuo kristalo ilgio lazerio spindulio sklidimo kryptimi ir atstumo tarp elektrodų. Bendru atveju Pokelso narvelių ketvirčio bangos įtampa gali kisti nuo 1 kV iki 5 kV (Svelto 2010). Mažesnė įtampa leidžia supaprastinti Pokelso narvelių valdymo elektroniką. Dėl šios priežasties Pokelso narveliams siekiama naudoti tik aukštu elektrooptiniu koeficientu pasižyminčias kristalines medžiagas.

Tradicinės Pokelso narveliuose naudojamos kristalų medžiagos yra kalio dideuterio fosfatas (DKDP) ir ličio niobatas (LNB). Vėliau Pokelso narvelių kristalams pradėtas naudoti beta bario boratas (BBO), bei lantano galio silikatas (LGS) ir kalio titanilo fosfatas (KTP). Šių medžiagų pralaidumo juostos, kristalo simetrijos, lūžio rodikliai ir elektrooptiniai koeficientai yra plačiai išnagrinėti moksliniuose straipsniuose ir knygose (Roth ir kt. 2005; Zernike 1964; Zhang ir kt. 2000; Carvajal ir kt. 2007; Eichler ir kt. 2018; Koechner 2006; Träger 2012; Cheng ir kt. 1994; Anon 1970; Hamze ir kt. 2020). Visoms medžiagoms yra svarbus homogeniškumas kadangi tai daro įtaką optiniam kontrastui.

KDP ir DKDP kristalai yra vieni pirmų ir labiausiai žinomų elektrinių optinių medžiagų. Šie kristalai auginami kambario temperatūroje iš vandens tirpalo ir pasižymi maža sugertimi ultravioletinių, matomų ir artimųjų infraraudonųjų spindulių spektro ruože. Standartiniu auginimo metodu įmanoma išauginti iki 100 mm skersmens kristalą (Koechner 2006). Naudojant pagreitinto auginimo metodą, gautas $57 \times 57 \times 55 \text{ cm}^3$ matmenų kristalas (Zaitseva ir kt. 1997; Li ir kt. 2005). Šios šeimos kristalai pasižymi aukštais lazerinio pramušimo slenksčiais, aukšta optine kokybe ir dideliais elektrooptiniais koeficientais, tačiau yra minkšti ir higroskopiški, todėl juos būtina apsaugoti nuo aplinkos poveikio. Norint išvengti paprastojo ir nepaprastojo spindulių išsiskyrimo (angl. *walk-off*) elektrinis laukas formuojamas lygiagrečiai spindulio sklidimo kryptiai (išilginio tipo Pokelso narvelis). Tokioje konfigūracijoje dominuoja vienas elektrooptinis koeficientas (r_{63}). DKDP dažnai naudojami vietoje KDP, nes pasižymi mažesne pusės bangos įtampa ir didesniu pramušimo slenksčiu.

LNB ir LTA kristalai yra auginami aukštoje 1250–1650 °C temperatūroje. Dėl aukštos auginimo temperatūros sudėtinga išlaikyti aukštą kristalų homogeniškumą. Šios medžiagos yra kietos, nėra higroskopiškos, pasižymi maža sugertimi infraraudonųjų spindulių spektro ruože, tačiau pramušimo slenkstis yra žymiai mažesnis lyginant su DKDP kristalais. Žinoma, kad šie LNB kristalai pasižymi stipriais pjezoelektriniais virpesiais (Wang ir kt. 2002) dėl kurių jie naudojami net akustiniuose optiniuose modulatoriuose kaip elektriniai akustiniai keitikliai. Dėl šios medžiagos savybės LNB kristalai nėra plačiai taikomi Pokelso narveliuose. Šiais kristalais paremtų Pokelso narvelių didžiausias pasikartojimo dažnis – 10 kHz (Wang ir kt. 1990; Basséras ir kt. 1998). LNB kristalų elektrooptiniai koeficientai yra didesni, lyginant su KDP (iki 10 pm/V). LNB ir LTA kristalai pasižymi fotorefrakcija (Saeed ir kt. 2019; Buse ir kt. 2007), t. y. lūžio rodiklio pokyčiu, kurį sukelia lazerio spindulys. Ši savybė sumažina LNB ir LTA kristalų pritaikomumą didelės galios lazerinėse sistemose.

BBO kristalai yra auginami žemesnėse temperatūrose (<925 °C). Jie nepasižymi fotorefrakcija, yra mažai higroskopiški ir pasižymi aukštu pramušimo slenkščiu (Nakatani ir kt. 1988). BBO kristalai pasižymi maža sugertimi diapazone nuo 0,19 μm iki 2,2 μm bangos ilgio ir mažais pjezoelektriniais virpesiais, kurie aptinkami 6 kHz dažnyje (Goodno ir kt. 1995). Kristalo pjezoelektrinių savybių įtaka elektrooptiniam koeficientui, lyginant su LNB, yra itin maža (Mustapha Abarkan ir kt. 2003; M. Abarkan ir kt. 2003). BBO kristalai pasižymi mažais elektrooptiniais koeficientais $r_{22} = 2,2\text{--}2,7$ pm/V (Eimerl ir kt. 1987; Ebberts 1988; M. Abarkan ir kt. 2003). Dėl šios priežasties šie kristalai naudojami tik skersinio tipo Pokelso narveliuose. Dėl auginimo technologijos šių kristalų ilgiai būna apriboti iki 20–40 mm (Roth ir kt. 1996; Perlov ir kt. 2011; Z. Li ir kt. 2015).

LGS kristalų pritaikymas Pokelso narveliuose yra apribotas dėl optinio aktyvumo nulemtu fotorefrakcinio ir fotovoltinio reiškinių (Kaminskii ir kt. 1983; Batirov ir kt. 2000). Tačiau vėlesni tyrimai atlikti su LGS kristalu rodo, kad šiuos kristalus veikiant ketvirčio bangos įtampa optinėje scheme, kurioje spindulys per kristalą sklinda du kartus, optinis aktyvumas savaime kompensuojasi (Kong ir kt. 2003). Dėl silpnų pjezoelektrinių savybių šie kristalai naudojami lazerinėse sistemose su pasikartojimo dažniu iki 200 kHz, tačiau mažas elektrooptinis koeficientas ir mažas optinis kontrastas mažina šio tipo kristalų pritaikomumą (Ma ir kt. 2016; Ma ir kt. 2017; Liu ir kt. 2005).

KTP ir RTP kristalai yra dviašiai (angl. *biaxial*) ir pasižymi kristalografine ortorombine simetrija (Cheng ir kt. 1994), todėl nėra optinės ašies kurioje nepasireiškia dvigubas spindulio lūžis. Kristalą paveikus išoriniu elektriniu lauku z ašimi, apsisuka lūžio rodiklių elipsoidas, kad suformuotų naują dviašį elipsoidą su lūžio rodikliais:

$$\begin{aligned}
 n_{x'} &= n_x - \frac{1}{2} n_x^3 r_{13} E_z ; \\
 n_{y'} &= n_y - \frac{1}{2} n_y^3 r_{23} E_z ; \\
 n_{z'} &= n_z - \frac{1}{2} n_z^3 r_{33} E_z .
 \end{aligned}
 \tag{1.14}$$

Elektrooptiniai koeficientai šviesos spindulio sklindančio y (r_{c1}) arba x (r_{c2}) ašimis tampa (Wang ir kt. 1998):

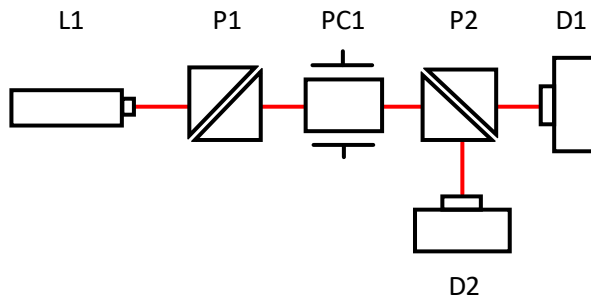
$$\begin{aligned}
 r_{c1} &= r_{33} - \left(\frac{n_x}{n_z} \right)^3 r_{13} ; \\
 r_{c2} &= r_{33} - \left(\frac{n_y}{n_z} \right)^3 r_{23} .
 \end{aligned}
 \tag{1.15}$$

Remiantis šiomis sąlygomis, elektrinį lauką sukūrus lygiagrečiai z ašiai, o y naudojant kaip optinę ašį, su $4 \times 8 \times 4$ mm (x , y , z) matmenų kristalu galima pasiekti labai aukštą elektrooptinį koeficientą (M. Abarkan ir kt. 2003). Dėl mažos pusės bangos įtampos galima Pokelso narvelius su šio tipo kristalais taikyti ilgesniuose bangos ilgiuose. Iširta, kad dvigubą spindulio lūžį šiuose kristaluose galima kompensuoti šildant kristalą (Wang ir kt. 1998). Tokiu būdu išnaudojamas temperatūrinis lūžio rodiklio kitimas. Kristalo dvigubas spindulio lūžis bei aplinkos temperatūros įtaka šiuose kristaluose yra kompensuojami naudojant antrą KTP kristalą. Pirmuosiuose tokio kompensavimo metoduose poliarizacijos plokštumos sukimui buvo naudojama pusės bangos fazinė plokštelė, tačiau tai padidindavo nuostolius iki 2,5 % (Ebberts ir kt. 1998). Norint sumažinti nuostolius nenaudojant fazinės plokštelės, reikalingas dviejų kristalų orientavimas skirtingomis ašimis, tačiau tai reikalauja itin tikslaus jų išstatymo ir kristalų su vienu lūžio rodikliu. Atskirų kristalų lūžio rodiklio skirtumus galima kompensuoti keičiant vieno iš kristalų temperatūrą. Šioje konfigūracijoje optinis kontrastas ir elektrooptinis koeficientas priklauso nuo spindulio sklaidimo krypties x arba y ašimi (Roth ir kt. 2005). RTP kristalai pasižymi didesniu elektrooptiniu koeficientu ir dvigubai aukštesniu pramušimo slenksčiu, lyginant su KTP kristalais. KTP kristalai pasižymi elektrochromatiniu reiškiniu dėl kurio padidėja lazerinio pažeidimo kristale tikimybė (Pysher ir kt. 2010; Satyanarayan ir kt. 1998; Ebberts ir kt. 1998). Tuo tarpu RTP kristalai šiuo reiškiniu nepasižymi. RTP ir KTP kristalai pasižymi silpnais pjezoelektriniais virpesiais.

1.3. Pokelso narvelių optinių schemų apžvalga

Pokelso narveliai leidžia didelio intensyvumo lazerio spindulių poliarizaciją valdyti aukšto dažnio ir mažos trukmės elektros impulsais. Tai lėmė platų šių moduliatorių pritaikomumą lazeriuose (Liu ir kt. 2017; Zhang ir kt. 2017; Chng ir kt. 2020; Mori ir kt. 2008; Zhao ir kt. 2020; Bai ir kt. 2017). Šiame poskyryje aptartos optinės schemos, kuriose naudojami Pokelso narveliai.

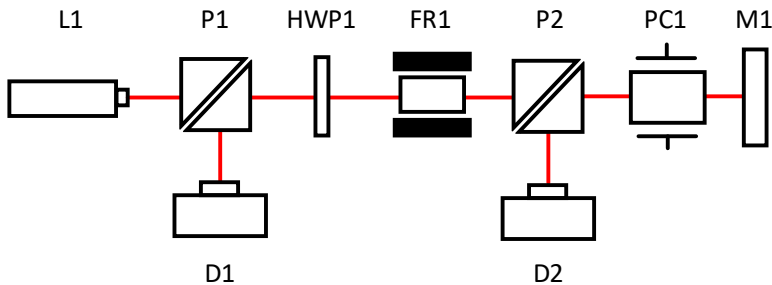
Lazerio spindulio poliarizacija yra moduluojama (keičiama) naudojant Pokelso narvelį. Spindulys, kurio poliarizacija yra moduluojama, praėjęs per poliarizatorių tampa amplitudiškai moduluojamas. Amplitudės moduliaciją išnaudoja didžioji dalis optinių schemų kuriose naudojami Pokelso narveliai. Šios schemos pagal Pokelso narvelio įtampą skirstomos į du tipus: pusės bangos (1.3 paveikslas) ir ketvirčio bangos (1.4 paveikslas).



1.3 pav. Optinė schema paremta Pokelso narvelio pusės bangos įtampos veikimu

Fig. 1.3. Optical scheme based on the Pockels cell half-wave voltage operation

Optinėje schemoje pateiktoje 1.3 paveiksle, Pokelso narvelis (PC) įtvirtinamas tarp dviejų poliarizatorių (P1 ir P2), kurie yra sukryžiuoti vienas kito atžvilgiu. Lazerio (L1) spindulys sklinda į poliarizatorių (P1). Šis poliarizatorius praleidžia tik *p*-poliarizuotą spindulį. Pokelso narvelio (PC1) kristalo optinė ašis išstatyta lygiagrečiai lazerio spinduliui. Jeigu Pokelso narvelis nėra veikiamas elektrinio lauko (neveikiamas įtampos), tuomet spindulys nepakeitęs poliarizacijos sklinda į poliarizatorių (P2) kuris atspindi *p*-poliarizuotą spindulį į fotodetektorį (D2). Paveikus Pokelso narvelį (PC1) pusės bangos įtampa, sukuriamas elektrinis laukas, kuris suformuoja $\Delta\phi = \pi$ fazių skirtumą tarp paprastojo ir nepaprastojo spindulių. Šios sąlygos pakeičia spindulio poliarizaciją iš *p*-poliarizuoto į *s*-poliarizuotą, o spindulys sklinda per poliarizatorių (P2) į fotodetektorį (D1).



1.4 pav. Optinė schema paremta Pokelso narvelio ketvirčio bangos įtampos veikimu

Fig. 1.4. Optical scheme based on the Pockels cell quarter-wave voltage operation

Optinėje schemoje, pateiktoje 1.4 paveiksle, lazerio (L1) spindulys sklinda į poliarizatorių (P1). Šis poliarizatorius praleidžia tik *p*-poliarizuotą spindulį. Pusės bangos fazinė plokštelė (HWP1) išstatoma taip, kad per ją sklindančio spindulio poliarizacija būtų pasukama 45° . Faradėjaus rotatorius (FR1) spindulio poliarizaciją pasuką 45° , priešinga kryptimi, t. y. kompensuoja pusės bangos poliarizacijos pasukimą fazine plokšte (HWP1), šia spindulio kryptimi. Faradėjaus rotatorius (FR1) nuo pusės bangos fazinės plokštelės (HWP1) skiriasi tuo, kad šviesai grįžtant atgal į rotatorių poliarizacijos sukimo kryptis išlieka ta pati, o fazinės plokštelės pakinta. Šių komponentų pora vadinama optiniu izoliatoriumi. Spindulys sklindantis iš Faradėjaus rotatoriaus (FR1) į poliarizatorių (P2) yra *p*-poliarizuotas. Šios poliarizacijos spindulys sklinda į Pokelso narvelį (PC1). Pridėta ketvirčio bangos įtampa prie Pokelso narvelio sukuria elektrinį lauką kuris suformuoja $\Delta\varphi = \pi/2$ fazių skirtumą tarp paprastojo ir nepaprastojo spindulių. Spindulys, atsispindėjęs nuo veidrodžio (M1), dar kartą kerta Pokelso narvelį. Pokelso narvelį veikiant ketvirčio bangos įtampa suformuojamas papildomas $\Delta\varphi = \pi/2$ fazių skirtumas tarp paprastojo ir nepaprastojo spindulių. Spindulys tampa *s*-poliarizuotas ir poliarizatorius (P2) jį atspindi į fotodetektorį (D2). Jeigu įtampa nėra pridėta prie Pokelso narvelio (PC1) tuomet spindulio poliarizacija lieka nepakitusi (*p*-poliarizuota) ir grįžta per poliarizatorių (P2) į Faradėjaus rotatorių (FR1). Spinduliui sklindant per Faradėjaus rotatorių (FR1) ir pusės bangos fazinę plokštelę (HWP1), poliarizacija kiekvienu iš komponentų yra pasukama po 45° į tą pačią pusę. Spindulys tampa *s*-poliarizuotas ir atsispindėjęs nuo poliarizatoriaus (P1) patenka į fotodetektorį (D1).

Pagrindinis Pokelso narvelio parametras – optinis kontrastas. Jis apskaičiuojamas (Goldstein 1986):

$$CR = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}, \quad (1.16)$$

čia $I_{\max}$ ir $I_{\min}$ – didžiausias ir mažiausias intensyvumas užregistruotas fotodetektoriais. Pokelso narvelio optinis kontrastas tiksliai išmatuojamas naudojant Glano-Tayloro prizmes, naudojant jas vietoje poliarizatorių (P1 ir P2). Šių prizmių optinis kontrastas yra labai aukštas ir siekia $1 : 2,9 \times 10^{10}$. Naudojant šiuos komponentus Pokelso narvelio pusės bangos veikimu paremtoje optinėje schemoje (1.3 paveikslas) galime užtikrinti aukštą sisteminių optinį kontrastą (Takubo ir kt. 1998).

1.4. Pokelso narvelių optinį kontrastą mažinančių reiškinių analizė

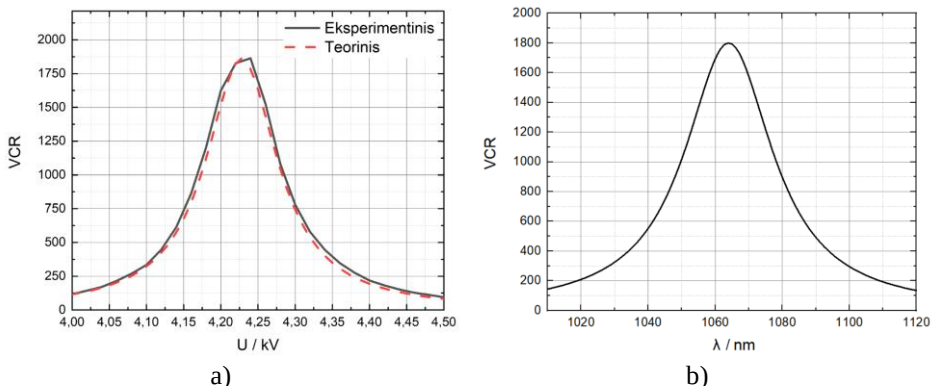
Lazerinėse sistemose Pokelso narveliai dirba kombinuoto kontrasto režimu (CR), kuriame įtaką daro medžiagos optinis kontrastas (angl. *intrinsic contrast ratio ICR*, arba dar žinomas kaip angl. *extinction ratio ER*) ir optinis kontrastas kai Pokelso narvelis yra veikiamas išorinio elektrinio lauko (angl. *voltage contrast ratio VCR*).

Pokelso narvelio optinio kontrasto mažėjimas sukelia intensyvumo nuotėkį, kurio energija gali daryti neigiamą įtaką lazerinės sistemos darbui. Pavyzdžiui, lazerinėse sistemose, kurios naudojamos trapių medžiagų (kristalų, keramikos, saulės elementų) apdirbimui intensyvumo nuotėkio energija gali sugadinti bandinius dėl perkaitimo, kurį sukelia intensyvumo nuotėkis. Dėl intensyvumo nuotėkio padidėja palydovuose naudojamų lazerinių atstumo matavimo įtaisų (angl. *satellite laser ranging*) paklaida ir suprastėja jų komunikacijos kokybė dėl padidėjusio triukšmo lygio (Bai ir kt. 2017; Chu ir kt. 2004; Bai ir kt. 2017). Todėl svarbu mažinti reiškinių, sąlygojančių optinio kontrasto mažėjimą, įtaką. Pokelso narvelio optinį kontrastą mažina šie reiškiniai: elektrinio lauko stiprio kitimas, lazerio spindulio bangos ilgio kitimas, kristalo ašių nuokrypis lazerio spindulio ir jo poliarizacijos atžvilgiu, narvelio temperatūros kitimas, pjezoelektriniai virpesiai. Šių reiškinių įtaką aptariame šiame poskyryje.

1.4.1. Pokelso narvelio įtampos ir lazerio bangos ilgio įtaka optiniam kontrastui

Aukštą Pokelso narvelio optinį kontrastą galima pasiekti naudojant homogeniškus kristalus ir užtikrinant, kad paprastojo ir nepaprastojo spindulių fazių skirtumą įtakojantys kintamieji pateikti (1.9) nekinta. Apjungiant (1.9–1.13) galime įvertinti VCR vertės priklausomybę nuo pusės bangos įtampos ir lazerio spindulio

bangos ilgio. Skersinio Pokelso narvelio (1.1b paveikslas) kuris sudarytas iš dviejų BBO kristalų, kurių matmenys $4 \times 4 \times 20$ mm, tyrimų rezultatai pateikti 1.5 paveiksle.



1.5 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu VCR priklausomybė nuo:
a) įtampos; b) lazerio spindulio bangos ilgio

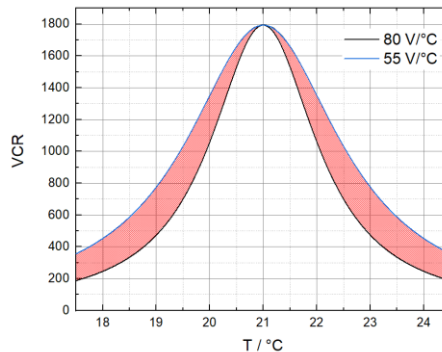
Fig. 1.5. BBO Pockels cell VCR dependence on: a) voltage; b) the laser beam wavelength

Iš gautos Pokelso narvelio VCR priklausomybės nuo įtampos, pateiktos 1.5a paveiksle, matyti, kad įtampai pakitus 2,3 % (100 V) nuo pusės bangos įtampos gaunamas 40 % VCR vertės sumažėjimas (Sinkevičius ir kt. 2017). Teoriniai Pokelso narvelio VCR priklausomybės nuo aukštos įtampos amplitudės skaičiavimai pagrindžia gautus eksperimentinio tyrimo rezultatus. Remiantis VCR vertės priklausomybės nuo lazerio spindulio bangos ilgio teoriniais skaičiavimais (1.5b paveikslas), matyti kad 15 nm bangos ilgio pokytis sumažina VCR vertę dvigubai. Taipogi lazerio spindulio poliarizacijos priklausomybė nuo kristalo ašių kampo patikrinta eksperimentiniame tyrime parodė, kad 2,5 laipsnio nuokrypis gali lemti dvigubą VCR vertės sumažėjimą (Sinkevičius ir kt. 2017). Šios priklausomybės turi būti įvertintos projektuojant lazerines sistemas, kuriose naudojami Pokelso narveliai.

1.4.2. Pokelso narvelio šilimo įtaka optiniam kontrastui

Medžiagų lūžio rodiklis priklauso nuo temperatūros. Šiuo reiškiniu paremti temperatūriniai optiniai modulatoriai (Ren ir kt. 2013). Pokelso narvelyje temperatūros pokytis nėra pageidaujamas, nes (1.12) ir (1.13) rodo, kad pusės bangos įtampa priklauso nuo lūžio rodiklio pakelto trečiuoju laipsniu. Optinėje schemoje, kurioje Pokelso narvelį spindulys kerta du kartus (1.4 paveikslas), lūžio rodiklio dreifas daro dvigubai didesnę įtaką pusės bangos įtampai. Pokelso

narveliuose, kuriuose neišvengiamas dvigubas spindulio lūžis (pavyzdžiui KTP), temperatūrinis kristalų stabilumas yra ypatingai aktualus. DKDP kristalai turi stiprią pusės bangos įtampos priklausomybę nuo temperatūros. Ketvirčio bangos įtampa naudojama veikiant 1064 nm lazerio spinduliui gali kisti 55–80 V/°C (Koechner 2006; Starobor ir kt. 2016; Takeuchi ir kt. 2008; Takeuchi ir kt. 2007; Wang ir kt. 1998). Remiantis Pokelso narvelio VCR priklausomybės nuo įtampos tyrimo rezultatais (1.5a paveikslas), galime įvertinti Pokelso narvelio šilimo įtaką optiniam kontrastui. Pokelso narvelio su DKDP kristalu, kurio pusės bangos įtampa yra 6,37 kV (kai kristalo temperatūra yra 21 °C), optinio kontrasto priklausomybės nuo temperatūros grafikas, gautas modeliuojant, pateiktas 1.6 paveiksle.



1.6 pav. Pokelso narvelio su DKDP kristalu VCR priklausomybė nuo kristalo temperatūros

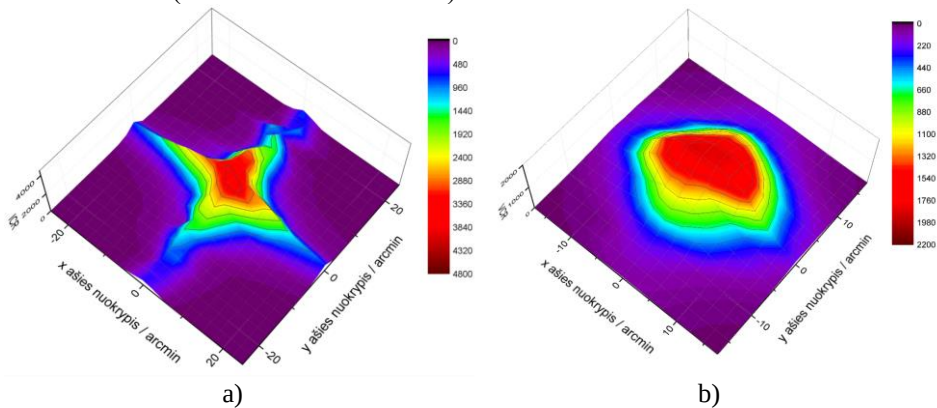
Fig. 1.6. Dependence of VCR of Pockels cell with DKDP crystal on crystal temperature

Iš rezultatų matyti, kad 1,25–1,75 °C pokytis gali sumažinti optinį kontrastą dvigubai. Taip pat veikiant didelio intensyvumo lazerio spinduliui ši temperatūrinė priklausomybė suformuoja šiluminį lęšį (Starobor ir kt. 2016). Temperatūrinį kompensavimą galima įgyvendinti tik skersinio tipo Pokelso narveliuose suporuojant du identiškus kristalus, kurie tarpusavyje orientuoti 90° kampu (Anon 1970; Roth ir kt. 2005; Wang ir kt. 1998). Toks kompensavimas yra efektyvus tik tuomet jeigu temperatūros pasiskirstymas kristale yra homogeniškas.

1.4.3. Spindulio nuokrypio optinės ašies atžvilgiu įtaka optiniam kontrastui

Lazerio spindulio sklaidimo kryptis turi sutapti su Pokelso narvelio kristalo optine ašimi, norint pasiekti aukštą optinį kontrastą (1.7 paveikslas). Remiantis žemiau

pateiktų tyrimų rezultatais galima įvertinti Pokelso narvelio ICR ir VCR nuostolius atsirandančius dėl lazerio spindulio pločio, skėsties ir nuokrypio nuo optinės ašies (1.7 ir 1.8 paveikslai). Tyrimai atlikti 1064 nm bangos ilgio lazerio spinduliui sklindant per Pokelso narvelį su BBO kristalu, kurio matmenys $4 \times 4 \times 20$ mm (Sinkevičius ir kt. 2019).



1.7 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu: a) ICR; b) VCR priklausomybė nuo lazerio spindulio nuokrypio optinės ašies atžvilgiu

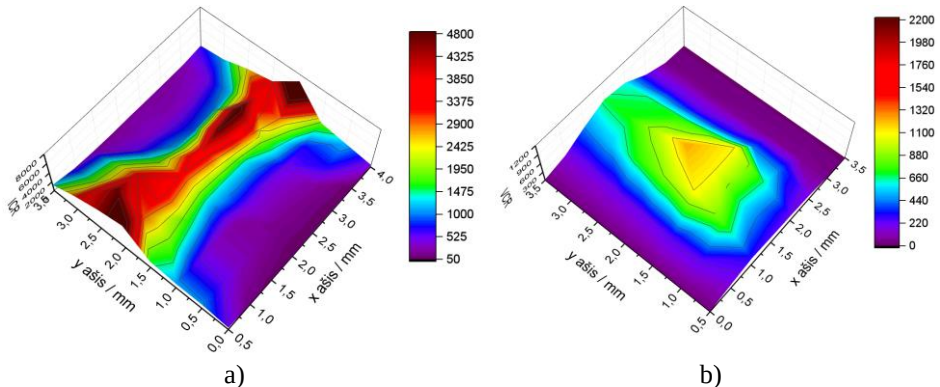
Fig. 1.7. Dependence of: a) ICR; b) VCR of BBO Pockels cell on the laser beam angular deviation in relation to optical axis

Iš rezultatų pateiktų 1.7 paveiksle matyti, kad ICR ir VCR verčių pasiskirstymo struktūra nėra vienoda. Pokelso narvelio ICR vertė gali sumažėti daugiau nei du kartus, jeigu lazerio spindulio nuokrypis nuo x arba y ašių yra didesnis nei 5 arcmin. Jeigu nuokrypis atsiranda abejose ašyse, tuomet Pokelso narvelio ICR vertė gali sumažėti daugiau nei du kartus, jeigu lazerio spindulio nuokrypis yra didesnis nei 2 arcmin. Pokelso narvelio VCR vertė gali sumažėti daugiau nei du kartus, jeigu lazerio spindulio nuokrypis x ašimi yra didesnis nei 7 arcmin arba y ašimi didesnis nei 3 arcmin. Trumpėjant bangos ilgiui struktūra mažėja, todėl galima teigti, kad didesnio tikslumo išstatant kristalo optinę ašį reikės kai bangos ilgis yra trumpesnis.

1.4.4. Lazerio spindulio pozicijos įtaka optiniam kontrastui

Pokelso narvelio ICR ir VCR verčių pasiskirstymo kristale, kai lazerio spindulys yra lygiagretus kristalo optiniam ašiai, tyrimo rezultatai pateikti 1.8 paveiksle (Sinkevičius ir kt. 2017). Pateiktuose tyrimų rezultatuose elektrodai yra pritvirtinti prie Pokelso narvelio kristalo xz plokštumoje, o elektrinis laukas yra lygiagretus y ašiai. Iš gautų rezultatų matyti, kad ICR vertė nėra tolygiai pasiskirsčiusi Pokelso narvelyje. Didžiausia optinio kontrasto vertė užfiksuota kai lazerio spindulys sklinda Pokelso narvelio centru lygiagrečiai elektrodams. Toks

pasiskirstymas gali susidaryti dėl Pokelso narvelio kristalo tvirtinimo sukeltų įtempimų arba liekamojo elektrinio krūvio kristalo ir elektrodo kampuose. Iš gautų rezultatų pateiktą 1.8b paveikslą matyti, kad VCR vertės pasiskirstymo struktūra pasikeičia ir didžiausios optinio kontrasto vertės užfiksuotos kai lazerio spindulys sklinda kristalo centru statmenai elektrodams.



1.8 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu: a) ICR; b) VCR verčių pasiskirstymas kristale

Fig. 1.8. Distribution of: a) ICR; b) VCR inside of BBO Pockels cell crystal

Šis reiškinys yra matomas, nes Pokelso narvelių kristalas pasižymi pjezoelektrinėmis savybėmis. Medžiaga paveikta elektrinio lauko deformuojasi ir pakinta jos elektrooptinis koeficientas (Takeda ir kt. 2012; Roth ir kt. 2005; Koechner 2006). Intensyviausia deformacija vyksta kristalo centre, dėl ko ir matomas šis VCR verčių pasiskirstymas kai yra pridėta nuolatinė įtampa prie Pokelso narvelio.

1.4.5. Pjezoelektrinių virpesių įtaka optiniam kontrastui

Pokelso narveliai pasižymi pjezoelektrinėmis savybėmis. Dėl šios priežasties, narvelį veikiant aukštos įtampos impulsais, kurie yra naudojami jo valdymui, yra sukelti įtempimai Pokelso narvelio kristalo tūryje. Šie įtempimai sklinda Pokelso narvelyje akustinės bangos greičiu ir šis reiškinys yra vadinamas pjezoelektriniais virpesiais.

Pokelso narveliuose, elektrooptinį koeficientą sudaro trys dedamosios, sąlygojamos šių reiškinų: elektrinio lauko sukulto dvigubo spindulio lūžio, šviesos sklindančios per kristalą atstumo pokyčio dėl pjezoelektrinio poslinkio ir fotoelastinio reiškinio, sąlygojamo pjezoelektrinių įtempimų (Takeda ir kt. 2012).

Paprastojo ir nepaprastojo spindulio fazių skirtumas dėl pjezoelektrinio poslinkio apskaičiuojamas:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta n}{\lambda} \Delta l, \quad (1.17)$$

čia Δl yra pjezoelektrinio poslinkio sukeltas šviesos kelio skirtumas, Δn – ne elektrinio lauko sukeltas lūžio rodiklio pokytis. Skersinio tipo Pokelso narvelio kristale pjezoelektrinio poslinkio sukeltas šviesos kelio skirtumas apskaičiuojamas (Sun ir kt. 2011):

$$\Delta l = d_{31} E_3 l, \quad (1.18)$$

čia d_{31} – skersinė pjezoelektrinė konstanta, l – kristalo ilgis. Paprastojo ir nepaprastojo spindulio fazių skirtumas dėl fotoelastinio reiškinių:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi n_e^3 l}{\lambda} \sum_{i,j,k,l} p_{ijkl} S_{kl}, \quad (1.19)$$

čia p_{ijkl} yra ketvirto rango tenzorius apibūdinantis elastiškumą, S_{kl} – antro rango deformacijos tenzorius. Tolygiai keičiant Pokelso narvelyje susidarančio elektrinio lauko stiprį kristalo deformacija tampa tiesine elektrinio lauko funkcija (Amundsen ir kt. 1987):

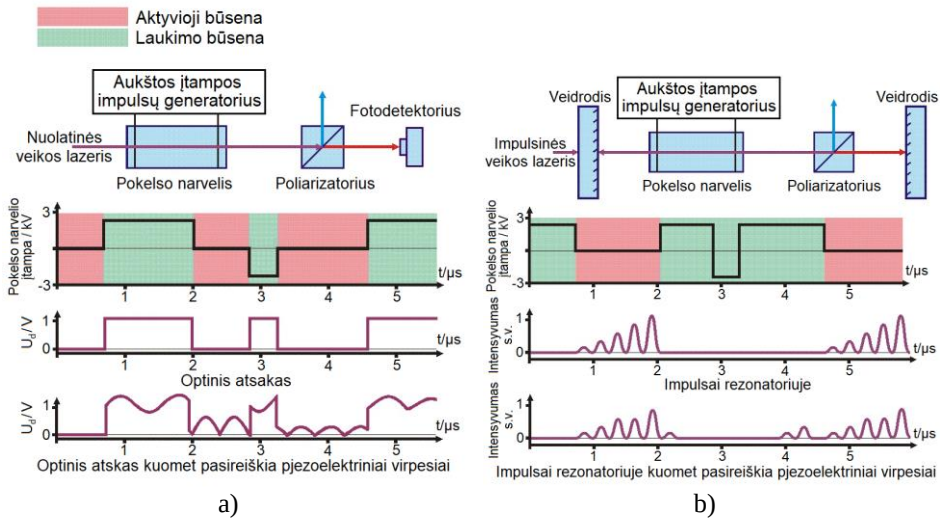
$$S_{\lambda} = d_{mk} E_m, \quad (1.20)$$

čia d_{mk} – pjezoelektrinio įtempimo tenzorius.

Pjezoelektrinių virpesių įtaka elektrooptiniam koeficientui ištirta integriniuose LNB, KTP ir BBO elektrooptiniuose modulatoriuose (M. Abarkan ir kt. 2003; Mustapha Abarkan ir kt. 2003).

Pasireiškus pjezoelektriniam virpesiams, mažėja Pokelso narvelio optinis kontrastas (Takeda ir kt. 2012; Bergmann ir kt. 2015; Samsonas ir kt. 2021; Vengelis ir kt. 2019; Yin ir kt. 2017; Sinkevicius ir kt. 2019; Sinkevicius ir kt. 2020; Sinkevicius ir kt. 2017). Šis reiškinys išryškėja kai Pokelso narvelis dirba aukštu dažniu (> 10 kHz), tuomet sužadintos akustinės bangos nespėja natūraliai išsisklaidyti iki kito aukštos įtampos impulso ir yra sustiprinamos. Veikiant Pokelso narvelį aukštos įtampos impulsais, kurių dažnis sutampa su kristalo savuoju pjezoelektrinių virpesių dažniu, įvyksta rezonansas ir tai žymiai sumažina optinį kontrastą (Bergmann ir kt. 2015; Nickel ir kt. 2005). Tyrimai atlikti su LNB kristalu parodė, kad rezonansinio dažnio atveju fotoelastinio reiškinių įtaka elektrooptiniam koeficientui yra žymiai didesnė, lyginant su kitais reiškiniais (Takeda ir kt. 2012).

Dvi situacijos, parodančios pjezoelektrinių virpesių reiškinio įtaką lazerinės sistemos veikimui, kai Pokelso narvelis yra optinio rezonatoriaus išorėje ir viduje pateiktos 1.9 paveiksle. (Svelto 2010; Eichler ir kt. 2018; Träger 2012).



1.9 pav. Pokelso narvelio valdymo impulsų ir optinio atsako (U_d) laikinės diagramos: a) optinio rezonatoriaus išorėje; b) optiniam rezonatoriuje

Fig. 1.9. Time diagrams of Pockels cell control voltage pulses and optical response (U_d): a) in the extracavity mode; b) in the intracavity mode

Pokelso narvelio taikymas optinio rezonatoriaus išorėje (1.9a paveikslas) yra naudojamas optinių impulsų voros formavimui. Dirbant šiuo režimu, Pokelso narvelis būna vienoje iš būsenų: aktyviojoje būsenoje, kai įtampa nėra pridėta prie Pokelso narvelį (optiniam atsake nėra impulso) ir laukimo būsenai, kai įtampa yra pridėta prie Pokelso narvelio (optiniam atsake yra impulsas). Laukimo būsenoje aukšta įtampa yra pridėta prie Pokelso narvelio, kas leidžia spinduliui skliti per polarizatorių į fotodetektorius, kuriuo matuojamas spindulio intensyvumas. Fotodetektoriaus registruojama įtampa U_d yra tiesiškai proporcinga spindulio intensyvumui. Įtampa U_d mes vadiname optiniu atsaku. Grafikai pateikti 1.9a paveiksle parodo kaip pjezoelektriniai virpesiai paveikia Pokelso narvelio optinį atsaką, dėl ko sumažėja optinis kontrastas.

Pokelso narvelio taikymas optinio rezonatoriaus viduje (1.9b paveikslas) yra naudojamas stiprinamo optinio signalo išskyrimui iš rezonatoriaus. Aktyviosios būsenos metu, vienas impulsinės veikos lazerio impulsas yra uždarytas tarp dviejų veidrodžių ir yra sustiprinamas kiekvieną kartą sklindant per aktyviąją terpę (ji nepateikiama šiame paveiksle). Tarp dviejų veidrodžių cirkuliuojantis stiprinamas impulsas yra pateiktas 1.9b paveiksle. Šiame taikyme būtina užtikrinti aukštą Pokelso narvelio optinį kontrastą, norint pasiekti aukštą optinio signalo

stiprinimą ir išvengti sužadintų nepageidaujamų impulsų (angl. *false seeding*). Stačių frontų aukštos įtampos impulsų generatoriai gali pakeisti Pokelso narvelio įtampos poliškumą nesužadinant nepageidaujamų impulsų. Tačiau pjezoelektriniai virpesiai, sukelti aukštos įtampos impulsų, gali sumažinti optinį kontrastą ir sužadinti nepageidaujamus impulsus optinio rezonatoriaus išėjime (1.9b paveikslas).

Pjezoelektrinių virpesių įtaka optiniam kontrastui yra esminis Pokelso narvelių pritaikymą aukštuose dažniuose ribojantis reiškinys. Todėl aktualu ištirti Pokelso narvelio optinio kontrasto priklausomybę nuo aukštos įtampos impulsų dažnio, norint sužinoti pjezoelektrinių virpesių nulemtų mažo optinio kontrasto dažnių zonas. Taip pat aktualu kurti metodus, leidžiančius efektyviai slopinti pjezoelektrinius virpesius Pokelso narvelyje.

1.5. Pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodų Pokelso narveliuose analizė

Moksliniuose straipsniuose yra mažai medžiagos apie pjezoelektrinių virpesių slopinimą Pokelso narveliuose. Dažniausiai siūlomos pasyvios priemonės pjezoelektriniams virpesiams slopinti: Pokelso narvelio kristalo geometrijos keitimas ir pasyvūs akustiniai slopintuvai kristalo šonuose. Kelios pasyvaus pjezoelektrinių virpesių slopinimo technologijos Pokelso narveliuose buvo patentuotos (Juhasz 1993; Lee 1972; Dreisewerd ir kt. 1992; Miller ir kt. 1991).

Mokslinių straipsnių apie aktyvųjų pjezoelektrinių virpesių slopinimo įgyvendinimą Pokelso narveliuose nėra. Tačiau yra keli išleisti patentai. Vienas iš jų siūlo pjezoelektrinių virpesių sukeltą lazerio spindulio intensyvumo moduliaciją slopinti naudojant du Pokelso narvelius, kurie dirba pakaitomis (Barsack ir kt. 1980). Kadangi taikant šį metodą virpesiai nėra slopinami Pokelso narveliais, kurie pasižymi stipriais pjezoelektriniais virpesiais, gali dirbti tik žemais dažniais, taip pat gaunasi sudėtinga optinė schema. Aktyvusis pjezoelektrinių virpesių slopinimas naudojant papildomą aukštos įtampos impulsą pademonstruotas (Haefner 2019). Tačiau naudojant šį metodą, pjezoelektrinių virpesių slopinimui skirtas aukštos įtampos impulsas sukuria nereikalingą impulsą optiniame atsake. Pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodas, kompensuojant įtempimų sukeltus lūžio rodiklio pokyčius, naudojant įtampos dedamąją, pateiktas darbe (Amundsen ir kt. 1987). Aktyvusis pjezoelektrinių virpesių slopinimas, kuris sumažina lazerio spindulio intensyvumo pulsacijas 71 %, naudojant lygiagrečiai Pokelso narveliui sujungtą nuoseklius varžą ir induktyvumą, yra aprašytas patente (Bergmann ir kt. 2017).

Surasti ir išnagrinėti pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodai pagerina Pokelso narvelio optinį kontrastą, tačiau jie skirti atvejams kai Pokelso narvelis

dirba žemais dažniais ir nėra tinkami arba nėra efektyvūs Pokelso narveliui dirbant aukštais dažniais.

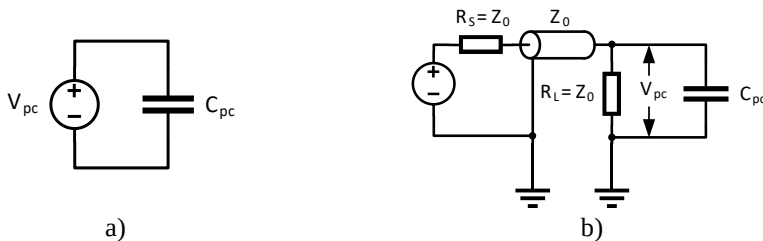
1.6. Aukštos įtampos impulsų generatoriai Pokelso narvelių valdymui

Aukštos įtampos impulsų generatorius yra galios elektronikos įtaisas, gebantis suformuoti aukštos įtampos impulsą, skirtą elektrinio lauko sukūrimui Pokelso narvelyje. Reikalavimus aukštos įtampos impulso amplitudei apsprendžia pasirinkto Pokelso narvelio tipas, medžiaga ir jo optinė schema. Dažniausiai naudojamų išilginio tipo Pokelso narvelių pusės bangos įtampa yra skaičiuojama pagal (1.12) ir svyruoja nuo 4 kV iki 10 kV (Dorrer 2014). Skersinio tipo Pokelso narvelio pusės bangos įtampa yra skaičiuojama pagal (1.13) ir yra nuo 1 kV iki 8 kV (Li 2017; Ionin ir kt. 2017). Kadangi Pokelso narvelio atsakas yra labai greitas (apie 100 fs), narvelio greಿತaveiką apsprendžia aukštos įtampos impulso frontų trukmė, t. y. aukštos įtampos impulsų generatoriaus galimybės. Lazerių taikymuose didesnis aukštos įtampos impulsų dažnis yra pageidaujamas, nes tai leidžia formuoti trumpesnius ir aukštesnio dažnio lazerio spindulio impulsus, kas išplečia apdirbimo ar bandinių tyrimų, paremtų lazerinėmis technologijomis, galimybes.

Pokelso narvelio valdymui yra sukurta įvairių aukštos įtampos impulsų generatorių topologijų, paremtų: aukšto dažnio triodais (Bado ir kt. 1998), krytronais (Hyer ir kt. 2008; Hyde ir kt. 1977), tiratronais (Barbosa ir kt. 2007; Barbosa ir kt. 2008), iškrova (Essmann ir kt. 2018; Kimura 2017) ir dreifiniai atkūrimo diodais (angl. *drift-step-recovery diodes*) (Kesar ir kt. 2016). Kiekviena iš topologijų pasižymi savo privalumais ir trūkumais (Jiang ir kt. 2004), tačiau labiausiai paplitusios yra dvi: MOSFET tranzistorių ir lavininių bipoliarinių tranzistorių (angl. *avalanche transistors*).

1.6.1. Aukštos įtampos impulsų generatorių apkrovos jungimo grandinės

Aukštos įtampos impulsų generatoriai skirti Pokelso narvelių valdymui formuoja aukštos įtampos impulsus, kurių frontų trukmė yra mažesnė nei 10 ns. Trumpų perjungimo trukmių formavimui galimos 1.10 paveiksle pateiktos Pokelso narvelio jungimo grandinės (Tucker 2011). Šios jungimo grandinės nulemia Pokelso narveliui valdyti naudojamo aukštos įtampos impulsų generatoriaus topologiją ir jo parametrus.



1.10 pav. Principinė Pokelso narvelio jungimo grandinė: a) su talpumine apkrova; b) su talpumine apkrova ir perdavimo linija

Fig. 1.10. The circuit diagram of a Pockels cell with: a) a capacitive load; b) a capacitive load and transmission line

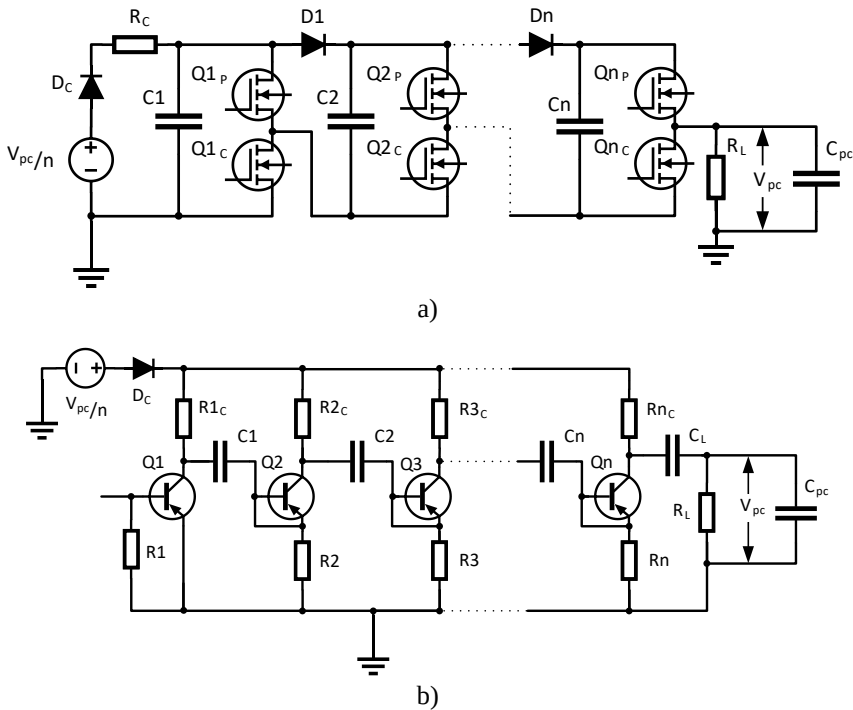
Jeigu aukštos įtampos impulsų generatorius yra apkraunamas tik talpumine apkrova (1.10a paveikslas), tada Pokelso narvelis turi būti tvirtinamas kuo arčiau aukštos įtampos impulsų generatoriaus išėjimo, nes laidininko savasis induktyvumas ir talpumas perjungimo metu sukels viršįtampius. Ši jungimo grandinė dažniausiai naudojama kartu su pusės arba pilno tiltelio topologija ir leidžia generuoti impulsus plačiame dažnių ir impulsų trukmių diapazone (Xu ir kt. 2017; Kim ir kt. 2019; Tang ir kt. 2020; Jiang 2007).

Jeigu aukštos įtampos impulsų generatorius yra apkraunamas su talpumine apkrova naudojant suderintos apkrovos perdavimo liniją (1.10b paveikslas), laidų savojo induktyvumo ir talpumo įtaka yra sumažinama. Dažniausiai perdavimo linijų reaktyvioji varža Z_0 būna suderinta 50Ω . Tuomet impulsų generatoriaus vidinė varža ir perdavimo linijos apkrova turi būti lygi Z_0 . Kadangi Pokelso narvelio talpa yra maža, jos įtaka perdavimo linijos apkrovai R_L taip pat yra maža. Tinkamai suderinus perdavimo linijos apkrovą, sumažinami atspindžiai, tačiau naudojant šią perdavimo liniją reikia dvigubai didesnės impulsų įtampos, todėl padidėja energijos nuostoliai. Šia topologija paremti aukštos įtampos impulsų generatoriai pasižymi labai trumpų trukmių ir frontų impulsais, tačiau impulsų dažnis yra žemas (Bishop ir kt. 2006; Ding ir kt. 2015; J. Li ir kt. 2015; J.-T. Li ir kt. 2015; J. Li ir kt. 2017; Rao ir kt. 2019; Gao ir kt. 2017; Yong-sheng ir kt. 2016; Yan ir kt. 2020; Shen ir kt. 2020). Generuojant ilgos trukmės impulsus, su šia topologija reikėtų didelių energijos sąnaudų, kuri išsiskirtų impulsų generatoriaus R_S ir R_L varžose.

1.6.2. Aukštos įtampos impulsų generatoriai pikosekundinių-nanosekundinių trukmių impulsų formavimui

Aukštos įtampos impulsų generatoriai skirti pikosekundinių-nanosekundinių trukmių impulsų formavimui dažniausiai naudoja talpuminės apkrovos su perdavimo linija jungimo grandinės topologiją (1.10b paveikslas). Šie aukštos

įtampos impulsų generatoriai naudojantys puslaidininkinius tranzistorius dažniausiai apjungia dar kelias topologijas: nuoseklų ir lygiagretų tranzistorių jungimą bei Markso generatoriaus topologiją. Lygiagretus tranzistorių jungimas naudojamas norint gauti didesnę impulsų generatoriaus išėjimo srovę, o nuoseklus – siekiant gauti didesnę generuojamų impulsų įtampą (J.-T. Li ir kt. 2015; J. Li ir kt. 2017; Roig ir kt. 2017). Markso generatoriaus topologija taikoma išėjimo impulso amplitudės didinimui (1.11 paveikslas). Taikant šias topologijas svarbus sinchroniškas tranzistorių darbas.



1.11 pav. Markso topologija naudojant: a) bipoliarinius lavininius tranzistorius; b) MOSFET tranzistorius

Fig. 1.11. Marx topology using: a) bipolar avalanche transistors; b) MOSFET transistors

Markso generatoriaus topologija yra labai plačiai taikoma ir išvystyta daugybėje konfigūracijų. Plačiausiai naudojamos konfigūracijos su MOSFET ir bipoliariniais lavininiais tranzistoriais yra pateiktos 1.11 paveiksle. Markso generatoriaus topologijoje, kurioje yra n pakopų, išėjime suformuoto impulso amplitudė yra n kartų didesnė už maitinimo įtampą. Šios grandinės privalumas

yra tai, kad galima su žemesnės įtampos komponentais formuoti įtampos impulsus su aukšta amplitude.

Markso generatorius su lavininiais bipoliariniais tranzistoriais (1.11a paveikslas) pasižymi labai trumpu nuo 7 ns iki 240 ps aukštos įtampos impulso priekiniu frontu (Krishnaswamy ir kt. 2007; Xuelin ir kt. 2010; Oak ir kt. 1991; Tamuri ir kt. 2009; Rai ir kt. 1994; Dharmadzhikari ir kt. 1996; Ding ir kt. 2015; Bishop ir kt. 2006; Nunnally ir kt. 2011; Gao ir kt. 2017; Shen ir kt. 2020; Yan ir kt. 2020; Rao ir kt. 2019; C. Li ir kt. 2017; J. Li ir kt. 2015; Li ir kt. 2018). Pavienių bipoliarinių lavininių tranzistorių pramušimo įtampos siekia 320V (FMMT417), todėl dažnai šie tranzistoriai jungiami nuosekliai norint pasiekti aukštesnę išėjimo impulso amplitudę su mažiau pakopų. Toks Markso generatorius su įžemintu komplanarinio bangolaidžiu, kuris suderintas 47 Ω apkrovai, gali formuoti 4 kV amplitudės 3,6 ns trukmės impulsus, kurių frontų trukmė 239 ps (Bishop ir kt. 2006). Papildomai pritaikius impulsų kombinavimo topologijas yra sukurti generatoriai, galintys formuoti 14 kV amplitudės impulsus (J. Li ir kt. 2017). Tačiau lavininių bipoliarinių tranzistorių ir Markso generatoriaus junginiu paremti aukštos įtampos generatoriai turi ilgos trukmės galinį frontą, kuris gali viršyti daugiau nei 10 kartų priekinio fronto trukmę, žemą impulsų dažnį ir fiksuotą impulsų trukmę. Aukščiausias dažnis pasiekiamas su šio tipo aukštos įtampos impulsų generatoriais yra 200 kHz (Krishnaswamy ir kt. 2007). Dėl mažo lavininių bipoliarinių tranzistorių patikimumo (Bishop ir kt. 2006; Oak ir kt. 1991; Yan ir kt. 2020) juos rekomenduojama atrinkinėti naudojant ilgalaikius testus (angl. *burn-in procedure*) (Oak ir kt. 1991). Naujausi tyrimai rodo, kad pritaikius pagalbinės sinchronizacijos topologiją (angl. *auxiliary triggering topology*) galima prailginti šia topologija paremtų generatorių tarnavimo laiką (Yan ir kt. 2020; Shen ir kt. 2020).

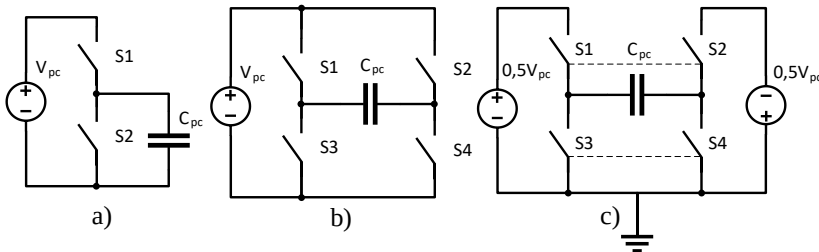
MOSFET tranzistorių topologija paremtas Markso generatorius (1.11b paveikslas) pasižymi ilgesnės trukmės priekiniu frontu lyginant su bipoliariniais tranzistoriais, tačiau geba formuoti stačiakampius impulsus (Redondo ir kt. 2019; Redondo ir kt. 2018; Redondo ir kt. 2017; Dong ir kt. 2016; Pang ir kt. 2019). Dėl žymiai aukštesnių MOSFET tranzistorių pramušimo įtampų yra naudojama mažiau pakopų, o atskiri tranzistoriai Markso generatoriaus kondensatorių užkrovimui (Q_{1C} , Q_{2C} , ..., Q_{nC}) (1.11b paveikslas) ir impulso formavimui išėjime (Q_{1P} , Q_{2P} , ..., Q_{nP}) leidžia gauti didesnę impulsų dažnį. Šia topologija paremtų generatorių aukščiausias pademonstruotas dažnis siekia 500 kHz, formuojant impulsų vorą (Redondo ir kt. 2019).

Šiuo metu pradedami kurti impulsų generatoriai su GaN FET tranzistoriais. Šių tranzistorių luste gali būti integruotas ir tranzistoriaus užtūros valdiklis, kas leidžia sumažinti parazitinių talpumą ir induktyvumą bei pasiekti itin aukštą perjungimo greitį (Amano ir kt. 2018). Dėl žymiai mažesnės santakos-ištakos varžos šie tranzistoriai energetiniu efektyvumu pralenkia kitas, aukštos įtampos

generatoriams skirtas, tranzistorių technologijas (Alharbi ir kt. 2017; Roig ir kt. 2017; Shah ir kt. 2018). Naujausi tyrimai rodo, kad Markso generatoriaus topologijai įgyvendinti gali būti taikomi GaN FET tranzistoriai (Chen ir kt. 2020).

1.6.3. Aukštos įtampos impulsų generatoriai nanosekundinių-milisekundinių trukmių impulsų formavimui

Aukštos įtampos impulsų generatoriai, skirti nanosekundinių-milisekundinių trukmių impulsų formavimui, dažniausiai naudoja tik talpuminės apkrovos jungimo grandinės topologiją (1.10a paveikslas). Šiuose aukštos įtampos impulsų generatoriuose MOSFET tranzistoriai jungiami nuosekliai, o pats generatorius realizuojamas naudojant tiltelio topologiją (1.12 paveikslas). Šiuose aukštos įtampos impulsų generatoriuose Pokelso narvelis yra tvirtinamas arti išėjimo, siekiant mažinti parazitinę talpumą ir induktyvumą, kas leidžia išvengti aukštų viršįtampių.



1.12 pav. Aukštos įtampos impulsų generatorių topologijos: a) pusės tiltelio; b) pilno tiltelio su vienpoliu šaltiniu; c) pilno tiltelio su dvipoliu šaltiniu

Fig. 1.12. Topologies of high voltage pulse generators: a) half bridge; b) full bridge with single source; c) full bridge with bipolar source

Aukštos įtampos impulsų generatorius su MOSFET tranzistoriais gali generuoti impulsus, kurių dažnis siekia keletą MHz, o minimali impulsų frontų trukmė – 6 ns (Rutten ir kt. 2007; Xu ir kt. 2017; Baker ir kt. 1993; Jiang 2007; Sundararajan ir kt. 2004; Keith ir kt. 2000; Kim ir kt. 2018; Kim ir kt. 2019). GaN FET tranzistoriai turi potencialą šiame taikyme, nes jų maksimali santakos-ištakos įtampa siekia iki 600 V. Tačiau šio tipo tranzistorių nuoseklus jungimas nėra pilnai ištirtas ir yra komplikuoatas (Roig ir kt. 2017).

Principinėje pusės tiltelio elektros schemoje S1 raktas užkrauna, o S2 iškrauna Pokelso narvelio talpą (1.12a paveikslas). Šio tipo topologija pasižymi ribota minimalia impulso trukme, sąlygojamą būtino raktų atidarymo vėlinimo (angl. *dead-time*), norint išvengti būsenos kai abu raktai yra atviri. Minimali impulso trukmė gali būti sumažinta naudojant pilno tiltelio topologiją su vienpoliu

šaltinio (1.12b paveikslas), o dvigubai aukštesnė įtampa pasiekama naudojant pilno tiltelio topologiją su dvipoliu šaltiniu (1.12c paveikslas). Naudojant dvipolį maitinimo šaltinį ir sinchroniškai įjungiant S1 ir S2 raktus dvigubai didesne įtampa yra veikiamas Pokelso narvelis. Pokelso narvelio talpoje sukaupias krūvis yra iškraunamas įjungus S3 ir S4 raktus. Šis sprendimas leidžia mažinti kiekviename iš raktų esančių nuosekliai sujungtų tranzistorių kiekį ir pasiekti dvigubai statesnį frontą, nei taikant pusės tiltelio topologiją (1.12a paveikslas). Pilno tiltelio topologija su vienpoliu maitinimo šaltiniu pasižymi galimybe formuoti itin trumpos trukmės impulsus Pokelso narveliui. Sinchroniškai įjungus S1 ir S2 raktus potencialų skirtumas ant Pokelso narvelio kontaktų bus lygus nuliui ir elektrinis laukas nebus sukurtas. Įjungiant S3 raktą, o S4 rakto įjungimą užvėlinant, sukuriamas įtampos impulsas ant narvelio kontaktų, kurio trukmė lygi vėlinimo trukmei. Naudojant nuosekliai sujungtus MOSFET tranzistorius aukštos įtampos impulsų generatoriaus raktams realizuoti, taikant pilno tiltelio topologiją (angl. *full-bridge*), yra pasiekta 11 ns minimali impulso trukmė, formuojant 2 kV amplitudės impulsus (Kim ir kt. 2019: 4334–4343).

1.6.4. Komercinių aukštos įtampos impulsų generatorių apžvalga

Augant lazerinių sistemų paklausai, didėja ir Pokelso narveliams skirtų aukštos įtampos impulsų generatorių paklausa. Pokelso narvelių naudojamų lazerinėse sistemose įvairovė, sąlygoja ir aukštos įtampos impulsų generatorių sprendimų įvairovę. Siūlomų komercinių aukštos įtampos impulsų generatorių sąrašas ir jų parametrai pateikti 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Komercinių, Pokelso narvelių valdymui skirtų, aukštos įtampos impulsų generatorių parametrai

Table 1.1. Parameters of commercial Pockels cell drivers (high voltage pulse generators)

Aukštos įtampos impulsų generatorius	Impulso amplitudė, kV	Impulso frontai, ns	Impulso trukmė, ns	Didžiausias dažnis, kHz
DQ-100-4	4	7–2000	180	100
DPBX-250-7.0	7	6–9,5	100–5000	250
DPS-1000-2.9	2,9	6–8,5	100–5000	1000
STA-PCD-1	3,8	2–6000	500–1000	2
V driver	6	20	200	50
Q-DRIVE 551	4,5	4–5000	200	4,5
HVR-DRIVE	7,5	10–15	250–3000	200
HVPG:1.0-4000	4	5	40–DC	1000 (iki 10 MHz vora)

1.1 lentelės pabaiga

Aukštos įtampos impulsų generatorius	Impulso amplitudė, kV	Impulso frontai, ns	Impulso trukmė, ns	Didžiausias dažnis, kHz
R200	2,5	4–7	250–3000	200
PCD-04	5,8	4–7	2–800	1
PCD-21	3,8	4–6000	500–1000	4
BME Bergmann	9	10	–	0,1
	7,2	0,25	–	0,1
	1,2	4	0–DC	10 000 (iki 50 MHz vora)

Pagal pateiktus parametrus galime atskirti kurios anksčiau aptartos impulsų formavimo topologijos yra taikomos komerciniuose aukštos įtampos impulsų generatoriuose. Pilno tiltelio topologija su vienpoliu maitinimo šaltiniu leidžia pasiekti platų aukštos įtampos impulso trukmės derinimo diapazoną nuo 0 iki nuolatinės (DC) įtampos ir dirbti aukštesniais nei 100 kHz dažniais. Pilno tiltelio topologija su dvipoliu maitinimo šaltiniu turi tokius pat parametrus kaip ir prieš tai charakterizuoto tipo generatoriai, tačiau juose yra ribota minimali impulso trukmė. Tiltelio topologijos aukštos įtampos impulsų šaltiniai turi ir impulso maksimalios trukmės apribojimus dėl to, kad valdymo signalai yra tiekami naudojant transformatorinį galvaninį izoliavimą. Markso generatoriaus su lavininiais bipoliariniais tranzistoriais topologija paremti impulsų generatoriai pasižymi labai trumpais frontais, tačiau jie gali generuoti tik žemo dažnio impulsus.

Aukštos įtampos impulsų generatorių gamintojai siūlo generatorius skirtus impulsų formavimui aukštu dažniu, tačiau neatsižvelgia į pagrindinį Pokelso narvelių darbą aukštuose dažniuose ribojantį reiškinį – pjezoelektrinius virpesius. Todėl aktualu kurti aukštos įtampos impulsų generatorius su pjezoelektrinių virpesių slopinimo sprendimu. Tokie generatoriai būtų itin paklausūs aukšto dažnio lazerinių sistemų taikymuose.

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus literatūros analizę disertacijos tema, suformuluotos šios išvados:

1. Pokelso narvelių pjezoelektriniai virpesiai mažina optinį kontrastą ir riboja narvelių pritaikomumą aukštuose dažniuose, todėl aktualu kurti metodus, leidžiančius efektyviai slopinti pjezoelektrinius virpesius Pokelso narvelyje.

2. Pokelso narveliuose pjezoelektriniai virpesiai pasireiškia juos veikiant periodiniais aukštos įtampos impulsais, todėl aktualu atlikti tyrimus, siekiant surasti dažnių ir trukmių zonas su sumažėjusiu optiniu kontrastu.
3. Nepavyko rasti didelio dažnio aukštos įtampos impulsinių generatorių skirtų Pokelso narvelių valdymui, kuriuose būtų įgyvendintas aktyvusis pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodas.

Atlikus analizę disertacijos tema, suformuluoti šie uždaviniai:

1. Ištirti Pokelso narvelio kristalo pjezoelektrinių virpesių įtakos optiniam kontrastui priklausomybę nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio.
2. Sukurti ir modeliuojant ištirti aktyvųjį Pokelso narvelių pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodą.
3. Sukurti aukštos įtampos impulsų generatorių ir, jį naudojant, eksperimentiškai ištirti aktyvųjį pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodą Pokelso narveliuose.

Pokelso narvelio optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio tyrimas

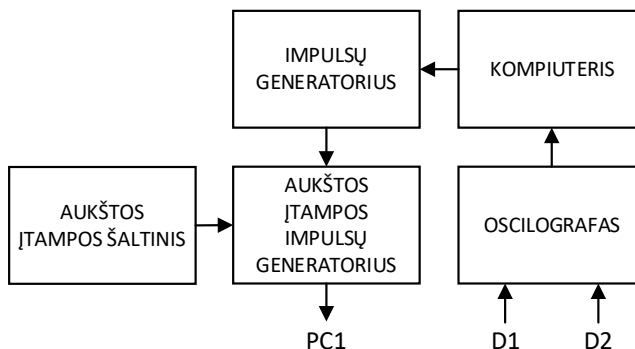
Šiame skyriuje pateikiami optinio kontrasto priklausomybės nuo Pokelso narvelio valdymui naudojamų aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio tyrimų rezultatai. Pasiūlytas Pokelso narvelių optinio kontrasto priklausomybės nuo impulsų dažnio ir trukmės tyrimo metodas, leidžiantis aptikti pjezoelektrinių virpesių sąlygojamas sumažinto optinio kontrasto zonas. Skyriaus rezultatai paskelbti aštuoniose publikacijose (Sinkevicius ir kt. 2017; Sinkevičius ir kt. 2017; Sinkevičius ir kt. 2018; Sinkevicius ir kt. 2018; Sinkevicius ir kt. 2019; Sinkevičius ir kt. 2019; Vengelis ir kt. 2019; Giedrius Sinkevicius ir kt. 2020).

2.1. Optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio tyrimų stendas

Sutapus Pokelso narvelį veikiančių aukštos įtampos impulsų dažniui su kristalo savuoju pjezoelektrinių virpesių dažniu, padidėja pjezoelektrinių virpesių

amplitudė – įvyksta rezonansas. Pjezoelektriniai virpesiai ir jų sukelti rezonansai apriboja Pokelso narvelių darbą tam tikrose aukštos įtampos impulsų dažnių ir trukmių srityse. Todėl tikslinga ištirti Pokelso narvelio pjezoelektrinių virpesių įtakos optiniam kontrastui priklausomybę nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio.

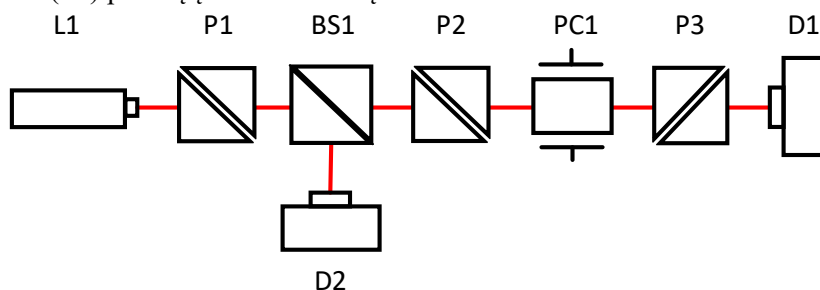
Skyriuje pateikti dviejų dydžių Pokelso narvelių su BBO ir DKDP kristalais tyrimų rezultatai. Tirtų BBO kristalų matmenys: $4 \times 4 \times 20$ mm ir $3 \times 3 \times 25$ mm. Tirtų DKDP kristalų matmenys: $\varnothing 12 \times 24$ mm ir $\varnothing 9 \times 20$ mm. Tyrimų standas aprašytas autoriaus publikacijose (Vengelis ir kt. 2019; Sinkevičius ir kt. 2018; Sinkevičius ir kt. 2018; Sinkevičius ir kt. 2019; Sinkevičius ir kt. 2017; Giedrius Sinkevičius ir kt. 2020). Pokelso narvelio optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio tyrimų stendo elektrinės dalies struktūrinė schema pateikta 2.1 paveiksle. Ji sudaryta iš aukštos įtampos maitinimo šaltinio (HVS100-2x60, EK SMA Optics), aukštos įtampos impulsų generatoriaus (DPD-1000-2.9, EK SMA Optics), impulsų generatoriaus (9530, Quantum composers), oscilografo (MDO3054, Tektronix) ir kompiuterio. Pokelso narvelyje elektrinį lauką sukuria aukštos įtampos impulsų generatorius, kurio impulsų trukmę ir dažnį užduoda impulsų generatorius, o aukštos įtampos impulso amplitudę – aukštos įtampos maitinimo šaltinis. Kompiuteriu nustatoma aukštos įtampos impulsų trukmė ir dažnis. Aukštos įtampos impulsu paveikus Pokelso narvelį, optinis atsakas matuojamas silicio fotodetektoriumi (DET10A/M, Thorlabs). Fotodetektoriaus elektrinis atsakas registruojamas oscilografu. Oscilogramos duomenys siunčiami į kompiuterį, kur atliekamas tolimesnis duomenų apdorojimas.



2.1 pav. Pokelso narvelio optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio tyrimų stendo elektrinės dalies struktūrinė schema

Fig. 2.1. Block diagram of the electrical part of the workbench for the investigation of dependences of optical contrast on the duration and frequency of high voltage pulses

Pokelso narvelio optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio matavimo stendo optinės dalies struktūrinė schema pavaizduota 2.2 paveiksle. Optinė dalis sudaryta iš koherentinės šviesos šaltinio (L1), kurio spindulio diametras 1,5 mm, pluošto divergencija 2 mrad ir bangos ilgis 1064 nm. Iš jo spindulys sklinda į pirmąją Glano-Tayloro prizmę (P1), už kurios spindulys patenka į šviesos intensyvumo daliklį (BS1), nuo kurio atsispindėję 5 % intensyvumo šviesos patenka į fotodetektorių (D2). Jis skirtas koherentinės šviesos šaltinio intensyvumo svyravimams registruoti. Likusi neatspindėta šviesa po intensyvumo daliklio (BS1) sklinda į antrą Glano-Tayloro prizmę (P2). Trečioji Glano-Tayloro prizmė (P3) yra naudojama kaip analizatorius ir yra sukryžiuota antrosios Glano-Tayloro prizmės (P2) atžvilgiu. Tarp P2 ir P3 Glano-Tayloro prizmių yra patalpinamas tyrimų objektas – Pokelso narvelis (PC1). Fotodetektorius D1 matuoja šviesos spindulio intensyvumą už Glano-Tayloro prizmės (P3). Kai Pokelso narvelis (PC1) nėra veikiamas elektrinio lauko, didžioji šviesos spindulio intensyvumo dalis yra atspindėta nuo trečios Glano-Tayloro prizmės (P3) ir fotodetektorius D1 fiksuoja žemą intensyvumo lygį. Jeigu Pokelso narvelis (PC1) yra veikiamas elektrinio lauko didžioji dalis šviesos spindulio intensyvumo sklinda tiesiai per trečiąją Glano-Tayloro (P3) prizmę į fotodetektorių D1.



2.2 pav. Pokelso narvelio optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio tyrimų stendo optinės dalies struktūrinė schema

Fig. 2.2. Block diagram of the optical part of the workbench for the investigation of dependences of optical contrast on the duration and frequency of high voltage pulses

Aukštos įtampos impulsų generatoriaus suformuotas aukštos įtampos impulsas sukuria elektrinį lauką Pokelso narvelyje, o jo optinis atsakas fiksuojamas fotodetektoriuje D1. Idealiu atveju optinis atsakas turėtų atkurti aukštos įtampos kitimą, bet Pokelso narvelių kristalų pjezoelektrinės savybės iškreipia optinio atsako signalą. Iš optinio atsako oscilogramos, užfiksuotos su fotodetektorium D1, apskaičiuojamas optinis kontrastas. Pokelso narvelio

vertinimui naudojama atvirkštinio optinio kontrasto vertė $1/CR$. (Bergmann ir kt. 2015). Atvirkštinis optinis kontrastas apskaičiuojamas:

$$\frac{1}{CR} = \frac{1}{\left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}}\right)}, \quad (2.1)$$

čia:

$$I_{\max} = \frac{1}{t_0 - t_{pw}} \int_{t_0}^{t_{pw}} U_d(t) dt; \quad (2.2)$$

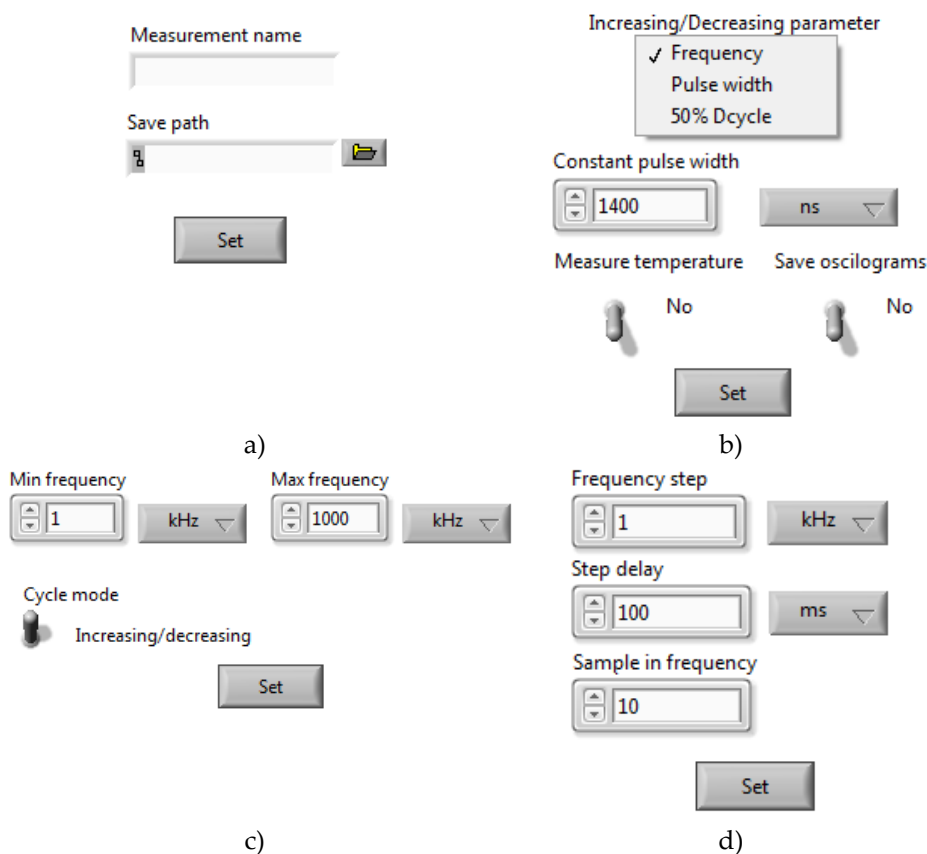
$$I_{\min} = \frac{1}{t_p - t_{pw}} \int_{t_{pw}}^{t_p} U_d(t) dt, \quad (2.3)$$

čia CR – optinis kontrastas, $U_d(t)$ – fotodetektoriaus įtampa, t_0 – optinio impulso priekinio fronto atsiradimo momentas, t_{pw} – optinio impulso trukmė, t_p – optinio impulso periodas. $I_{\max}$ ir $I_{\min}$ yra didžiausio ir mažiausio fotodetektoriaus D1 užfiksuoto viename periode intensyvumo vidurkis.

Pokelso narvelio optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio tyrimų stendas leidžia atlikti tyrimus paveikiant Pokelso narvelį aukštos įtampos impulsais, kurių amplitudė iki 2,8kV, dažnis – nuo 1 Hz iki 1MHz. Mažiausia aukštos įtampos impulso trukmė 130 ns. Tyrimų stendo dažnio žingsnis yra apribotas impulsų generatoriaus (9530, Quantum composers), kurio periodo nustatymo skiriamoji geba yra 10 ns. Automatizuotam matavimui atlikti naudojama autoriaus sukurta programa „LabVIEW“ aplinkoje.

Atliekant naują matavimą paprašoma nurodyti atliekamo matavimo pavadinimą ir vietą, kur bus saugomi duomenys (2.3a paveikslas). Kitas programos langas, pateiktas 2.3b paveiksle, leidžia pasirinkti fiksuotą ir kintantį parametrus: aukštos įtampos impulsų dažnį arba trukmę. Taip pat numatyta pusės periodo aukštos įtampos impulsų formavimo funkcija. Tyrimų stendas leidžia įjungti arba išjungti Pokelso narvelio kristalo temperatūros ir optinio signalo oscilogramų registravimą.

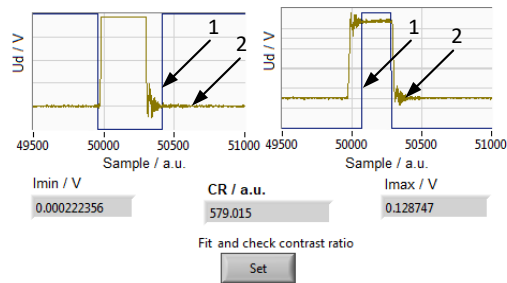
Pokelso narvelio optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio matavime reikia nurodyti aukštos įtampos impulsų, veikiančių Pokelso narvelį, dažnių diapazoną (2.3c paveikslas). Programoje, po matavimo užbaigimo, numatytas jo pakartojimas atbuline eiga (2.3c paveiksle „Cycle mode“). Įjungus šią funkciją galima aptikti ar matavimo metu pasireiškia lėtiniai reiškiniai (pavyzdžiui temperatūros įtaka). Nurodžius matavimo dažnio žingsnį, vėlinimą tarp žingsnių ir imčių kiekį viename iš žingsnių (2.3d paveikslas), patikrinama Pokelso narvelio optinio atsako oscilograma.



2.3 pav. Matavimo konfigūravimo langai: a) pavadinimas ir duomenų saugojimo adresas; b) režimo pasirinkimas; c) dažnių ruožo pasirinkimas; d) žingsnio parametrų pasirinkimas

Fig. 2.3. Measurement configuration windows: a) the name and storage address of the measurement; b) measurement mode; c) measurement frequency range; d) measurement step parameters

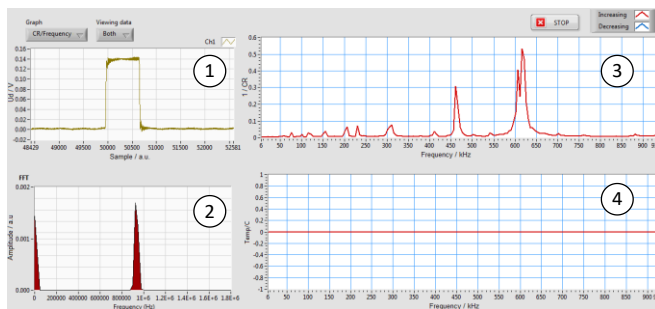
Oscilogramos registruojamos naudojant vieną fotodetektorių, tiekiant iš jo signalą į du oscilografo kanalus, sujungus juos lygiagrečiai (2.4 paveikslas). Šis metodas padidina registruojamo signalo gebą ties didžiausiu ir mažiausiu intensyvumu. Apdorojus gautas oscilogramas, naudojant (2.1), (2.2) ir (2.3), apskaičiuotos $I_{\max}$, $I_{\min}$ ir CR vertės pateikiamos programos lange (2.4 paveikslas). Atliekant Pokelso narvelio pozicijos derinimą lazerio spindulio atžvilgiu, atrandama geriausio optinio kontrasto pozicija.



2.4 pav. Aukštos įtampos impulsų generatoriaus sinchronizacijos ir Pokelso narvelio optinio kontrasto patikros langas. 1 – kalibracinis vėlinimo derinimo signalas; 2 – optinio atsako oscilograma

Fig. 2.4. Synchronization of high voltage pulse generator and Pockels cell contrast ratio verification window. 1 – delay adjustment signal use for calibration; 2 – optical response oscillogram

Pasirinkus Pokelso narvelio optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų trukmės arba dažnio matavimo parametrus pradedamas automatinis matavimas. Atliekant matavimą pateikiama (2.5 paveikslas) imties oscilograma, jos diskrečiosios Furjė transformacijos rezultatas ir du grafikai: Pokelso narvelio optinio kontrasto ir temperatūros priklausomybė nuo dažnio. Dažninė temperatūros charakteristika pateikiama tik tuomet, jei pasirinkta temperatūros matavimo funkcija pateikta 2.3b paveiksle.

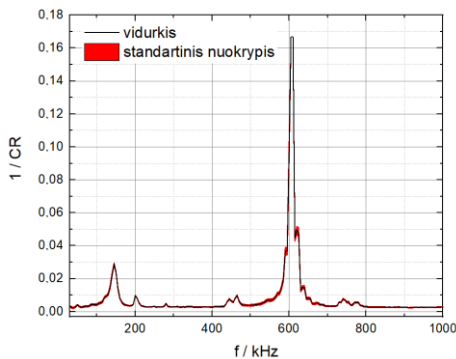


2.5 pav. Matavimo rezultatų langas. 1 – optinio atsako oscilograma; 2 – optinio atsako oscilogramos diskrečios Furjė transformacijos rezultatas; 3 – optinio kontrasto priklausomybės nuo dažnio grafikas; 4 – Pokelso narvelio temperatūros priklausomybės nuo dažnio grafikas

Fig. 2.5. Window of the measured results. 1 – optical response oscillogram; 2 – result of discrete Fourier transform of optical response oscillogram; 3 – contrast ratio dependence on frequency graph; 4 – temperature of Pockels cell dependence on frequency graph

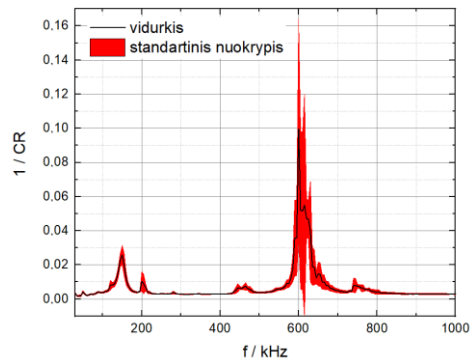
Užbaigus matavimą išsaugoma dažninė CR charakteristika BMP paveikslo ir tekstiniu CSV formatu. Jeigu matavimo parametrų pasirinkimo metu (2.3b paveikslas) įjungžiama oscilogramų saugojimo funkcija, imčių oscilogramos išsaugojamos tekstiniu CSV formatu.

Pokelso narvelio optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų dažnio matavimo atsikartojamumas patikrintas su BBO Pokelso narveliu, kurio matmenys $3 \times 3 \times 25$ mm. Matavimo metu aukštos įtampos impulso trukmė buvo lygi pusės periodo trukmei. Atliktų 10 matavimų vidutinė optinio kontrasto ir jų standartinio nuokrypio priklausomybė nuo dažnio pateikta 2.6 paveiksle. Ištyrus sistemos stabilumą, buvo atlikti 12 vienetų tokių pačių matmenų Pokelso narvelių matavimai, nekeičiant matavimo sąlygų. Išmatuotų 12 narvelių vidutinė optinio kontrasto ir jų standartinio nuokrypio priklausomybė nuo dažnio pateikta 2.7 paveiksle. Iš matavimo rezultatų, pateiktų 2.6 ir 2.7 paveiksluose, matyti, kad dažnių zonos kuriuose įvyksta rezonansai nekinta, tačiau optinio kontrasto vertė rezonanso metu gali kisti tarp bandinių. Taip gali būti dėl Pokelso narvelių gamybos metu atsirandančių skirtumų.



2.6 pav. Pokelso narvelio 10 matavimų vidutinė optinio kontrasto ir jų standartinio nuokrypio priklausomybė nuo dažnio

Fig. 2.6. Frequency dependence of the average contrast ratio and their standard deviation of the 10 measurements of the Pockels cell



2.7 pav. 12 Pokelso narvelių vidutinė optinio kontrasto ir jų standartinio nuokrypio priklausomybė nuo dažnio

Fig. 2.7. Frequency dependence of the average contrast ratio and their standard deviation of the 12 units of Pockels cells

2.2. Pokelso narvelių su beta bario borato kristalu tyrimai

Pokelso narveliai su BBO kristalais pasižymi mažos amplitudės pjezoelektriniais virpesiais, kuriuos galima aptikti tik veikiant Pokelso narvelį aukštos įtampos impulsais rezonansiniu dažniu (2.6 ir 2.7 paveikslai). Šiame poskyryje pateikta pjezoelektrinių virpesių analizė naudojant diskrečiąją Furjė transformaciją. Pateikti teoriniai rezonansinių dažnių skaičiavimai pritaikant stovinčios bangos sąlygą ir atlikta įtempimų pasiskirstymo kristale analizė naudojant baigtinių elementų metodą. Teoriniai skaičiavimai palyginami su eksperimentiniais rezultatais. Pademonstruotas sukurtas pasyvusis pjezoelektrinių virpesių slopinimas Pokelso narveliuose su BBO kristalais.

2.2.1. Pjezoelektrinių virpesių analizė

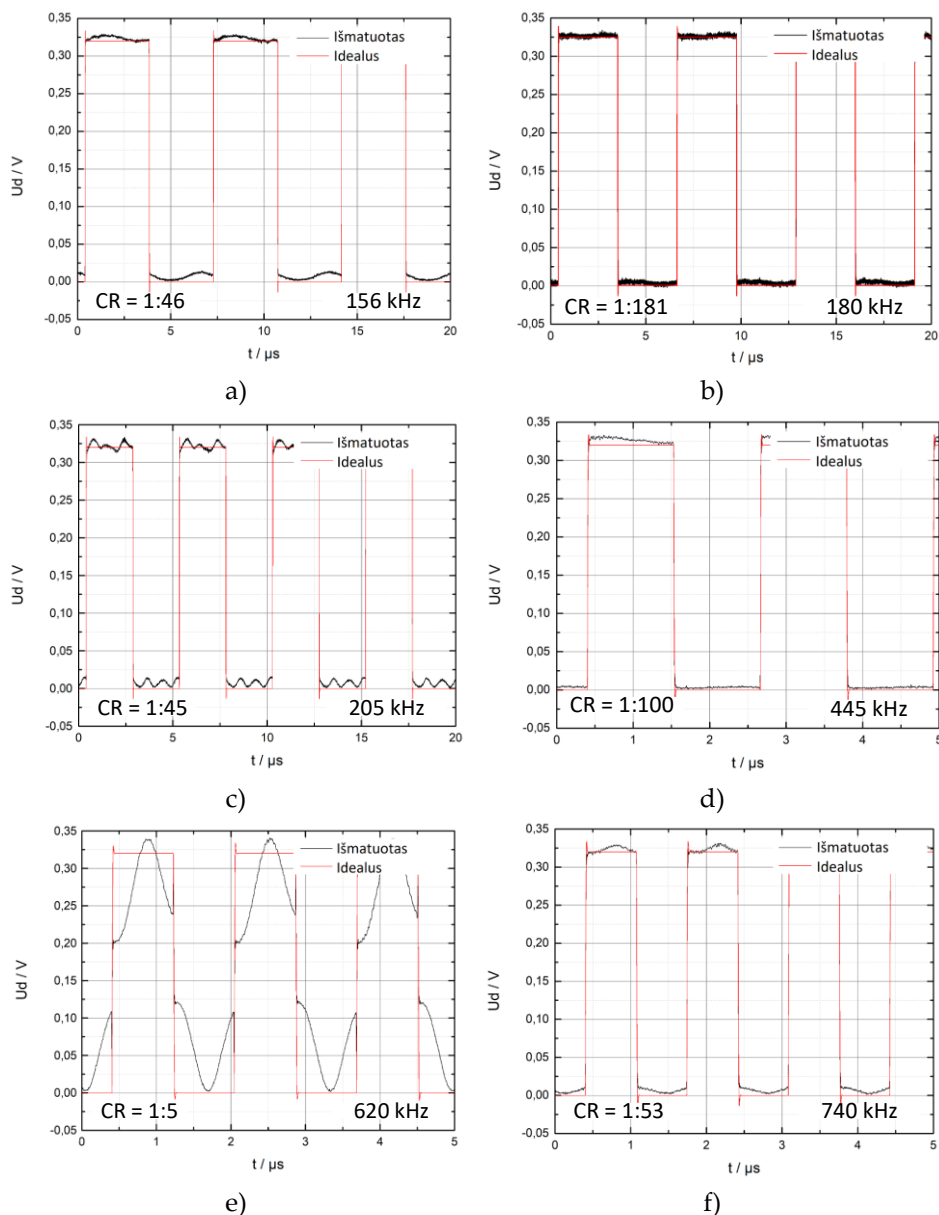
Pokelso narvelio optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų dažnio matavimo rezultatuose (2.6 ir 2.7 paveikslai) aptikti rezonansiniai dažniai ir užregistruotas optinio kontrasto sumažėjimas (grafikuose pateiktas atvirkštinis optinis kontrastas). Gautos Pokelso narvelio optinio atsako oscilogramos pateiktos 2.8 paveiksle kartu su idealiais tokios pat trukmės impulsais (modeliavimui naudojama „LabVIEW“ programinė įranga). Impulso trukmės visais pateiktais atvejais yra lygūs pusei periodo.

Pokelso narvelio optinio atsako oscilogramai sutapus su modeliuotu signalu gauname aukštą optinį kontrastą. Tokių sąlygų pavyzdys pateiktas Pokelso narvelį veikiant 180 kHz aukštos įtampos impulsais (2.8b paveikslas). Pjezoelektrinių virpesių įtaka šiame dažnyje yra nežymi. Pokelso narvelio optinio atsako oscilogramose, pateiktose 2.8a,c-f paveiksluose, optiškai išmatuoti virpesiai, veikiant Pokelso narvelį aukštos įtampos impulsais, kurių dažnis sutampa su narvelio savųjų virpesių dažniu. Pokelso narvelio optinio atsako iškraipymai yra pjezoelektrinių savybių pasekmė. Didžiausias signalo iškraipymas aptiktas 620 kHz dažnyje pateiktas 2.8e paveiksle.

Rezonanso metu gautų signalų analizė atlikta taikant diskrečiąją Furjė transformaciją:

$$y(f) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi kn/N}, \quad (2.4)$$

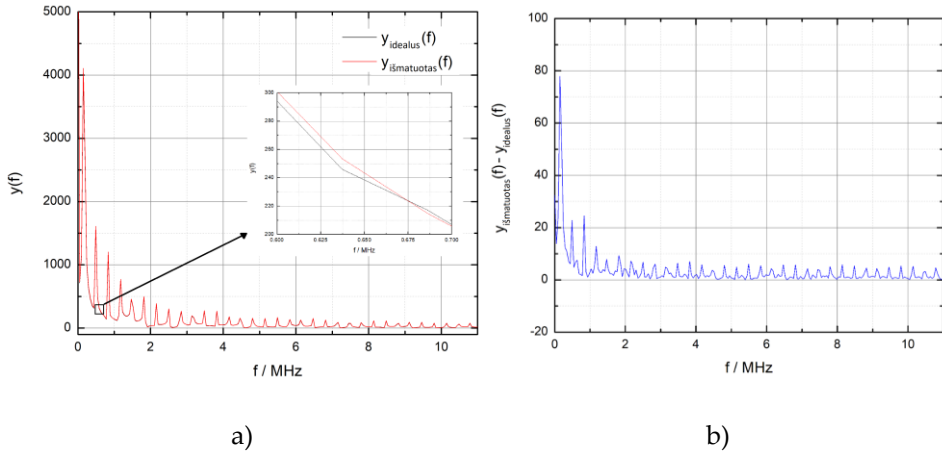
čia $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, yra x įvesties seka, N – x elementų skaičius ir y – transformacijos rezultatas.



2.8 pav. Modeliuotas idealus signalas ir išmatuotas optinis atsakas veikiant Pokelso narvelį su BBO kristalu: a) 156 kHz; b) 180 kHz; c) 205 kHz; d) 445 kHz; e) 620 kHz; f) 740 kHz aukštos įtampos impulsų dažniu

Fig. 2.8. Simulated ideal signal and measured optical response of Pockels cell with BBO crystal when supplied with high voltage pulse frequency of: a) 156 kHz; b) 180 kHz; c) 205 kHz; d) 445 kHz; e) 620 kHz; f) 740 kHz

Modeliuoto idealaus signalo ir išmatuoto optinio atsako, veikiant Pokelso narvelį su BBO kristalu 180 kHz aukštos įtampos impulsais, spektrai gauti naudojant diskrečiąją Furjė transformaciją pateikti 2.9a paveiksle.



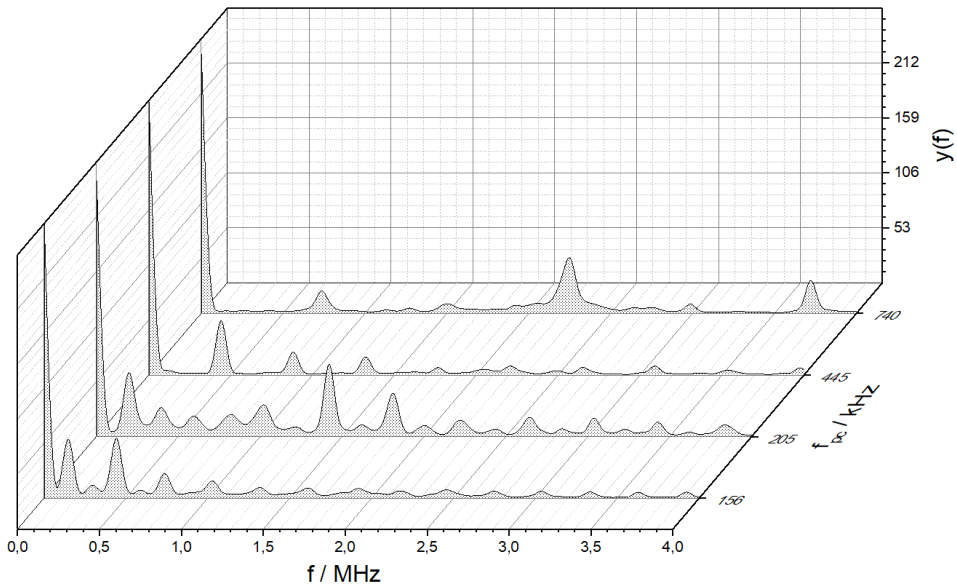
2.9 pav. Modeliuoto idealaus signalo ir išmatuoto optinio atsako, veikiant Pokelso narvelį su BBO kristalu, kurio matmenys $3 \times 3 \times 25$ mm, 180 kHz aukštos įtampos impulsais, spektrai: a) modeliuto ir išmatuoto signalų spektrai; b) modeliuto ir išmatuoto signalų spektrų skirtumas

Fig. 2.9. Spectra of the simulated ideal signal and the measured optical response when acting on a Pockels cell with a BBO crystal with 180 kHz high voltage pulses: a) spectrum of measured and simulated signals; b) result of spectrum subtraction

Iš gautų rezultatų, pateiktų 2.9a paveiksle matyti, kad Pokelso narvelį su BBO kristalu veikiant aukštos įtampos impulsais nerezonansiniu dažniu, išmatuoto signalo spektras $y_{i\text{šmatuotas}}(f)$ sutampa su modeliuto impulsinio signalo spektru $y_{i\text{dealus}}(f)$. Išmatuotų ir modeliutų signalų spektrų skirtumas pateiktas 2.9b paveiksle. Iš tyrimo rezultatų matyti, kad spektro dedamųjų amplitudės BBO kristale, dažnių spektre iki 11 MHz, yra mažos. Pokelso narvelį veikiant 156 kHz, 205 kHz, 445 kHz ir 750 kHz dažnio aukštos įtampos impulsais optinio atsako ir modeliuto idealaus signalo spektrų skirtumo rezultatas pateiktas 2.10 paveiksle. Spektrų skirtumas veikiant Pokelso narvelį 620 kHz dažnio aukštos įtampos impulsais nėra pateiktas dėl didelės spektro komponentių amplitudės, lyginant su kitų rezonansinių dažnių spektrų komponentėmis.

Pokelso narvelį veikiant aukštos įtampos impulsais 156 kHz dažniu, dominuoja 156 kHz ir 445 kHz spektro komponentės, veikiant 205 kHz dažniu – 205 kHz, 1,44 MHz ir 1,85 MHz, veikiant 445 kHz dažniu – 445 kHz, 890 kHz,

1,34 MHz, veikiant 740 kHz – 740 kHz, 2,25 MHz ir 3,75 MHz spektro komponentės.



2.10 pav. Modeliuoto ir išmatuoto signalų spektrų skirtumas kai Pokelso narvelis su BBO kristalu, kurio matmenys $3 \times 3 \times 25$ mm, yra veikiamas 156 kHz, 205 kHz ir 445 kHz ir 740 kHz dažnio aukštos įtampos impulsais

Fig. 2.10. Simulated and measured signal spectra subtraction result at 156 kHz, 205 kHz, 445 kHz and 740 kHz high voltage pulse frequencies for Pockels cell with BBO crystal with $3 \times 3 \times 25$ mm dimensions

Iš rezultatų pateiktų 2.10 paveiksle matyti, kad veikiant Pokelso narvelį aukštos įtampos impulsais 156 kHz ir 445 kHz dažniu optinio atsako spektrai turi bendrą 445 kHz dažnio spektro komponentę. Pokelso narvelį veikiant aukštos įtampos impulsais, kurių dažnis 156 kHz, akustinių bangų rezonansas susidaro bangoms sklindant skirtingomis kryptimis. Iš matavimo rezultatų galima teigti, kad taikant diskrečiąją Furjė transformaciją Pokelso narvelio optinio atsako signalui, galime aptikti rezonansinius dažnius platesniame spektre nei stendo matavimo ribos. Taipogi matyti, kad didelę įtaką Pokelso narvelio optiniam kontrastui turi akustinių bangų rezonansai susiformavę keliomis kryptimis.

Atlikti teorinių rezonansinių dažnių skaičiavimai paremti stovinčiosios akustinės bangos sąlyga:

$$f_{\text{res}0} = \frac{\sqrt{\frac{C_{ijkl}}{\rho}}}{2L}, \quad (2.5)$$

čia C_{ijkl} vienas iš kristalo elastinio standumo tenzorių, ρ – kristalo tankis ir L – kristalo skersinis matmuo. Skaičiavimams atlikti buvo panaudotas kristalo elastinio standumo tenzorius (Eimerl ir kt. 1987):

$$C_{ijkl} = \begin{bmatrix} 123,8 & 60,3 & 49,4 & 12,3 & 0 & 0 \\ 60,3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 49,4 & 0 & 53,3 & 0 & 0 & 0 \\ 12,3 & 0 & 0 & 7,8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 31,8 \end{bmatrix} \times 10^9 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right). \quad (2.6)$$

Stovinčios bangos rezonanso sąlygų skaičiavime buvo gauta daug rezonansinių dažnių, kurie susidaro dėl akustinių bangų sklindančių skirtingomis kryptimis. Tačiau remiantis eksperimentiškai gautais rezultatais buvo aptikta, kad didžiausią įtaką optiniam kontrastui, veikiant Pokelso narvelį iki 1 MHz dažnio aukštos įtampos impulsais, turi akustinės bangos sklindančios elektrinio lauko ir lazerio spindulio kryptimis. Šiuo atveju, $C_{11} = 123,8 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ yra akustinės bangos sklindančios kristale x kryptimi (lygiagrečiai elektriniam laukui), o $C_{33} = 53,3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ – akustinės bangos sklindančios kristalo z kryptimi, lygiagrečiai kristalo optinei ašiai. Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio skersinis kristalo matmuo yra 3 mm, rezonansiniai dažniai x ir z ašimis yra atitinkamai 945,22 kHz ir 620,21 kHz, o 4 mm – 708,92 kHz ir 465,16 kHz. Šie rezonansiniai dažniai ir jų harmonikos pateikti 2.1 lentelėje.

Iš tyrimo rezultatų pateiktų 2.8 ir 2.10 paveiksluose matyti, kad Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $3 \times 3 \times 25 \text{ mm}$, rezonansiniai dažniai yra 156 kHz, 205 kHz, 445 kHz, 620 kHz ir 740 kHz. Teoriniai skaičiavimai pagrindžia matavimo rezultatus. Pokelso narvelį veikiant 156 kHz aukštos įtampos impulsais optiniam kontrastui daro įtaką x ašimi sklindančios akustinės bangos šeštos harmonikos (teorinis dažnis 157,54 kHz) ir z ašimi sklindančios ketvirtos harmonikos (teorinis dažnis 155,05 kHz) rezonansai. Tai sutampa su spektrinės analizės rezultatu (2.10 paveikslas). Pokelso narvelį veikiant 205 kHz dažnio aukštos įtampos impulsais įvyksta z ašimi sklindančios akustinės bangos trečios harmonikos (teorinis dažnis 206,74 kHz) rezonansas, kurį pagal spektrinę analizę sudaro dar keliomis kryptimis sklindančių bangų rezonansai. Pokelso narvelį veikiant 445 kHz dažnio impulsams įvyksta x ašimi sklindančios akustinės

bangos antros harmonikos rezonansas (teorinis dažnis 472,61 kHz). Pokelso narvelį veikiant 620 kHz dažnio impulsams įvyksta z ašimi sklindančios akustinės bangos pirmosios harmonikos rezonansas (teorinis dažnis 620,21 kHz). Rezonansinio dažnio 740 kHz akustinių bangų sklidimo kryptis nėra žinoma, bet iš spektrinės analizės rezultatų matyti, kad šį rezonansą sudaro akustinių bangų sklindančių keliomis kryptimis rezonansai kurių 2,25 MHz dažnio dedamoji turi didžiausią amplitudę.

2.1 lentelė. Apskaičiuoti Pokelso narvelio su BBO kristalu rezonansiniai dažniai ir jų harmonikos

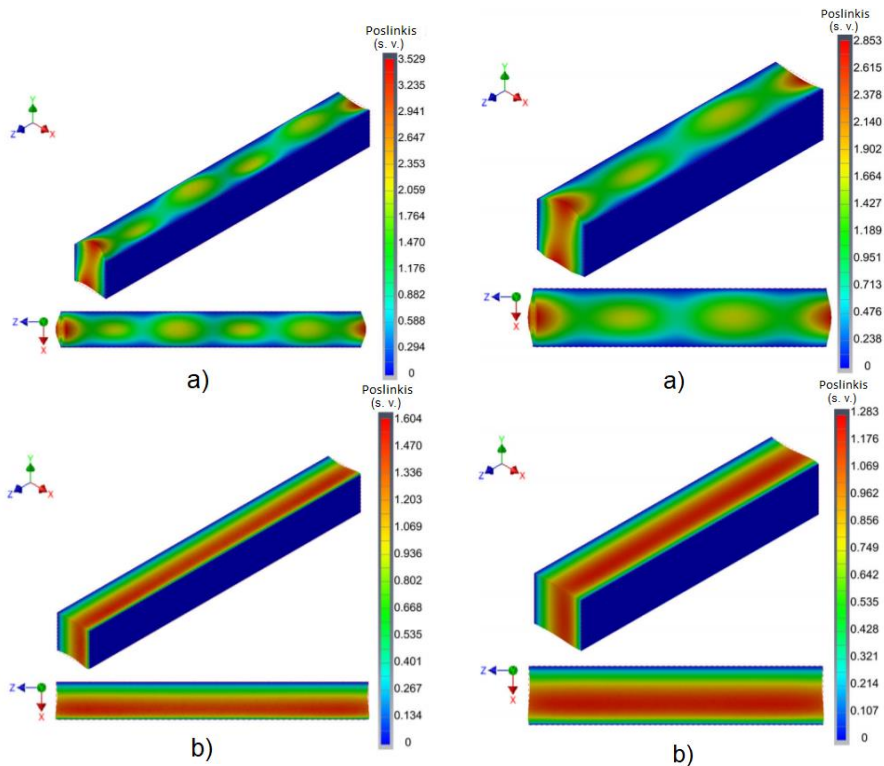
Table 2.1. The resonant frequencies and their harmonics calculated for BBO Pockels cell

Skersinis kristalo matmuo		3 mm kristalas		4 mm kristalas	
Akustinių bangų sklidimo kryptis		x ašimi	z ašimi	x ašimi	z ašimi
Akustinių bangų rezonansiniai dažniai, kHz	f_{res0}	945,22	620,22	708,92	465,16
	$f_{\text{res0}} / 2$	472,61	310,11	354,46	232,58
	$f_{\text{res0}} / 3$	315,07	206,74	236,31	155,05
	$f_{\text{res0}} / 4$	236,31	155,05	177,23	116,29
	$f_{\text{res0}} / 5$	189,04	124,04	141,78	93,03
	$f_{\text{res0}} / 6$	157,54	103,37	118,15	77,53
	$f_{\text{res0}} / 7$	135,03	88,60	101,27	66,45

Teoriškai apskaičiuoti rezonansiniai dažniai pagrindžia eksperimentiškai aptiktus rezonansinius dažnius. Matomas rezonansinių dažnių skirtumas tarp teoriškai apskaičiuotų ir praktiškai išmatuotų dažnių yra sąlygojamas Pokelso narvelio konstrukcinės įtakos arba matmenų paklaidų įtakos.

Pjezoelektrinių virpesių Pokelso narvelyje su BBO kristalu pasiskirstymas buvo tiriamas naudojant baigtinių elementų metodą, „Autodesk Nastran In-CAD“ modeliavimo aplinkoje. Modeliui buvo pritaikyti apribojimai ties kristalo x ašies paviršiais kurie imituoja elektrodus. Baigtinių elementų metodo modeliavimo rezultatai parodė, kad BBO kristalo, kurio matmenys $4 \times 4 \times 20$ mm, fundamentiniai akustinių bangų, sklindančių, x ir z ašimis, rezonansiniai dažniai yra atitinkamai 709,02 kHz ir 467,16 kHz, o BBO kristalo, kurio matmenys $3 \times 3 \times 25$ mm – 944,08 kHz ir 627,61 kHz. Rezultatų vizualizacijos pateiktos 2.11 ir 2.12 paveiksluose.

Baigtinių elementų metodo modeliavimo rezultatai sutampa su teoriniais skaičiavimais paremtais stovinčios bangos rezonanso sąlyga (2.5). Remiantis eksperimentiškai gautais rezultatais buvo aptikta, kad virpesiai sklindantys x kryptimi (elektrinio lauko kryptimi) ir z kryptimi (optinės ašies kryptimi) dominuoja ir daro didžiausią įtaką Pokelso narvelio optiniam kontrastui.



2.11 pav. Akustinių bangų sukulto mechaninio poslinkio matematinio modeliavimo rezultatai veikiant $3 \times 3 \times 25$ mm matmenų BBO kristalą: a) 627,61 kHz; b) 944,08 kHz dažnio signalu

Fig. 2.11. Numerically simulated results of acoustic wave induced mechanical displacement in $3 \times 3 \times 25$ mm BBO crystal by: a) 627.61 kHz; b) 944.08 kHz frequency signal

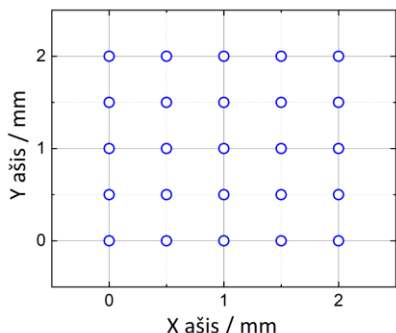
2.12 pav. Akustinių bangų sukulto mechaninio poslinkio matematinio modeliavimo rezultatai veikiant $4 \times 4 \times 20$ mm matmenų BBO kristalą: a) 467,16 kHz; b) 709,02 kHz dažnio signalu

Fig. 2.12. Numerically simulated results of acoustic wave induced mechanical displacement in $4 \times 4 \times 20$ mm BBO crystal by: a) 467.16 kHz; b) 709.02 kHz frequency signal

2.2.2. Pjezoelektrinių virpesių pasiskirstymo kristale tyrimas

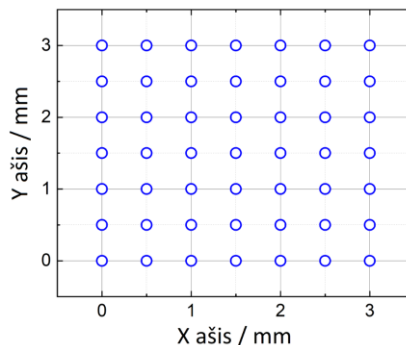
Norint patikrinti modeliavimo rezultatus, gautus naudojant baigtinių elementų metodą, atliktas Pokelso narvelių su BBO kristalais, kurių matmenys $3 \times 3 \times 25$ mm ir $4 \times 4 \times 20$ mm įtempimų sukeltų spindulio intensyvumo pasiskirstymo eksperimentinis tyrimas. Pokelso narvelis pritvirtintas prie dviejų

ašių laikiklio ir pasirinkti taškai kuriose buvo atlikti matavimai. Pokelso narvelyje su BBO kristalu, kurio matmenys $3 \times 3 \times 25$ mm, pasirinkti 25 matavimo taškai (2.13 paveikslas), o $4 \times 4 \times 20$ mm matmenų – 49 matavimo taškai (2.14 paveikslas). Matavimo taškų žingsnis buvo apribotas lazerio spindulio diametro – 1,5 mm. Pokelso narvelio elektrodai šio tyrimo metu yra xz plokštumoje.



2.13 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $3 \times 3 \times 25$ mm, matavimo taškų koordinatės

Fig. 2.13. Coordinates of measuring points of a Pockels cell with BBO crystal with dimensions of $3 \times 3 \times 25$ mm

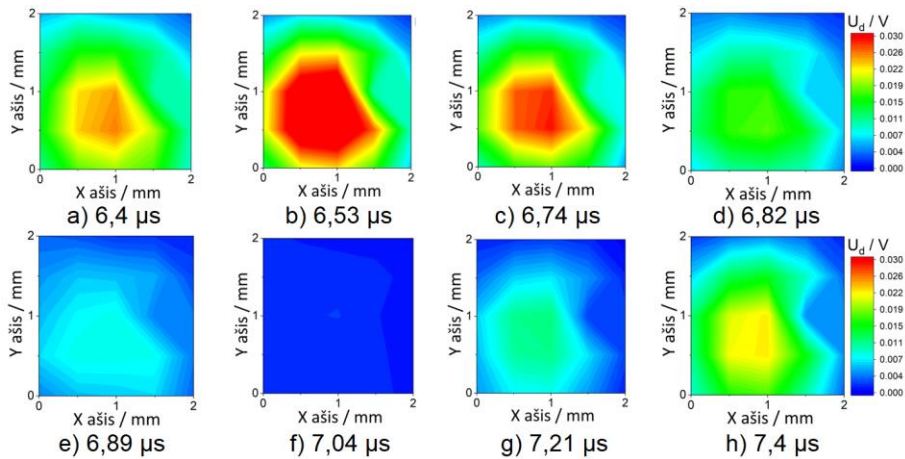


2.14 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $4 \times 4 \times 20$ mm, matavimo taškų koordinatės

Fig. 2.14. Coordinates of measuring points of a Pockels cell with BBO crystal with dimensions of $4 \times 4 \times 20$ mm

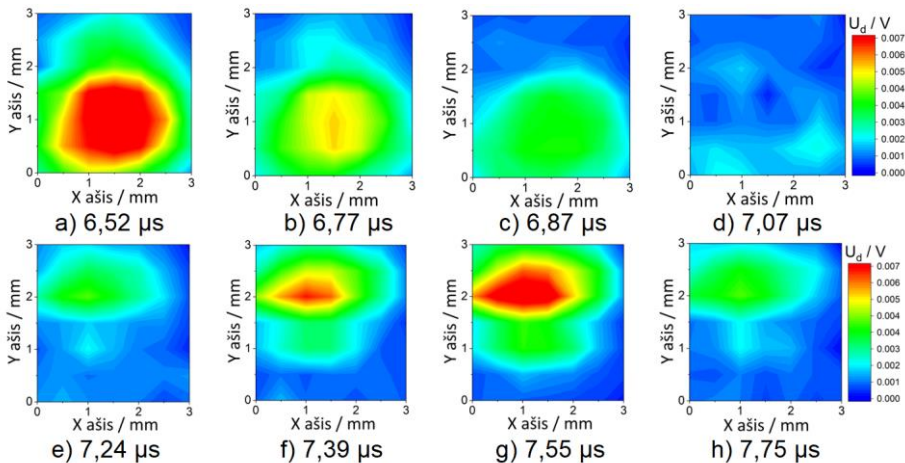
Pokelso narvelio optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų dažnio matavimas atliekamas kiekviename iš 2.13 ir 2.14 paveiksluose nurodytų taškų. Matavimo metu gautos Pokelso narvelio optinio atsako oscilogramos. Oscilogramos gautos prie rezonansinių dažnių pateikiamos matricos pavidalu, skirtingais laiko momentais (2.15–2.20 paveikslai). Analizei pasirinkti skirtingomis kryptimis sklindančių akustinių bangų rezonansiniai dažniai dviejų dydžių Pokelso narvelių kristalams. Rezultatuose pateikiamas vieno aukštos įtampos impulsų periodo atsakas. Spindulio intensyvumo pasiskirstymas atvaizduoja įtempimų pasiskirstymą (akustinių bangų sklaidimą) Pokelso narvelio BBO kristale. Kuo didesnis intensyvumas užfiksuojamas tuo stipresnius įtempimus patiria kristalas.

Pokelso narvelių su BBO kristalu, kurių matmenys $3 \times 3 \times 25$ mm ir $4 \times 4 \times 20$ mm, akustinių bangų sklindančių optine ašimi pirmosios harmonikos rezonanso spindulio intensyvumo pasiskirstymas pateiktas 2.15 ir 2.16 paveiksluose.



2.15 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $3 \times 3 \times 25$ mm, spindulio intensyvumo pasiskirstymo kitimas laike (aukštos įtampos impulsų dažnis 613 kHz)

Fig. 2.15. Changes in the distribution of beam intensity over time of a Pockels cell with a BBO crystal of $3 \times 3 \times 25$ mm dimensions (613 kHz high voltage pulse frequency)



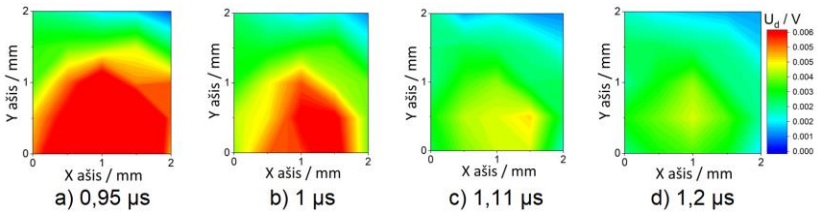
2.16 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $4 \times 4 \times 20$ mm, spindulio intensyvumo pasiskirstymo kitimas laike (aukštos įtampos impulsų dažnis 463 kHz)

Fig. 2.16. Changes in the distribution of beam intensity over time of a Pockels cell with a BBO crystal of $4 \times 4 \times 20$ mm dimensions (463 kHz high voltage pulse frequency)

Rezultatuose pateiktuose 2.15 ir 2.16 paveiksluose matome spindulio intensyvumo pasiskirstymą kristale, kurio akustinių bangų sukulto mechaninio poslinkio matematinio modeliavimo rezultatai pateikti 2.11a ir 2.12a paveiksluose. Modeliavimo rezultatuose (2.11a ir 2.12a paveikslai) matyti,

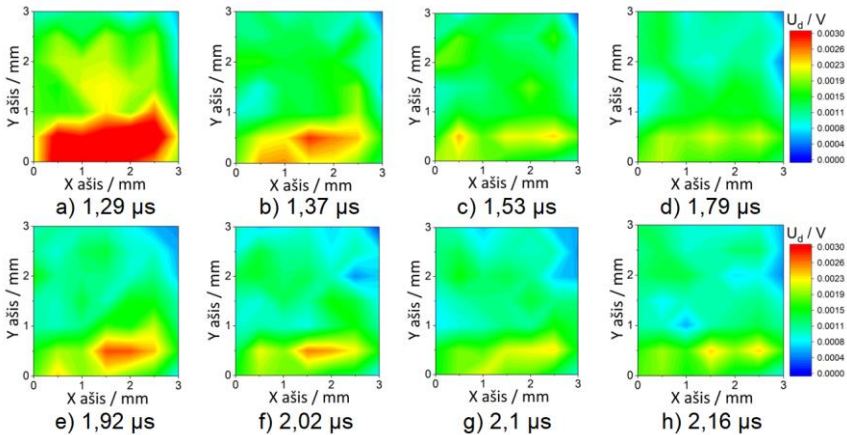
kad akustinėms bangoms sklindant optinės ašies kryptimi didžiausi įtempimai susiformuoja akustinei bangai atsimušus į kristalo paviršių. Eksperimentinio tyrimo metu matomas šių įtempimų sukeltų spindulio intensyvumo pasiskirstymo periodiškumas. Pokelso narvelio su $4 \times 4 \times 20$ mm kristalu matavimo rezultatai rodo kad akustinė banga pasislenka link vieno iš elektrodų. Tai sąlygojama tame pačiame dažnyje vykstančio akustinių bangų rezonanso, kuris vyksta kita kryptimi (dėl kito elastinio standumo tenzorius).

Pokelso narvelių su BBO kristalu, kurių matmenys $3 \times 3 \times 25$ mm ir $4 \times 4 \times 20$ mm, akustinių bangų sklindančių elektrinio lauko kryptimi pirmosios harmonikos rezonanso spindulio intensyvumo pasiskirstymas pateikiamas 2.17 ir 2.18 paveiksluose.



2.17 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $3 \times 3 \times 25$ mm, spindulio intensyvumo pasiskirstymo kitimas laike (aukštos įtampos impulsų dažnis 949 kHz)

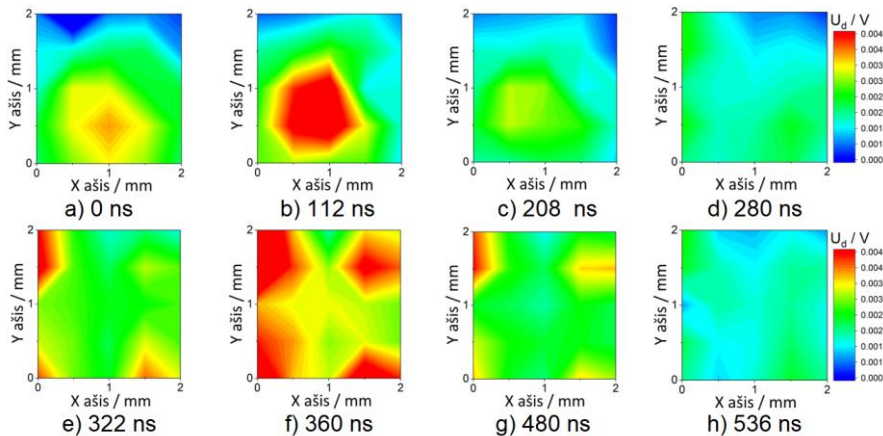
Fig. 2.17. Changes in the distribution of beam intensity over time of a Pockels cell with a BBO crystal of $3 \times 3 \times 25$ mm dimensions (949 kHz high voltage pulse frequency)



2.18 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $4 \times 4 \times 20$ mm, spindulio intensyvumo pasiskirstymo kitimas laike (aukštos įtampos impulsų dažnis 721 kHz)

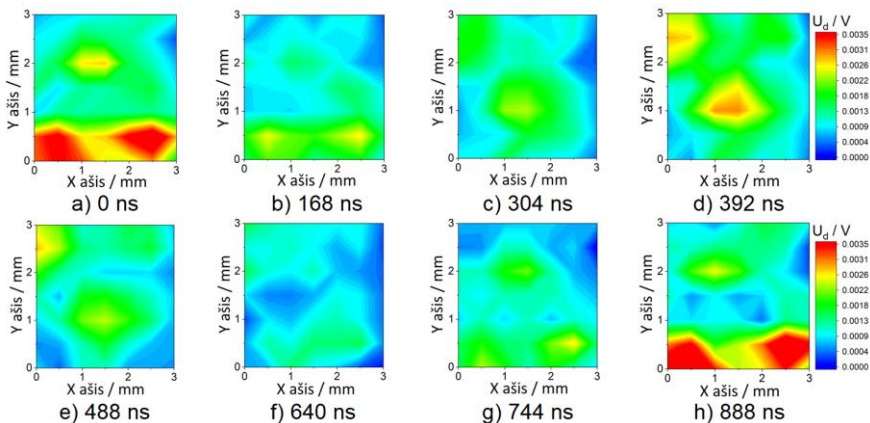
Fig. 2.18. Changes in the distribution of beam intensity over time of a Pockels cell with a BBO crystal of $4 \times 4 \times 20$ mm dimensions (721 kHz high voltage pulse frequency)

Matavimo rezultatai rodo, kad šia kryptimi sklindančių akustinių bangų rezonanso pirmoji harmonika neturi tokios didelės įtakos Pokelso narvelio optiniam kontrastui. Šios krypties žemesnių dažnių akustinių bangų rezonanso harmonikos sustiprėja tik dėl papildomai susiformuojančių akustinių bangų rezonansų kitomis kryptimis.



2.19 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $3 \times 3 \times 25$ mm, spindulio intensyvumo pasiskirstymo kitimas laike (aukštos įtampos impulsų dažnis 763 kHz)

Fig. 2.19. Changes in the distribution of beam intensity over time of a Pockels cell with a BBO crystal of $3 \times 3 \times 25$ mm dimensions (763 kHz high voltage pulse frequency)



2.20 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $4 \times 4 \times 20$ mm, spindulio intensyvumo pasiskirstymo kitimas laike (aukštos įtampos impulsų dažnis 523 kHz)

Fig. 2.20. Changes in the distribution of beam intensity over time of a Pockels cell with a BBO crystal of $4 \times 4 \times 20$ mm dimensions (523 kHz high voltage pulse frequency)

Iš rezultatų gautų 2.19 ir 2.20 paveiksluose matome sąlygas kai susiformuoja akustinių bangų rezonansas keliomis kryptimis. Dėl intensyvumo pasiskirstymo pobūdžio sudėtinga nustatyti akustinių bangų sklidimo kryptis šiuose dažniuose. Iš rezultatų pateiktų 2.17 ir 2.18 paveiksluose matyti, kad akustinė banga susiformuoja tik vienoje iš zonų. Tai pagrindžia stovinčios bangos susiformavimo faktą elektrinio lauko kryptimi.

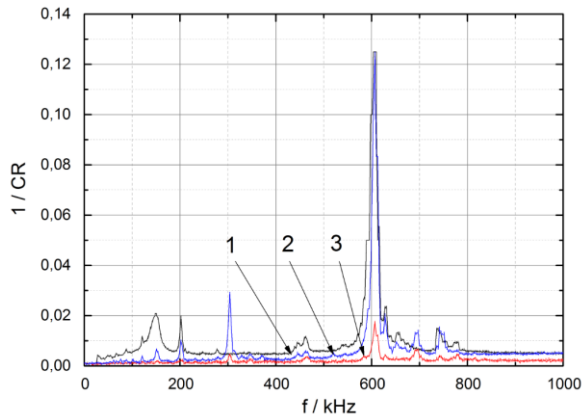
Atlikti matavimai patvirtina, kad didžiausią įtaką Pokelso narvelio su BBO kristalu kontrasto vertei turi akustinės bangos sklindančios z kryptimi (tarp kristalo elektrodų) ir x kryptimi (lazerio spindulio sklidimo kryptimi). Sąlygos kai suformuojami akustinių bangų rezonansai keliomis kryptimis žymiai padidina kristale suformuotų įtempimų amplitudę (matomas optiniam atsake kaip intensyvumo padidėjimas).

2.2.3. Optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulso trukmės tyrimas

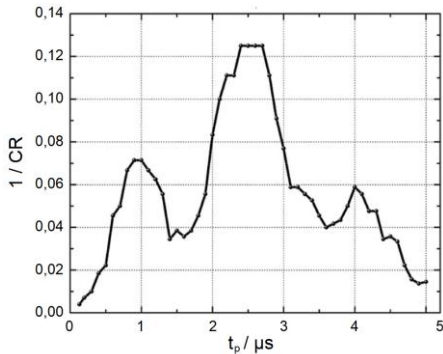
Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $3 \times 3 \times 25$ mm, optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų dažnio matavimai buvo atlikti su skirtingomis aukštos įtampos impulsų trukmėmis. Tyrimo metu buvo palyginti optinio kontrasto rezultatai gauti kai impulso trukmė yra fiksuota ir lygi 150 ns ir 500 ns, bei kai impulso trukmė kinta priklausomai nuo dažnio, t. y. impulso trukmė lygi pusei periodo. Tyrimo rezultatai pateikti 2.21 paveiksle.

Iš gautų matavimo rezultatų matosi, kad optinis kontrastas priklauso nuo aukštos įtampos impulso trukmių. Taip pat matome, kad mažiausias optinis kontrastas aptinkamas Pokelso narvelį veikiant 600 kHz aukštos įtampos impulsų dažniu. Kai aukštos įtampos impulso trukmė yra 500 ns, papildomas rezonansinis dažnis aptinkamas prie 300 kHz. Specifiniu atveju, kai aukštos įtampos impulso trukmė yra keičiama su dažniu ir yra lygi pusei periodo, rezonansai aptinkami prie 150 kHz ir 200 kHz dažnių. Kuo trumpesnė aukštos įtampos impulso trukmė, tuo siauresniame dažnių diapazone įvyksta rezonansas ir tuo mažesnė gaunama pjezoelektrinių virpesių amplitudė (didesnė optinio kontrasto vertė), tačiau matoma, kad kartu ir sužadinamos kitų dažnių pjezoelektrinių virpesių harmonikos.

Iš tyrimų rezultatų matyti, kad priklausomai nuo aukštos įtampos impulso trukmės optinį kontrastą mažinančius akustinių bangų rezonansinius dažnius galima sužadinti arba nuslopinti. Tam patikrinti buvo atlikti Pokelso narvelio optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulso trukmės tyrimai esant rezonansui. Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $3 \times 3 \times 25$ mm, optinio kontrasto priklausomybės nuo impulso trukmės, kai trukmė keičiama nuo 130 ns iki 5 μ s, pateiktos 2.22 ir 2.23 paveiksluose.

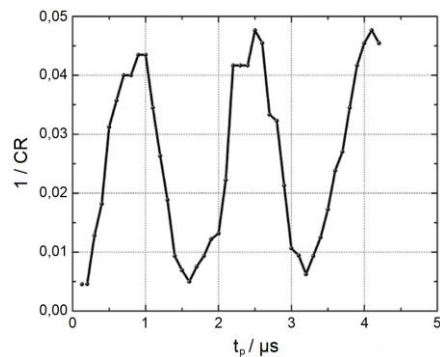


2.21 pav. Pokelso narvelio su $3 \times 3 \times 25$ mm BBO kristalu kontrasto priklausomybė nuo aukštos įtampos impulsų dažnio: 1 – impulso trukmė lygi pusei periodo; 2 – impulso trukmė 500 ns; 3 – impulso trukmė 150 ns
Fig. 2.21. The dependences of $3 \times 3 \times 25$ mm Pockels cells BBO crystal contrast on applied high voltage pulse frequency: 1– duty cycle is 50 %, pulse width changes with frequency; 2 – pulse width is fixed and is equal to 500 ns. 3 – pulse width is fixed and is equal to 150 ns



2.22 pav. Pokelso narvelio su $3 \times 3 \times 25$ mm BBO kristalu optinio kontrasto priklausomybė nuo aukštos įtampos impulsų trukmės (156 kHz dažnis)

Fig. 2.22. Dependence of optical contrast of Pockels cell with $3 \times 3 \times 25$ mm BBO crystal on high voltage pulse width (156 kHz frequency)



2.23 pav. Pokelso narvelio su $3 \times 3 \times 25$ mm BBO kristalu optinio kontrasto priklausomybė nuo aukštos įtampos impulsų trukmės (208 kHz dažnis)

Fig. 2.23. Dependence of optical contrast of Pockels cell with $3 \times 3 \times 25$ mm BBO crystal on high voltage pulse width (208 kHz frequency)

Optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulso trukmės tyrimo rezultatai parodė, kad optinio kontrasto kitimas yra periodinis. Periodas yra 1,6 μ s, kai aukštos įtampos impulsų dažnis 156 kHz ir 208 kHz. Didžiausia Pokelso narvelio optinio kontrasto vertė gauta tuomet, kada aukštos įtampos impulso trukmė yra lygi z kryptimi sklindančių akustinių bangų rezonansinio dažnio (620,22 kHz) arba jo harmonikų periodui. Teoriškai apskaičiuotas Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $3 \times 3 \times 25$ mm, pjezoelektrinių virpesių slopimo periodas yra 1,61 μ s kas pagrindžia matavimo rezultatus. Mažiausias optinis kontrastas gaunamas tuomet, kada aukštos įtampos impulso trukmė yra lygi arba nelyginė rezonansinio dažnio sklindančio z kryptimi pusės periodo kartotiniui (~ 800 ns).

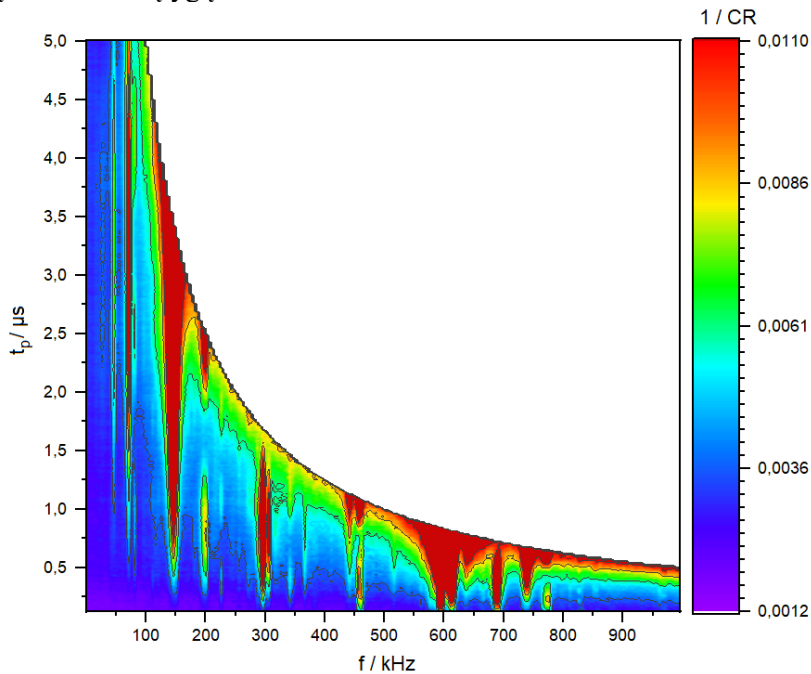
Tyrimo rezultatuose, pateiktuose 2.22 ir 2.23 paveiksluose, aptikto periodiškumo priežastis yra aukštos įtampos priekinio ir galinio fronto sukeltų akustinių bangų tarpusavio sąveika. Priekinis ir galinis frontai sukelia priešingos pradinės fazės akustines bangas Pokelso narvelyje. Kai aukštos įtampos impulso trukmė yra lygi dominuojančio rezonansinio dažnio pusei periodo arba jo nelyginiam kartotiniui, akustinės bangos, sukeltos aukštos įtampos impulso galinio fronto, fazė sutampa su priekinio fronto sukeltos bangos faze, todėl įvyksta konstruktyvi šių akustinių bangų interferencija, t. y. akustinių bangų amplitudė padidėja, o Pokelso narvelio optinio kontrasto vertė sumažėja. Kai aukštos įtampos impulso trukmė yra lygi arba kartotina dominuojančio rezonansinio dažnio periodui, akustinių bangų fazė sukelta galinio fronto yra priešinga priekinio fronto sukeltai akustinės bangos fazei. Pasireiškia destruktvyi akustinių bangų interferencija, t. y. akustinių bangų amplitudė sumažėja, todėl tirtu atveju nuo 2 iki 10 kartų padidėja Pokelso narvelio optinio kontrasto vertė.

Visiems galimiems rezonansiniams dažniams, prie kurių sumažėja optinis kontrastas, aptikti būtina atlikti detalų optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio tyrimą.

2.2.4. Optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio tyrimas

Pokelso narvelio optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio tyrime naudoti dviejų skirtingų dydžių Pokelso narvelių BBO kristalai: $3 \times 3 \times 25$ mm ir $4 \times 4 \times 20$ mm. Tyrimas buvo atliekamas dažnių diapazone nuo 1 kHz iki 1 MHz, keičiant dažnį 3 kHz žingsniu. Kiekviename žingsnyje išmatuojamas Pokelso narvelio optinis kontrastas. Šis matavimas atliekamas su aukštos įtampos impulso trukmėmis nuo 130 ns iki 5 μ s, keičiant impulso trukmę 15 ns žingsniu. Tyrimo rezultatai pateikti 2.24 ir 2.25 paveiksluose. Juose balta spalva pažymėta zona kurioje nėra atlikti matavimai. Tyrimai atlikti kai aukštos įtampos impulso trukmė neviršija pusės

periodo. Tyrimo metu aptiktos pjezoelektrinių virpesių sąlygojamos mažo optinio kontrasto zonos prie skirtingų aukštos įtampos impulsų trukmių ir dažnių. Taip pat matomi dažniai kuriuose optinio kontrasto vertė padidėjo pasirinkus tinkamą impulsų trukmę taip išvengiant pjezoelektrinių virpesių sukeltų akustinių bangų rezonanso sąlygų.



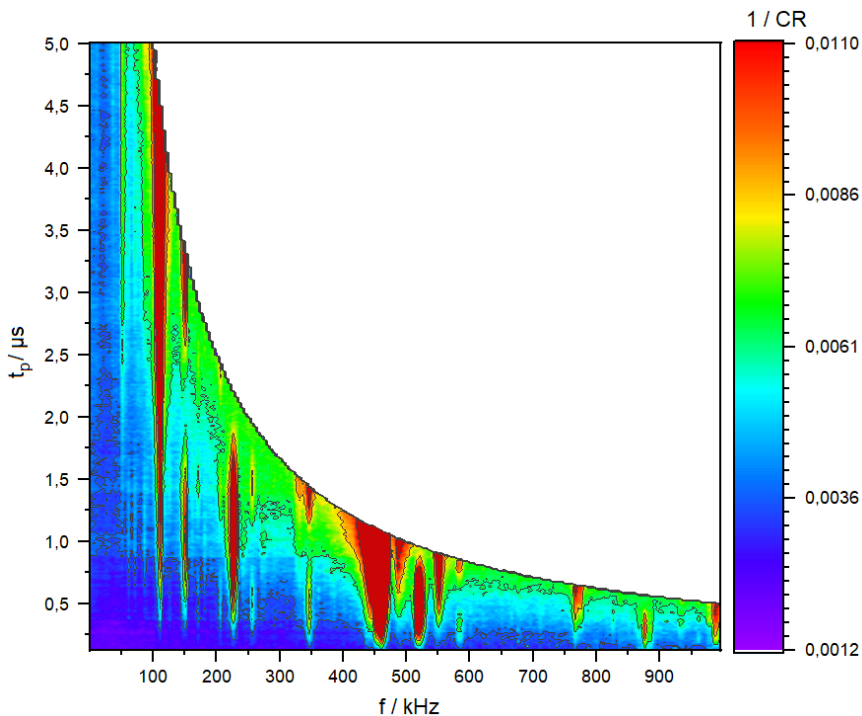
2.24 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $3 \times 3 \times 25$ mm, optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulso trukmės ir dažnio

Fig. 2.24. Pockels cell with BBO crystal with dimensions of $3 \times 3 \times 25$ mm optical contrast dependence on high voltage pulse duration and frequency

Remiantis teoriniais akustinių bangų rezonansinių dažnių skaičiavimais, pateiktais 2.1 lentelėje ir matavimo rezultatais pateiktais 2.24 paveiksle, galima nustatyti akustinių bangų rezonansinius dažnius, susidarantius skirtingomis kristalo kryptimis. Lygiagrečiai kristalo optinei ašiai (z kryptis) sklindančių akustinių bangų rezonansus aptinkame 620 kHz, 310 kHz, 205 kHz, 156 kHz dažniuose. Veikiant Pokelso narvelį 310 kHz ir 205 kHz aukštos įtampos impulso dažniais matomas optinio kontrasto padidėjimas kai impulso trukmė yra $1,6 \mu\text{s}$. Ši trukmė yra lygi z kryptimis sklindančios akustinės bangos periodui. Pokelso narvelį veikiant 620 kHz ir 156 kHz aukštos įtampos impulsų dažniais

nepastebime optinio kontrasto padidėjimo dėl susidarančių akustinių bangų rezonansų keliomis kryptimis. Lygiagrečiai elektriniam laukui sklindančių akustinių bangų (sklindančių x ašimi) ir lygiagrečiai kristalo optinei ašiai sklindančių akustinių bangų (sklindančių z ašimi) rezonansai sutampa arba yra artimi 310 kHz ir 156 kHz dažniuose. Aukštesniuose dažniuose optinio kontrasto sumažėjimą sukelia akustinių bangų sklindančių keliomis kryptimis rezonansai.

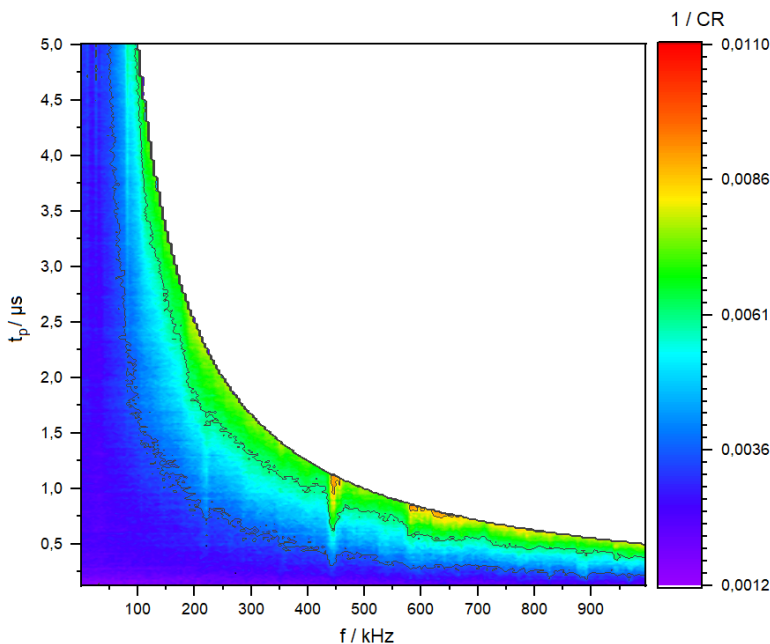
Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $4 \times 4 \times 20$ mm, optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulso trukmės ir dažnio tyrimo rezultatai pateikti 2.25 paveiksle. Šiam kristalui optinio kontrasto sumažėjimo zonos, lyginant su $3 \times 3 \times 25$ mm matmenų kristalu, pasislinko 23–25 % į žemesnių dažnių sritį (2.25 paveikslas). Eksperimento metu aptikti rezonansiniai dažniai yra artimi teoriškai apskaičiuotiems dažniams (2.1 lentelė).



2.25 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $4 \times 4 \times 20$ mm, optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulso trukmės ir dažnio

Fig. 2.25. Pockels cell with BBO crystal with dimensions of $4 \times 4 \times 20$ mm optical contrast dependence on high voltage pulse duration and frequency

Iš tyrimų rezultatų pateiktų 2.24 ir 2.25 paveiksluose matyti, kad akustinių bangų rezonansas, susiformavęs tame pačiame dažnyje keliomis kryptimis, turi didelę įtaką Pokelso narvelio optiniam kontrastui. Šios įtakos sumažinimui galima naudoti pasyvųjų akustinių bangų, sklindančių bent viena kryptimi (šiuo atveju elektrinio lauko kryptimi), slopinimą. Tam tikslui naudojamas padidintų matmenų elektrodas, kurio akustinė varža yra artima kristalo akustinei varžai, kuris yra pritvirtinamas prie kristalo su tokios pat akustinės varžos klėjais. Pasyvusis akustinių bangų slopinimas buvo pritaikytas Pokelso narveliui su BBO kristalu, kurio matmenys $4 \times 4 \times 20$ mm. Optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų trukmės ir dažnio tyrimo rezultatas pateiktas 2.26 paveiksle.



2.26 pav. Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $4 \times 4 \times 20$ mm, su pasyviuoju slopinimu, optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulso trukmės ir dažnio

Fig. 2.26. Optical contrast dependence of Pockels cell with BBO crystal with dimensions of $4 \times 4 \times 20$ mm on high voltage pulse duration and frequency, when passive suppression is applied

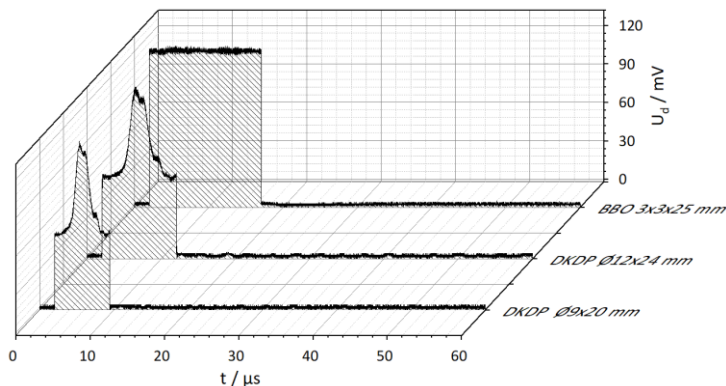
Iš rezultatų pateiktų 2.26 paveiksle matyti, kad pritaikius pasyvųjų slopinimo metodą išnyksta mažo optinio kontrasto zonos. Tai atsitinka dėl to, kad šiuo metodu panaikinamos rezonansų sąlygos. Šis sprendimas nereikalauja didelių konstrukcinių pakeitimų, todėl gali būti plačiai taikomas.

2.3. Pokelso narvelių su kalio dideuterio fosfato kristalu tyrimai

Pokelso narveliai su DKDP kristalu, lyginant su BBO kristalais, pasižymi žymiai didesnės amplitudės pjezoelektriniais virpesiais. Pjezoelektrinius virpesius Pokelso narveliuose su DKDP kristalu galima aptikti paveikus pavieniais aukštos įtampos impulsais. Šiame poskyryje pateikti pjezoelektrinių virpesių tyrimų, naudojant Furjė metodą, rezultatai.

2.3.1. Pjezoelektrinių virpesių analizė

Pokelso narvelių su BBO ir DKDP kristalais, paveiktų vienu aukštos įtampos impulsu, optinio atsako oscilogramos pateiktos 2.27 paveiksle.

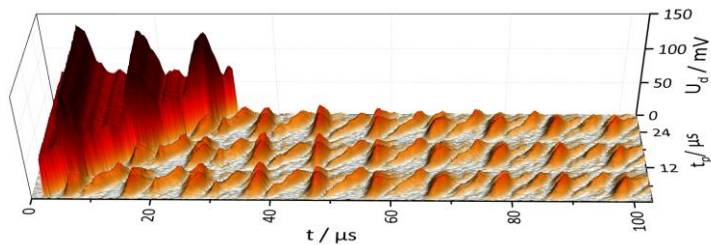


2.27 pav. Pokelso narvelių su BBO ir DKDP kristalais optinis atsakas, paveiktus vienu aukštos įtampos impulsu

Fig. 2.27. Optical response of BBO and DKDP crystal based Pockels cells affected by the single high voltage pulse

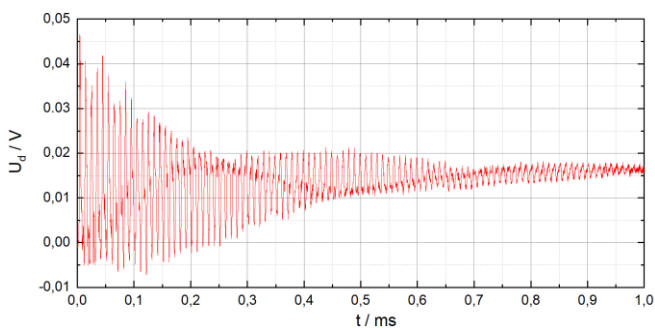
Rezultatuose, pateiktuose 2.27 paveiksle, pavaizduotos optinio atsako oscilogramos Pokelso narveliams su DKDP kristalais, kurių matmenys: $\varnothing 12 \times 24$ mm ir $\varnothing 9 \times 20$ mm. Pjezoelektrinių virpesių periodas Pokelso narveliuose su DKDP kristalais yra: 10 μ s kai kristalo matmenys $\varnothing 12 \times 24$ mm ir 7,4 μ s kai kristalo matmenys $\varnothing 9 \times 20$ mm. Pokelso narveliuose su BBO kristalu, veikiant jį vienu aukštos įtampos impulsu, pjezoelektriniai virpesiai nesusidaro.

Pokelso narvelio su DKDP kristalu, kurio matmenys $\varnothing 12 \times 24$ mm, optinio atsako oscilogramos, kai aukštos įtampos impulsų trukmė buvo keičiama nuo 200 ns iki 30 μ s, pateiktos 2.28 paveiksle.



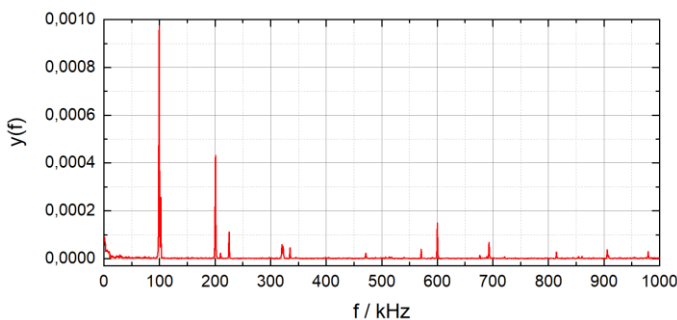
2.28 pav. Pokelso narvelio su DKDP kristalu, kurio matmenys $\varnothing 12 \times 24$ mm, optinio atsako oscilogramos prie skirtingų aukštos įtampos impulso trukmių t_p
Fig. 2.28. Pockel cell with DKDP crystal with dimensions of $\varnothing 12 \times 24$ mm optical response oscilograms at different high voltage pulse widths t_p

Pateiktam 2.28 paveiksle t_p – aukštosios įtampos impulso trukmė. Iš gautų rezultatų galima teigti, kad kuo kristalo virpesių harmonikų periodo trukmė yra artimesnė Pokelso narvelio kristalą žadinančios aukštosios įtampos impulso trukmei, tuo mažesnės amplitudės optinio atsako pulsacijos aptinkamos po aukštosios įtampos impulso galinio fronto. Tai nutinka dėl to, kad galinio fronto sukelti pjezoelektriniai virpesiai yra priešingos fazės, lyginant su priekinio fronto sukeltais virpesiais. Ta pati pjezoelektrinių virpesių slopimo tendencija pastebėta Pokelso narveliuose su BBO kristalais. Pokelso narvelio su DKDP kristalu priekinio aukštos įtampos impulso fronto optinis atsakas pateiktas 2.29 paveiksle. Pateiktos oscilogramos aukštos įtampos impulso amplitudės dedamoji yra kompensuota, todėl pavaizduoti tik pjezoelektriniai virpesiai ir jų įtaka intensyvumui.



2.29 pav. Pokelso narvelio su DKDP kristalu, kurio matmenys $\varnothing 12 \times 24$ mm, optinio atsako pulsacijos, sąlygojamos pjezoelektrinių virpesių, sukeltų priekinio aukštos įtampos impulso fronto
Fig. 2.29. Optical response pulsations of a Pockel cell with $\varnothing 12 \times 24$ mm DKDP crystal caused by piezoelectric ringing introduced by the high voltage pulse rising edge

Iš rezultatų pateiktų 2.29 paveiksle, matyti, kad optinio atsako pulsacijos, sąlygojamos pjezoelektrinių virpesių, sukeltų priekinio aukštos įtampos impulso fronto Pokelso narvelyje, nuslopsta 20 kartų po 1 ms. Taip pat matyti, kad pjezoelektriniai virpesiai po kurio laiko nuslopsta, o optinio atsako intensyvumas nusistovi ties tam tikra baigtine verte. Matyti, kad impulso fronto sukeltas optinio atsako pereinamasis procesas nėra harmoninis, t. y. jį sudaro kelios harmonikos. Optinio atsako pulsacijų spektras, gautas naudojant diskrečiąją Furjė transformaciją, pateiktas 2.30 paveiksle. Iš jo matyti, kad pulsacijų spektro pirmos harmonikos dažnis yra 100 kHz, kurios periodas yra lygus aukštos įtampos impulso trukmei leidžiančiai nuslopinti pjezoelektrinius virpesius (2.28 paveikslas). Tyrimai parodė, kad veikiant Pokelso narvelį trumpos ir ilgos trukmės aukštos įtampos impulsais pusės bangos įtampa, dėl stiprių pjezoelektrinių virpesių, bus skirtinga.



2.30 pav. Pokelso narvelio su DKDP kristalu, kurio matmenys $\varnothing 12 \times 24$ mm, optinio atsako pulsacijų, sąlygojamų pjezoelektrinių virpesių, sukeltų priekinio aukštos įtampos impulso fronto, spektras

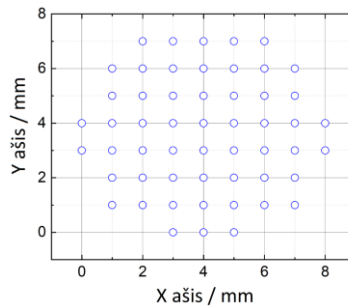
Fig. 2.30. Spectrum of optical response pulsations of a Pockel cell with $\varnothing 12 \times 24$ mm DKDP crystal caused by piezoelectric ringing introduced by the high voltage pulse rising edge

Spektro komponentės, pateiktos 2.30 paveiksle, susidaro dėl sąveikos tarp akustinių bangų, sklindančių skirtingomis kryptimis. Norint ištirti dominuojančių akustinių bangų sklaidimo kryptis Pokelso narvelyje su DKDP kristalu, būtina atlikti pjezoelektrinių virpesių pasiskirstymo tyrimus.

2.3.2. Pjezoelektrinių virpesių pasiskirstymo kristale tyrimas

Atliekant tyrimus, Pokelso narvelis su DKDP kristalu buvo pritvirtintas prie dviejų ašių laikiklio, kuris buvo panaudotas Pokelso narvelio pozicijos nustatymui lazerio spindulio atžvilgiu. DKDP kristalo matmenys $\varnothing 9 \times 20$ mm. Jame buvo pasirinkti 54 matavimo taškai pateikti 2.31 paveiksle, kuriose buvo atlikti Pokelso

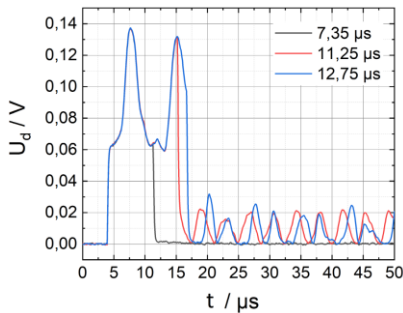
narvelio optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulso trukmės matavimai.



2.31 pav. Pokelso narvelio su DKDP kristalu, kurio matmenys $\varnothing 9 \times 20$ mm, matavimo taškų koordinatės

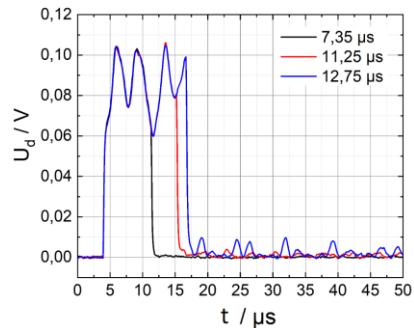
Fig. 2.31. Coordinates of measuring positions of Pockels cell with DKDP crystal with dimensions $\varnothing 9 \times 20$ mm

Pokelso narvelis su DKDP kristalu, optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulso trukmės matavimo metu, buvo veikiamas aukštos įtampos impulsais, kurių trukmė nuo 150 ns iki 20 μ s, dažnis 100 Hz. Aukštos įtampos impulso optinio atsako oscilogramos, matuotos skirtinguose kristalo taškuose, pateiktos 2.32 ir 2.33 paveiksluose. Detaliau analizuojamos optinio atsako oscilogramos veikiant Pokelso narvelį su DKDP kristalu aukštos įtampos impulsais, kurių trukmė 7,35 μ s, 11,25 μ s ir 12,75 μ s.



2.32 pav. Oscilogramos išmatuotos kai lazerio spindulys sklinda per kristalo koordinatę: $x = 4$ mm; $y = 4$ mm

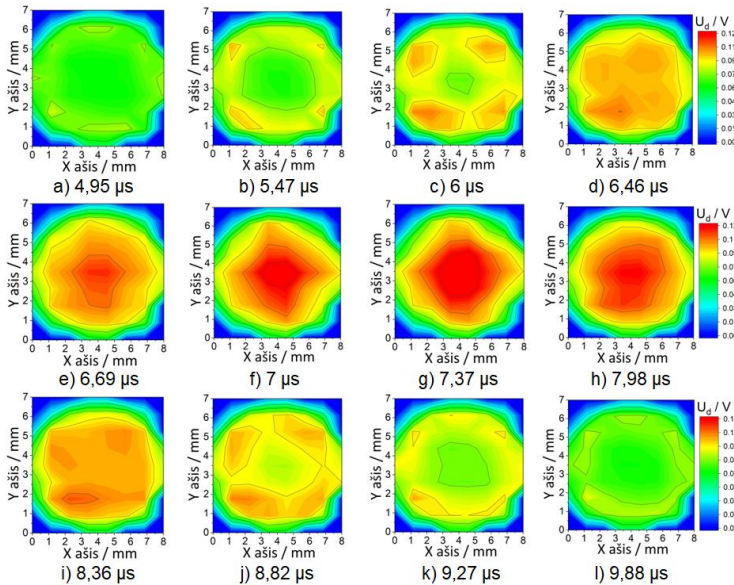
Fig. 2.32. Oscillogram taken when beam is aligned to travel through the crystal at coordinate: $x = 4$ mm; $y = 4$ mm



2.33 pav. Oscilogramos išmatuotos kai lazerio spindulys sklinda per kristalo koordinatę: $x = 6$ mm; $y = 6$ mm

Fig. 2.33. Oscillogram taken when beam is aligned to travel through the crystal at coordinate: $x = 6$ mm; $y = 6$ mm

Kai aukštos įtampos impulso trukmė yra $7,35 \mu\text{s}$, pjezoelektrinių virpesių, sukeltų priekinio fronto ir pjezoelektrinių virpesių sukeltų galinio fronto, fazių skirtumas yra $\varphi = \pi$. Tuomet aukštos įtampos impulso priekinio ir galinio fronto sukelti virpesiai vieni kitus nuslopina. Kai aukštos įtampos impulso trukmė yra $11,25 \mu\text{s}$, skirtumas tarp aukštos įtampos impulso priekinio ir galinio frontų sukeltų pjezoelektrinių virpesių fazių yra $\varphi = 3\pi/2$. Aukštos įtampos impulso priekinio ir galinio fronto sukelti virpesiai šiuo atveju sustiprėja ir daro įtaką optiniam atsakui po aukštos įtampos impulso galinio fronto (2.32 ir 2.33 paveikslai). Kai aukštos įtampos impulso trukmė $12,75 \mu\text{s}$, priekinio ir galinio frontų sukeltų pjezoelektrinių virpesių fazių skirtumas yra $\varphi = 7\pi/4$. Iš pateiktų matavimo rezultatų matyti, kad optinio atsako pulsacijų amplitudės ir dažnis priklauso nuo matavimo pozicijos DKDP kristale. Lazerio spindulio intensyvumo pasiskirstymai Pokelso narvelyje su DKDP kristalu skirtingais laiko momentais pateikti 2.34, 2.35 ir 2.36 paveiksluose. Optinio atsako (intensyvumo) pasiskirstymas parodo įtempimų pasiskirstymą ir jų kitimą Pokelso narvelio kristale. Įtempimų pasiskirstymo kitimas laike nusako akustinių bangų sklaidimo kryptis.

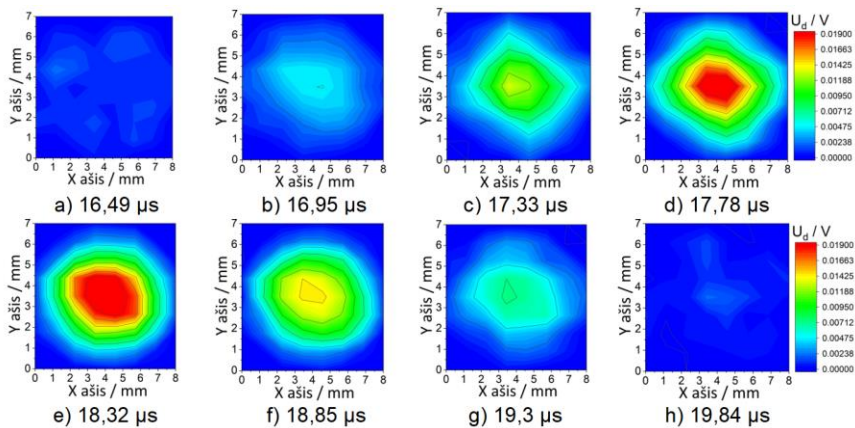


2.34 pav. Lazerio spindulio intensyvumo pasiskirstymas Pokelso narvelyje su DKDP kristalu skirtingais laiko momentais (laikinė skalė po intensyvumo matrica yra pateikta 2.32 ir 2.33 paveikslų laikinės skalės atžvilgiu) veikiant $7,35 \mu\text{s}$ trukmės aukštos įtampos impulsu

Fig. 2.34. Laser radiation intensity distribution in Pockels cell with DKDP crystal at different moments of time (time moments presented below each picture are related to the timing of oscillations in Fig. 2.32 and Fig. 2.33) when high voltage pulse duration is $7.35 \mu\text{s}$

Iš gautų rezultatų pateiktų 2.34 paveiksle matyti, kad intensyvumas ties Pokelso narvelio DKDP kristalo kraštais padidėja $5,47 \mu\text{s}$ ir $6 \mu\text{s}$ laiko momentais. Akustinės bangos, sklindančios link kristalo centro, dėl konstruktyvios akustinių bangų interferencijos sukelia padidėjusius įtempimus, dėl ko $7,37 \mu\text{s}$ laiko momentu atsiranda intensyvumo padidėjimas. Intensyvumas pradeda mažėti, o akustinė banga sklisti link kristalo šonų $8,82 \mu\text{s}$ ir $9,27 \mu\text{s}$ laiko momentais. Aukštos įtampos priekinio fronto generuojamos akustinės bangos sklinda link kristalo centro statmenai optinei ašiai.

Lazerio spindulio intensyvumo pasiskirstymas skirtingais laiko momentais po aukštos įtampos impulso galinio fronto pateiktas 2.35 ir 2.36 paveiksluose. Pokelso narvelį su DKDP kristalu veikiant $11,25 \mu\text{s}$ trukmės aukštos įtampos impulsu, priekinio ir galinio fronto sukeltų akustinių bangų fazė sutampa ir akustinių bangų amplitudė padidėja, ką galima įžvelgti 2.35 paveiksle pateiktuose intensyvumo pasiskirstymuose.

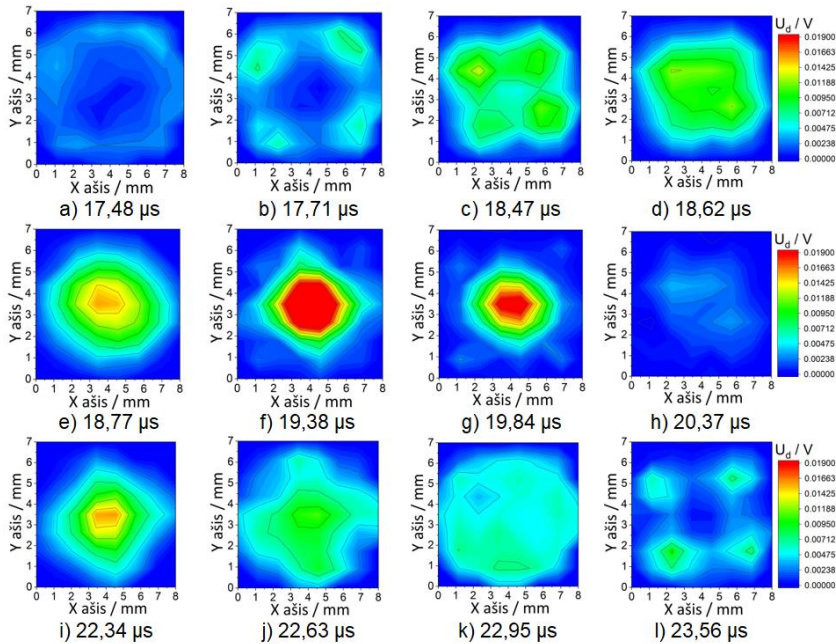


2.35 pav. Lazerio spindulio intensyvumo pasiskirstymas Pokelso narvelyje su DKDP kristalu skirtingais laiko momentais (laikinė skalė po intensyvumo matrica yra pateikta 2.32 ir 2.33 paveikslų laiko skalės atžvilgiu) veikiant $11,25 \mu\text{s}$ trukmės aukštos įtampos impulsu

Fig. 2.35. Laser radiation intensity distribution in Pockels cell with DKDP crystal at different moments of time (time moments presented below each picture are related to the timing of oscillations in Fig. 2.32 and Fig. 2.33) when high voltage pulse duration is $11.25 \mu\text{s}$

Tyrimo rezultatuose, pateiktuose 2.35 paveiksle, matyti, kad Pokelso narvelio DKDP kristalo centre intensyvumo amplitudė padidėja. Intensyvumo padidėjimo, nulemta akustinių bangų sklidimo link centro, taip kaip tai buvo pastebėta rezultatuose, pateiktuose 2.34 paveiksle, neaptikta.

Pokelso narvelį su DKDP kristalu, veikiant $12,75 \mu\text{s}$ trukmės aukštos įtampos impulsu, priekinio ir galinio fronto sukeltų akustinių bangų fazių skirtumas $\varphi = 7\pi/4$. Intensyvumo pasiskirstymas laike šiam atvejui yra pateiktas 2.36 paveiksle.



2.36 pav. Lazerio spindulio intensyvumo pasiskirstymas Pokelso narvelyje su DKDP kristalu skirtingais laiko momentais (laikinė skalė po intensyvumo matrica yra pateikta 2.32 ir 2.33 paveikslų laiko skalės atžvilgiu) veikiant $12,75 \mu\text{s}$ trukmės aukštos įtampos impulsu

Fig. 2.36. Laser radiation intensity distribution in Pockels cell with DKDP crystal at different moments of time (time moments presented below each picture are related to the timing of oscillations in Fig. 2.32 and Fig. 2.33) when high voltage pulse duration is $12.75 \mu\text{s}$

Tyrimo rezultatuose, pateiktuose 2.36 paveiksle, matome, kad intensyvumo pasiskirstymas Pokelso narvelio kristale ir kitimas laike yra mišrus 2.34 ir 2.35 paveiksluose pavaizduotų intensyvumo pasiskirstymų derinys. Iš šio poskyrio tyrimo rezultatų matyti, kad didžiausią įtaką Pokelso narvelio optiniam kontrastui turi akustinės bangos, kurios sklinda xz plokštumoje statmenai elektriniam laukui. Lygiagrečiai elektriniam laukui sklindančios akustinės bangos neturi didelės įtakos optiniam kontrastui. Intensyvumo svyravimai sukelti šia kryptimi sklindančių akustinių bangų, kurių periodas $39 \mu\text{s}$, parodyti

2.29 paveiksle. Šios moduliacijos įtaka intensyvumui yra maža lyginant su kitomis dažnių dedamosiomis, todėl jos nesimato diskrečiosios Furjė transformacijos rezultate (2.30 paveikslas).

Gauti Pokelso narvelio su DKDP kristalu tyrimai parodė, kad jis pasižymi intensyviais pjezoelektriniais virpesiais, kurie mažina narvelio optinį kontrastą. Todėl aktualu sukurti aktyvųjį pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodą Pokelso narveliams su šiuo kristalu. Taip pat aktualu sukurti aukštos įtampos impulsų generatorių, leidžiantį realizuoti aktyvųjį pjezoelektrinių virpesių slopinimą.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

1. Pasiūlytas Pokelso narvelių optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų dažnio ir trukmės tyrimo metodas leidžia aptikti pjezoelektrinių virpesių sąlygojamas mažo optinio kontrasto zonas, apimančias impulsų dažnius nuo 1 kHz iki 1 MHz ir impulsų trukmes nuo 130 ns iki 5 μ s.
2. Pokelso narvelių su beta bario borato kristalu optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų dažnio ir trukmės tyrimai parodė, kad pasirinkus tinkamos trukmės impulsą galima pagerinti optinį kontrastą iki 3 kartų.
3. Pasyviojo pjezoelektrinių virpesių slopinimo taikymas Pokelso narveliuose su beta bario borato kristalu leidžia padidinti optinį kontrastą iki 10 kartų, kai aukštos įtampos impulsų dažnis keičiamas nuo 1 kHz iki 1 MHz, o impulsų trukmė keičiama nuo 130 ns iki 5 μ s.
4. Dėl intensyvių pjezoelektrinių virpesių Pokelso narveliuose su kalio dideuterio fosfato kristalu aktualu sukurti jiems skirtą aktyvųjį pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodą ir tam pritaikytą aukštos įtampos impulsų generatorių.

Aktyvusis Pokelso narvelių pjezoelektrinių virpesių slopinimas ir tam skirtas aukštos įtampos impulsų generatoriaus kūrimas

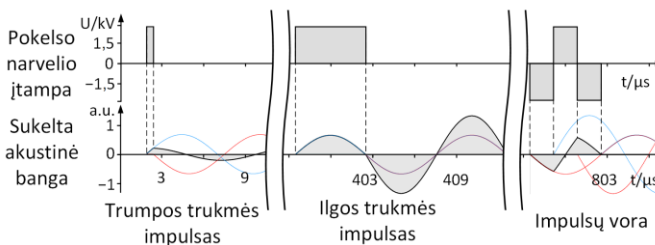
Šiame skyriuje pristatomas, autoriaus pasiūlytas, aktyvusis pjezoelektrinių virpesių Pokelso narveliuose slopinimo metodas ir jo realizavimui skirtas aukštos įtampos impulsų generatorius. Taip pat pristatomi gauti aktyviojo slopinimo modeliavimo ir eksperimentinio tyrimo rezultatai. Gauti rezultatai paskelbti vienoje publikacijoje (Sinkevicius ir kt. 2021). Šiame skyriuje pateikti rezultatai buvo pristatyti keturiose konferencijose, iš kurių trys respublikinės ir viena tarptautinė konferencija.

3.1. Pokelso narvelio su kalio dideuterio fosfato kristalu pjezoelektrinių virpesių aktyvusis slopinimo metodas

Tyrimai pateikti antrajame skyriuje parodė, kad Pokelso narveliuose su BBO kristalu pakankamam pjezoelektrinių virpesių slopinimui galima naudoti pasyvųjį virpesių slopinimo metodą. Tačiau Pokelso narveliai su DKDP kristalais pasižymi labai stipriais pjezoelektriniais virpesiais, todėl narveliams su šiais kristalais būtina sukurti efektyvesnį pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodą.

3.1.1. Pjezoelektrinių virpesių aktyvusis slopinimo principas

Pokelso narveliuose aukštos įtampos impulsų frontai sukelia pjezoelektrinius virpesius. Impulso priekinis ir galinis frontai sukelia virpesius, kurie sąlygoja priešingos fazės akustines bangas Pokelso narvelyje. Sukeltų akustinių bangų atvejai (3.1 paveikslas) kai į Pokelso narvelį tiekiamas trumpas ir ilgas teigiamo poliariškumo impulsai ir atvejis kai vietoje ilgo impulso tiekiami trumpi teigiamo ir neigiamo poliariškumo impulsai (tiekiamas impulsų vora). Pastaruoju atveju, parinkus tinkamai impulsų trukmes, galima pasiekti, kad impulsų voros frontų sukeltos akustinės bangos viena kitą slopina. Tokį slopinimo metodą vadinsime aktyviuoju pjezoelektrinių virpesių slopinimu. Šį slopinimo efektą galima pastebėti naudojant sukurtą pjezoelektrinių virpesių slopinimo sąlygų modelį „LabVIEW“ aplinkoje.



3.1 pav. Aukštos įtampos impulsai Pokelso narvelio valdymui ir jų sukeltos akustinės bangos narvelyje. Akustinė banga sukurta aukštos įtampos impulso priekinio ir galinio fronto pažymėta atitinkamai mėlyna ir raudona spalva. Suminis akstinių bangų rezultatas pateiktas pilka spalva

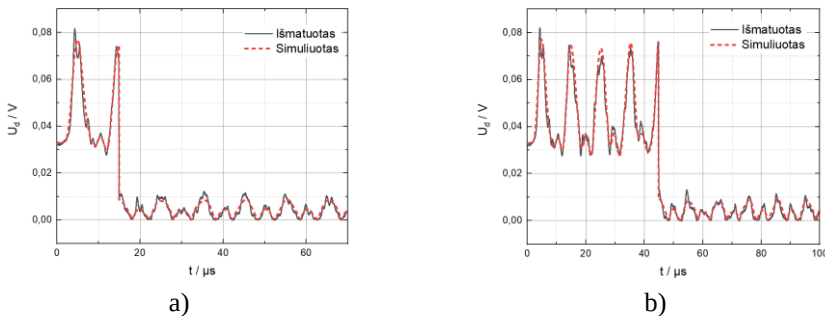
Fig. 3.1. High voltage pulses for Pockels cell control and acoustic waves introduced by these pulses. Acoustic wave caused by the rising edge of the high voltage pulse is marked in blue, caused by the falling edge – in red and resulting wave in grey

Antrajame skyriuje atlikti Pokelso narvelių su DKDP kristalu tyrimai rodo, kad aukštos įtampos fronto metu sužadinti pjezoelektriniai virpesiai sąlygoja

optinio atsako pulsacijas, kurių spektras apima platų dažnių ruožą (2.29 ir 2.30 paveikslai). Todėl aktyvaus slopinimo sąlygų atradimas yra sudėtingas uždavinys, kurio siekis yra nuslopinti kuo daugiau pjezoelektrinių virpesių sukeltų optinio atsako pulsacijų spektro dedamųjų. Buvo sukurtas pjezoelektrinių virpesių modelis „LabVIEW“ aplinkoje, kuriuo remiantis buvo atlikta slopinimo sąlygų paieška. Pjezoelektrinių virpesių sukeltų optinio atsako pulsacijų spektro dedamąsias, pateiktas 2.30 paveiksle, galima aprašyti eksponentiškai slopstančio sinuso funkcija:

$$y(t) = A \times e^{-\lambda t} \times \cos(\omega t + \varphi), \quad (3.1)$$

čia $y(t)$ – amplitudė laiko momentu t , A – pradinė signalo amplitudė, λ – slopinimo koeficientas, φ – fazės kampas laiko momentu $t = 0$, $\omega = 2\pi f$ – kampinis dažnis. Optinio atsako spektro dedamąsias modeliuojančių sinuso funkcijų pradinės fazės kampas, amplitudė, virpesio slopinimo sparta ir kampinis dažnis buvo parinkti taip, kad suminis šių signalų spektras atitiktų 2.30 paveiksle pateiktą spektrą. Aukštos įtampos impulso priekinio ir galinio fronto sukeltų optinio atsako pulsacijų, aprašytų naudojant tris spektro dedamąsias kartu su stačiakampio formos signalo funkcija, kuri modeliuoja prie Pokelso narvelio pridėtos įtampos atsaką, pateiktos 3.2 paveiksle. Įtampos impulso priekinio fronto metu gaunamam optiniam atsakui modeliuoti naudojamos spektro dedamosios, kurių dažnis ir fazė: 100 kHz, 90°; 200 kHz, 270°; 325 kHz, 90°. Galinio fronto metu gaunamam optiniam atsakui modeliuoti naudojamos šios spektro dedamosios, kurių parametrai: 100 kHz, 270°; 200 kHz, 90°; 325 kHz, 270°.

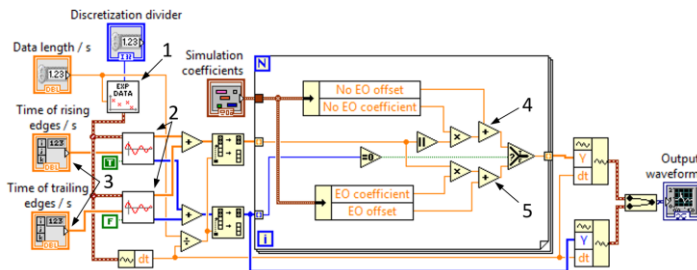


3.2 pav. Išmatuotas ir modeliuotas optinis atsakas kai aukštos įtampos impulso trukmė: a) 15 μs; b) 45 μs

Fig. 3.2. Measured and simulated optical response when the high voltage pulse duration is: a) 15 μs; b) 45 μs

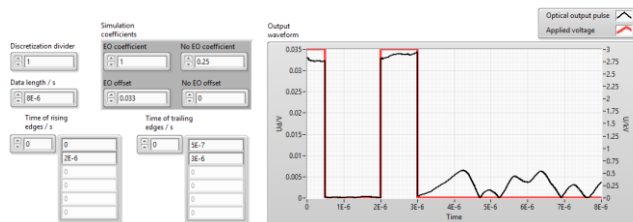
Pastebėta, kad suminė šių signalų įtaka optiniam atsakui yra didesnė kai Pokelso narvelis yra veikiamas elektriniu lauku. Dėl šios priežasties modelyje yra įvedama papildoma konstanta Pokelso reiškiniui įvertinti, o rezultato vertės yra absoliutinamos.

Rezultatuose pateiktuose 3.2 paveiksle matyti, kad pasiūlyto modelio rezultatas gerai sutampa su išmatuotu Pokelso narvelio su DKDP kristalu optiniu atsaku, net tuomet kada naudojamos tik trys spektro dedamosios. Dėl plataus optinio atsako pulsacijų, sąlygojamų pjezoelektrinių virpesių, spektro (2.30 paveikslas) sudėtinga tinkamai parinkti aukštesnio dažnio dedamųjų slopstančio sinuso parametrus, todėl nuspręsta modelyje tiesiogiai taikyti užregistruotą optinį atsaką (2.29 paveikslas). Papildytas modelis įgyvendintas „LabVIEW“ aplinkoje pateiktas 3.3 ir 3.4 paveiksluose.



3.3 pav. Sukurto modelio „LabVIEW“ aplinkoje blokinė schema

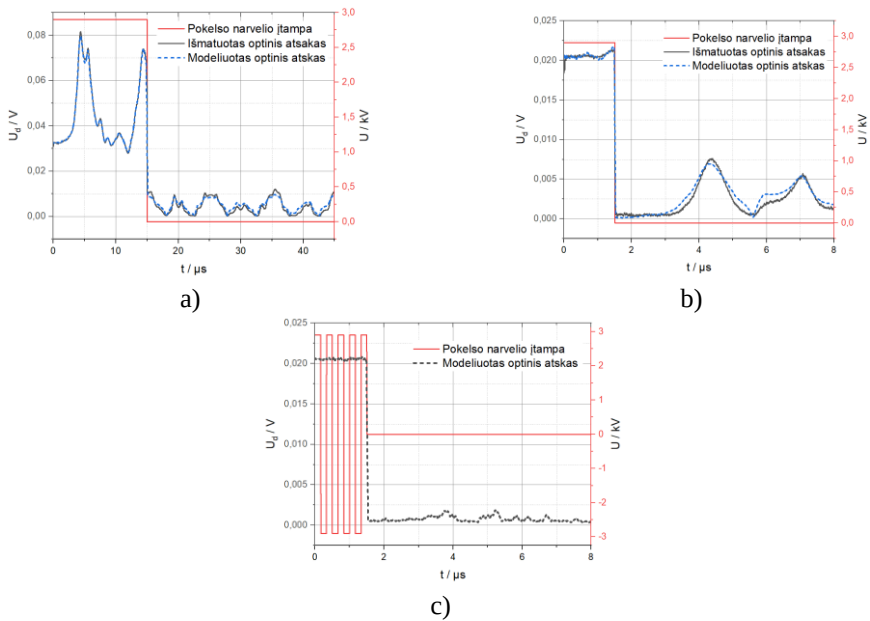
Fig. 3.3. Block diagram of developed model in “LabVIEW” environment



3.4 pav. Sukurto modelio „LabVIEW“ aplinkoje programos langas

Fig. 3.4. Front panel of developed model in “LabVIEW” environment

Iš sukurto modelio „LabVIEW“ aplinkoje blokinės diagramos, pateiktos 3.3 paveiksle, matyti, kad užregistruoto optinio atsako blokas (1) diskretizuoto signalo duomenis perduoda į priekinio ir galinio fronto generuojamų signalų blokus (2). Šiuose blokuose generuojami optinio atsako signalai, kurių kiekis ir pradinis vėlinimas yra nulemtas masvyvo duomenų (3), o suminis šių signalų rezultatas kartu su aukštos įtampos verte pateikiami šio bloko išėjime. Priekinio ir galinio fronto generuojami signalai sumuojami, o gautas rezultatas perduodamas į ciklą, kuriame parenkami koeficientai apsprendžiantys optinio atsako amplitudę. Šie koeficientai, kai Pokelso narvelis nėra veikiamas (4) ir yra veikiamas (5) aukštos įtampos impulsu, skiriasi. Parinktos koeficientų vertės ir modeliavimo rezultato oscilograma pateikti 3.4 paveiksle. Gauti modeliavimo rezultatai pateikti 3.5 paveiksle.



3.5 pav. Išmatuotas ir modeliuotas optinis atsakas kai aukštos įtampos impulso trukmė: a) 15 μs ; b) 1,5 μs ; c) 1,5 μs sudaryta iš 9 trumpesnės trukmės impulsų

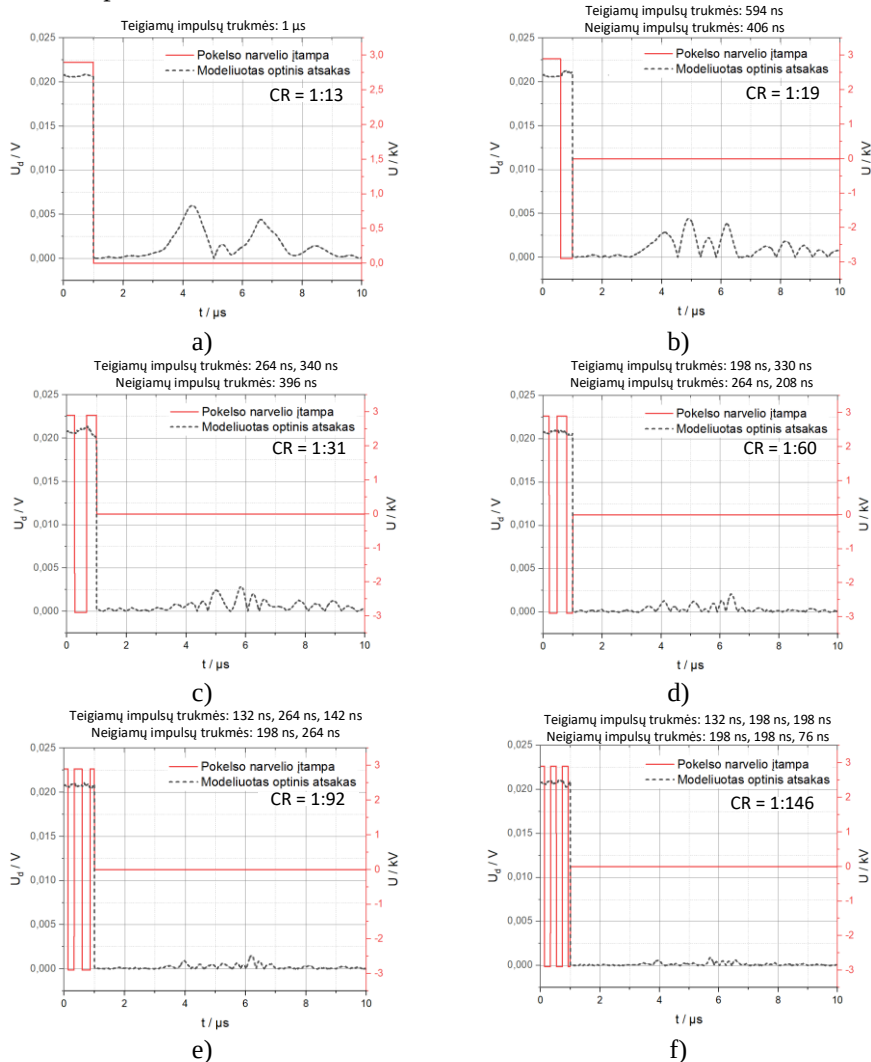
Fig. 3.5. Measured and simulated optical response when the high voltage pulse duration is: a) 15 μs ; b) 1.5 μs ; c) 1.5 μs consists of 9 shorter duration pulses

Iš rezultatų pateiktų 3.5 paveiksle matyti, kad sukurtas modelis tiksliai atkartoja išmatuotą optinį atsaką. Modeliavimo atvejis, kai Pokelso narvelio valdymui vietoje vieno ištisinio impulso naudojama trumpų impulsų vora, t. y. taikomas pasiūlytas aktyvusis pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodas, pateiktas 3.5c paveiksle. Jo realizavimui, vietoje vieno 1,5 μs trukmės impulso panaudota devynių 166 ns trukmės impulsų vora. Gauti modeliavimo rezultatai rodo, kad panaudojus siūlomą aktyvųjį pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodą, žymiai sumažėjo optinio atsako pulsacijos.

3.1.2. Pjezoelektrinių virpesių aktyviojo slopinimo tyrimas modeliuojant

Efektyvus aktyvusis pjezoelektrinių virpesių slopinimas gali būti pasiekiamas parinkus tinkamą vorą sudarančių impulsų kiekį ir trukmę. Tam tikslui buvo sukurtas algoritmas, naudojant „LabVIEW“ programinę įrangą, kuris generuoja impulsų, sudarančių vorą, kombinacijas ir jas siunčia į sukurtą optinio atsako modelį. Naudojant sukurtą modelį gaunami optinio atsako standartiniai

nuokryptai, pagal kuriuos sprendžiama apie pjezoelektrinių virpesių slopinimo efektyvumą naudojant tą kombinaciją. Sąlygos, kai buvo gauti mažiausi standartiniai nuokryptai, veikiant skirtingo kiekio aukštos įtampos impulsų vora, pateikti 3.6 paveiksle.



3.6 pav. Modeliuotas Pokelso narvelio su DKDP kristalu optinis atsakas:

a) vieno aukštos įtampos impulso; taikant pjezoelektrinių virpesių aktyvųjį slopinimą b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; f) 6 aukštos įtampos impulsų voromis

Fig. 3.6. Simulated optical response of a Pockels cell with a DKDP crystal by a) one high voltage pulse; using active suppression of piezoelectric ringing by burst of b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; f) 6 high voltage pulses

Rezultatuose, pateiktuose 3.6 paveiksle, matyti, kad optinio atsako pulsacijų amplitudė mažėja padidinus impulsų kiekį voroje. Taip pat matyti, kad mažesnę optinio atsako pulsacijų amplitudę galima pasiekti naudojant voroje skirtingos trukmės aukštos įtampos impulsus. Taip yra dėl, to kad fronto metu sukeliama plataus spektro virpesiai (2.30 paveikslas) kurių aukštesnių dažnių dedamosios efektyviau slopinamos naudojant trumpesnį aukštos įtampos impulsą. Modeliavimo rezultatai rodo, kad Pokelso narvelį su DKDP kristalu veikiant aukštos įtampos impulsų vora matomas iki 11,2 karto optinio kontrasto padidėjimas (3.6f paveikslas), lyginant su atveju kai narvelis veikiamas vieno ištinio impulso (3.6a paveikslas).

Siekiant patvirtinti aktyviojo pjezoelektrinių virpesių slopinimo Pokelso narvelyje su DKDP kristalu rezultatus, gautus modeliuojant, būtina sukurti, eksperimentiniams tyrimams atlikti, aukštos įtampos impulsų generatorių, kuris leistų formuoti labai trumpų, teigiamo ir neigiamo poliškumo, impulsų voras.

3.2. Aukštos įtampos impulsų generatorius Pokelso narvelių valdymui su aktyviuoju pjezoelektrinių virpesių slopinimu

Aukštos įtampos impulsų generatorius yra galios elektronikos įtaisas, skirtas suformuoti aukštos įtampos impulsus, skirtus elektriniam laukui sukurti Pokelso narvelyje. Aukštos įtampos impulsų generatorius, kuriame įgyvendintas aktyvusis pjezoelektrinių virpesių slopinimas, remiantis 3.6 paveikslu modeliavimo rezultatais, turi gebėti formuoti teigiamo ir neigiamo polių impulsų vorą kurią sudarančių impulsų mažiausia trukmė yra 60 ns. Įtampos impulso amplitudė turi siekti 2,8 kV, impulso frontų trukmė turi būti ne ilgesnė kaip 10 ns.

3.2.1. Pokelso narvelio kaip talpuminės apkrovos impulsų generatoriui analizė

Kuriant aukštos įtampos impulsų generatorių svarbu žinoti jo apkrovos parametrus. Pokelso narveliai sudaryti iš dielektrinės medžiagos, prie kurios šonų pritvirtinti elektrodai (1.1 paveikslas). Pokelso narvelio kristalo talpa apskaičiuojama:

$$C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \frac{A}{d}, \quad (3.2)$$

čia ε – santykinė dielektrinė skvarba, ε_0 – vakuumo dielektrinė skvarba, A – elektrodų plotas, d – atstumas tarp elektrodų. Pokelso narvelio užkraunamo arba nukraunamo krūvio kiekis:

$$Q = CU, \quad (3.3)$$

čia U – Pokelso narvelio įtampa. Pokelso narvelių talpa vyrauja nuo 2 iki 12 pF, valdymo įtampa nuo 1 iki 10 kV. Pavyzdžiui skersinio tipo Pokelso narvelio su BBO kristalu, kurio matmenys $4 \times 4 \times 20$ mm, talpa, remiantis gamintojų duomenimis, yra mažesnė nei 3 pF. Pagal literatūroje pateiktą dielektrinę skvarbą, teoriškai apskaičiuota šio kristalo talpa – 1,12 pF (Raja ir kt. 1993). Išilginio tipo Pokelso narvelio su DKDP kristalu, kurio matmenys $\emptyset 12 \times 24$ mm, talpa, remiantis gamintojų duomenimis, yra mažesnė nei 6 pF, o teoriškai apskaičiuota – 2,71 pF. Talpų skirtumas tarp teoriškai apskaičiuotos ir gamintojų pateiktos atsiranda dėl kristalo tvirtinimo mazgų parazitinės talpos.

Teoriškai apskaičiuota skersinio Pokelso narvelio su BBO kristalu pusės bangos įtampa (1.13) yra 8,7 kV, jeigu kristalo matmenys $4 \times 4 \times 20$ mm ir lazerio spindulio bangos ilgis 1064 nm (Tamošauskas ir kt. 2018; Roth ir kt. 2005). Norint sumažinti pusės bangos įtampą optiškai išstatomi du tokių pačių matmenų kristalai ir taip pusės bangos įtampa sumažinama dvigubai (šiuo atveju iki 4,35 kV). Pokelso narvelių gamintojų pateikiama pusės bangos įtampa <4,6 kV.

Teoriškai apskaičiuota išilginio Pokelso narvelio su DKDP kristalu pusės bangos įtampa (1.12) yra 6,37 kV jeigu kristalo matmenys $\emptyset 12 \times 24$ mm ir spindulio bangos ilgis 1064 nm (Zernike 1964; Roth ir kt. 2005). Atstumas tarp elektrodų šiuo atveju yra 24 mm, todėl nėra būtinybės naudoti antrą kristalą įtampos mažinimui. Pokelso narvelių gamintojų pateikiama pusės bangos įtampa yra <6,8 kV.

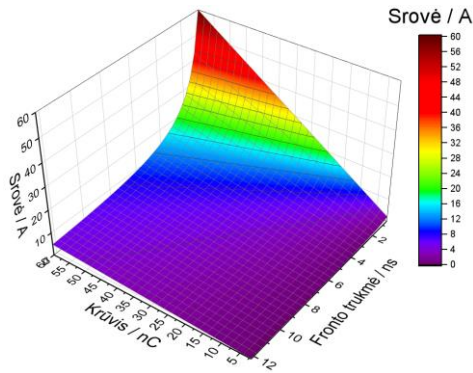
Elektrooptiniai koeficientai pateikti literatūroje (Roth ir kt. 2005) yra mažesni, lyginant su kristalų augintojų pateikiamais. Šie nesutapimai gali būti dėl kristalų auginimo technologijų skirtumų.

Krūvio kiekis reikalingas užkrauti Pokelso narvelius apskaičiuojamas (3.3). Skersinio Pokelso narvelio su dvigubu BBO kristalu, kurio matmenys $4 \times 4 \times 20$ mm, teorinis krūvis 10,3 nC. Pagal gamintojų pateikiamus parametrus 27,6 nC. Pokelso narvelio su DKDP kristalu, kurio matmenys $\emptyset 12 \times 24$ mm, teorinis krūvis 17,3 nC. Pagal gamintojų pateikiamus parametrus 40,8 nC. Žinant Pokelso narvelio kristalo krūvio kiekį ir numatant aukštos įtampos impulso fronto trukmę galime apskaičiuoti srovę:

$$I = \frac{dQ}{dt}, \quad (3.4)$$

čia Q – Pokelso narvelio kristalo krūvio pokytis. Naudojantis (3.4) apskaičiuota maksimali impulsų generatoriaus raktų srovė kai aukštos įtampos impulsų generatoriaus frontų trukmė svyruoja nuo 1 iki 12 ns, o Pokelso narvelio krūvis keičiasi nuo 2 nC iki 60 nC. Srovės priklausomybės nuo krūvio ir fronto trukmės

charakteristika pateikta 3.7 paveiksle. Remiantis šia charakteristika matyti, kad aukštos įtampos impulsų generatoriaus galinė pakopa gebanti išduoti 4 A maksimalią srovę padengtų iki pusės, o 8 A srovę – didžiąją dalį nagrinėtų atvejų.

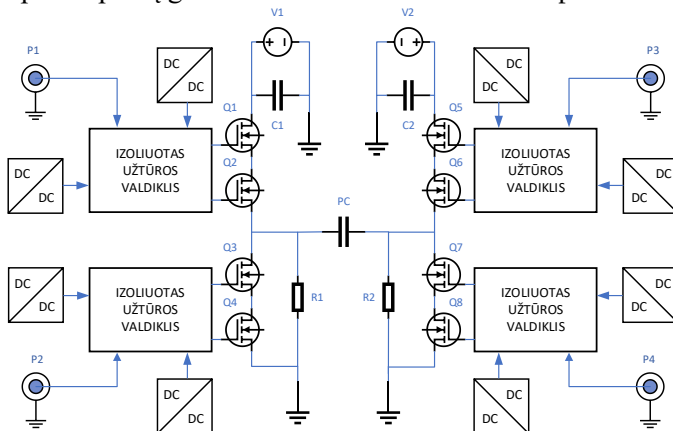


3.7 pav. Maksimalios srovės priklausomybė nuo aukštos įtampos impulso fronto trukmės ir krūvio kiekio

Fig. 3.7. The dependence of the peak current on rising/falling edge duration of the high voltage pulse and the amount of charge

3.2.2. Aukštos įtampos impulsų generatoriaus Pokelso narvelių valdymui kūrimas

Aukštos įtampos impulsų generatoriaus struktūrinė schema pateikta 3.8 paveiksle.



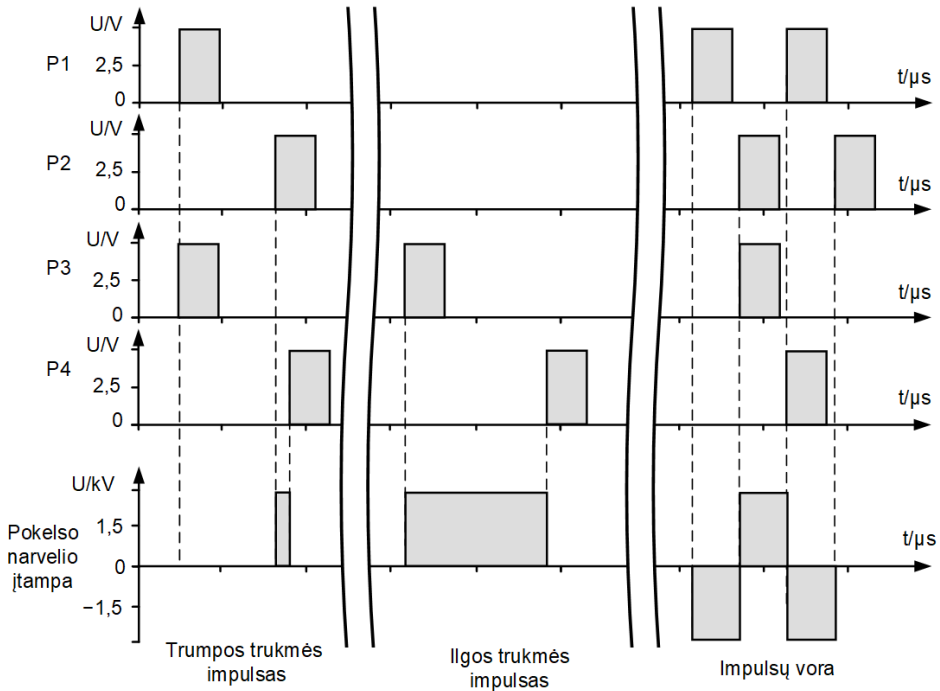
3.8 pav. Aukštos įtampos impulsų generatoriaus struktūrinė schema

Fig. 3.8. Block diagram of the high voltage pulse generator

Aukštos įtampos impulsų generatorius sukurtas naudojant pilno tiltelio (angl. *full-bridge*) topologiją. Pilno tiltelio raktams naudojami nuosekliai sujungti silicio karbido (SiC) MOSFET tranzistoriai Q1–Q8 (3.8 paveikslas.). Šie tranzistoriai, lyginant su Si MOSFET tranzistoriais, dėl mažesnių lusto matmenų, pasižymi mažesnėmis parazitinėmis talpomis, todėl leidžia pasiekti didesnių dV/dt ir dI/dt verčių. Dėl šios priežasties impulsų generatorius su SiC MOSFET pasižymi geresnėmis dinaminėmis charakteristikomis, kas leidžia generuoti trumpesnius aukštos įtampos impulsus su statesniais frontais. Be to, SiC MOSFET tranzistoriai pasižymi aukštesne pramušimo įtampa ir mažesne atviro tranzistoriaus varža, lyginant su Si MOSFET. Kiekvieną pilno tiltelio raktą sudaro du nuosekliai sujungti tranzistoriai. Generatoriuje naudojamų SiC MOSFET tranzistorių pramušimo įtampa 1,7 kV, todėl kiekvienam raktui naudojant 2 nuosekliai sujungtus tranzistorius, generuojamų įtampos impulsų amplitudė gali siekti 3,4 kV. Tačiau atsižvelgus į apkrovos parazitinių induktyvumą kuris sukels viršįtampius maksimali saugų tranzistorių darbą garantuojanti įtampa – 2,9 kV. Pilno tiltelio tranzistorių aukštos įtampos grandinių galvaniniam atšimui nuo valdančios elektronikos naudojami izoliuoti tranzistorių užtūros valdikliai (angl. *isolated gate driver*), kurie gali galvaniškai atskirti grandines jei potencialų skirtumas tarp jų neviršija 7,5 kV. Tranzistorių užtūrų valdikliai maitinami izoliuojančiais DC-DC keitikliais, kurių pramušimo įtampa tarp pirminės ir antrinės grandinių ne mažesnė kaip 6,4 kV. Šių komponentų taikymas leidžia sumažinti spausdintinės plokštės dydį, dėl ko mažėja ir MOSFET tranzistorių užtūros grandinių induktyvumas. Tai svarbu nes, į tranzistoriaus užtūrą, siekiant gauti didelę momentinę Pokelso talpos pakrovimo srovę, paduodama įtampa, kurios vertė yra arti ribinės. Šiuo atveju tranzistoriai dirba kieto perjungimo (angl. *hard-switching*) režimu, todėl reikia mažinti užtūros grandinės induktyvumą, siekiant išvengti viršįtampių. Renkantis izoliuotus DC-DC keitiklius ir užtūros valdiklius, pasirinkti komponentai su mažomis vidinėmis talpomis.

Kiekvienas aukštos įtampos impulsų generatoriaus pilno tiltelio petys (pusė tiltelio) maitinamas atskiru aukštos įtampos maitinimo šaltiniu V1 ir V2. Kiekvieno izoliuoto užtūros valdiklio įėjimo ir išėjimo grandinė maitinama atskiru izoliuotu DC-DC keitikliu. Varžos R1 ir R2 skirtos lėtam krūvio iškrovimui iš Pokelso narvelio, jeigu valdymo impulsai nėra paduodami į aukštos įtampos impulsų generatorių.

Aukštos įtampos impulsų generatorius valdomas į užtūros valdiklių P1–P4 įėjimus paduodamais signalais. Tiekiamų į užtūros valdiklius signalų ir generuojamų aukštos įtampos impulsų epiūros pateiktos 3.9 paveiksle.

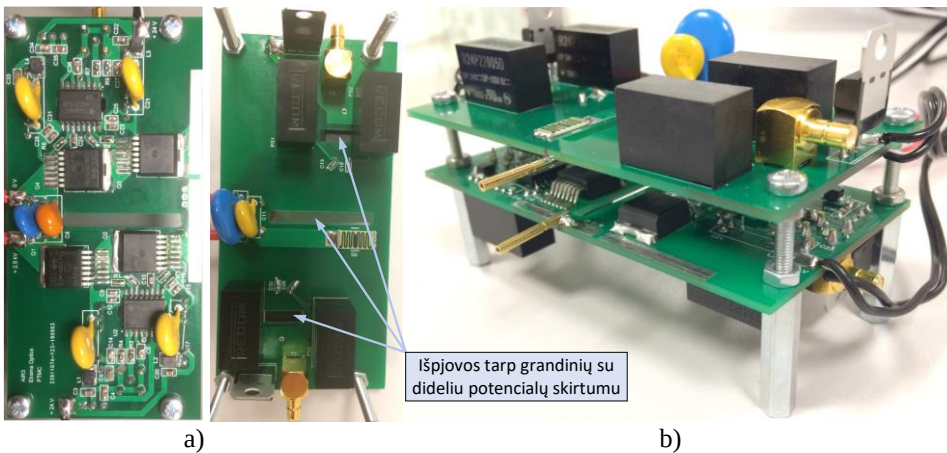


3.9 pav. Aukštos įtampos impulsų generatoriaus raktų valdymo signalų ir generatoriaus išėjimo impulsų laikinės diagramos

Fig. 3.9. Timing diagrams of pulse generator control signals and output voltage pulses

Impulsų generatoriaus tiekiami aukštos įtampos impulsai Pokelso narvelyje sukuria elektrinį lauką, kurio stiprį apsprendžia V1 ir V2 šaltinių įtampa. Norint išvengti būsenos, kai atviri visi pusės tiltelio raktų tranzistoriai, turi būti pavėlintas raktų tranzistorius atidarantis valdymo impulsas. Eksperimentiškai nustatyta, kad saugų darbą užtikrina 45 ns raktų atidarancio valdančio impulso vėlinimas. Šis vėlinimas apsprendžia impulso, kurį generuoja pusė tiltelio, minimalią trukmę. Naudojant pilną tiltelį galima suformuoti trumpesnius aukštos įtampos impulsus Pokelso narveliu.

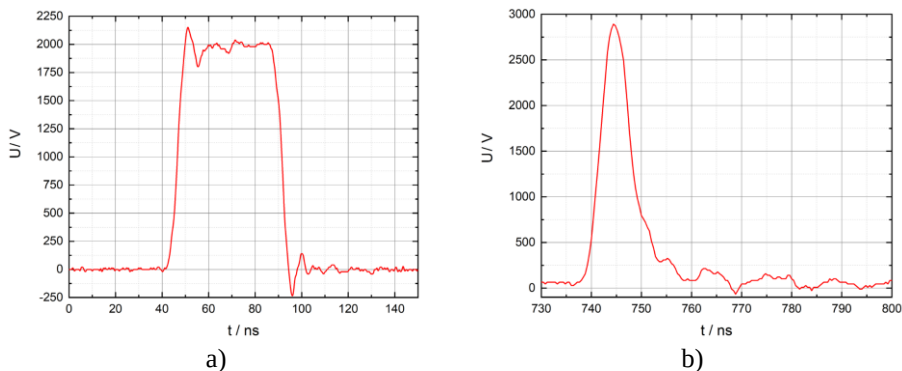
Sukurtas ir pagamintas aukštos įtampos impulsų generatorius pateiktas 3.10 paveiksle. Jo spausdintinėje plokštėje, siekiant išvengti paviršinių srovių, tarp grandinių su dideliu potencialų skirtumu padarytos išpjovos. Išpjovos taip pat padarytos ir po izoliuotais užtūros valdikliais.



3.10 pav. Sukurto aukštos įtampos impulsų generatoriaus nuotraukos: a) vieno peties viršus ir apačia; b) pilnas aukštos įtampos generatorius
Fig. 3.10. Photo of developed high voltage pulse generator: a) top and bottom of one arm; b) the whole high voltage pulse generator

3.2.3. Aukštos įtampos impulsų generatoriaus išėjimo impulso parametrai

Sukurto aukštos įtampos impulsų generatoriaus suformuoti trumpiausi galimi aukštos įtampos impulsai pateikti 3.11 paveiksle.

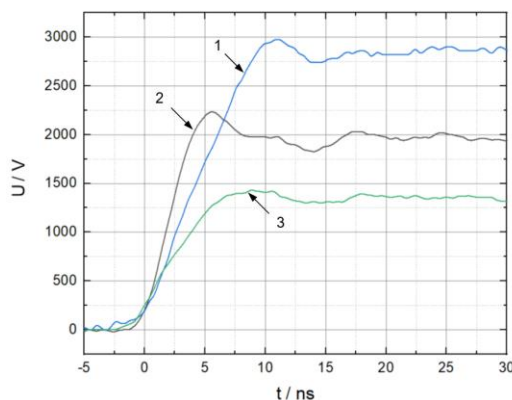


3.11 pav. Trumpiausi galimi aukštos įtampos impulsai: a) impulsas suformuotas naudojant pusę tiltelio; b) impulsas suformuotas naudojant pilną tiltelį

Fig. 3.11. Shortest possible pulse generated: a) by one of the arms; b) by whole high voltage pulse generator

Trumpiausia aukštos įtampos impulsų generatoriaus pusės tiltelio suformuoto aukštos įtampos impulso trukmė yra 45 ns ir ji pateikta 3.11a paveiksle. Naudojant pilną tiltelį suformuoto impulso minimali galima trukmė yra 12 ns. Iš oscilogramos, pateiktos 3.11b paveiksle, matyti, kad suformuoto aukštos įtampos impulso priekinis frontas yra statesnis nei galinis frontas. Taip nutinka dėl viršįtampių, susiformavusių po aukštos įtampos impulso priekinio fronto, įtakos galiniam frontui.

Siekiant gauti minimalią aukštos įtampos impulsų frontų trukmę, buvo pasirinkti du SiC MOSFET tranzistorių tipai su geriausiais dinaminiais parametrais. Gauti priekiniai impulsų frontai naudojant šiuos tranzistorius pateikti 3.12 paveiksle. Ten pat pateiktas ir komerciškai prieinamo (su kuriuo atlikti antro skyriaus tyrimai) aukštos įtampos impulsų generatoriaus priekinis frontas.

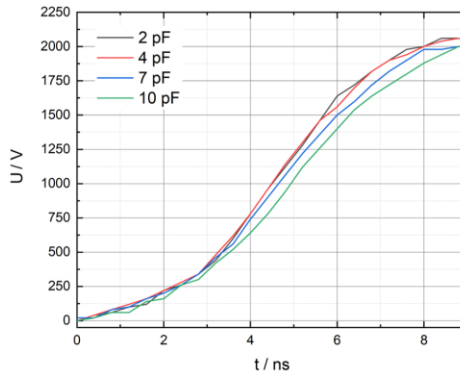


3.12 pav. Sukurto su 1-o (1 kreivė) ir 2-o (2 kreivė) tipo tranzistoriais ir komercinio (3 kreivė) aukštos įtampos generatorių impulsų priekiniai frontai

Fig. 3.12. Rising edges of pulse generated by developed high voltage pulse generator using 1st (1 curve) and 2nd (2 curve) type transistors and using commercial generator (3 curve)

Sukurto aukštos įtampos impulsų generatoriaus su SiC MOSFET 1-o ir 2-o tipo tranzistoriais maksimali generuojamo impulso amplitudė 2,9 kV ir 1,9 kV, komercinio – 1,4 kV, o fronto trukmės, atitinkamai 7,6 ns, 3,4 ns ir 5,8 ns (3.12 paveikslas). Apskaičiavus gauname, atitinkamai šias generuojamų impulsų priekinio fronto įtampos augimo spartas 382 V/ns, 558 V/ns ir 241 V/ns. Tyrimo metu aukštos įtampos impulsų generatoriaus apkrova buvo 6 pF talpos Pokelso narvelis.

Sukurtas aukštos įtampos impulsų generatorius skirtas skirtingų talpų Pokelso narvelių valdymui. Atlikto aukštos įtampos impulso priekinio fronto priklausomybės nuo apkrovos talpos tyrimo rezultatai pateikti 3.13 paveiksle.



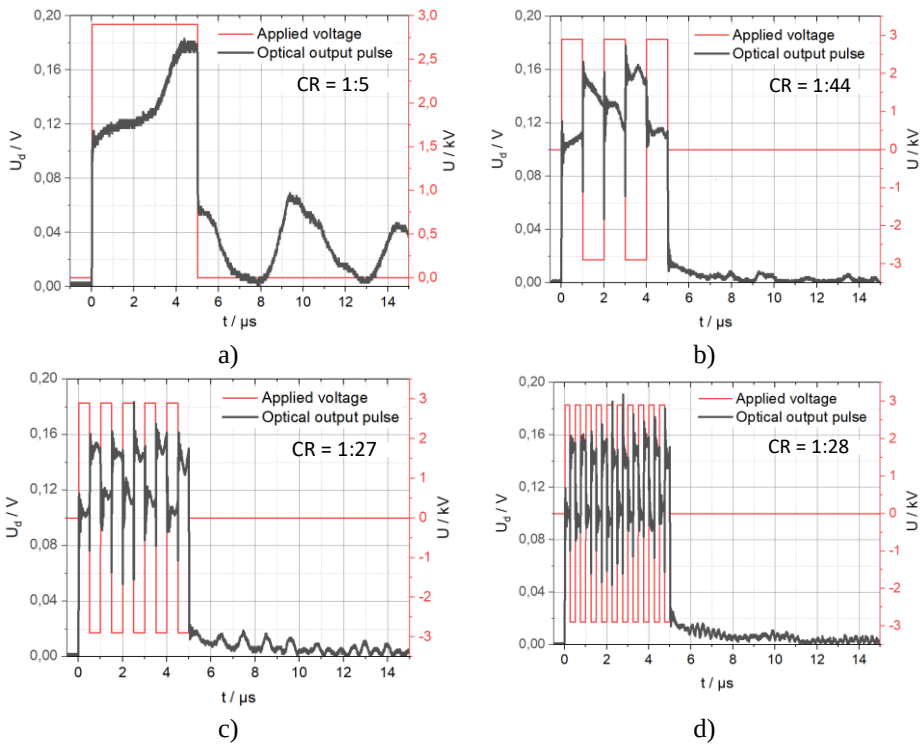
3.13 pav. Aukštos įtampos impulsų generatoriaus priekinis frontas prie įvairių Pokelso narvelio kristalo talpų
Fig. 3.13. Rising edge of high voltage generator pulse at different capacity of a Pockels cell

Iš tyrimo rezultatų pateiktų 3.13 paveiksle matyti, kad aukštos įtampos impulso priekinio fronto trukmė priklauso nežymiai nuo Pokelso narvelio kristalo talpos, nes SiC MOSFET tranzistorių vidinė varža, kuri apsprendžia Pokelso narvelio talpos pakrovimo srovę, yra maža.

Sukurtas aukštos įtampos impulsų generatorius, dėl pritaikytos pilno tiltelio topologijos, gali generuoti teigiamo ir neigiamo polių impulsų voras. Jis yra tinkamas sukurtam aktyviajam Pokelso narvelių su DKDP kristalu pjezoelektrinių virpesių slopinimui.

3.3. Pokelso narvelio pjezoelektrinių virpesių aktyviojo slopinimo eksperimentinis tyrimas

Tyrimų, aprašytų šiame poskyryje, tikslas, naudojant sukurtą aukštos įtampos impulsų generatorių, eksperimentiškai ištirti aktyvųjų pjezoelektrinių virpesių slopinimą Pokelso narveliuose su DKDP kristalu. Eksperimentiškai buvo tiriamas Pokelso narvelis, kurio kristalo matmenys $\varnothing 12 \times 24$ mm. Jis buvo valdomas naudojant 5 μ s trukmės aukštos įtampos impulsų vorą, su įvairiu impulsų kiekiu voroje, kurių amplitudė 2,9 kV. Gautos optinio atsako oscilogramos pateiktos 3.14 paveiksle.



3.14 pav. Pokelso narvelio su DKDP kristalu optinis atsakas:

a) netaikant aktyviojo pjezoelektrinių virpesių slopinimo; taikant aktyvųjį pjezoelektrinių virpesių slopinimą kai vorą sudarančių impulsų trukmė b) 1 μ s; c) 0,5 μ s; d) 0,25 μ s

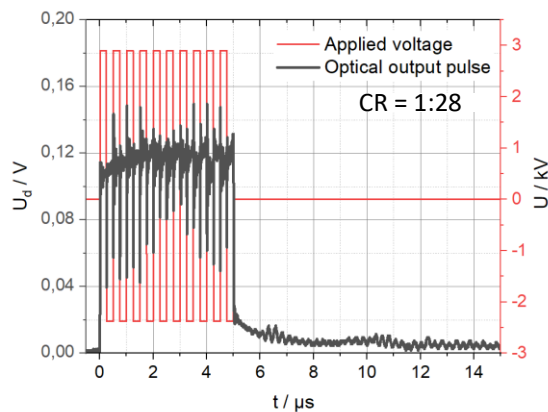
Fig. 3.14. Optical response of DKDP Pockels cell: a) with no active piezoelectric ringing suppression; with active piezoelectric ringing suppression using burst of b) 1 μ s; c) 0.5 μ s; d) 0.25 μ s duration pulses

Iš tyrimo rezultatų, pateiktų 3.14a paveiksle matyti, kad Pokelso narvelį paveikus 5 μ s trukmės ištisiniu aukštos įtampos impulsu, t. y. kai nenaudojamas aktyvusis virpesių slopinimas, gaunami dideli optinio atsako svyravimai. Šie svyravimai, atsirandantys po impulso galinio fronto, siekia iki 30 % maksimalios optinio atsako vertės. Tai rodo, kad pasireiškia stiprūs pjezoelektriniai virpesiai, kurie iškraipo Pokelso narvelio optinį atsaką.

Rezultatai, gauti atvejams kai Pokelso narvelis valdomas, naudojant vietoje ištisinio impulso, trumpų impulsų vorą su įvairiu impulsų kiekiu voroje, t. y. kai taikomas pasiūlytas aktyvusis virpesių slopinimo metodas, pateikti 3.14b–d paveiksluose. Matome, kad optinio atsako svyravimų amplitudė po aukštos įtampos impulso, lyginant su atveju kai aktyvusis slopinimas nėra naudojamas, sumažėjo žymiai. Geriausi rezultatai pasiekti kai aukštos įtampos

impulsų vora buvo sudaryta iš 1 μs trukmės impulsų (3.14b paveikslas). Šiuo atveju optinis kontrastas padidėjo 8,8 karto, lyginant su atveju kai aktyvusis virpesių slopinimas nėra naudojamas (3.14a paveikslas). Kai voroje buvo naudojami 0,5 μs trukmės impulsai, Pokelso narvelyje buvo sužadintos aukštesnio dažnio pjezoelektrinių virpesių dedamosios, kurios atsispindi optiniame atsake (3.14c paveikslas). Tačiau ir šiuo atveju optinio atsako pulsacijų amplitudė yra 5 kartus mažesnė, o optinis kontrastas 5,4 karto didesnis, lyginant su atveju, kai aktyvusis virpesių slopinimas nėra naudojamas (3.14a paveikslas).

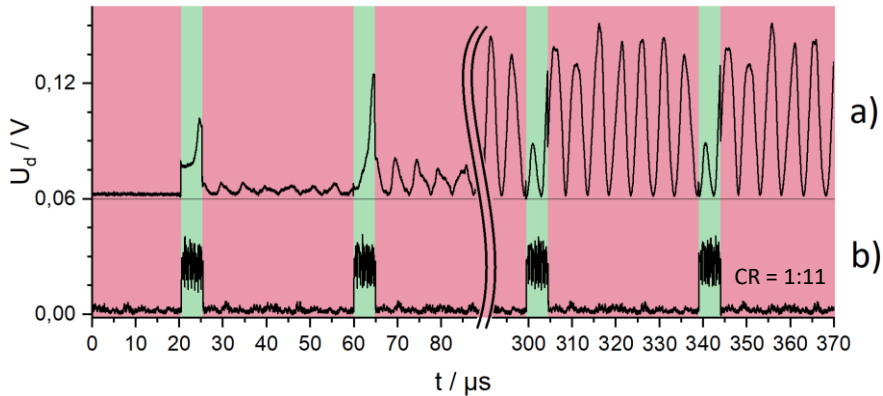
Iš gautų rezultatų (3.14b, c, d paveikslai) matosi, kad aukštos įtampos impulsų voros metu, optinio atsako amplitudė svyruoja. Taip nutinka dėl, to kad lazerio spindulio poliarizacija, spinduliui sklindanti per Pokelso narvelį, yra pasukama skirtingu kampu, priklausomai nuo aukštos įtampos impulso poliškumo. Šį optinio atsako amplitudės svyravimą galima sumažinti naudojant skirtingas aukštos įtampos teigiamų ir neigiamų impulsų amplitudes. Tai pasiekti galima naudojant maitinimo šaltinius V1 ir V2 (3.8 paveikslas) su skirtingomis įtampomis. Geriausias rezultatas gautas kada neigiamos įtampos impulso amplitudė buvo sumažinta 18 % (iki 2,46 kV) (3.15 paveikslas). Optinio atsako impulso amplitudės svyravimai šiuo atveju sumažėjo 3 kartus.



3.15 pav. Pokelso narvelio su DKDP kristalu optinis atsakas, taikant aktyvųjį pjezoelektrinių virpesių slopinimą, kai vorą sudarančių impulsų trukmė 0,25 μs . Optinio atsako svyravimai įtampos impulsų voros metu sumažėja, kada neigiamų aukštos įtampos impulsų amplitudė sumažinama 18 % (iki 2,46 kV)

Fig. 3.15. Optical response of the DKDP Pockels cell with active piezoelectric ringing suppression using burst of 0.25 μs duration high voltage pulses. Variations of optical response during voltage pulse burst are reduced by reducing the amplitude of negative high voltage pulses by 18 % (up to 2.46 kV)

Kitame tyrime Pokelso narvelis su DKDP kristalu, kurio matmenys $\varnothing 12 \times 24$ mm, buvo veikiamas periodiniais aukštos įtampos impulsais. Impulsų dažnis buvo parinktas taip, kad aukštos įtampos impulso sužadintos akustinės bangos nespėtų visiškai nuslopti iki kito impulso. Optinio atsako oscilograma, kai aukštos įtampos impulsų trukmė 5 μ s, dažnis 25 kHz ir amplitudė 2,9 kV, pateikta 3.16 paveiksle.

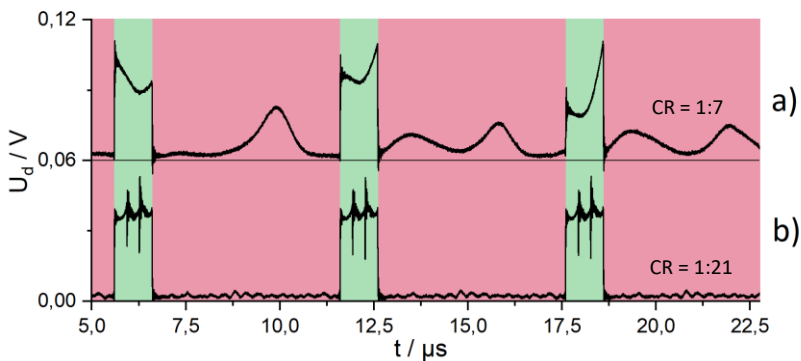


3.16 pav. Pokelso narvelio su DKDP kristalu optinis atsakas, veikiant periodiniais aukštos įtampos impulsais, kurių trukmė 5 μ s, dažnis 25 kHz ir amplitudė 2,9 kV: a) netaikant aktyviojo pjezoelektrinių virpesių slopinimo; b) taikant aktyvųjį pjezoelektrinių virpesių slopinimą

Fig. 3.16. Optical response of the DKDP Pockels cell to periodic high voltage pulses with a duration of 5 μ s, a frequency of 25 kHz and an amplitude of 2.9 kV: a) with no active piezoelectric ringing suppression; b) with active piezoelectric ringing suppression

Iš rezultatų pateiktų 3.16a paveiksle matyti, kad nenaudojant aktyviojo pjezoelektrinių virpesių slopinimo optinio atsako pulsacijų, kurias sąlygoja pjezoelektriniai virpesiai, amplitudė padidėja po kiekvieno aukštos įtampos impulso. Po kelių aukštos įtampos impulsų, dėl akustinių bangų rezonanso, pasiekama didžiausia pjezoelektrinių virpesių amplitudė. Pritaikius aktyvųjį pjezoelektrinių virpesių slopinimą, kai vietoje ištisinių 5 μ s trukmės impulsų naudojamos 384 ns trukmės 13 impulsų voros, pasiekiamas stabilus Pokelso narvelio su DKDP kristalu darbas (3.16b paveikslas).

Optinio atsako oscilograma, kai Pokelso narvelis valdomas aukštos įtampos impulsais, kurių trukmė 1 μ s, dažnis 166 kHz ir amplitudė 2,9 kV, pateikta 3.17a paveiksle. Pritaikius aktyvųjį pjezoelektrinių virpesių slopinimą, sudarytą iš trijų 333 ns trukmės impulsų voros, optinis kontrastas padidėja tris kartus (3.17b paveikslas).



3.17 pav. Pokelso narvelio su DKDP kristalu optinis atsakas, veikiant periodiniais aukštos įtampos impulsais, kurių trukmė 1 μ s, dažnis 166 kHz ir amplitudė 2,9 kV: a) netaikant aktyviojo pjezoelektrinių virpesių slopinimo; b) taikant aktyvųjų pjezoelektrinių virpesių slopinimą

Fig. 3.17. Optical response of the DKDP Pockels cell to periodic high voltage pulses with a duration of 1 μ s, a frequency of 166 kHz and an amplitude of 2.9 kV: a) with no active piezoelectric ringing suppression; b) with active piezoelectric ringing suppression

Iš rezultatų, pateiktų 3.17 paveiksle, matyti, kad taikant aktyvųjų pjezoelektrinių virpesių slopinimą optinio atsako pulsacijų, kurias sąlygoja pjezoelektriniai virpesiai, amplitudė sumažėjo 5 kartus, o optinis kontrastas padidėjo 3 kartus. Šiame tyrime optinio atsako pulsacijos aukštos įtampos impulsų voros metu buvo sumažintos naudojant skirtingas teigiamų ir neigiamų aukštos įtampos impulsų amplitudes.

Iš gautų tyrimų matyti, kad taikant sukurtą aktyvųjų pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodą Pokelso narveliuose su DKDP kristalu, galima žymiai sumažinti narvelio optinio atsako pulsacijas. Tai leidžia sumažinti neigiamą pjezoelektrinių virpesių įtaką svarbiausiam Pokelso narvelio su DKDP kristalais parametru – optiniam kontrastui bei taikyti šiuos narvelius aukštesniuose dažniuose.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Naudojant Pokelso narvelio valdymui trumpų impulsų vorą, vietoje ištisinio aukštos įtampos impulso, galima pasiekti, kad vorą sudarančių impulsų teigiamų ir neigiamų frontų sukeltos akustinės bangos slopintų viena kitą, todėl aktyvųjų pjezoelektrinių virpesių slopinimą galima įgyvendinti naudojant impulsų voras.

2. Sukurtas pjezoelektrinių virpesių modelis leidžia „LabVIEW“ aplinkoje surasti aukštos įtampos impulsų voros parametrus, prie kurių stebimas pjezoelektrinių virpesių slopinimas.
3. Sukurtas aukštos įtampos impulsų generatorius Pokelso narvelių valdymui leidžia formuoti impulsus, kurių mažiausia frontų trukmė yra 3,4 ir 7,6 ns, kai impulso amplitudė neviršija, atitinkamai 1,9 ir 2,9 kV, o Pokelso narvelio talpa yra 6 pF.
4. Naudojant aktyvųjį pjezoelektrinių virpesių slopinimą Pokelso narveliui su kalio dideuterio fosfato kristalu, kai narvelis valdomas žemo dažnio 5 μ s trukmės aukštos įtampos impulsais, optinio atsako pulsacijų amplitudė sumažėjo 5 kartus, o optinis kontrastas padidėjo 5,4 kartus, lyginant su atveju kai aktyvusis slopinimas nėra naudojamas.
5. Kalio dideuterio fosfato Pokelso narvelį valdant periodiniais ištisiniais 5 μ s trukmės aukštos įtampos impulsais, didėjant dažniui pjezoelektriniai virpesių sukeliama optinio atsako svyravimai didėja ir prie 25 kHz narvelis ima dirbti nestabiliai. Pritaikius aktyvųjį pjezoelektrinių virpesių slopinimą, kai vietoje ištisinių impulsų naudojamos 384 ns trukmės 13 impulsų voros, Pokelso narvelis su kalio dideuterio fosfato kristalu darbas stabilizuojasi.

Bendrosios išvados

1. Pokelso narvelių optinio kontrasto priklausomybės nuo aukštos įtampos impulsų dažnio ir trukmės tyrimo rezultatai parodė, kad dažniuose nuo 1 kHz iki 1 MHz pasirinkus tinkamos trukmės impulsus galima pagerinti optinį kontrastą iki 3 kartų.
2. Pokelso narveliuose su beta bario borato kristalu taikant pasyvųjį akustinių bangų, sklindančių elektrinio lauko kryptimi, slopinimą rezonansinių dažnių atveju pasiekiamas 10 kartų optinio kontrasto padidėjimas.
3. Aktyvus pjezoelektrinių virpesių slopinimo metodas paremtas trumpų impulsų vora, vietoje ištisinio aukštos įtampos impulso, padidina Pokelso narvelių su kalio dideuterio fosfato kristalu optinį kontrastą nuo 3 iki 8,8 kartų.
4. Sukurtas aukštos įtampos impulsų generatorius Pokelso narvelių valdymui leidžia formuoti impulsų vorą skirtą pjezoelektrinių virpesių slopinimui. Mažiausia vorą sudarančio impulso trukmė 45 ns, frontų trukmė yra 3,4 ir 7,6 ns, kai impulso amplitudė neviršija 1,9 ir 2,9 kV.

Literatūra ir šaltiniai

Abarkan M., Salvestrini J. P., Fontana M. D., Aillerie M. 2003. Frequency and wavelength dependences of electro-optic coefficients in inorganic crystals, *Applied Physics B* 76(7): 765–769. DOI: 10.1007/s00340-003-1196-5 .

Abarkan Mustapha, Salvestrini J. P., Aillerie M., Fontana M. D. 2003. Frequency dispersion of electro-optical properties over a wide range by means of time-response analysis, *Applied Optics* 42(13): 2346–2353. DOI: 10.1364/AO.42.002346 .

Alharbi S. S., Alharbi S. S., Al-bayati A. M. S., Matin M. 2017. Design and performance evaluation of a DC-DC buck-boost converter with cascode GaN FET, SiC JFET, and Si IGBT power devices *2017 North American Power Symposium (NAPS)*. 2017 North American Power Symposium (NAPS). DOI: 10.1109/NAPS.2017.8107322 .

Amano H., ir kt. 2018. The 2018 GaN power electronics roadmap, *Journal of Physics D: Applied Physics* 51(16): 163001. DOI: 10.1088/1361-6463/aaaf9d .

Amundsen P. C., Wang G. 1987. Low-loss LiNbO₃ Q switches - Compensation of acoustically-induced refractive index variations, *IEEE Journal of Quantum Electronics* 23: 2252–2257. DOI: 10.1109/JQE.1987.1073292 .

Andreev N. F., Babin A. A., Davydov V. S., Matveev A. Z., Garanin S. G., Dolgoplov Yu. V., Kulikov S. M., Sukharev S. A., Tyutin S. V. 2011. Wide-aperture plasma-electrode pockels cell, *Plasma Physics Reports* 37(13): 1219–1224. DOI: 10.1134/S1063780X1106002X .

Anon 1970. Modulators for optical communications, *Proceedings of the IEEE* 58(10): 1440–1457. DOI: 10.1109/PROC.1970.7970 .

Anon 2014. Unipolar and Bipolar Power Diodes *Fundamentals of Silicon Carbide Technology*. John Wiley & Sons, Ltd. DOI: 10.1002/9781118313534.ch7 [Žiūrėta rugsėjo 30, 2020].

Antonov S. N. 2016. Acousto-optic deflector: A new method to increase the efficiency and bandwidth, *Technical Physics* 61(10): 1597–1601. DOI: 10.1134/S1063784216100042 .

Bado P., Bouvier M. 1998. Multikilohertz Pockels cell driver, *Review of Scientific Instruments* 56(9): 1744. DOI: 10.1063/1.1138086 .

Bai Zhenao, Bai Zhenxu, Kang Z., Lian F., Lin W., Fan Z. 2017. Non-Pulse-Leakage 100-kHz Level, High Beam Quality Industrial Grade Nd:YVO4 Picosecond Amplifier, *Applied Sciences* 7(6): 615. DOI: 10.3390/app7060615 .

Baker R. J., Johnson B. P. 1993. Series operation of power MOSFETs for high-speed, high-voltage switching applications, *Review of Scientific Instruments* 64(6): 1655–1656. DOI: 10.1063/1.1144043 .

Barbosa F., Arnold P. A., McHale G. B., James G., Brown G., Cook E. G., Hickman B. C. 2008. Development of Solid-State Drivers for the NIF Plasma Electrode Pockels Cell 2008 *IEEE International Power Modulators and High-Voltage Conference*. 2008 IEEE International Power Modulators and High-Voltage Conference. DOI: 10.1109/IPMC.2008.4743591 .

Barbosa F., Arnold P. A., Hinz A. F., Zacharias R. A., Ollis C. W., Fulkerson E. S., Mchale B., Runtal A., Bishop C. L. 2007. Plasma electrode Pockels Cell subsystem performance in the National Ignition Facility 2007 *16th IEEE International Pulsed Power Conference*. 2007 16th IEEE International Pulsed Power Conference. DOI: 10.1109/PPPS.2007.4652463 .

Barsack E., Chabot A. A., Harris C. E., Kawachi D. A., Richardson W. A. 1980. Optical modulator with ringing suppression. Prieiga per internetą: <https://patents.google.com/patent/US4221463A/en>.

Basséras P., Miller R. J. D., Gracewski S. M. 1998. Theoretical analysis of acoustic transients in lithium niobate electro-optic modulators, *Journal of Applied Physics* 69(11): 7774. DOI: 10.1063/1.347505 .

Batirov T. M., Verkhovskaya K. A., Dzhahalov R. K., Dubovik E. V., Mill B. V., Fridkin V. M. 2000. Bulk photovoltaic and photorefractive effects in a piezoelectric La₃Ga₅SiO₁₄: Fe crystal, *Crystallography Reports* 45(1): 154–156. DOI: 10.1134/1.171154 .

Bergmann F., Siebold M., Loeser M., Röser F., Albach D., Schramm U. 2015. MHz Repetition Rate Yb:YAG and Yb:CaF₂ Regenerative Picosecond Laser Amplifiers with a BBO Pockels Cell, *Applied Sciences* 5(4): 761–769. DOI: 10.3390/app5040761 .

Samsonas D., Petrulionis D., Grigaitis D., Vengris M. 2021. Influence of the piezoelectric ringing on the polarisation contrast of the KRTP Pockels cell in the modulation frequency range up to 10 MHz, *Proc. SPIE, Components and Packaging for Laser Systems VII*, 116670G. DOI: 10.1117/12.2578790

Bergmann T. H., Bergmann F., Siebold M., Löser M. 2017. Pockels cell driver circuit comprising resistive, inductive or capacitive elements. Prieiga per internetą: <https://patents.google.com/patent/US20170038610A1/en>.

Bishop A. I., Barker P. F. 2006. Subnanosecond Pockels cell switching using avalanche transistors, *Review of Scientific Instruments* 77(4): 044701. DOI: 10.1063/1.2194472 .

Buse K., Imbrock J., Krätzig E., Peithmann K. 2007. Photorefractive Effects in LiNbO₃ and LiTaO₃ P. Günter & J.-P. Huignard, sud. *Photorefractive Materials and Their Applications 2: Materials*. Springer Series in Optical Sciences, New York, NY: Springer. DOI: 10.1007/0-387-34081-5_4 [Žiūrėta balandžio 12, 2021].

Carvajal J. J., Segonds P., Peña A., Zaccaro J., Boulanger B., Díaz F., Aguiló M. 2007. Structural and optical properties of RbTiOPO₄:Nb crystals, *Journal of Physics: Condensed Matter* 19(11): 116214. DOI: 10.1088/0953-8984/19/11/116214 .

Chen Y., Du J., Feng L., Xiao J., Zhang J., He Y. 2020. Comparative Study on Driving Switching Characteristics of GaN-FET and SiC-MOSFET in Transient High Voltage Pulse Discharge Circuit 2020 *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). DOI: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279479 .

Cheng L. K., Cheng L. T., Galperin J., Hotsenpiller P. A. M., Bierlein J. D. 1994. Crystal growth and characterization of KTiOPO₄ isomorphs from the self-fluxes, *Journal of Crystal Growth* 137(1): 107–115. DOI: 10.1016/0022-0248(94)91256-4 .

Chng T. L., Ding C., Naphade M., Goldberg B. M., Adamovich I. V., Starikovskaia S. M. 2020. Characterization of an optical pulse slicer for gas-phase electric field measurements using field-induced second harmonic generation, *Journal of Instrumentation* 15(03): C03005–C03005. DOI: 10.1088/1748-0221/15/03/C03005 .

Chu H. H., Huang S. Y., Yang L. S., Chien T. Y., Xiao Y. F., Lin J. Y., Lee C. H., Chen S. Y., Wang J. 2004. A versatile 10-TW laser system with robust passive controls to achieve high stability and spatiotemporal quality, *Applied Physics B* 79(2): 193–201. DOI: 10.1007/s00340-004-1533-3 .

Dharmadhikari A. K., Dharmadhikari J. A., Adhi K. P., Mehendale N. Y., Aiyer R.C. 1996. Low cost fast switch using a stack of bipolar transistors as a pockel cell driver, *Review of Scientific Instruments* 67(12): 4399–4400. DOI: 10.1063/1.1147543 .

Ding W., Wang Y., Fan C., Gou Y., Xu Z., Yang L. 2015. A Subnanosecond Jitter Trigger Generator Utilizing Trigatron Switch and Avalanche Transistor Circuit, *IEEE Transactions on Plasma Science* 43(4): 1054–1062. DOI: 10.1109/TPS.2015.2402178 .

Dong S., Yao C., Yang N., Luo T., Zhou Y., Wang C. 2016. Solid-State Nanosecond-Pulse Plasma Jet Apparatus Based on Marx Structure With Crowbar Switches, *IEEE Transactions on Plasma Science* 44(12): 3353–3360. DOI: 10.1109/TPS.2016.2627141 .

Donley E. A., Heavner T. P., Levi F., Tataw M. O., Jefferts S. R. 2005. Double-pass acousto-optic modulator system, *Review of Scientific Instruments* 76(6): 063112. DOI: 10.1063/1.1930095 .

Dorrer C. 2014. Analysis of nonlinear optical propagation in a longitudinal deuterated potassium dihydrogen phosphate Pockels cell, *JOSA B* 31(8): 1891–1900. DOI: 10.1364/JOSAB.31.001891 .

Dreisewerd D. W., Haack J. A., Rigney T. F. 1992. Electro-optic modulator with acoustic damping. Prieiga per internetą: <https://patents.google.com/patent/US5079642A/en>.

Ebbers C. A. 1988. Linear electro-optic effect in β -BaB₂O₄, *Applied Physics Letters* 52(23): 1948–1949. DOI: 10.1063/1.99585 .

Ebbers C. A., Velsko S. P. 1998. High average power KTiOPO₄ electro-optic Q-switch, *Applied Physics Letters* 67(5): 593. DOI: 10.1063/1.115399 .

Eichler H. J., Eichler J., Lux O. 2018. *Lasers: Basics, Advances and Applications* Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-99895-4 [Žiūrėta liepos 26, 2020].

Eimerl D., Davis L., Velsko S., Graham E. K., Zalkin A. 1987. Optical, mechanical, and thermal properties of barium borate, *Journal of Applied Physics* 62(5): 1968–1983. DOI: 10.1063/1.339536 .

El-Sherif A. F., Harfosh A. 2015. Comparison of high-power diode pumped actively Q-switched double-clad flower shape co-doped-Er³⁺:Yb³⁺ fiber laser using acousto-optic and mechanical (optical) modulators, *Journal of Modern Optics* 62(15): 1229–1240. DOI: 10.1080/09500340.2015.1028498 .

Essmann S., Spörhase S., Grosshans H., Markus D. 2018. Precise triggering of electrical discharges by ultraviolet laser radiation for the investigation of ignition processes, *Journal of Electrostatics* 91: 34–40. DOI: 10.1016/j.elstat.2017.12.003 .

Gao M., Xie Y., Hu Y. 2017. Parameter optimization for rise time of sub-nanosecond pulser based on avalanche transistors 2017 *IEEE 21st Workshop on Signal and Power Integrity (SPI)*. 2017 IEEE 21st Workshop on Signal and Power Integrity (SPI). DOI: 10.1109/SaPIW.2017.7944007 .

Giesberts M., Fitzau O., Hoffmann H. D., Lange R., Bachert C., Krause V. 2018. Directly q-switched high power resonator based on XLMA-fibers *Fiber Lasers XV: Technology and Systems*. Fiber Lasers XV: Technology and Systems. International Society for Optics and Photonics. DOI: 10.1117/12.2287783 [Žiūrėta lapkričio 28, 2018].

Goldstein R. 1986. Electro-optic devices in review, *Lasers & Applications*, April.

Goodno G. D., Guo Z., Miller R. J. D., Miller I. J., Montgomery J. W., Adhav S. R., Adhav R. S. 1995. Investigation of β -BaB₂O₄ as a Q switch for high power applications, *Applied Physics Letters* 66(13): 1575–1577. DOI: 10.1063/1.113675 .

de Groote R. P., ir kt. 2015. Use of a Continuous Wave Laser and Pockels Cell for Sensitive High-Resolution Collinear Resonance Ionization Spectroscopy, *Physical Review Letters* 115(13): 132501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.132501 .

Guo S., Zhang L., Lei Y., Li X., Xue F., Yu W., Huang A. Q. 2015. 3.38 Mhz operation of 1.2kV SiC MOSFET with integrated ultra-fast gate drive 2015 *IEEE 3rd Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*. 2015 IEEE 3rd Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA). DOI: 10.1109/WiPDA.2015.7369298 .

- Haefner M. 2019. Exciting a crystal of a pockels cell Prieiga per internetą: <https://patents.google.com/patent/US20190280455A1/en>.
- Hakiri K., Suzuki M., Kakio S. 2019. Acousto-optic modulators driven by longitudinal leaky surface acoustic waves on LiNbO₃ thin-plate bonded structures, *Japanese Journal of Applied Physics* 58(SG): SGGA09. DOI: 10.7567/1347-4065/ab0ba1 .
- Hamze A. K., Reynaud M., Geler-Kremer J., Demkov A. A. 2020. Design rules for strong electro-optic materials, *npj Computational Materials* 6(1): 1–9. DOI: 10.1038/s41524-020-00399-z .
- Hyde R. L., Jacoby D., Ramsden S. A. 1977. A laser-triggered Krytron-Blumlein electro-optic switch, *Journal of Physics E: Scientific Instruments* 10(11): 1106–1107. DOI: 10.1088/0022-3735/10/11/004 .
- Hyer R. C., Sutphin H. D., Winn K. R. 2008. Laser-initiated krytron-switched Blumlein structure for pulse selection, *Review of Scientific Instruments* 46(10): 1333. DOI: 10.1063/1.1134066 .
- Huang H., ir kt. 2012. Broadband Modulation Performance of 100-GHz EO Polymer MZMs, *Journal of Lightwave Technology* 30(23): 3647–3652.
- Yan J., Shen S., Ding W. 2020. High-Power Nanosecond Pulse Generators With Improved Reliability by Adopting Auxiliary Triggering Topology, *IEEE Transactions on Power Electronics* 35(2): 1353–1364. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2922360 .
- Yin X., Jiang M., Sun Z., Hui Y., Lei H., Li Q. 2017. Intrinsic reduction the depolarization loss in electro-optical Q-switched laser using a rectangular KD*P crystal, *Optics Communications* 398: 107–111. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.04.048 .
- Yong-sheng G., Bai-yu L., Yong-lin B., Jun-jun Q., Xiao-hong B., Bo W., Bing-li Z., Chuan-dong S. 2016. High-speed, high-voltage pulse generation using avalanche transistor, *Review of Scientific Instruments* 87(5): 054708. DOI: 10.1063/1.4948727 .
- Ionin A. A., Kinyaevskiy I. O., Klimachev Yu. M., Kotkov A. A., Kozlov A. Yu., Kryuchkov D. S. 2017. Selection of CO laser single nanosecond pulse by electro-optic CdTe shutter, *Infrared Physics & Technology* 85: 347–351. DOI: 10.1016/j.infrared.2017.07.021 .
- Jiang W., ir kt. 2004. Compact solid-State switched pulsed power and its applications, *Proceedings of the IEEE* 92(7): 1180–1196. DOI: 10.1109/JPROC.2004.829003 .
- Jiang W. 2007. Fast High Voltage Switching Using Stacked MOSFETs, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 14(4): 947–950. DOI: 10.1109/TDEI.2007.4286531 .
- Juhasz T. 1993. Pockel cell damping system. Prieiga per internetą: <https://patents.google.com/patent/US5221988A/en>.
- Kaminskii A. A., Mill B. V., Khodzhabagyan G. G., Konstantinova A. F., Okorochkov A. I., Silvestrova I. M. 1983. Investigation of trigonal (La_{1-x}Nd_x)₃Ga₅SiO₁₄ crystals. I. Growth and optical Properties, *physica status solidi (a)* 80(1): 387–398. DOI: 10.1002/pssa.2210800142 .

Keith W. D., Pringle D., Rice P., Birke P.V. 2000. Distributed magnetic coupling synchronizes a stacked 25-kV MOSFET switch, *IEEE Transactions on Power Electronics* 15(1): 58–61. DOI: 10.1109/63.817363 .

Kesar A. S., Sharabani Y., Shafir I., Zoran S., Sher A. 2016. Characterization of a Drift-Step-Recovery Diode Based on All Epi-Si Growth, *IEEE Transactions on Plasma Science* 44(10): 2424–2428. DOI: 10.1109/TPS.2016.2605744 .

Kim H., Yu C., Jang S., Kim G. 2018. Gate Driver Circuit for Short Pulse Generation in Solid-State Pulsed Power Modulators *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. DOI: 10.1109/IECON.2018.8591813 .

Kim H., Yu C., Jang S., Kim G. 2019. Solid-State Pulsed Power Modulator With Fast Rising/Falling Time and High Repetition Rate for Pockels Cell Drivers, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 66(6): 4334–4343. DOI: 10.1109/TIE.2018.2866078 .

Kimura W. D. 2017. Tunable CO2 laser system with subnanosecond-pulse-train output, *Optics & Laser Technology* 88: 263–274. DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.09.022 .

Koechner W. 2006. *Solid-State Laser Engineering* 6-axis leid., New York: Springer-Verlag. Prieiga per internetą: <https://www.springer.com/gb/book/9780387290942>.

Kong H., ir kt. 2003. Growth, properties and application as an electrooptic Q-switch of langasite crystal, *Journal of Crystal Growth* 254(3): 360–367. DOI: 10.1016/S0022-0248(03)01106-0 .

Kreutzer O., Eckardt B., Maerz M. 2015. Optimum gate driver design to reach SiC-MOSFET's full potential — Speeding up to 200 kV/μs 2015 *IEEE 3rd Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*. 2015 IEEE 3rd Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA). DOI: 10.1109/WiPDA.2015.7369313 .

Kreutzer O., Heckel T., Maerz M. 2016. Using SiC MOSFET's Full Potential – Switching Faster than 200 kV/μs, *Materials Science Forum* 858: 880–884. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.858.880 .

Krishnaswamy P., Kuthi A., Vernier P. T., Gundersen M. A. 2007. Compact Subnanosecond Pulse Generator Using Avalanche Transistors for Cell Electroperturbation Studies, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 14(4): 873–877. DOI: 10.1109/TDEI.2007.4286518 .

Lee T.-C. 1972. Acoustic resonance damping apparatus Prieiga per internetą: <https://patents.google.com/patent/US3663091A/en>.

Li C., Wang E., Yao C., Mi Y., Tan J., Zhang R. 2017. Compact solid-state Marx-bank sub-nanosecond pulse generator based on gradient transmission line theory, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 24(4): 2181–2188. DOI: 10.1109/TDEI.2017.006367 .

Li C., Wang E., Tan J., Zhang R., Wang S., Yao C., Mi Y. 2018. Design and Development of a Compact All-Solid-State High-Frequency Picosecond-Pulse Generator, *IEEE Transactions on Plasma Science* 46(10): 3249–3256. DOI: 10.1109/TPS.2018.2850153 .

- Li C. 2017. Electrooptic Switcher Based on Dual Transverse Pockels Effect and Lithium Niobate Crystal, *IEEE Photonics Technology Letters* 29(24): 2159–2162.
- Li G., He Y., Su G., Li Z., Zhuang X., Ma J., Huang X. 2005. Study on rapid growth of KH_2PO_4 and its characterization, *Crystal Research and Technology* 40(3): 217–221. DOI: 10.1002/crat.200410328 .
- Li J., Zhao Z., Sun Y., Liu Y., Ren Z., He J., Cao H., Zheng M. 2017. A hybrid pulse combining topology utilizing the combination of modularized avalanche transistor Marx circuits, direct pulse adding, and transmission line transformer, *Review of Scientific Instruments* 88(3): 033507. DOI: 10.1063/1.4978650 .
- Li J., Zhong X., Li Jianhao, Liang Z., Chen W., Li Z., Li T. 2015. Theoretical Analysis and Experimental Study on an Avalanche Transistor-Based Marx Generator, *IEEE Transactions on Plasma Science* 43(10): 3399–3405. DOI: 10.1109/TPS.2015.2436373 .
- Li J. T., Zhong X., Cao H., Zhao Z., Xue J., Li T., Li Z., Wang Y. N. 2015. Development of a stereo-symmetrical nanosecond pulsed power generator composed of modularized avalanche transistor Marx circuits, *Review of Scientific Instruments* 86(9): 093502. DOI: 10.1063/1.4929872 .
- Li X., Zhang L., Guo S., Lei Y., Huang A. Q., Zhang B. 2015. Understanding switching losses in SiC MOSFET: Toward lossless switching 2015 *IEEE 3rd Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*. 2015 IEEE 3rd Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA). DOI: 10.1109/WiPDA.2015.7369295 .
- Li Xuan, Li Xu, Liu P., Guo S., Zhang L., Huang A. Q., Deng X., Zhang B. 2019. Achieving Zero Switching Loss in Silicon Carbide MOSFET, *IEEE Transactions on Power Electronics* 34(12): 12193–12199. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2906352 .
- Li Z., Zhang R., Wu Y., Tang B., Zhang G. 2015. Controlled growth of large β -BaB₂O₄ crystals based on theoretical guidelines, *Journal of Applied Crystallography* 48. DOI: 10.1107/S1600576715016040 .
- Liu K., ir kt. 2017. Pulse width adjustable Q-switched cavity dumped laser by rotating a quarter-wave plate and a Pockels cell, *Optics Letters* 42(13): 2467–2470. DOI: 10.1364/OL.42.002467 .
- Liu K., Ye C. R., Khan S., Sorger V. J. 2015. Review and perspective on ultrafast wavelength-size electro-optic modulators, *Laser & Photonics Reviews* 9(2): 172–194. DOI: 10.1002/lpor.201400219 .
- Liu Zhaojun, Wang Q., Zhang X., Liu Zejin, Wei A., Chang J., Su F., Jin G. 2005. Pulse-off electro-optic Q-switch made of $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$, *Optics Express* 13(18): 7086–7090. DOI: 10.1364/OPEX.13.007086 .
- Lu B., Wang D. 2017. Note: A four-pass acousto-optic modulator system for laser cooling of sodium atoms, *Review of Scientific Instruments* 88(7): 076105. DOI: 10.1063/1.4994223 .
- Ma S., Yu H., Zhang H., Han X., Lu Q., Ma C., Boughton R. I., Wang J. 2016. Efficient high repetition rate electro-optic Q-switched laser with an optically active langasite crystal, *Scientific Reports* 6(1): 30517. DOI: 10.1038/srep30517 .

- Ma S., Lu D., Yu H., Zhang H., Han X., Lu Q., Ma C., Wang J. 2017. High repetition rates optically active langasite electro-optically Q-switched laser at 1.34 μm , *Optics Express* 25(20): 24007–24014. DOI: 10.1364/OE.25.024007.
- 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. DOI: 10.1016/j.ijleo.2017.01.013.
- Mercante A. J., Shi S., Yao P., Xie L., Weikle R. M., Prather D. W. 2018. Thin film lithium niobate electro-optic modulator with terahertz operating bandwidth, *Optics Express* 26(11): 14810–14816. DOI: 10.1364/OE.26.014810.
- Miller R. J. D., Basseras P. 1991. Electro-optic device for optical signal processing at high repetition rates Prieiga per internetą: <https://patents.google.com/patent/US5075795A/en>.
- Mo S., T M. 2013. TO-247 4 pin Excluding the Source Inductance from Driving Circuit Prieiga per internetą: /paper/TO-247-4-pin-Excluding-the-Source-Inductance-from-Mo-Maiyalagan/0fadca649decacbbe1c13bdfd20fc57119cb3869.
- Mori M., ir kt. 2008. New Method to Measure the Rise Time of a Fast Pulse Slicer for Laser Ion Acceleration Research, *IEEE Transactions on Plasma Science* 36(4): 1872–1877. DOI: 10.1109/TPS.2008.2000886.
- Nakatani H., Bosenberg W. R., Cheng L. K., Tang C. L. 1988. Laser-induced damage in beta-barium metaborate, *Applied Physics Letters* 53(26): 2587–2589. DOI: 10.1063/1.100535.
- Nickel D., Stolzenburg C., Beyertt A., Giesen A., Häußermann J., Butze F., Leitner M. 2005. 200 kHz electro-optic switch for ultrafast laser systems, *Review of Scientific Instruments* 76(3): 033111. DOI: 10.1063/1.1867052.
- Nunnally C., Lara M. B., Mayes J. R., Smith T. R. 2011. Low cost 400-ps rise-time circuit-board Marx generator 2011 *IEEE Pulsed Power Conference*. 2011 IEEE Pulsed Power Conference. DOI: 10.1109/PPC.2011.6191470.
- Oak S. M., Bindra K. S., Narayan B. S., Khardekar R. K. 1991. A fast cavity dumper for a picosecond glass laser, *Review of Scientific Instruments* 62(2): 308–312. DOI: 10.1063/1.1142119.
- Pang L., Long T., He K., Huang Y., Zhang Q. 2019. A Compact Series-Connected SiC MOSFETs Module and Its Application in High Voltage Nanosecond Pulse Generator, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 66(12): 9238–9247. DOI: 10.1109/TIE.2019.2891441.
- Pečar M., Čepič M. 2015. Conoscopic figure: A complex consequence of a not so simple phenomenon, *European Journal of Physics* 36. DOI: 10.1088/0143-0807/36/1/015014.
- Perlov D., Livneh S., Czechowicz P., Goldgirsh A., Loiacono D. 2011. Progress in growth of large β -BaB₂O₄ single crystals, *Crystal Research and Technology* 46. DOI: 10.1002/crat.201100208.
- Pysker M., Miwa Y., Shahrokshahi R., Xie D., Pfister O. 2010. A new method for locking the signal-field phase difference in a type-II optical parametric oscillator above threshold, *Optics Express* 18(26): 27858–27871. DOI: 10.1364/OE.18.027858.

- Rai V. N., Shukla M., Khardekar R. K. 1994. A transistorized Marx bank circuit providing sub-nanosecond high-voltage pulses, *Measurement Science and Technology* 5(4): 447. DOI: 10.1088/0957-0233/5/4/020 .
- Raja C. R., Gobinathan R., Gnanam F. D. 1993. Dielectric Properties of Beta Barium Borate and Potassium Pentaborate Single Crystals, *Crystal Research and Technology* 28(5): 737–743. DOI: 10.1002/crat.2170280527 .
- Rao J., Zhang W., Jiang S., Li Z. 2019. Nanosecond pulse generator based on cascaded avalanche transistors and Marx circuits, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 26(2): 374–380. DOI: 10.1109/TDEI.2018.007710 .
- Redondo L. M., Kandratsyev A., Barnes M. J., Fowler T. 2017. Design strategies for a SiC Marx generator for a kicker magnet 2017 *IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC)*. 2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC). DOI: 10.1109/PPC.2017.8291333 .
- Redondo L. M., Kandratsyev A., Barnes M. J. 2018. Marx Generator Prototype for Kicker Magnets Based on SiC MOSFETs, *IEEE Transactions on Plasma Science* 46(10): 3334–3339. DOI: 10.1109/TPS.2018.2808194 .
- Redondo L. M., Zahyka M., Kandratsyev A. 2019. Solid-State Generation of High-Frequency Burst of Bipolar Pulses for Medical Applications, *IEEE Transactions on Plasma Science* 47(8): 4091–4095. DOI: 10.1109/TPS.2019.2923570 .
- Ren F., Wang X., Wang A. X. 2013. Thermo-optic modulation of plasmonic bandgap on metallic photonic crystal slab, *Applied Physics Letters* 102(18): 181101. DOI: 10.1063/1.4804202 .
- Ren T., ir kt. 2019. An Integrated Low-Voltage Broadband Lithium Niobate Phase Modulator, *IEEE Photonics Technology Letters* 31(11): 889–892. DOI: 10.1109/LPT.2019.2911876 .
- Roig J., Gomez G., Bauwens F., Vlachakis B., Rodríguez J., Rodríguez M., Rodríguez A., Lamar D. 2017. Series-connected GaN transistors for ultra-fast high-voltage switch (>1kV). DOI: 10.1109/APEC.2017.7931130 .
- Roth M., Perlov D. 1996. Growth of barium borate crystals from sodium fluoride solutions, *Journal of Crystal Growth* 169(4): 734–740. DOI: 10.1016/S0022-0248(96)00450-2 .
- Roth M., Tseitlin M., Angert N. 2005. Oxide crystals for electro-optic Q-switching of lasers, *Glass Physics and Chemistry* 31(1): 86–95. DOI: 10.1007/s10720-005-0028-6 .
- Rutten T. P., Wild N., Veitch P. J. 2007. Fast rise time, long pulse width, kilohertz repetition rate Q-switch driver, *Review of Scientific Instruments* 78(7): 073108. DOI: 10.1063/1.2757474 .
- Saeed S., ir kt. 2019. Rapid response of photorefractive in vanadium and magnesium co-doped lithium niobate, *Journal of Physics D: Applied Physics* 52. DOI: 10.1088/1361-6463/ab30ed .
- Satyanarayan M. N., Bhat H. L. 1998. Electrical and optical characterisation of electrochromic damages in KTP single crystals Korean Phys. Soc. Priciga per internetą: <http://eprints.iisc.ac.in/10109/>.

- Shah F. M., Xiao H. M., Li R., Awais M., Zhou G., Bitew G. T. 2018. Comparative performance evaluation of temperature dependent characteristics and power converter using GaN, SiC and Si power devices 2018 *IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018)*. 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018). DOI: 10.1109/CPE.2018.8372523 .
- She X., Huang A. Q., Lucía Ó., Ozpineci B. 2017. Review of Silicon Carbide Power Devices and Their Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 64(10): 8193–8205. DOI: 10.1109/TIE.2017.2652401 .
- Shen S., Yan J., Wang Y., Sun G., Ding W. 2020. Further Investigations on a Modified Avalanche Transistor-Based Marx Bank Circuit, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 69(10): 8506–8513. DOI: 10.1109/TIM.2020.2993343 .
- Starobor A., Palashov O. 2016. Thermal effects in the DKDP Pockels cells in the 215–300 K temperature range, *Applied Optics* 55(26): 7365–7370. DOI: 10.1364/AO.55.007365 .
- Sun E., Wang Z., Zhang R., Cao W. 2011. Reduction of electro-optic half-wave voltage of 0.93Pb(Zn₁/3Nb₂/3)O₃–0.07PbTiO₃ single crystal through large piezoelectric strain, *Optical Materials* 33(3): 549–552. DOI: 10.1016/j.optmat.2010.10.047 .
- Sundararajan R., Shao J., Soundarajan E., Gonzales J., Chaney A. 2004. Performance of solid-state high-voltage pulsed for biological applications-a preliminary study, *IEEE Transactions on Plasma Science* 32(5): 2017–2025. DOI: 10.1109/TPS.2004.835944 .
- Svelto O. 2010. *Principles of Lasers* 5-asis leid.Springer US. Prieiga per internetą: <https://www.springer.com/gp/book/9781441913012>.
- Takeda K., Hoshina T., Takeda H., Tsurumi T. 2012. Electro-optic effect of lithium niobate in piezoelectric resonance, *Journal of Applied Physics* 112(12): 124105. DOI: 10.1063/1.4769306 .
- 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. DOI: 10.1088/1742-6596/112/3/032061 .
- Takeuchi Y., Yoshida A., Tokita S., Fujita M., Kawanaka J. 2007. Temperature dependences of the electro-optic coefficient in DKDP crystal 2007 *Conference on Lasers and Electro-Optics - Pacific Rim*. 2007 Conference on Lasers and Electro-Optics - Pacific Rim. DOI: 10.1109/CLEOPR.2007.4391521 .
- Takubo Y., Takeda N., Huang J. H., Muroo K., Yamamoto M. 1998. Precise measurement of the extinction ratio of a polarization analyser, *Measurement Science and Technology* 9(1): 20–23. DOI: 10.1088/0957-0233/9/1/004 .
- Tamošauskas G., Beresnevičius G., Gadonas D., Dubietis A. 2018. Transmittance and phase matching of BBO crystal in the 3–5 μm range and its application for the characterization of mid-infrared laser pulses, *Optical Materials Express* 8(6): 1410–1418. DOI: 10.1364/OME.8.001410 .

- Tamuri A., Bidin N., Mad Daud Y. 2009. Nanoseconds Switching for High Voltage Circuit using Avalanche Transistors, *Applied Physics Research* 1. DOI: 10.5539/apr.v1n2p25 .
- Tang P., Towner D. J., Hamano T., Meier A. L., Wessels B. W. 2004. Electrooptic modulation up to 40 GHz in a barium titanate thin film waveguide modulator, *Optics Express* 12(24): 5962–5967. DOI: 10.1364/OPEX.12.005962 .
- Tang T. Y., Kim H. S., Kim G. H., Lee B., Lee H. J. 2020. Optical diagnostics of the characteristics of a square unipolar nanosecond pulse-driven atmospheric pressure helium plasma jet, *AIP Advances* 10(12): 125218. DOI: 10.1063/5.0033907 .
- Träger F. sud. 2012. *Springer Handbook of Lasers and Optics* 2-asis leid., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. DOI: 10.1007/978-3-642-19409-2 [Žiūrėta liepos 26, 2020].
- Tucker R. S. 2011. Green Optical Communications—Part I: Energy Limitations in Transport, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 17(2): 245–260. DOI: 10.1109/JSTQE.2010.2051216 .
- Wang X., Yuan X., Li W., Qi J., Wang S., Shen D. 2002. Flux growth of large potassium titanyl phosphate crystals and their electro-optical applications, *Journal of Crystal Growth* 237–239: 672–676. DOI: 10.1016/S0022-0248(01)01991-1 .
- Wang X. D., Basséras P., Miller R. J. D., Vanherzeele H. 1998. Investigation of KTiOPO₄ as an electro-optic amplitude modulator, *Applied Physics Letters* 59(5): 519. DOI: 10.1063/1.105425 .
- Wang X. D., Basséras P., Miller R. J. D., Sweetser J., Walmsley I. A. 1990. Regenerative pulse amplification in the 10-kHz range, *Optics Letters* 15(15): 839–841. DOI: 10.1364/OL.15.000839 .
- Wu Y., Su B. 2020. Experiment of Measuring Half-wave Voltage and Electro-optic Coefficient of Crystal Based on KDP Crystal, *Journal of Physics: Conference Series* 1600: 012083. DOI: 10.1088/1742-6596/1600/1/012083 .
- Wu Q., Gao Z., Tian X., Su X., Li G., Sun Y., Xia S., He J., Tao X. 2017. Biaxial crystal β -BaTeMo₂O₉: theoretical analysis and the feasibility as high-efficiency acousto-optic Q-switch, *Optics Express* 25(21): 24893–24900. DOI: 10.1364/OE.25.024893 .
- Xiaojie Z., Izutsu M., Kumagai H., Toyoda K. 1997. Femtosecond optical Kerr studies of photodarkening effect on nonlinear optical properties of CdS x Se 1–x doped glass, *Optics Communications – OPT COMMUN* 142: 273–278. DOI: 10.1016/S0030-4018(97)00276-9.
- Xu Y., Chen W., Liang H., Li Y. H., Liang F. T., Shen Q., Liao S. K., Peng C. Z. 2017. Megahertz high voltage pulse generator suitable for capacitive load, *AIP Advances* 7(11): 115210. DOI: 10.1063/1.5006827 .
- Xuelin Y., Hongde Z., Yang B., Zhenjie D., Qingsong H., Bo Z., Long H. 2010. 4kV/30kHz short pulse generator based on time-domain power combining 2010 *IEEE International Conference on Ultra-Wideband*. 2010 IEEE International Conference on Ultra-Wideband. DOI: 10.1109/ICUWB.2010.5614759 .

Zaitseva N. P., De Yoreo J. J., Dehaven M. R., Vital R. L., Montgomery K. E., Richardson M., Atherton L. J. 1997. Rapid growth of large-scale (40–55 cm) KH_2PO_4 crystals, *Journal of Crystal Growth* 180(2): 255–262. DOI: 10.1016/S0022-0248(97)00223-6 .

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. DOI: 10.1364/JOSA.54.001215 .

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. DOI: 10.1016/S0030-4018(00)00968-8 .

Zhang F., Tang P., Wu M., Huang B., Liu J., Qi X., Zhao C. 2017. Voltage-on-Type RTP Pockels Cell for Q-switch of an Er:YAG Laser at 1,617 nm, *Journal of Russian Laser Research* 38(4): 339–343. DOI: 10.1007/s10946-017-9650-8 .

Zhao Z., Mernick K., Costanzo M., Minty M. 2020. An ultrafast laser pulse picker technique for high-average-current high-brightness photoinjectors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 959: 163586. DOI: 10.1016/j.nima.2020.163586 .

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Sinkevičius G., Baškys A. 2017. Investigation of Pockels Cells Crystal Contrast Ratio Distribution, *Science – Future of Lithuania / Mokslas – Lietuvos Ateitis* 9(3): 308–311. DOI: 10.3846/mla.2017.1031.

Sinkevičius G., Baškys A. 2018. Pjezoelektrinių virpesių Pokelso narvelio kalio dideuterio fosfato ir beta bario borato kristaluose tyrimas / Investigation of piezoelectric ringing in the Pockels cells based on the DKDP and BBO crystal, *Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania* 10. DOI: 10.3846/mla.2018.2485.

Sinkevicius G., Baskys A., Paulauskas N. 2018. Influence of the Piezoelectric Ringing on the Temperature of the Beta Barium Borate Crystal, *Acta Physica Polonica A* 134: 535–538. DOI: 10.12693/APhysPolA.134.535.

Sinkevicius G., Baskys A. 2019. Investigation of Piezoelectric Ringing Frequency Response of Beta Barium Borate Crystals, *Crystals* 9(1): 1–10, 49. DOI: 10.3390/cryst9010049.

Sinkevičius G., Baškys A. 2019. Investigation of the contrast ratio dependence on angular deviation of the laser beam direction from optical axis of Pockels cells based on the beta barium borate crystal. *Lithuanian Journal of Physics*. Lietuvos mokslų akademija. ISSN 2424-3647.

Vengelis J., Sinkevičius G., Banys J., Masiulis L., Grigonis R., Domarkas J., Sirutkaitis V. 2019. Investigation of piezoelectric ringing effects in Pockels cells based on beta barium borate crystals, *Applied Optics* 58(33): 9240–9250. DOI: 10.1364/AO.58.009240.

Sinkevicius G., Vengelis J., Banys J., Masiulis L., Grigonis R., Baskys A., Sirutkaitis V., Domarkas J. 2020. Investigation of piezoelectric ringing effects in deuterated potassium dihydrogen phosphate crystals, *Optical Engineering* 59(3): 1–11. DOI: 10.1117/1.OE.59.3.036107.

Sinkevicius G., Baskys A., Tamošauskas G. 2021. Active Suppression of Piezoelectric Ringing in Pockels Cells for Laser Cavity Application, *Symmetry* 13(4): 1–10, 677. DOI: 10.3390/sym13040677.

Straipsniai kituose leidiniuose

Sinkevicius G., Baskys A. 2017. Investigation of frequency response of pockels cells based on beta barium borate crystals 2017 *Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*. DOI: 10.1109/eStream.2017.7950307 .

Summary in English

Introduction

Formulation of the Problem

Electro-optic modulators, also known as Pockels cells, are widely used to generate high power pulses in lasers. Pockels cells are controlled by an electric field generated by high voltage pulses. The applied electric field produces linear change in the refractive index, which changes the polarization of the laser beam passing through the Pockels cell. When laser beam enters the polarizer, the change in the intensity of the emitted beam is determined by the change in polarization. The relative change in the intensity of the laser beam is called the contrast ratio and it is the main parameter of the Pockels cell, the value of which must be as large as possible. However, there is a phenomenon in Pockels cell that reduces the contrast ratio. That phenomenon is called piezoelectric ringing caused by acoustic waves inside the Pockels cell crystal. Acoustic waves are induced in piezoelectric material by high voltage pulses that are used to generate a pulsed electric field in the Pockels cell. Acoustic wave effects the refractive index of the crystal, thereby modulating the polarization of the laser beam, resulting in a decrease in contrast ratio of the Pockels cell.

In summary, we formulate the following problem of the Pockels cells, which is solved in the dissertation: decrease in contrast ratio of Pockels cells caused by the phenomenon of piezoelectric ringing.

Relevance of the Thesis

Over the last five years, the Lithuanian laser technology sector has grown by an average of 13% annually and outpaces the growth of the global laser market which is growing 5–6% annually. The Lithuanian laser technology sector is a world leader in supplying lasers for research. According to the Lithuanian Smart Specialization State Support Strategy for Research and Innovation 2014–2020, the priority “Photonic and Laser technologies” is included in the first place in the direction of “New Production Processes, Materials and Technologies”. As the growth of the laser technology market depends not only on the growing demand for such technologies, but also on their continuous improvement, research leading to the development of more advanced laser systems and their components is relevant and of practical value.

The Object of Research

Piezoelectric ringing suppression in Pockels cells based on potassium dideuterium phosphate (DKDP) and beta barium borate (BBO) crystals.

The Aim of the Thesis

To develop a method as well as high voltage pulse generator for active piezoelectric ringing suppression.

Tasks of the Thesis

1. To investigate the influence of Pockels cell piezoelectric ringing on the dependence of the contrast ratio on the duration and frequency of high voltage pulses.
2. To develop and simulate the active piezoelectric ringing suppression in Pockels cell method.
3. To develop a high voltage pulse generator and, using it, to experimentally investigate the active piezoelectric ringing suppression method in Pockels cells.

Research Methodology

Analytical methods, simulation and experimental research are applied in this work. The analysis of crystal strains of Pockels cells was performed using developed mathematical models for “Autodesk Nastran In-CAD” and “LabVIEW” software. Experimental studies were performed using a developed high voltage pulse generator and a measurement stand for the study of contrast ratio of Pockels cells. Pulse generator and oscilloscope control algorithms were implemented in “LabVIEW” software.

Scientific Novelty of the Thesis

1. The proposed method of the study of the dependence of the contrast ratio of Pockels cell on the duration and frequency of high voltage pulses allows to observe areas of low contrast ratio caused by piezoelectric ringing.
2. A new high voltage pulse generator has been developed for the control of Pockels cells, with shorter edges compared to the known high voltage pulse generators of this topology.

3. A new active piezoelectric ringing suppression method for Pockels cells has been developed.

Practical Significance of the Research Findings

The obtained dissertation results can be applied in the development of laser systems which uses Pockels cells. Research results will be used in EKSMA Optics, UAB to develop modern Pockels cells and control electronics prototypes. The results of the research, achieved in the doctoral process, were applied in the implementation of the project “The development of prototype of pulse picker suitable for selection of synchronized pulse trains from continuously pumped high repetition rate ultrashort pulse lasers”. No. TPP-01-048, (2017–2018), carried out by the high-tech company Optolita (EKSMA Optics, UAB) together with the Laser Research Center of Vilnius University. The project was part of the programme’s technological development projects TPP-01, funded by the Science, Innovation and Technology Agency.

Defended Statements

1. Proposed method for the study of the dependence of the optical contrast of Pockels cells on the duration and frequency of high voltage pulses allows to observe areas of low contrast ratio caused by piezoelectric ringing from 1 kHz to 1 MHz frequency and 130 ns to 5 μ s duration.
2. Using burst of short duration high voltage pulses to control the Pockels cell, instead of single long duration pulse, the acoustic waves induced by the edges of positive and negative pulses cause destructive interference which can be used to achieve active piezoelectric ringing suppression.
3. The developed high voltage pulse generator for Pockels cell control allows to generate pulses with a edge duration of 3.4 and 7.6 ns, when the pulse amplitude is 1.9 and 2.9 kV respectively, and capacity of the Pockels cell is 6 pF.
4. The developed active piezoelectric ringing suppression method, based on a sequence of short duration high voltage pulses, allows to reduce the piezoelectric ringing amplitude of Pockels cells with potassium dideuterium phosphate crystals 5 times compared to long continuous high voltage pulse.

Approval of the Research Findings

Nine articles are published on the subject of dissertation: 6 in scientific journals included in *Clarivate Analytics Web of Science* database, 2 in other scientific journals and 1 in conference proceedings.

Dissertation research results have been announced in 12 scientific conferences, including 7 national and 5 international conferences.

The Structure of the Dissertation

The dissertation consists of introduction, three chapters, general conclusions, list of references, author’s publications on the subject of dissertation.

The total scope of dissertation – 113 pages (without annexes), 30 indexed equations, 65 pictures, 2 tables, and 143 references have been used.

1. Overview of the Principle and Problems of Pockels cells

The high-power laser pulses required for material processing are generated using quality modulation (Q-switching). The quality of a laser system is defined as the ration between the energy stored in the optical resonator and the energy lost during one cycle (Koechner 2006). The quality of the laser system is reduced in order to store energy in the active medium while avoiding emission. When the quality of the laser system becomes high the stored energy is emitted in short duration pulse (Koechner 2006). Only a few active Q-switching topologies are applicable to high power laser systems: acousto-optic and electro-optic (Svelto 2010; Eichler et al. 2018; Koechner 2006; Träger 2012; Liu et al. 2015).

The property of any optical modulator is the ability to let through or shut out the laser beam that travels through the modulator. The measure of this property for the electro-optic modulators is contrast ratio; for the acousto-optic modulators – diffraction efficiency. Electro-optic modulators contrast ratio varies from 1000:1 to 2000:1 (Zhang et al. 2017; Bergmann et al. 2015) and acousto-optic modulators diffraction efficiency from 70 to 91% (Donley et al. 2005; Wu et al. 2017; Lu et al. 2017; Hakiri et al. 2019; Antonov 2016). An essential parameter of optical modulators is the rise and the fall time of the modulator. The rise and fall time of electro-optical modulators can reach 10 ns (Giesberts et al. 2018; de Groote et al. 2015) and it varies from 200 ns down to 56 ns for acousto-optic modulators (Wu et al. 2017; El-Sherif et al. 2015). Electro-optical modulators based on the Pockels effect are called Pockels cells. The Pockels cell is composed of a dielectric nonlinear optical crystalline material with optical anisotropy and electrodes attached to the sides of the crystal. Supplying high voltage to the electrodes creates an electric field in the crystal, which change ordinary and extraordinary refractive indices of the material. Change in refractive indices induce change in the polarization of the laser beam propagating through the Pockels cell. The voltage applied to the Pockels cell is determined by the type, material of the Pockels cell as well as optical scheme. Voltage required to achieve $\Delta\varphi = \pi$ phase shift between ordinary and extraordinary waves are called half-wave voltage. The half-wave voltage of the longitudinal type Pockels cells usually ranges from 4 to 10 kV (Dorrer 2014). The half-wave voltage of the transverse type Pockels cells usually ranges from 1 to 8 kV (Li 2017; Ionin et al. 2017). The crystals used in Pockels cells have piezoelectric properties which, if exited, influence optical properties of the crystal. Therefore the electro-optical coefficient of the crystal is not constant and consists of three phenomenon: the influence of the electric field-induced birefringence, the change in the distance of light propagating through the crystal due to piezoelectric displacement, and the photoelastic phenomenon due to piezoelectric stresses (Takeda et al. 2012). The polarization changes caused by these phenomena are known as piezoelectric ringing. Piezoelectric ringing has a high negative impact on the main parameter of the Pockels cell – contrast ratio.

Various topologies of high voltage pulse generators (Pockels cell drivers) have been used for the control of the Pockels cells: high frequency triodes (Bado et al. 1998), krytrons (Hyer et al. 2008; Hyde et al. 1977), thyratrons (Barbosa et al. 2007; Barbosa et al. 2008), discharge (Essmann et al. 2018; Kimura 2017) and drift-step-recovery diodes (Kesar et al. 2016). Each of the topologies has its advantages and disadvantages (Jiang

et al. 2004). Two topologies are the most commonly used for high voltage pulse generators: MOSFET and avalanche bipolar transistors. In these topologies, the transistors are connected in series to distribute high voltage stress.

Avalanche bipolar transistors are usually combined with a Marx generator topology and feature a very short rising edge of high voltage pulse from 7 ns down to 240 ps (Krishnaswamy et al. 2007; Xuelin et al. 2010; Oak et al. 1991; Tamuri et al. 2009; Rai et al. 1994; Dharmadhikari et al. 1996; Ding et al. 2015; Bishop et al. 2006; Nunnally et al. 2011; Gao et al. 2017; Shen et al. 2020; Yan et al. 2020; Rao et al. 2019; C. Li et al. 2017). An overview of the evolution of this topology is provided in one of the articles (Li et al. 2018). However, this topology features a long duration falling edge that exceeds rising edge duration by more than 10 times. Combining the topology of avalanche bipolar transistors with other topologies square wave high voltage pulses have been demonstrated. Implementing the topology of avalanche bipolar transistor with grounded coplanar waveguide terminated by low resistance load ($47\ \Omega$) shows that a 4 kV amplitude 3.6 ns pulse with edges of 239 ps can be achieved (Bishop et al. 2006). High voltage pulses up to 14 kV amplitude have been demonstrated by applying a pulse combination topology (J. Li et al. 2017). However, high voltage pulse generators based on the avalanche bipolar transistors topology only operate at low frequencies and at a fixed pulse duration. Highest frequency achieved with this type of pulse generator is 200 kHz (Krishnaswamy et al. 2007). Due to the low reliability of avalanche transistors (Bishop et al. 2006; Oak et al. 1991; Yan et al. 2020) it is recommended to select them by using burn-in procedure (Oak et al. 1991). Recent research show that by applying auxiliary triggering topology the service life of avalanche bipolar transistors can be extended (Yan et al. 2020; Shen et al. 2020).

The topology of GaN FET transistors is being intensively developed in the field of power electronics. This topology increases the power density while also integrating gate controller, which allows extremely high switching speeds to be achieved by reduction of parasitic capacitances and inductances (Amano et al. 2018). They outperform other high voltage transistor topologies due to significantly lower drain-source resistance (Alharbi et al. 2017; Roig et al. 2017; Shah et al. 2018). However, the maximum drain-source voltage of GaN FET transistors is up to 600 V, and the series connection of the transistors for high voltage stress distribution is complicated by the low internal capacity of these transistors (Roig et al. 2017).

Topology based on serial connection of MOSFET transistors demonstrate high voltage pulses up to several MHz forming high voltage pulses with edges shorter than 30 ns (Rutten et al. 2007; Xu et al. 2017; Baker et al. 1993; Jiang 2007; Sundararajan et al. 2004; Keith et al. 2000; Kim et al. 2018). This high voltage pulse generation topology allows to easily adjust pulse duration. High voltage pulses of 2 kV as short as 12 ns duration have been demonstrated with MOSFET transistor series connection combination with full-bridge topology (Kim et al. 2019). In power electronics Silicon carbide (SiC) MOSFETs outperform widely used silicon (Si) transistors in electrical, thermal and mechanical properties. The property of SiC material to withstand up to 10 times stronger electric field has led to the fact that the internal resistance of these MOSFET transistors can be reduced up to 1000 times compared to Si material-based MOSFET transistors (Anon 2014). Due to the smaller size of the SiC MOSFET chip, the internal capacitance

(input capacitance C_{iss} , output capacitance C_{oss} and reverse transfer capacitance C_{rss}) is significantly reduced. Therefore, SiC MOSFETs demonstrates short duration edges (high dI/dt and dV/dt) (She et al. 2017; X. Li et al. 2015). The inductances source L_s , drain L_d and gate L_g of SiC MOSFET transistor must be reduced to avoid overshoot caused by fast transition edges. A typical internal L_s value is few nH (Mo et al. 2013). Using bare die MOSFET mounted on ceramics reduces parasitic inductance and achieves switching speeds of up to 96 V/ns without significant overshoots (Li et al. 2019; Guo et al. 2015). Using this method and optimizing the gate controller, the SiC MOSFET transistor up to 200 V/ns switching speed was demonstrated (Kreutzer et al. 2016; Kreutzer et al. 2015).

The only high voltage pulse generator topology with variable pulse duration, capable of MHz frequency operation and to deliver pulses with few ns edge duration is a series connected MOSFET topology. For these reasons, a high voltage pulse generator based on this topology was developed for the active piezoelectric ringing suppression for Pockels cells.

2. Investigation of the Contrast Ratio of Pockels Cell on the Duration and Frequency of High Voltage Pulses

In the author's publications, a stand for measuring the dependence of the optical contrast of a Pockels cell on high voltage pulse duration and frequency has been proposed (Vengelis et al. 2019; Sinkevicius et al. 2018; Sinkevičius et al. 2018; Sinkevicius et al. 2019; Sinkevicius et al. 2017; Sinkevicius et al. 2020). The developed measurement stand allows to investigate the optical response of the Pockels cell at high voltage pulses duration from 130 ns to 5 μ s and at frequencies up to 1 MHz. The author's algorithm developed in "LabVIEW" (National Instruments, United States, 2016) programming environment was prepared for automated measurement.

Two different sizes of BBO Pockels cell crystals were used in the investigation of the dependence of the contrast ratio of the Pockels cell on the duration and frequency of high voltage pulses: $3 \times 3 \times 25$ mm and $4 \times 4 \times 20$ mm. The results of the measurement of Pockels cells with two sizes of BBO crystals are presented in the form of a matrix in Figure S2.1. The value of the inverse contrast ratio of the Pockels cell is indicated by color pallet. Many resonant frequencies at different high voltage pulse durations were detected during the measurements. The suppression of resonant conditions can be observed when proper high voltage pulse duration is selected.

The results of measuring the dependence of the contrast ratio on the duration and frequency of high voltage pulses showed that the resonant frequencies shift to lower frequency range by 23–25% when BBO Pockels cells with crystal dimensions are changed from $3 \times 3 \times 25$ mm (Figure S2.1 part a) to $4 \times 4 \times 20$ mm (Figure S2.1 part b). The resonant frequencies observed during the experiment support the theoretical calculations results using a standing wave resonance condition as well as numerical simulations using finite element method software (Autodesk Nastran In-CAD). Theoretical calculations are used to identify the directions of acoustic wave resonances in the crystal.

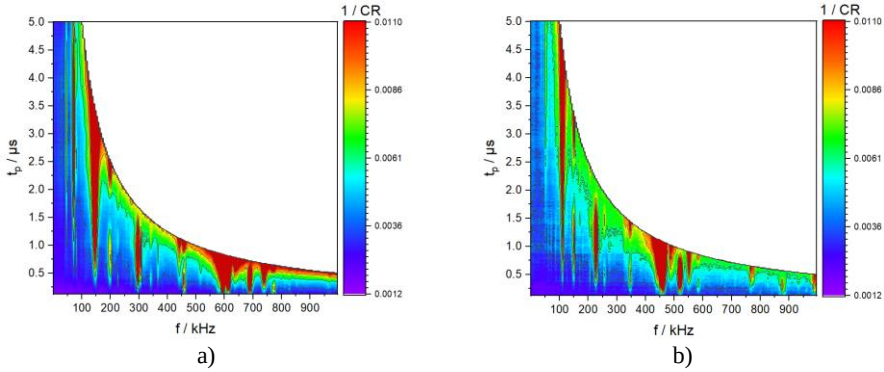


Fig. S2.1. Dependence of the optical contrast of a Pockels cell on the duration and frequency of high voltage pulses when the dimensions of the BBO crystal are: a) $3 \times 3 \times 25$ mm, b) $4 \times 4 \times 20$ mm

Resonances of acoustic waves propagating parallel to the optical axis of the crystal (z direction) are detected at frequencies of 620 kHz, 310 kHz, 205 kHz, 156 kHz when $3 \times 3 \times 25$ mm crystal is used and 464 kHz, 232 kHz, 154 kHz, 115 kHz when $4 \times 4 \times 20$ mm crystal is used. When the Pockels cell with crystal dimensions of $3 \times 3 \times 25$ mm is supplied with 310 kHz and 205 kHz high voltage pulses and $4 \times 4 \times 20$ mm – 232 kHz and 154 kHz, an improvement in contrast ratio is observed when certain pulse durations are used. Highest contrast ratio is observed when duration is $1.6 \mu\text{s}$ in the case of $3 \times 3 \times 25$ mm crystal and $2.15 \mu\text{s}$ in the case of $4 \times 4 \times 20$ mm crystal. These durations are equivalent to the fundamental resonance frequency of acoustic waves traveling parallel to optical axis (z direction) 620 kHz and 464 kHz, respectively. When $3 \times 3 \times 25$ mm crystal is used resonant frequencies of acoustic waves propagating in different directions are close to each other at 300–310 kHz, and overlap when $4 \times 4 \times 20$ mm crystal is used at 232 kHz. Resonances of acoustic waves propagating parallel to the electric field are observed at 115 kHz and 232 kHz frequency with $3 \times 3 \times 25$ mm and $4 \times 4 \times 20$ mm crystals respectively.

It can be seen that when Pockels cell with BBO crystal of $4 \times 4 \times 20$ mm dimensions are used (Figure S2.1 part b) the resonant frequencies are observed at 765, 876 and 988 kHz. These are caused by the match of the higher frequency resonance harmonics of which occur in different directions. These resonant frequencies were not observed in a study of BBO Pockels cell with crystal dimensions of $3 \times 3 \times 25$ mm (Figure S2.1 part a) because these occur outside the measured frequency range (above 1 MHz). From the measurement results presented in Figure S2.1, it can be seen that the resonance of acoustic waves formed at the same frequency in several direction has a significant impact on the contrast ratio of the Pockels cell. Passive suppression of acoustic waves propagating in parallel to the direction of electric field was implemented inside the Pockels cell. The crystal of the Pockels cell was attached to the electrode using adhesive with a matched acoustic impedance. The results of BBO Pockels cell with crystal dimensions of $4 \times 4 \times 20$ mm using proposed acoustic wave suppression method are shown in Figure S2.2.

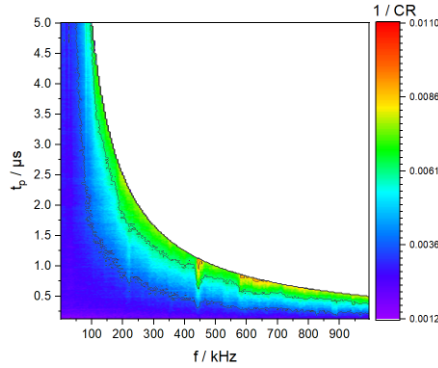


Fig. S2.2. Optical contrast dependence of Pockels cell with BBO crystal with dimensions of $4 \times 4 \times 20$ mm on high voltage pulse duration and frequency, when passive suppression is applied

The results presented in Figure S2.2 show that allowing the acoustic wave to propagate to the electrode avoids the previously observed resonant conditions. The proposed solution does not require major design changes and can therefore be widely applied.

Pockels cells with DKDP crystal show significantly higher amplitude of piezoelectric ringing compared to the BBO crystals. When single high voltage pulse is supplied to the DKDP Pockels cell, piezoelectric ringing can be clearly observed. In the investigation of the optical response of a DKDP Pockels cell (crystal dimensions of $\varnothing 12 \times 24$ mm) on the duration of a high voltage pulse, we observe changes of the amplitude of piezoelectric ringing during and after a high voltage pulse (Figure S2.3).

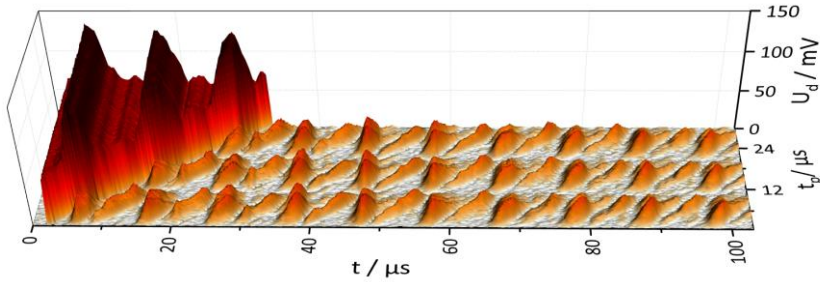


Fig. S2.3. Pockels cell with DKDP crystal with dimensions of $\varnothing 12 \times 24$ mm optical response oscillograms at different high voltage pulse widths

From the obtained results, it can be seen that piezoelectric ringing is suppressed when high voltage pulse duration is equal to multiple of $10 \mu\text{s}$. In this case acoustic waves caused by the falling edge of the high voltage pulse are at the opposite phase compared to the acoustic waves generated by the rising edge of the high voltage pulse. Destructive interference of the acoustic waves occurs. This phenomenon of active piezoelectric ringing

suppression was also observed with BBO Pockels cells (Figure S2.1). The experimental investigation of piezoelectric ringing distribution in the Pockels cell have shown that 10 μs duration is equal to the period of the acoustic wave propagating perpendicular to the electric field (Giedrius Sinkevicius et al. 2020). Impact of acoustic waves propagating in different directions can be observed in analysis of piezoelectric ringing caused by single edge of the high voltage pulse (Figure S2.4).

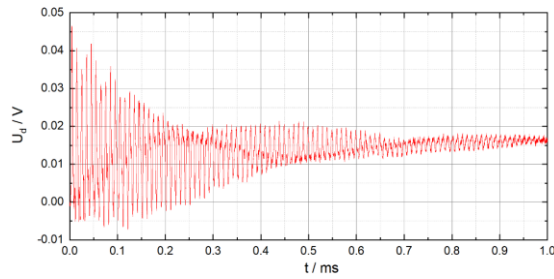


Fig. S2.4. Optical response pulsations of a Pockel cell with $\varnothing 12 \times 24$ mm DKDP crystal caused by piezoelectric ringing introduced by the high voltage pulse rising edge

The results presented in Figure S2.4 show that piezoelectric ringing in DKDP Pockels cells will decrease down to 5% after 1 ms. It can be seen that steady state value after 1 ms is achieved higher than at the start of the oscillation. From this we can conclude that the voltage of the short (~ 100 ns) and long duration (few ms) high voltage pulses would have to be different amplitudes to achieve same amplitude of intensity. We observe that the piezoelectric ringing induced by single edge of high voltage pulse consists of several frequency components. Acoustic waves which propagate perpendicular to the electric field are observed in modulation period of 10 μs while acoustic waves which propagate parallel to the electric field can be observed in modulation period of 49 μs (Figure S2.4).

Due to the intense piezoelectric oscillations of the DKDP Pockels cell a passive acoustic wave suppression, demonstrated with the BBO Pockels cell, will not be as effective. Therefore, we develop a high voltage pulse generator which will be used to achieve active piezoelectric ringing suppression.

3. Active Piezoelectric Ringing Suppression in Pockels Cells and Development of a Dedicated High Voltage Pulse Generator

The high voltage pulse generator is the power electronics device that is capable to supply a high voltage pulse to the Pockels cell. The block diagram of developed high voltage pulse generator is presented in Figure S3.1.

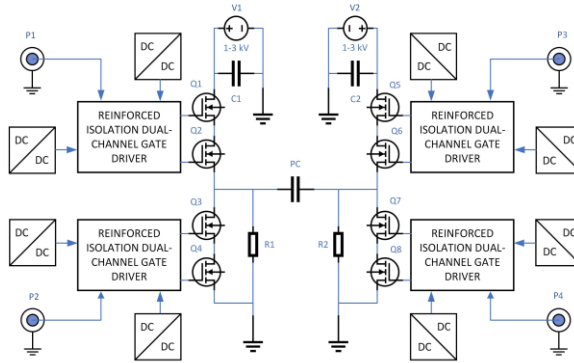


Fig. S3.1. Block diagram of the high voltage pulse generator

The developed high voltage pulse generator uses full-bridge topology. Both sides of the bridge are galvanically isolated from low voltage control circuit. The SiC MOSFET transistors with 1.7 kV drain-source breakdown voltage were used. Two transistors were connected in series on each side of the bridge to share voltage stress of up to 3.4 kV. However, high voltage pulse generator was tested up to 3 kV output pulse, due to overshoot which is caused by parasitic inductance.

Isolated dual channel gate drivers with a breakdown voltage of up to 7.5 kV rms and isolated DC-DC converters with a breakdown voltage of up to 6.4 kV were used for high voltage galvanic isolation. Isolated gate drivers and DC-DC converters with small input to output capacitance devices have been chosen, as high dV/dt would cause common-mode-transient current through these capacitances. The shortest duration high voltage pulses generated by the developed high voltage pulse generator are presented in Figure S3.2.

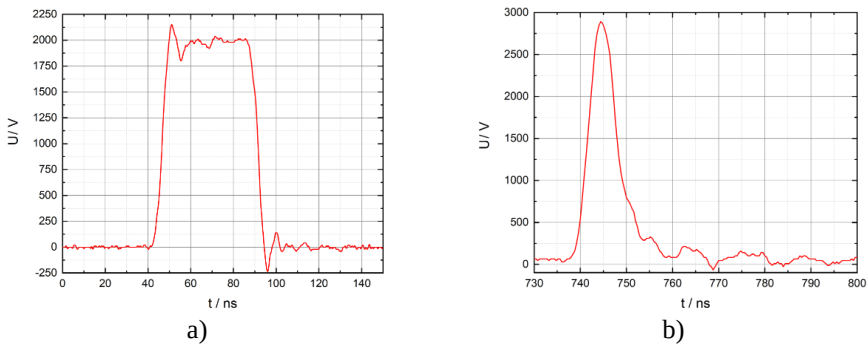


Fig. S3.2. Shortest pulse generated: a) by one of the arms; b) by whole high voltage pulse generator

The minimum duration of high voltage pulse generated by one arm of a high voltage pulse generator is 45 ns (Figure S3.2 part a). It can be seen that the rising and falling edges of the pulse feature high dV/dt and dI/dt , so even a small value of the parasitic inductance cause voltage overshoot.

The shortest generated high voltage pulse of a high voltage pulse generator is given in Figure S3.2 part b with a duration of 10 ns. A pulse of such short duration is formed by using the full-bridge topology when synchronized high voltage pulses of different durations are formed on each of the arms. The potential difference allows the Pockels cell to be affected by a very short duration high voltage pulse. The oscillogram in part b of Figure S3.2 shows that the falling edge of generated high voltage pulse is 2 times longer than the rising edge. This is due to overshoot occurrence at the rising and falling edges of the high voltage pulse which interference causes this phenomenon.

Piezoelectric ringing suppression simulation of the Pockels cell is proposed based on the interaction of acoustic waves caused by high voltage transition. The timing diagrams of the control pulses of the high voltage pulse generator together with the result of a simplified simulation of the acoustic waves induced in the Pockels cell is presented in Figure S3.3.

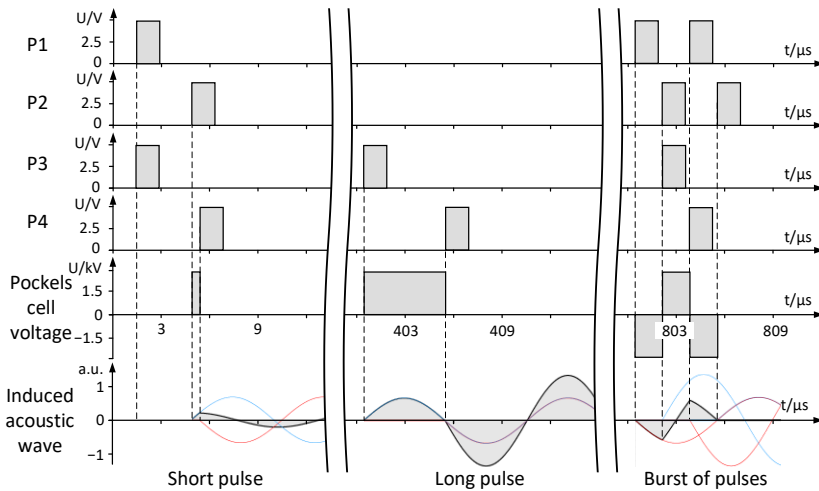


Fig. S3.3. Timing diagram of the high voltage pulse generator. Acoustic wave caused by the rising edge of the high voltage pulse is marked in blue, caused by the falling edge – in red and resulting wave in grey

In the Pockels cell low frequency acoustic waves are generated when transition of voltage occurs. Initial phase of acoustic wave is voltage polarity dependent. By using developed high voltage pulse generator, burst of pulses can be arranged to minimize amplitude of the induced acoustic waves (Figure S3.3). DKDP Pockels cell with crystal dimensions of $\varnothing 12 \times 24$ mm was supplied with a burst of high voltage pulses and optical response is presented in Figure S3.4.

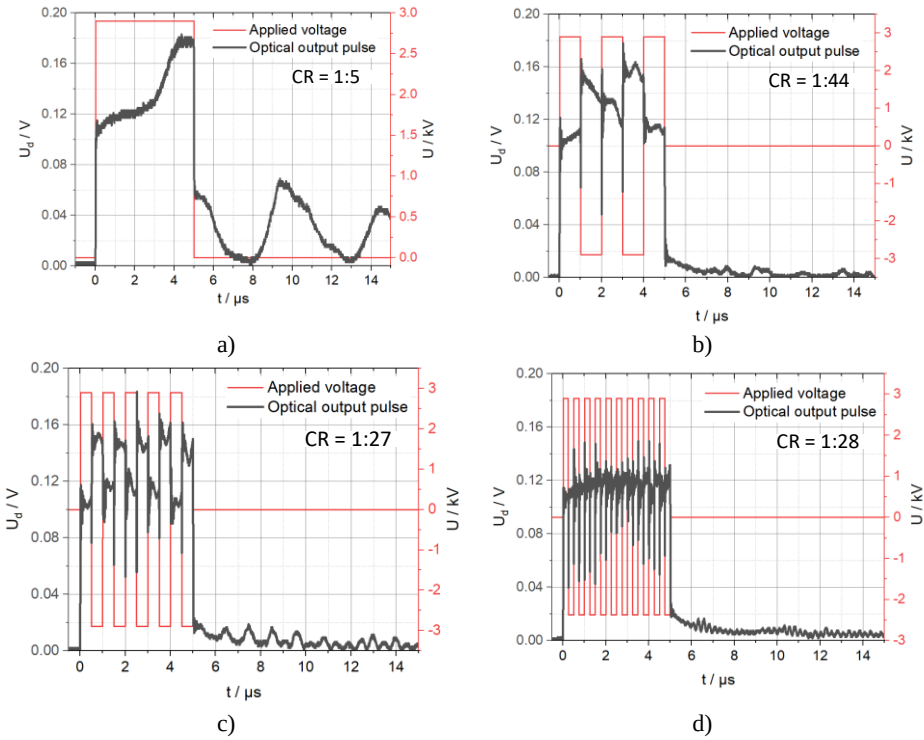


Fig. S3.4. Optical response of DKDP Pockels cell: a) with no active piezoelectric suppression; with active piezoelectric ringing suppression using burst of b) 1 μ s, c) 0.5 μ s, d) 0.25 μ s pulses. In case d) variations of the intensity during the burst of pulses have been compensated by adjusting the voltage of the power sources

The research results presented in part a of Figure S3.4 show that when a Pockels cell is supplied with high voltage pulses of 5 μ s duration, high amplitude piezoelectric ringing occurs which distorts the optical response of the Pockels cell. After a high voltage pulse, the optical response does not decrease to a steady state, but experiences pulsations that reach up to 30% of the peak intensity value. Optical response of the DKDP Pockels cell, when the active piezoelectric ringing suppression is provided by using a burst of short duration pulses, is presented in parts b, c and d of Figure S3.4. It can be seen that the amplitude of the optical response varies during high voltage pulses in parts b and c of Figure S3.4. This is due to the fact that the polarization of the laser beam propagation through the Pockels cell is rotated at different angles depending on the polarity of the high voltage pulse. This phenomenon can be compensated by adjusting the amplitude of the output voltage of V1 or V2 supplies (Figure S3.1). The best result was obtained when the amplitude of the negative voltage pulse was reduced by 18% (Figure S3.4 part d). In this case pulsations of the amplitude during the burst decreased up to 3 times.

The piezoelectric ringing was suppressed when DKDP Pockels cell was supplied with burst of 1 μ s duration pulses (Figure S3.4 part d). When the duration of high voltage pulses in a burst was 0.5 μ s, the higher frequency components of piezoelectric ringing was

excited in DKDP Pockels cell (Figure S3.4 part c). However, excited piezoelectric ringing amplitude is 5 times smaller compared to the ringing induced by the 5 μ s duration high voltage pulse (Figure S3.4 part a).

Measurement results presented in Figure S3.4 show significant decrease in piezoelectric ringing amplitude using proposed active piezoelectric ringing suppression method.

General Conclusions

1. The proposed method for the investigation of the dependance of the contrast ratio of the Pockels cell on the frequency and duration of high voltage pulses showed that in the frequencies from 1 kHz to 1 MHz, selecting the appropriate duration of pulses can improve the contrast ratio 3 times.
2. By using passive suppression of acoustic waves propagating in the direction of the electric field in Pockels cells based on beta barium borate crystals, contrast ratio was increased by 10 times at resonant frequencies.
3. Active piezoelectric ringing suppression method based on burst of short duration high voltage pulses, instead of single long duration pulse, increases contrast ratio of the Pockels cell based on potassium dideuterium phosphate crystals from 3 to 8.8 times.
4. A high voltage pulse generator developed to control a Pockels cell can produce a burst of pulses to achieve active piezoelectric ringing suppression. The minimum pulse duration used in burst is 45 ns, and the rising edge duration is 3.4 and 7.6 ns when the pulse amplitude does not exceed 1.9 kV and 2.9 kV.

Priedai³

A priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija

B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Giedrius SINKEVIČIUS

PJEZOELEKTRINIŲ VIRPESIŲ SLOPINIMO
POKELSO NARVELIUOSE TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
elektros ir elektronikos inžinerija (T 001)

RESEARCH OF PIEZOELECTRIC RINGING
SUPPRESSION IN POCKELS CELLS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Electrical and Electronic Engineering (T 001)

2021 10 08. 11,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Leidinio el. versija
<https://doi.org/10.20334/2021-045-M>
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
Spausdino BĮ UAB „Baltijos kopija“,
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius

A priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija

B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos