

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Kvantinės elektronikos katedra

Justina Kalvelytė

POKELSO ELEMENTŲ, NAUDOJAMŲ AUKŠTO PASIKARTOJIMO DAŽNIO LAZERINĖSE
SISTEMOSE, SAVYBIŲ TYRIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos studijų programa

Studentė

Justina Kalvelytė

Darbo vadovas

Prof. dr. Mikas Vengris

Recenzentas

doc. dr. Rytis Butkus

Katedros vedėjas

Prof. Habil. dr. Valdas Sirutkaitis

Vilnius 2017

Turinys

TURINYS	2
ĮVADAS	3
1. ELEKTROOPTINIŲ ELEMENTŲ TAIKYMAS	5
1.1 FAZĖS MODULIATORIAI	5
1.2 AMPLITUDĖS MODULIATORIAI	6
1.3 POLIARIZACIJOS MODULIATORIAI	7
2. POKELSO ELEMENTUOSE PASIREIŠKIANČYS EFEKTAI	10
2.1 PJEZOELEKTRINIS EFEKTAS	10
2.2 ELEKTROOPTINIS EFEKTAS	10
2.3 POKELSO EFEKTAS	12
2.4 FOTOELASTINIS EFEKTAS	13
2.5 AKUSTINIŲ BANGŲ SUSIDARYMAS IR SKLIDIMAS KIETUOSE KŪNUOSE	13
3. MEDŽIAGOS NAUDOJAMOS ELEKTROOPTINIUOSE MODULIATORIUOSE	16
3.1 BETA – BARIO BORATAS ($B-BaB_2O_4$)	16
1.1 KALIO TITANILO FOSFATAS ($KTiOPO_4$)	17
1.2 RUBIDŽIO TITANILO FOSFATAS ($RbTiOP_4$) IR KALIO-RUBIDŽIO TITANILO FOSFATAS ($K_{x-1}Rb_xTiOP_4$)	18
4. ELEKTROOPTINIŲ MODULIATORIŲ TYRIMAS	19
4.1 EKSPERIMENTO SCHEMA IR TIRIAMOSIOS MEDŽIAGOS	19
5. EKSPERIMENTŲ REZULTATAI IR APTARIMAS	24
IŠVADOS	39
LITERATŪRA	40
PRIEDAS	42
SANTRAUKA	46
SUMMARY	47

Įvadas

Sparčiai besivystant lazerių pramoniniams taikymams, reikia vis tiksliau valdomų, didesnės vidutinės galios ir didelį pasikartojimo dažnį turinčių lazerinių sistemų. Naudojant tokias sistemas, išauga medžiagų apdirbimo greičiai, kas yra vienas iš aktualiausių sistemos parametru, taikant tokius lazerius pramonėje.

Didelio pasikartojimo dažnio lazerinėse sistemose naudojami elektrooptiniai modulatoriai. Jų veikimo principas yra paremtas Pokelso efektu. Tai efektas, kai prie kristalo prijungus elektrinį lauką, jame indukuojamas dvejetainis lūžis – kristalas ima veikti kaip fazinė plokštelė, leidžianti pasukti tiesiškai poliarizuotos šviesos poliarizaciją (pusės bangos ilgio plokštelė) arba pakeisti tiesiškai poliarizuotos šviesos poliarizaciją į apskritiminę (ketvirčio bangos ilgio plokštelė). Įtampa, reikalinga poliarizacijai pasukti vyrauja nuo kelių šimtų iki kelių tūkstančių voltų ir tai viena iš priežasčių kodėl anksčiau buvo sunku pasiekti didelius pasikartojimo dažnius. Šiuolaikiniai aukštos įtampos generatoriai gali moduluoti kV eilės dydžio signalus 1 MHz ar dar didesniu dažniu. Moduliacijos dažnį riboja elektroniniuose raktuose sklaidoma galia ir perjungimo tranzistorių aušinimo galimybės. Pasiekus 1 MHz dažnį prie ~3 kV įtampos, toliau jį didinti pasidaro nepraktiška. Todėl norint pasiekti dar didesnius moduliavimo dažnius reikia surasti Pokelso terpes, kurių įtampa reikalinga poliarizacijai pasukti būtų mažesnė. Viena iš tokių medžiagų – Kalio-rubidžio titanilo fosfatas (KRTP). Šios medžiagos maža ketvirčio bangos ilgio įtampa leidžia peržengti 1 MHz pasikartojimo dažnio ribą [1, 2].

Pjezoelektrinis efektas – tai vienas iš neigiamai pasireiškiančių reiškinių Pokelso elementuose. Dėl deformacijų, atsirandančių prijungus prie kristalo elektrinį lauką, kristale sukuriama ultragarso bangos. Jei išorinio lauko dažnis sutampa su kristalo savųjų virpesių dažniais, kristalo virpesių amplitudė smarkiai išauga, o deformacijos sąlygoti elektriniai laukai susideda su išoriniu elektriniu lauku. Dėl to modulatorius nustoja veikti ties ketvirčio (pusės) bangos ilgio įtampa ir blogėja jo kontrastas. Dar vienas neigiamas efektas yra fotoelastinis reiškinys. Jis sukelia optinės anizotropijos atsiradimą skaidrioje medžiagoje. Dėl šio efekto yra prarandamas lazerinės sistemos impulso kontrastas. Norint išvengti tokių efektų ant kristalų yra dedami išoriniai akustinių bangų sugėrikiai.

Šio darbo tikslas yra ištirti Pokelso elementų, pagamintų iš skirtingų kristalų, taikymo galimybes aukšto pasikartojimo dažnio lazerinėse sistemose.

Tiksliui pasiekti suformuluoti tokie darbo uždaviniai:

- išsiaiškinti iš skirtingų medžiagų pagamintų Pokelso elementų dažnines charakteristikas lemiančius fizikinius reiškinius,
- dviem metodais nustatyti ir palyginti skirtingų Pokelso elementų dažnines charakteristikas,
- pademonstruoti Pokelso elementą veikiančią didesniu nei 1 MHz pasikartojimo dažniu ir
- suformuluoti būdus, kuriais galima toliau pagerinti aukšto dažnio Pokelso elementų veikimo charakteristikas.

1. Elektrooptinių elementų taikymas

Pasitelkdami išorinį elektrinį lauką, elektrooptiniu moduliatoriumi galime valdyti spinduliuotės amplitudę, fazę ir poliarizaciją. Šie moduliatoriai į sistemą įneša mažai nuostolių, yra optiškai atsparūs [3].

1.1 Fazės moduliatoriai

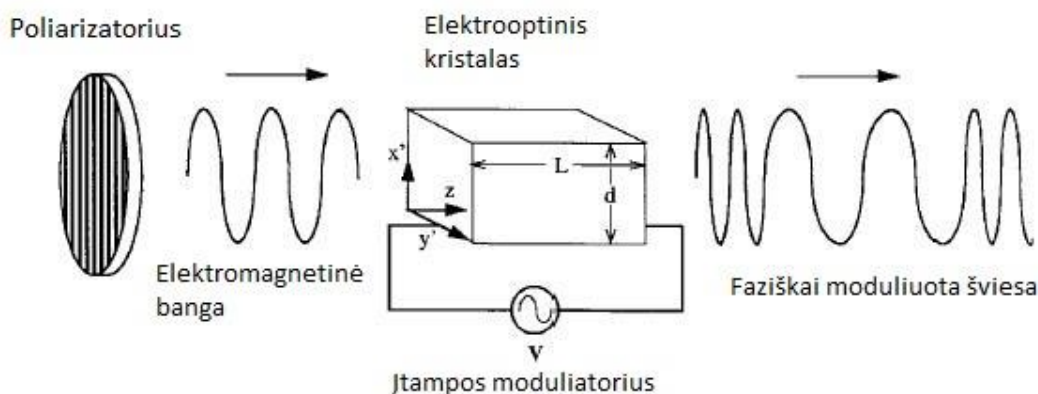
Faziškai moduluotą šviesą, nepakeičiant jos poliarizacijos ir intensyvumo, galime gauti naudodami poliarizatorių kartu su elektrooptiniu kristalu (1 pav.). Norint pakeisti šviesos fazę, įeinančios šviesos poliarizacija turi būti orientuota lygiagrečiai vienai iš optinių ašiu, tuo tarpu prie kristalo pridėta įtampa pasuka kristalo greitąją ir lėtąją ašis optinės ašies atžvilgiu. Prieš patenkant į kristalą elektrinis laukas aprašomas taip:

$$E_{ix'}(t) = E_i \cos \omega t \quad (1.1)$$

Elektrinis laukas praėjęs per kristalą įgauna fazės pokytį ir užrašomas taip:

$$E_o(t) = E_i \cos(\omega t - \Phi) \quad (1.2)$$

Kur $\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{x'} + \Delta n_{x'})L = \phi_o + \Delta\phi_{x'}$, $n_{x'}$ - natūralus lūžio rodiklis, $\Delta n_{x'}$ - lūžio rodiklio pokytis atsiradęs pridėjus elektrinį lauką, ϕ_o ir $\Delta\phi_{x'}$ - natūralus fazės pokytis ir fazės pokytis atsiradęs pridėjus įtampą, L - kristalo ilgis. Fazės pokytis susideda iš dviejų dalių – natūralus fazės kitimas: $\Phi_o = (2\pi/\lambda)Ln_{x'}$ ir elektriškai sukeltas fazės pokytis $\Delta\Phi_{x'} = (2\pi/\lambda)L\Delta n_{x'}$, kur $\Delta n_{x'} \approx \frac{1}{2}n_{x'}^3 rE$, r – elektrooptinis koeficientas.



1 pav. Elektrooptinio fazės moduliatoriaus schema

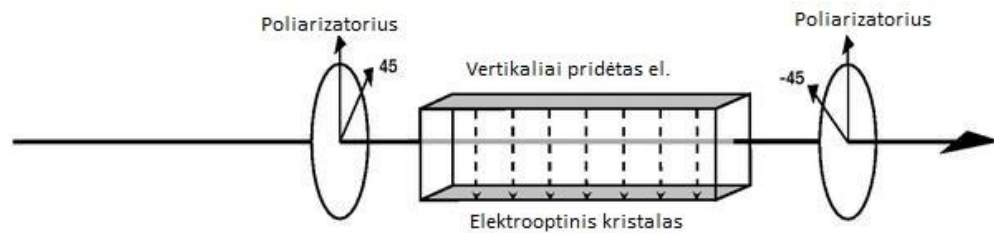
Šie fazės moduliatoriai dažnai yra naudojami rezonansinio dažnio stabilizavimui optiniuose rezonatoriuose [4, 5].

1.2 Amplitudės modulatoriai

Šviesos intensyvumas optinėse schemose gali būti moduluojamas įvairiais būdais: Pokelso elementas patalpintas tarp dviejų sukryžiuotų poliarizatorių, Pokelso elementas patalpintas tarp dviejų lygiagrečių poliarizatorių. Amplitudės modulatoriaus pagrindinis parametras yra pralaidumas T , kuris yra išreiškiamas išėjimo $I_{i\check{s}}$ ir įėjimo I_0 spinduliuotės intensyvumo santykiu:

$$T = I_{i\check{s}}/I_0 \quad (1.3)$$

Viena iš populiariausių amplitudės modulatoriaus schemų yra Pokelso elementas patalpintas tarp dviejų sukryžiuotų poliarizatorių. Tokia schema yra pavaizduota 2 – ame paveiksle.

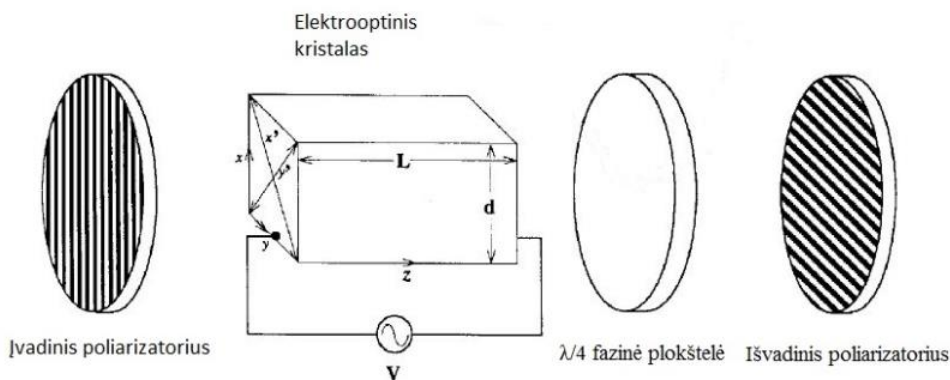


2 pav. Elektrooptinis amplitudės modulatoriaus su sukryžiuotais poliarizatoriais schema

Šviesos poliarizacija prieš moduliatorių yra pasukta 45^0 kampu. Jei prie Pokelso elemento yra prijungta pusės bangos ilgio ($U_{\lambda/2}$) įtampa, tai poliarizacija yra pasukama 90^0 ir pro išvadinį poliarizatorių yra praleidžiama visa atėjusi šviesa. Priešingu atveju, kai prie elektrodų įtampa neprisidėta, tai išvadinis poliarizatorius „užblokuoja“ ateinančią šviesą. Tokiu atveju pralaidumas lygus nuliui. Esant galimybei moduluoti įtampą, galime valdyti šviesos srautą praeinantį pro išvadinį poliarizatorių.

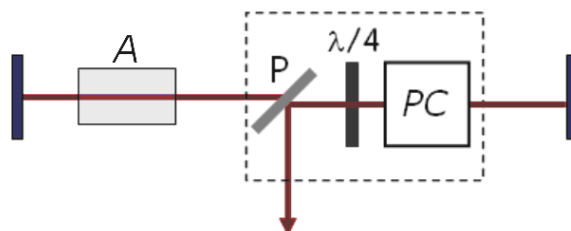
Norint sumažinti valdymo įtampą, schemą galima šiek tiek pakeisti - papildomai pridedant $\lambda/4$ plokštelę (3pav.). Šiuo atveju Pokelso elementui reikalinga įtampa poliarizacijai pasukti yra perpus mažesnė ($U_{\lambda/4}$). Šviesa praėjusi pro Pokelso elementą su įjungta įtampa taps apskritimiškai poliarizuota. Toliau šviesai praėjus pro banginę plokštelę gausime pradinės šviesos poliarizaciją pasuktą 90^0 . Naudojant tokią modulatoriaus schemą esant išjungtai įtampai galima pasiekti tik pusę moduliacijos gylio.

Amplitudės moduliatorius lazerinėse sistemose gali būti panaudojamas, kaip kokybės moduliatorius [6, 7].



3 pav. Elektrooptinio amplitudės moduliatoriaus su $\lambda/4$ plokštele schema

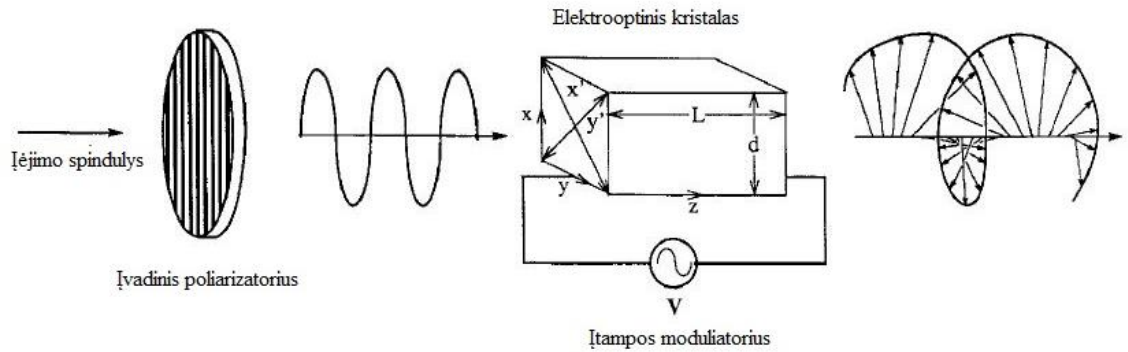
Elektrooptiniai amplitudės moduliatoriai dažnai naudojami kaip optiniai perjungikliai. Tuomet moduliatorius turi dvi pralaidumo būsenas – 100% arba 0%, kurias gali įjungti arba išjungti valdomu elektriniu signalu. Šiuos optinius perjungiklius galima panaudoti kaip impulsų išrinktuvą siekiant iš ultratrumpųjų impulsų voros atskirti tik norimus impulsus [8]. Taip pat šie perjungikliai yra naudojami ir regeneratyviniuose stiprintuvuose įleisti ir išleisti norimus impulsus (4 pav.) [9]. Į rezonatorių yra įleidžiamas impulsas, tuomet Pokelso elementas yra įjungiamas ir impulsas yra „užrakinamas“ rezonatoriuje ir ten būna kol sustiprinamas iki reikiamo laipsnio. Tuomet reikiamu momentu celė yra išjungiamą ir pastiprintas impulsas yra išleidžiamas iš rezonatoriaus.



4 pav. Rezonatoriaus su Pokelso elementu schema. A – lazerinis kristalas, P – poliarizatorius, PC - Pokelso elementas, $\lambda/4$ – fazinė plokštelė

1.3 Poliarizacijos moduliatoriai

Elektrooptinis poliarizacijos moduliatorius gali tapti tarsi įtampa valdoma fazinė plokštelė. Priklausomai nuo netiesinio kristalo tipo ir orientacijos bei pridėto elektrinio lauko krypties, galime užlaikyti fazę atitinkamai pakeičiant šviesos poliarizaciją. Paprasčiausia poliarizacijos moduliatoriaus schema susideda iš dviejų komponentų: įvadinio poliarizatoriaus ir elektrooptinio kristalo (Pokelso elemento). Principinė schema yra pavaizduota 5 – amje paveiksle.



5 pav. Elektrooptinio poliarizacijos modulatoriaus schema

Kristalas orientuojamas taip, kad įeinančio šviesos lauko poliarizacija sudarytų 45^0 kampą tiek su greitąja, tiek su lėtąja kristalo ašimis. Tada galima įsivaizduoti, kad tiesiškai poliarizuota šviesa skyla į dvi statmenas komponentes. Jei šviesa poliarizuota išilgai x ašies ir sklinda išilgai pagrindinei z ašiai, tai sklidimo laukų komponentės bus išreiškiamos šitaip:

$$E_{x'} = E_0 \cos[\omega t - (2\pi/\lambda)n_{x'}z] \quad (1.4)$$

$$E_{y'} = E_0 \cos[\omega t - (2\pi/\lambda)n_{y'}z] \quad (1.5)$$

kur greitoji ir lėtoji ašis yra x' ir y' . Atitinkamai įvedamas ir lūžio rodiklių pokytis:

$$n_{x'} \approx n_x - \frac{1}{2}r_x n_x^3 E = n_x - \Delta n_x \quad (1.6)$$

$$n_{y'} \approx n_y - \frac{1}{2}r_y n_y^3 E = n_y - \Delta n_y \quad (1.7)$$

kur n_x ir n_y yra lūžio rodikliai be pridėtos įtampos. r_x ir r_y yra medžiagos elektrooptiniai koeficientai priklausomai nuo prijungto elektrinio lauko krypties.

Kadangi x ir y kryptimi poliarizuota šviesa per kristalą sklinda skirtingais greičiais, tai fazių skirtumas arba atsilikimas Γ tampa funkcija priklausanti nuo kristalo ilgio:

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{2\pi}{\lambda}(n_{x'} - n_{y'})L \\ &= \frac{2\pi}{\lambda}(n_{x'} - n_{y'})L - \frac{\pi}{\lambda}(r_x n_x^3 - r_y n_y^3)EL = \Gamma_0 + \Gamma_i \end{aligned} \quad (1.8)$$

kur Γ_0 - fazės atsilikimas neveikiant išoriniam elektriniam laukui, o Γ_i – indukuotas fazės atsilikimas esant pridėtam elektriniam laukui, L – terpės ilgis.

Elektrinio lauko amplitudės išėjime gali būti išreiškiamos per fazės atsilikimą:

$$E_{x'} = \cos \omega t \quad (1.9)$$

$$E_{y'} = \cos(\omega t - \Gamma) \quad (1.10)$$

Elektrooptiniai poliarizacijos modulatoriai gali būti panaudojami panašiose schemose kaip ir amplitudės modulatoriai, kur yra naudojamos dvi pralaidumo būsenos – 100% arba 0%.

2. Pokelso elementuose pasireiškiantys efektai

Pokelso elemento veikimui įtaką daro ne tik elektrooptinis efektas, bet ir kiti fizikiniai reiškiniai tokie kaip pjezoelektrinis efektas, akustiniai reiškiniai ir pan. Šiame skyriuje juos aptarsime plačiau.

2.1 Pjezoelektrinis efektas

Pjezoelektriniu reiškiniu vadiname kūno savybę, kai patirdamas mechaninę deformaciją (suspaudimas arba ištempimas) jis kuria elektrinį lauką savo paviršiuje. Šis efektas veikia ir priešingai, t.y. pridėjus prie kūno elektrinį lauką – jis deformuojasi. Pjezoeffektas pasireiškia kristaluose, kurie neturi centro simetrijos. Deformavus kristalą tarp molekulės atomų yra sukuriama elektriniai dipoliai, dėl kurių pasikeičia kristalo struktūra. Medžiagos tūrio vienetą susidaręs dipolinis momentas yra išreiškiamas formule:

$$P_i = d_{ijk}\sigma_{jk}, \quad (2.1)$$

kur P_i yra poliarizacijos vektorius, d_{ijk} – pjezoelektrinis modulis, σ_{jk} – mechaninis įtempimas [10]. Mechaninių įtempimų tenzorius parodo jėgas, kurios veikia deformuotame tampriajame kūne ir yra išreiškiamas kaip išorinės veikiančiosios jėgos ir veikiamo ploto santykis.

Veikiant atvirkštiniam pjezoeffektui ir pridėjus išorinį elektrinį lauką – medžiaga deformuojasi. Jos matmenų pakitimas yra aprašomas santykinė deformacija, kuri aprašoma formule $\varepsilon_{kl} = \Delta l/l$. Ši medžiagos deformacija tiesiogiai priklauso nuo išorinio elektrinio lauko ir susiejama sąryšiu $\varepsilon_{kl} = d_{ijk}E_{i\check{s}}$. Dėl kristalo deformacijų taip pat atsiranda ir lūžio rodiklio pokyčiai, kurie išreiškiami formule:

$$\left(\frac{1}{n^2}\right) = \sum_{j=1}^3 r_{ij}E_j + \sum_{k=1}^3 p_{ik}\varepsilon_j, \quad (2.2)$$

kur r_{ij} – elektrooptinis koeficientas, E_j – išorinis elektrinis laukas, p_{ik} – fotoelastinio koeficiento tenzorius, ε_j – deformacijos tenzorius.

2.2 Elektrooptinis efektas

Lūžio rodiklio kitimas veikiant medžiagą išoriniu elektriniu lauku yra apibūdinamas, kaip elektrooptinis efektas. Nesant išorinio elektrinio lauko, medžiagos teigiamos ir neigiamos elektringos dalelės yra pusiausvyroje, todėl medžiagos atomas su aplinka nesąveikauja. Paveikus kristalą elektriniu

lauku, elektringos dalelės pasislenka, taip sudarydamos dipolinį momentą, dar kitaip vadinamą indukuotu poliarizuotumu \vec{P} . Teigiami krūviai „pasislenka“ elektrinio lauko kryptimi, o neigiami – priešinga.

$$\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E}_{i\check{s}}, \quad (2.3)$$

kur ε_0 - vakuomo dielektrinė skvarba, χ – tiesinis optinis jautris.

Elektriniame lauke, atstumas tarp pasislinkusių krūvių yra tiesiogiai proporcingas pridėtam išoriniam elektriniam laukui $E_{i\check{s}}$. Šios formulės tiesiškumas priklauso nuo išorinio elektrinio lauko santykio su atomo vidiniu elektriniu lauku, kurio vertė yra $\sim 10^8$ V/m. Medžiagą veikiant išoriniu elektriniu lauku, kurio vertė didesnė nei 10^4 V/m, joje pradeda reikštis netiesiniai efektai. Tiesinė ir netiesinės poliarizuotumo dalys atsispindi bendroje poliarizuotumo išraiškoje:

$$P(t) = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E(t) + \varepsilon_0 \chi^{(2)} E(t)^2 + \varepsilon_0 \chi^{(3)} E(t)^3 + \dots, \quad (2.4)$$

kur $\chi^{(2)}$ ir $\chi^{(3)}$ yra netiesiniai optiniai jautriai [11]. Veikiant silpnam elektriniam laukui, medžiagos poliarizuotumas tiesiogiai priklausys nuo $E_{i\check{s}}$.

Dielektrinę medžiagą patalpinus elektriniame lauke, jos paviršiuje atsiras pertekliniai surištieji krūviai, dėl atome atsiradusio elektringų dalelių poslinkio nuo pusiausvyros padėties. Dėl šio efekto, medžiagos viduje susidaro priešingos krypties vidinis elektrinis laukas E_{vid} . Tuomet kiekviename dielektriko taške egzistuos atstojamasis elektrinis laukas, kuris yra lygus išorinio $\vec{E}_{i\check{s}}$ ir vidinio \vec{E}_{vid} elektrinio laukų geometrinei sumai. Jei vienalytis dielektrikas užima visą plotą elektriniame lauke, tai jo atsakomasis elektrinis laukas aprašomas šia lygtimi:

$$\vec{E}_{at} = \frac{\vec{E}_{i\check{s}}}{\varepsilon_s}, \quad (2.5)$$

kur ε_s - santykinė dielektrinė skvarba, kuri susijusi su tiesiniu optiniu jautriu formule $\varepsilon_s = 1 + \chi^{(1)}$.

Santykinė dielektrinė skvarba taip pat susijusi ir su medžiagos lūžio rodikliu sąryšiu $n = \sqrt{\mu_s \varepsilon_s}$, kur μ_s – santykinė magnetinė skvarba, kurios vertė dielektrikams yra artima 1. Tada medžiagos lūžio rodiklis išreiškiamas formule:

$$n = \sqrt{\varepsilon_s} = \sqrt{1 + \chi^{(1)}}, \quad (2.6)$$

Išoriniam elektriniam laukui viršijus vidinio elektrinio lauko vertę prie lūžio rodiklio prisideda netiesinio poveikio lūžio rodiklio dalys. Tuomet lūžio rodiklis išreiškiamas taip:

$$n = \sqrt{1 + \chi^{(1)} + \chi^{(2)}E + \chi^{(3)}E^2 + \dots}$$

$$n = n_0 + \Delta n_1 + \Delta n_2 + \dots, \quad (2.7)$$

kur n_0 yra savasis medžiagos lūžio rodiklis, kai nėra išorinio elektrinio lauko poveikio.

Elektrooptinis reiškiny yra skirstomas į tiesinį ir netiesinį, priklausomai nuo išorinio elektrinio lauko poveikio. Tiesiniu elektrooptiniu efektu yra vadinamas tiesinis lūžio rodiklio kitimas necentrosimetriniuose kristaluose, proporcingai kintant išoriniam elektriniam laukui, t.y. $\Delta n_1 \sim E_{iš}$. Šis efektas kitaip dar yra vadinamas Pokelso efektu. Netiesiniu elektrooptiniu efektu pasižymi centrosimetrinės medžiagos ir dujos bei skysčiai, kuriuose antrosios eilės dielektrinis jautris dėl simetrijos lygus nuliui. Tuomet $\Delta n_2 \sim E_{iš}^2$. Šis efektas dar kitaip vadinamas Kero efektu, tačiau jis pasireiškia pakankamai silpnai, nes tam, kad jo poveikis taptų pastebimas, reikia labai stiprių elektrinių laukų.

2.3 Pokelso efektas

Pokelso efektas pirmą kartą buvo aprašytas 1906 metais, vokiečių fiziko Frederiko Pokelso (vok. Friedrich Pockels). Šis efektas yra tiesinis elektrooptinis efektas, kuris aprašo tiesinį lūžio rodiklio pokytį proporcingą išoriniam elektriniam laukui. Šis efektas pasireiškia tik necentrosimetrinę struktūrą turinčiose medžiagose, kurios taip pat turi $\chi^{(2)}$ netiesiškumą. Lūžio rodiklio pokytis pridėjus elektrinį lauką yra išreiškiamas tenzoriumi [3]:

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right) = \sum_j r_{ij} E_j, \quad (2.8)$$

kur r_{ij} yra ij -tasis elektrooptinis koeficientas. $i = 1, \dots, 6; j = x, y, z = 1, 2, 3$. Matricine forma lygtis išreiškiamas:

$$\begin{pmatrix} \Delta(1/n^2)_1 \\ \Delta(1/n^2)_2 \\ \Delta(1/n^2)_3 \\ \Delta(1/n^2)_4 \\ \Delta(1/n^2)_5 \\ \Delta(1/n^2)_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}, \quad (2.9)$$

kur E_x, E_y, E_z yra pridėto išorinio elektrinio lauko komponentės. Lūžio rodiklio pokytis $\Delta(1/n^2)$ dažniausiai yra 10^{-5} eilės dydis. Šie pokyčiai matematiškai yra aprašomi, kaip perturbacijos, pasikeičia lūžio rodiklio elipsoidas. Po elektrinio lauko poveikio jis aprašomas:

$$(1/n^2)'_1x^2 + (1/n^2)'_2y^2 + (1/n^2)'_3z^2 + 2(1/n^2)'_4yz + 2(1/n^2)'_5xz + 2(1/n^2)'_6xy = 1 \quad (2.10)$$

Ši lygtis tampa paprastesnė jeigu sutapatiname elipsoido x,y ir z ašis su medžiagos kristalografinėmis ašimis X,Y,Z. Tokioje koordinatinių sistemoje lygtis užrašoma taip:

$$(1/n^2)'_1x^2 + (1/n^2)'_2y^2 + (1/n^2)'_3z^2 = 1 \quad (2.11)$$

2.4 Fotoelastinis efektas

Fotoelastinis efektas tai optinės anizotropijos atsiradimas skaidriame kristale dėl mechaninių įtempimų, kitaip sakant tai yra lūžio rodiklio kitimas, medžiagai patiriant mechaninius įtempimus. Šį reiškinį, 1815 metais, pirmasis atrado Deividas Briusteris (ang. Sir David Brewster) [3]. Šis efektas pasireiškia visose medžiagose, nepaisant jų simetrijos. Fotoelastiškumas yra aprašomas ketvirtojo rango tenzoriumi. Anizotropiškas fotoelastinis sąryšis tarp deformacijos ir medžiagos lūžio rodiklio yra aprašomas:

$$\Delta\left(\frac{1}{n_{ij}^2}\right) = \sum_{kl} p_{ijkl} S_{kl}, \quad (2.12)$$

kur n_{ij} yra antro rango lūžio rodiklio tenzorius, S_{kl} – antro rango deformacijos tenzorius ir p_{ijkl} yra ketvirto rango tenzorius apibūdinantis medžiagos elastingumą [12].

Ketvirtojo rango fotoelastingumo tenzorius susideda iš 81 komponentės. Dėl simetriškumo savybių ($\Delta(n_{ij}^{-2}) = \Delta(n_{ji}^{-2})$) komponentių kiekį galima sumažinti iki 36 atlikus tokius pakeitimus:

$$\begin{aligned} jk = 11 \rightarrow 1, & \quad jk = 22 \rightarrow 2, & \quad jk = 33 \rightarrow 3, \\ jk = 23 \text{ ar } 32 \rightarrow 4, & \quad jk = 31 \text{ ar } 13 \rightarrow 5, & \quad jk = 12 \text{ ar } 21 \rightarrow 6. \end{aligned}$$

Tuomet visas nepriklausomas komponentes galima surašyti į 6x6 matricą.

2.5 Akustinių bangų susidarymas ir sklidimas kietuose kūnuose

Akustinės (tampriosios) bangos yra dalelių virpesių sklidimas tamprioje medžiagoje. Šių bangų sklidimas tamprioje terpėje perneša mechaninės deformacijos energiją iš vieno taško į kitą. Bangos apibūdinamos bangos ilgiu, dažniu, amplitude ir sklidimo greičiu.

Begalinių matmenų kietajame kūne gali sklisti tik išilginės ir skersinės tūrinės bangos. Šios bangos kristale gali sklisti bet kokiomis kryptimis, nepriklausomai nuo to, ar kūno elastinės savybės yra

izotropinės, ar anizotropinės. Viena kryptimi gali skliti viena išilginė ir dvi skersinės nepriklausomos bangos. Šių akustinių bangų fazinis greitis nepriklauso nuo dažnio [13, 14].

Garso bangų žadinimas necentrosimetriniame kristale atsiranda, kai jis yra veikiamas išorinio elektrinio lauko. Tuomet gardelės atomai išvedami iš pusiausvyros padėties ir svyruoja savituoju dažniu. Atomai veikiami elektriniu lauku svyruoja daug didesne amplitude apie pusiausvyros padėtį nei esant ramybės būsenoje. Įtempimai ir deformacijos yra aprašomos Huko (Hooke) dėsnio:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}\epsilon_{kl}, \quad (2.13)$$

kur c_{ijkl} – ketvirto rango tenzoriaus tamprumo konstantos, ϵ_{kl} – antrojo rango deformacijų tenzorius.

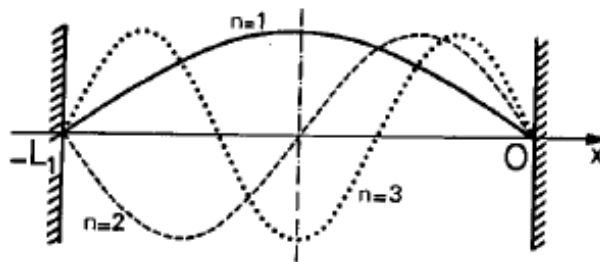
Sklindant garso bangai baigtinio dydžio stačiakampio gretasienio formos kristale, kristalo sienelės sudaro tūrinį rezonatorių, kuriame galime gauti stovinčią bangą. Stovinčios bangos koeficientas išreiškiamas formule [15]:

$$S. B. K. = \frac{A_i + A_r}{A_i - A_r} = \frac{1+r}{1-r}, \quad (2.13)$$

kur A_i, A_r – atitinkama kritusios ir atsispindėjusios bangos amplitudės, o $r = A_r/A_i$. Į vieną kristalo rezonatorių gali tilpti daugiau stovinčių bangų, bet galioja sąlyga, kad jų fazės turi būti 2π kartotinis. Stovinčios bangos rezonanso sąlygą galime užrašyti:

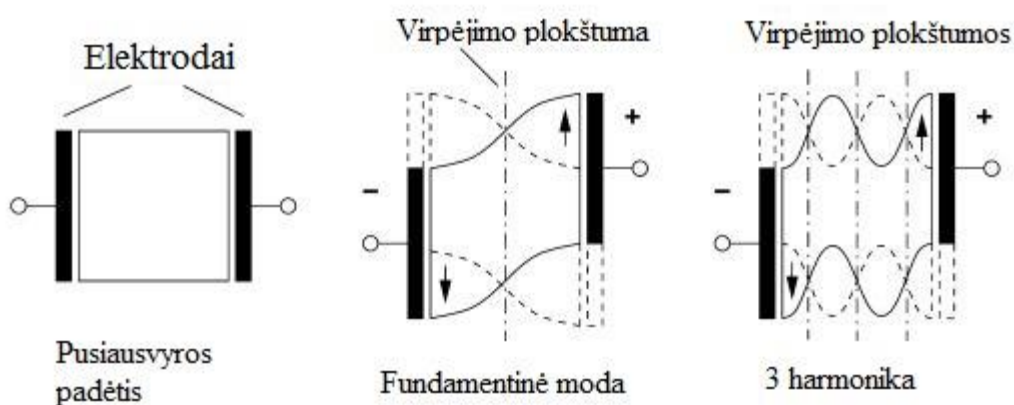
$$L = n \frac{\lambda_{rez}}{2}, \quad (2.14)$$

kur L – kristalo ilgis, n – teigiamas sveikas skaičius, o λ_{rez} – rezonansinis bangos ilgis. 6 – amė paveiksle parodytos kristale susidariusios stovinčios bangos. Išorinio elektrinio lauko bangai sutapus su nuosavąja kristalo stovinčia banga, jos amplitudė smarkiai išauga.



6 pav. Stovinčios akustinės bangos

Bendruoju atveju kristalo deformacijos kryptis nesutampa su išorinio elektrinio lauko kryptimi – susidaro šlyties deformacija (7 pav.). Jei žadinimo dažnis, toks, kad kristale susidaro stovinti šlyties banga, pjezoelektrinio reiškinių kuriamas laukas ima stipriai sąveikauti su išoriniu (kristalą žadinančiu) lauku ir stebimas pjezoelektrinis rezonansas. Jo dažnis atitinka fundamentinės šlyties bangos modos dažnį (deformacijos bangos ilgis atitinka kelią kristalu pirmyn ir atgal). Tokiame kristale galima sužadinti ir nelygines fundamentinės modos harmonikas. Įdomu, kad lyginių harmonikų sužadinti nepavyksta – jose į kristalo ilgį telpa lyginis pusbangių skaičius ir kontaktai nepasislenka vienas kito atžvilgiu, todėl ties kontaktais pjezoelektrinis elektrinis laukas nesusidaro.



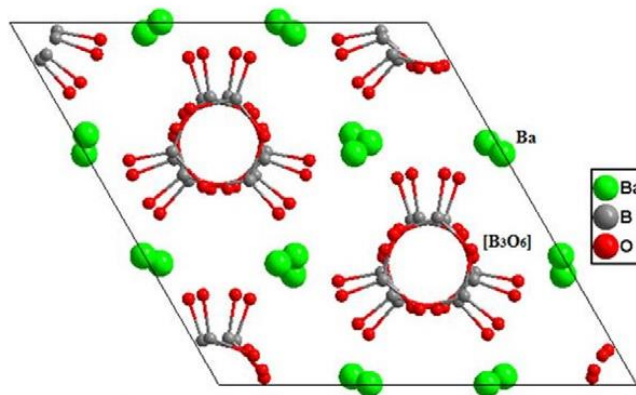
7 pav. Šlyties bangos rezonansų kristale susidarymas [16]

3. Medžiagos naudojamos elektrooptiniuose modulatoriuose

Pokelso elementams gaminti yra naudojami įvairių medžiagų kristalai. Skirtingos jų savybės lemia jų panaudojimą skirtingose srityse, atsižvelgiant į jų stabilumą, pažaidos slenkstį ir valdymo įtampą. Šiame skyriuje aptarsiu tyrime naudotas medžiagas.

3.1 Beta – bario boratas (β -BaB₂O₄)

Beta bario boratas (toliau BBO) yra vienas iš dažniausiai naudojamų netiesinių kristalų šiuolaikinėje rinkoje. 1984 metais šis kristalas buvo sukurtas Kinijos tyrėjų grupės, vadovaujamos prof. Chuangtian Chen [17]. Kristalai auginami iš fluso naudojant užuomazginį kristalą, t.y. tiglyje yra išlydomas boro, bario ir natrio oksidų mišinys, kurio temperatūra turi būti palaikoma ~900° C. Tuomet įleidus užuomazginį kristalą į lydą, pradedama auginti nauja bulė [18]. Per maždaug 3 mėnesius išauginamos ~4 cm diametro ir ~3cm aukščio bulės. BBO lydymosi temperatūra yra 1095° C, kristalas turi dvi kristalizavimosi fazes (α ir β), kurių fazinio virsmo temperatūra yra 925±5° C. Aukštesnėje temperatūroje formuojama α fazė, o žemesnėje – β fazė. Elektrooptiniams prietaisams yra naudojamas β fazės BBO kristalas, nes jo gardelė kristalizavimosi metu tampa necentrosimetrinė. β -BBO priklauso 3m taškinės simetrijos grupei, o kristalo kietumas Moso (Mohs) skalėje yra 4.



8 pav. Kristalinė β -BaB₂O₄ struktūra [19]

Optinės ir netiesinės optinės BBO savybės. BBO yra neigiamas vienaašis kristalas pasižymintis dideliu dvejopu lūžiu ir maža dispersija. Kristalo skaidrumo sritis apima spektro ruožą nuo 189 nm iki

3500 nm. Lūžio rodiklio vertės paprastajai ir nepaprastajai bangai išreiškiamos Sellmeier 's lygtimis [20]:

$$n_o^2 = 2.7405 + \frac{0.0184}{\lambda^2 - 0.0179} - 0.0155\lambda^2 \quad (3.1)$$

$$n_e^2 = 2.3730 + \frac{0.0128}{\lambda^2 - 0.0156} - 0.0044\lambda^2 \quad (3.2)$$

Kristalas yra temperatūriškai stabilus, o jo lūžio rodiklio priklausomybė nuo temperatūros, intervale 20-80° C ir spektro ruože 400-1000 nm išreiškiama šiomis lygtimis:

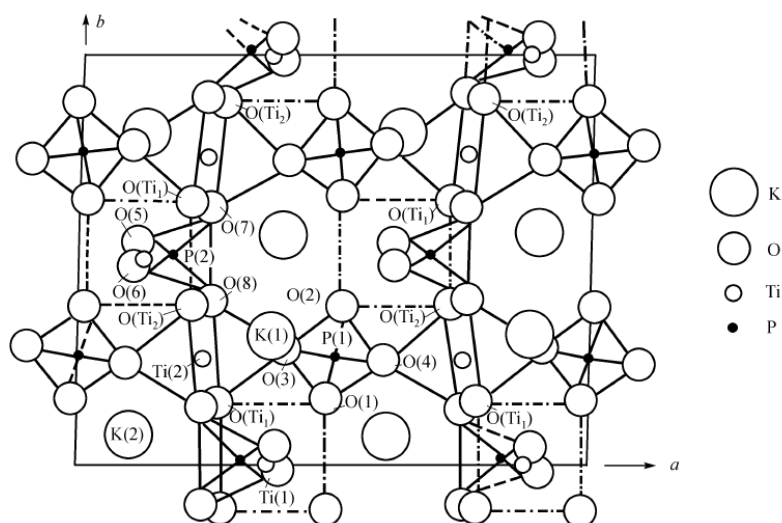
$$\frac{dn_o}{dT} = -16.6 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (3.3)$$

$$\frac{dn_e}{dT} = -9.3 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C} \quad (3.4)$$

Šie kristalai elektrooptiniams taikymams yra patrauklūs dėl kelių pagrindinių savo savybių: temperatūros stabilumo bei aukšto optinio pažeidimo slenksčio (žr. 3 lentelė). Deja jų elektrooptinis koeficientas r yra sąlyginai mažas, todėl šių kristalų aukšta pusės bangos ilgio įtampa tampa trukdžiu, siekiant aukštų pasikartojimo dažnių.

1.1 Kalio titanilo fosfatas (KTiOPO₄)

Kalio titanilo fosfatas (toliau KTP) – tai dar vienas populiarus kristalas naudojamas dėl savo elektrooptinių ir netiesinių savybių. Pirmą kartą kristalas buvo užaugintas 1971 metais, mokslininkų R. Masse and J.D. Grenier, Grenoblyje [21]. Kristalo auginimui naudojamas tradicinis auginimas iš fluso, kuris sudarytas iš K₆P₄O₁₃. Išauginti KTP kristalai siekia 18x35x35 mm³ matmenis, o lydymosi temperatūra yra 1157 ° C [22]. Kristalai yra necentrosimetrinės ortorombinės grupės ir priklauso mm2 taškinės simetrijos klasei. Kristalo struktūra (9 pav.) yra charakterizuojama spiralinėmis grandinėmis su aštuoniakampiais TiO₆ junginiais, kurie dviejuose kampuose yra atskirti PO₄ tetraedrais [23]. Šis kristalas elektrooptiniams taikymams naudojamas dėl didelio elektrooptinio koeficiento, kuris leidžia jais moduluoti šviesą didesniu dažniu. Deja, jie taip pat pasižymi didele akustinių rezonansų santykinė amplitude, o jų pagrindu pagamintų šviesos moduliatorių kontrastas tesiekia < 1:300.



9 pav. KTP kristalo projekcija (001) kryptimi

1.2 Rubidžio titanilo fosfatas (RbTiOP_4) ir kalio-rubidžio titanilo fosfatas ($\text{K}_{x-1}\text{Rb}_x\text{TiOP}_4$)

Rubidžio titanilo fosfatas (RbTiOP_4) ir kalio-rubidžio titanilo fosfatas ($\text{K}_{x-1}\text{Rb}_x\text{TiOP}_4$) yra izomorfiniai KTP tipo kristalai. KTP kristalo struktūroje kalis (K) gali būti lengvai pakeičiamas kitu elementu, pavyzdžiui Na, Ag, Ti, Rb arba Cs arba dalinai pakeistas keliais atomais, kaip KRTP atveju[23]. RTP kristalai yra auginami lėto šaldymo iš flusio metodu, naudojant užuomazginį kristalą. Augimo metu lydalo temperatūra kinta nuo 950°C iki 800°C , o visas kristalo augimas užtrunka 45-60 dienų [24]. RTP kristalai nėra jautrūs drėgmei, juos nesunku apdirbti, bei padengti dangomis. RTP kristalų skaidrumo sritis yra nuo 0.4 iki 3.5 μm . Vienas iš pagrindinių veiksnių kodėl jie yra patrauklūs elektrooptiniams taikymams – didelis elektrooptinis koeficientas, kuris leidžia sumažinti valdymo įtampą.

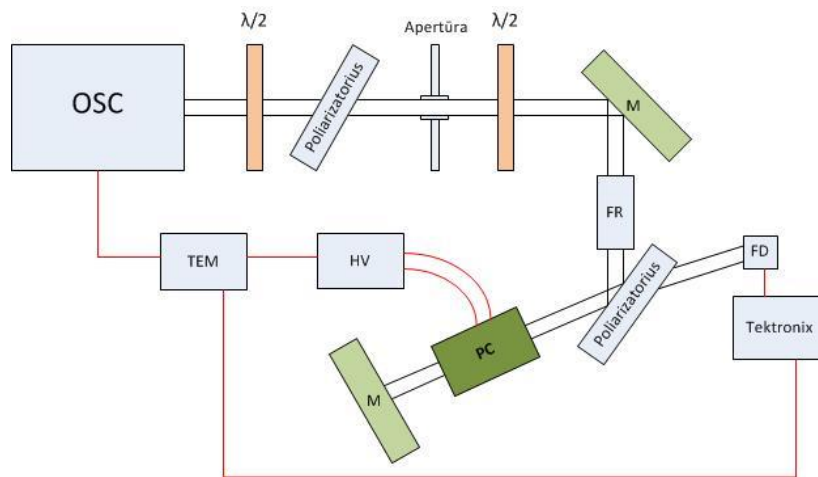
K^+ ir Rb^+ jonų radiusai yra 1.33 ir 1.48 Å. Nors jų radiusai skiriasi 10% , tačiau jų elektroneigiamumas yra vienodas ir tai leidžia gauti bet kokių proporcijų KRTP kristalus. Rubidžio priemaišos kristale sumažina jo laidumą bei padidina lazerinio pažeidimo slenkstį. KRTP kristalai gali būti išgaunami jonų mainų proceso metu. Kristalai auginami iš aukštos temperatūros tirpalo. Deja šiuos kristalus užauginti yra gana sunku dėl didesnio Rb^+ jonų radiuso įterpto į gardelę, kuri dėl įtempimų praranda kristalo struktūros stabilumą.

4. Elektrooptinių moduliatorių tyrimas

Šio darbo tikslas yra ištirti ir palyginti skirtingų Pokelso elementų akustinius ir optinius rezonansinius dažnius bei pabandyti išsiaiškinti jų kilmę.

4.1 Eksperimento schema ir tiriamosios medžiagos

Optiškai matuojamų rezonansų tyrimui buvo naudojama 10-ame paveiksle parodyta schema, kuri sudaryta iš lazerinio šaltinio („Pharos“ sistemos osciliatorius), dviejų fazinių plokštelių ($\lambda/2$), dviejų poliarizatorių, Faradėjaus rotatoriaus (FR), dviejų veidrodžių (M), Pokelso celės (PC). Signalas buvo matuojamas su foto detektoriumi (FD), o registruojamas signalas stebimas osciloskope (Tektronix TDS 3052C). Elektriniam žadinimo signalui generuoti buvo naudojami du skirtingi aukštos įtampos šaltiniai kartu su valdymo elektronikos moduliais. Pirmuoju („lėtuju“) aukštos įtampos šaltiniu su valdymo moduliu elektriniai žadinimo signalai Pokelso elementui paduodami naudojant programuojamą aukštos įtampos bloką su greito įjungimo raktu (HV), o pats raktas yra valdomas sinchronizavimo elektronikos modulio (TEM). Šis raktas generuoja stačiakampius elektrinius signalus, kurių minimali trukmė yra 150 ns, o maksimalus moduliacijos dažnis, kuris priklauso nuo generavimo įtampos, yra 2000 kHz. Antruoju („greituju“) aukštos įtampos generatoriumi su valdymo moduliu yra generuojami stačiakampiai elektriniai signalai, kurių minimali trukmė yra 20 ns, o maksimalus pasikartojimo dažnis, priklausomai nuo generavimo įtampos - 10 MHz. Matavimai atlikti su skirtingais Pokelso elementais ir skirtingais aukštos įtampos šaltiniais su valdymo blokais apibendrinti 1-oje lentelėje.



10 pav. Optiškai matuojamų rezonansinių dažnių tyrimo schema

Osciliatorius spinduliuoja 1030 nm bangos ilgio tiesiškai poliarizuotų impulsų vorą 76 MHz dažniu. Rezonansinės bangos Pokelso elementuose žadinamos stačiakampio formos impulsais, skirtais pralaidumui valdyti. Pirmoji banginė $\lambda/2$ plokštelė kartu su pirmuoju poliarizatoriumi yra naudojami kaip atenuatorius. Toliau sklindanti vora praeina pro apertūrą. Kita $\lambda/2$ banginė plokštelė pasuka šviesos poliarizaciją 45° . Faradėjaus rotatorius tiesinę šviesos poliarizaciją pasuka dar 45° . Visa atsispindėjusi šviesa atsispindi nuo antrojo poliarizatoriaus ir praeina pro Pokelso elementą iki galinio veidrodžio. Schema suderinta taip, kad kai prie modulatoriaus nėra prijungta įtampa tai poliarizatorius grįžtančią nuo galinio veidrodžio šviesą atspindi, o kai įtampa įjungta – praleidžia. Ketvirčio bangos ilgio Pokelso elemento įtampa $U_{\lambda/4}$ yra generuojama stačiakampiais impulsais, kurių dažnis yra keičiamas intervale 50-1100 kHz matuojant BBO ir KTP Pokelso elementus, intervale 40-2000 kHz matuojant 4x4 mm skersinio matmens KRTP1 elementą ir intervale 100-10 000 kHz matuojant 2x2 mm skersinio matmens KRTP2 elementą.

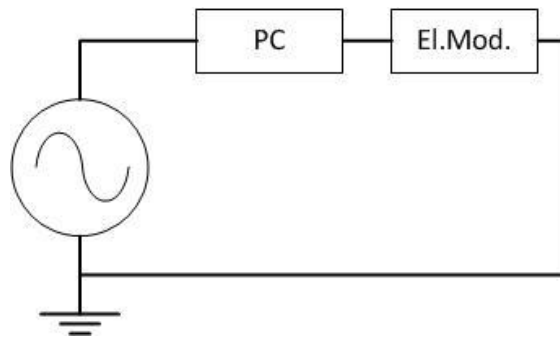
1 lentelė. Pokelso elementų matavimo parametrai naudojant skirtingus aukštos įtampos šaltinius su valdymo moduliais.

Pokelso elementas	Aukštos įtampos šaltinis + raktas nr. 1		Aukštos įtampos šaltinis + raktas nr. 2	
	Dažnių ruožas, kHz	Stačiakampio elektrinio signalo trukmė, ns	Dažnių ruožas, MHz	Stačiakampio elektrinio signalo trukmė, ns
BBO1	50-1100	300	-	-
BBO2	50-1100	300	-	-
BBO3	50-1100	300	-	-
KTP	50-1100	300	-	-
KRTP1	40-2000	150	-	-
KRTP2	40-2000	150	0,1-10,755	20

Elektriškai matuojamų rezonansų tyrimo schemą sudaro generatorius, Pokelso celė (PC), elektronikos skaičiavimo modulis (11 pav.). Elektronikos skaičiavimo modulio matavimai yra paremti impedanso skaičiavimu, kuris išreiškiamas formule $\tilde{Z}_C = 1/j\omega C$. Iš generatoriaus į Pokelso celę yra paduodamas harmoninis signalas. Elektronikos skaičiavimo modulis, kurio varža $\sim 0\Omega$ užfiksuoja praėjusią pro Pokelso elementą įtampą, kuri yra proporcinga srovei ($U_{is} \sim I$). Skaičiavimo modulio išėjime yra užfiksuojamas fazės tarp srovės ir įtampos pokytis, kuris nusako sistemoje atsiradusius talpos pokyčius. Talpos padidėjimas Pokelso elemente atsiranda tuomet, kai išorinio harmoninio signalo dažnis sutampa su kristalo vidiniais virpesiais, kurie atitinka elektrinius elemento rezonansus. Talpos

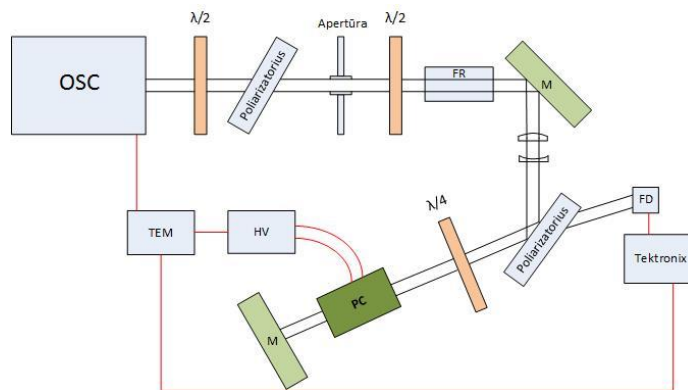
padidėjimas grandinės yra traktuojamas, kaip sistemos nuostoliai, kurie yra išreiškiami, kaip nuostolių kampo tangentas, kuris susidaro tarp kondensatoriaus impedanso vektoriaus ir neigimos reaktyvinės sistemos varžos ašies.

Kiekvieno rezonansų kreivės matavimo taškui gauti, elektronikos skaičiavimo modulis yra sukalibruojamas ir tik tuomet pamatuojamas talpos pokytis. Dažnas kalibravimas reikalingas palaikyti matavimo tikslumui. Keičiant harmoninio signalo dažnį 0,1 kHz žingsniu ir registruojant talpos pokytį (iš kurio paskaičiuojamas nuostolių kampas) yra gaunami rezonansinių dažnių kreivės taškai. Generatoriaus moduliacijos dažnis gali būti keičiamas 40 – 2000 kHz dažnių diapazone.



11 pav. Elektriškai matuojamų rezonansų tyrimo schema

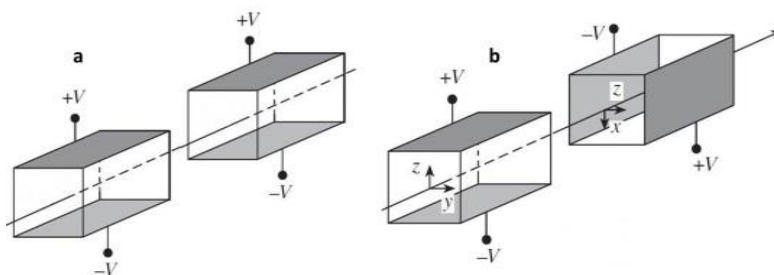
KRTP1 Pokelso elemento kontrasto su nuolatine įtampa matavimui buvo naudojama optinių rezonansų matavimo schema su papildoma $\lambda/4$ fazine plokštele (12 pav.). Taip pat atliekant kitus matavimus su šiuo elementu, šviesos pluoštas buvo sumažintas teleskopu ir jo diametras ties Pokelso elemento centru yra $\sim 350 \mu\text{m}$. Papildoma fazinė plokštelė schemoje leidžia, pridėjus pastovią įtampą prie Pokelso elemento, su fotodiodu fiksuoti šviesą, kurią elementas depoliarizuoja.



12 pav. Kontrasto su nuolatine įtampa matavimo schema

KRTP1 Pokelso elemento temperatūros ir akustinės amplitudės dinamika buvo registruojama termovizoriumi ir oscilografu. Kristalo temperatūra buvo matuojama iš kristalo priekio, fokusuojant vaizdą ties kristalo išėjimo paviršiumi. Oscilografo ekrane tuo pačiu metu buvo fiksuojama akustinio virpesio amplitudė.

Eksperimentų metu buvo iširtos šešios skirtingos Pokelso celės. Jose naudojamas skersinis Pokelso efektas, t.y. elektrodai yra užgaminami ant kristalo sienelių, lygiagrečių šviesos pluošto sklidimo kryptčiai (13 pav.). Pusbangę celės įtampą galima paskaičiuoti remiantis formule $V_{\pi} = \frac{d}{L} \cdot \frac{\lambda}{rn^2}$, kur d – kristalo plotis, L – ilgis, r – elektrooptinė konstanta. Visose celėse yra po 2 kristalus, siekiant kuo labiau sumažinti ketvirčio bangos ilgio įtampą.



13 pav. Skersinis elektrooptinis modulatorius a) BBO, b) KTP, KRTP

2 lentelė. Pokelso elementų parametrai

Pokelso elementas	Kristalai	Matmenys, mm	$V_{\lambda/4}$, V
BBO1	BBO (C)*	4x4x20	2147
BBO2	BBO (K)	4x4x20	2279
BBO3	BBO (C)	3,5x4x22	1820
KTP	KTP	4x4x20	643
KRTP1	KRTP	4x4x20	650
KRTP2	KRTP	2x2x25	330

*C ir K skirtingų augintojų kristalai.

3 lentelė. BBO, KTP ir KRTP kristalų parametrai [24-26]

Kristalai	Cheminė formulė	Kristalo optinė simetrija	Pažeidimo slenkstis	Kristalinė grupė	Taškinė simetrija	Higroskopiškumas
BBO	$\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$	Vienaašis neigiamas	$5\text{GW}/\text{cm}^2$ @1064nm, 10 ns	Trigoninė	3m	Taip
KTP	KTiOPO_4	Dviašis neigiamas	900 MW/cm^2 , @1064nm, 10 ns	Ortorombinė	mm2	Ne
KRTP	$\text{K}_{x-1}\text{Rb}_x\text{TiOP}_4$	Dviašis neigiamas	$1\text{GW}/\text{cm}^2$ @ 1064nm, 6 ns	Ortorombinė	mm2	Ne

Elektrooptinių koeficientų matricos BBO, KTP kristalams: [27],

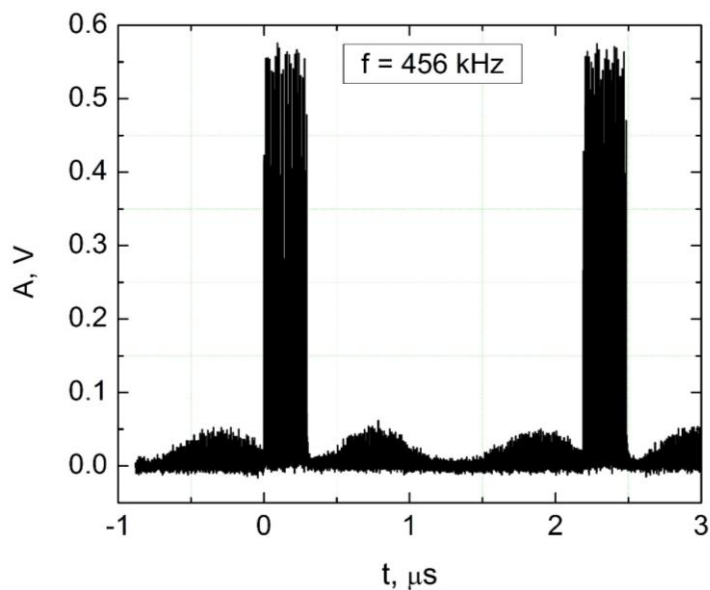
$$\begin{pmatrix} 0 & -r_{22}r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix}_{BBO, 3m} \quad \begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{23} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}_{KTP, mm2}$$

4 lentelė. Medžiagų elektrooptiniai koeficientai [6, 23, 28, 29]

Kristalas	Elektrooptiniai koeficientai
BBO	$r_{22} = 2,7 \text{ pm}/\text{V}$, $r_{31,51} < 0,1r_{22}$
KTP	$r_{13} = 9,5 \text{ pm}/\text{V}$, $r_{23} = 15,7 \text{ pm}/\text{V}$, $r_{33} = 36,3 \text{ pm}/\text{V}$, $r_{42} = 9,7 \text{ pm}/\text{V}$, $r_{51} = 7,3 \text{ pm}/\text{V}$
KRTP	$r_{13} = 9,7 \text{ pm}/\text{V}$, $r_{23} = 10,8 \text{ pm}/\text{V}$, $r_{33} = 22,5 \text{ pm}/\text{V}$, $r_{24} = 14,9 \text{ pm}/\text{V}$, $r_{15} = 7,6 \text{ pm}/\text{V}$

5. Eksperimentų rezultatai ir aptarimas

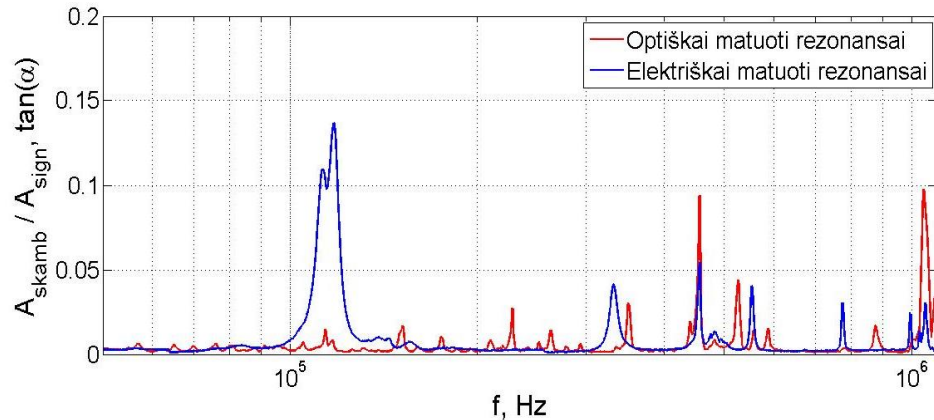
Naudojantis pirmąja matavimų schema optiškai išmatuota Pokelso elementų rezonansinių dažnių kreivė. Keičiant elektrinio signalo moduliacijos dažnį matuojamas susidariusios akustinės bangos virpesių ir signalo amplitudžių santykis. 14 - ame paveiksle parodyta BBO1 elemento oscilograma ties 456 kHz dažniu. Įjungus valdymo įtampą, Pokelso elemento pralaidumas išauga ir matome praėjusią šviesą, kurią sudaro 76 MHz dažnio femtosekundinių impulsų vora (dėl mušimų tarp voros dažnio ir oscilografo diskretizavimo dažnio signalas atrodo triukšmingas, nors impulsų amplitudė yra pastovi). Uždarius Pokelso elementą, registruojame akustinių bangų virpesius, sukeliančius pralaidumo padidėjimą. Rezonansinių dažnių kreivė yra gaunama kiekvienai dažnio vertei pamatuojant akustinės bangos virpesių ir signalo, kai Pokelso elementas atidarytas, santykį.



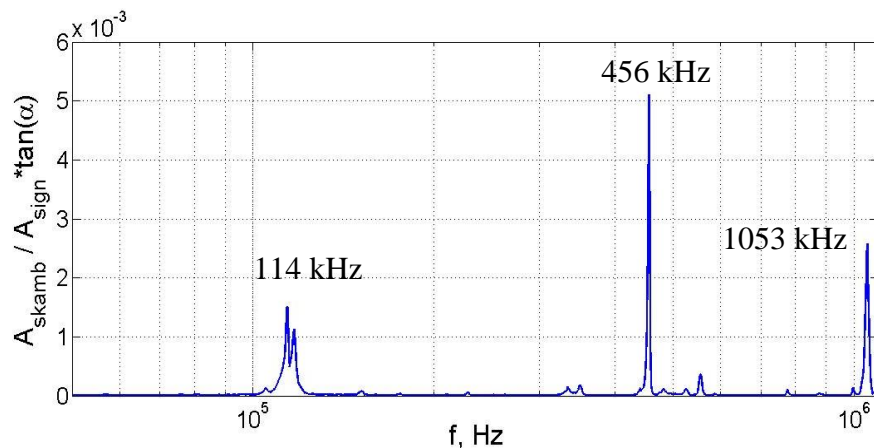
14 pav. Optiškai matuotų rezonansinių dažnių matavimo oscilograma, kai $f = 456$ kHz

Analogiškas matavimas atliktas naudojantis antrąja matavimų schema. Akustinių rezonansų skaičiavimas yra paremtas celės talpos pokyčiu ir aprašomas sistemos nuostolių kampo tangentu. 15 – ame paveiksle atvaizduota abiejų matavimų BBO1 celės rezonansinės kreivės. Elektriškai išmatuoti akustiniai rezonansai buvo žadinami harmoniniu signalu dažnių intervale 40 - 2000 kHz, o optiškai išmatuoti – stačiakampio formos impulsais dažnių intervale 50 – 1100 kHz. Didžiausią dažnį riboja aukštos įtampos raktas, kuris, perjunginėdamas BBO kristalo ketvirčio bangos įtampą, gali veikti ne didesniu nei 1.1 MHz dažniu. Iš 15 – o paveikslo matoma, kad ne visi rezonansiniai dažniai sutampa. Taip yra todėl, kad elektriškai išmatuotų rezonansų kreivėje matome rezonansus, kurie susidaro visomis kristalo kryptimis (X, Y, Z). Tuo tarpu optiškai jaučiami rezonansai yra tie, kurie susidaro kristalui

virpant tik X ir Y ašimis, kurios yra statmenos šviesos sklidimo kryptims. Kristalui virpant išilgai kristalo Z ašies, lūžio rodiklio moduliacija optiškai nejaučiama. Norint išsiaiškinti aktyviuosius rezonansinius dažnius, kurie sutampa tiek elektriniuose tiek optiniuose matavimuose, atliekama kreivių koreliacija. Iš 16 – o paveikslo matyti, kad BBO1 Pokelso elemente susidaro trys pagrindiniai rezonansiniai dažniai: 114 kHz, 456 kHz ir 1053 kHz. Mažos amplitudės rezonansiniai dažniai koreliacijos spektre atsiranda iš signalo triukšmų.



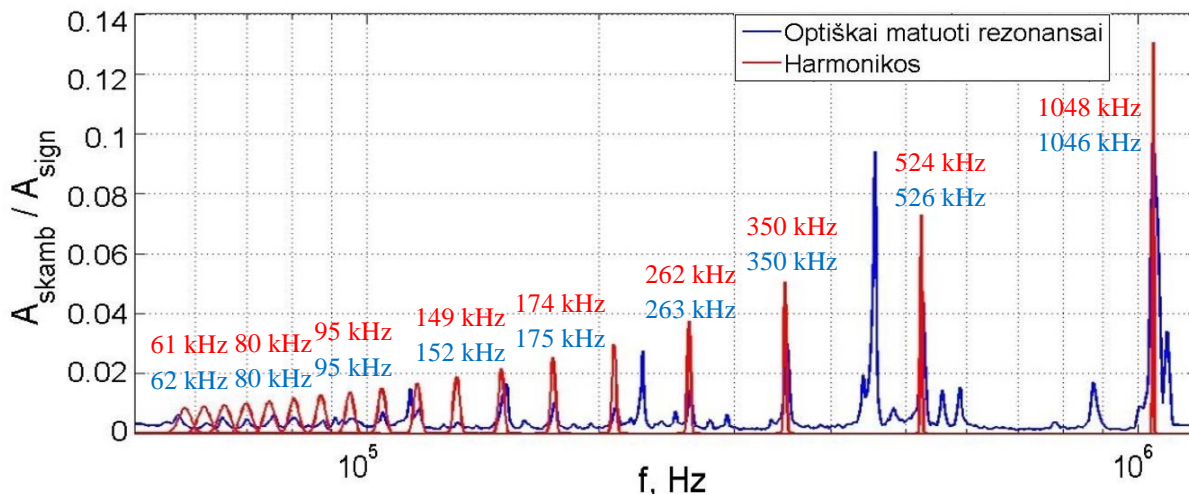
15 pav. BBO1 celės elektriškai ir optiškai matuotų rezonansų palyginimas



16 pav. BBO1 elemento elektriškai ir optiškai matuotų rezonansinių kreivių koreliacijos spektras

Žadinant signalą trumpu impulsu, jo spektro plotis paskaičiuojamas naudojant Furjė transformaciją bus platus. Kuo trumpesnis žadinantis impulsas, tuo daugiau dažnio modų telpa po spektro gaubtine. Dėl šios priežasties žadinimo impulso spektras turės daug harmonikų, kurios sutaps su stovinčiomis bangomis kristale, taip sustiprindamos rezonansus. Stovinčios bangos sąlyga yra $L = n \frac{\lambda_{rez}}{2}$, kur λ_{rez} – yra rezonansinis bangos ilgis, L – kristalo ilgis, o n – teigiamas sveikas skaičius.

Vadinasi rezonus tik dvigubo dažnio bangos. Šitokia tendencija pastebėta ir optiškai matuotos rezonansinės kreivės atveju (17 pav.) Išryškinti rezonansines dvigubo dažnio smailes, papildomai buvo sumodeliuotos ir nubrėžtos harmonikų smailes.

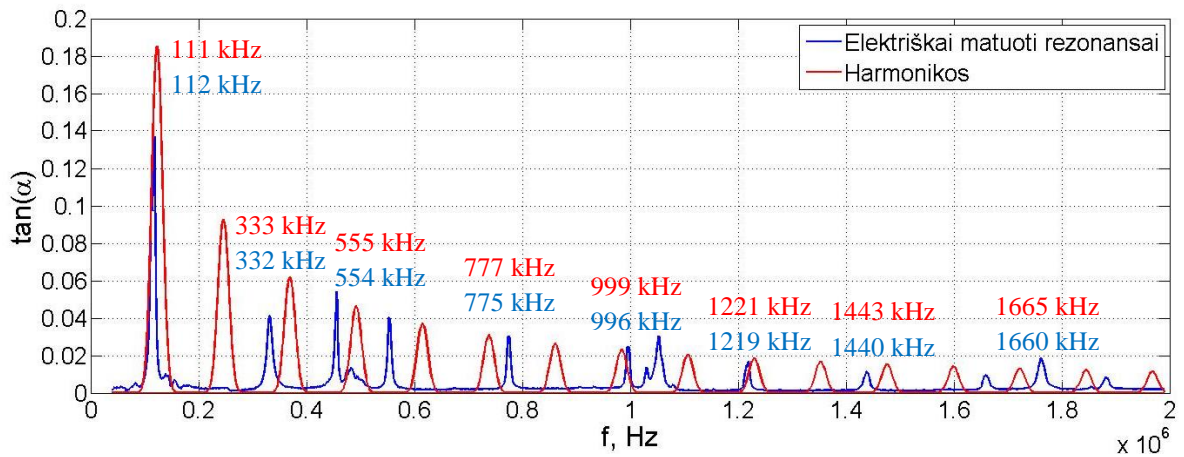


17 pav. BBO1 elemento optiškai matuotos rezonansų harmonikos

Žadinančioji banga yra žemadažnė, o aukštesniuose dažniuose rezonansų amplitudė išauga. Kaip matoma iš rezonansinių kreivių koreliacijos iš visų harmonikų aktyvūs yra tik du rezonansai, kurių dažniai 114 kHz ir 1048 kHz.

Išanalizavus elektriškai matuotų rezonansų kreives pastebėta, kad žadinančioji banga atsikartoja nelyginėmis harmonikomis aukštesniuose dažniuose (18 pav.). Rezonansai buvo žadinami harmoniniais elektriniais signalais. 18 – amė paveiksle papildomai sumodeliuotos harmonikų smailes, kad išryškintų nelyginių signalo harmonikų smailes.

Nelyginių signalo harmonikų žadinimas gali būti paaiškinamas kristalo šlyties deformacija X-Y plokštumoje dėl stovinčios akustinės bangos susidarymo (7 pav). Kai žadinimo dažnis kristale sukuria šlyties deformaciją ir sutampa su pjezoelektrinio reiškiniu kuriamu lauku, tuomet stebime pjezoelektrinį rezonansą. Kaip aprašyta 2.5 skyrelyje, esant lyginėms harmonikoms, kontaktai nepasislenka vienas kito atžvilgiu taip nesukurdami pjezoelektrinio lauko ir tokie rezonansai nestebimi.



18 pav. BBO1 elemento elektriškai matuotos rezonansų harmonikos

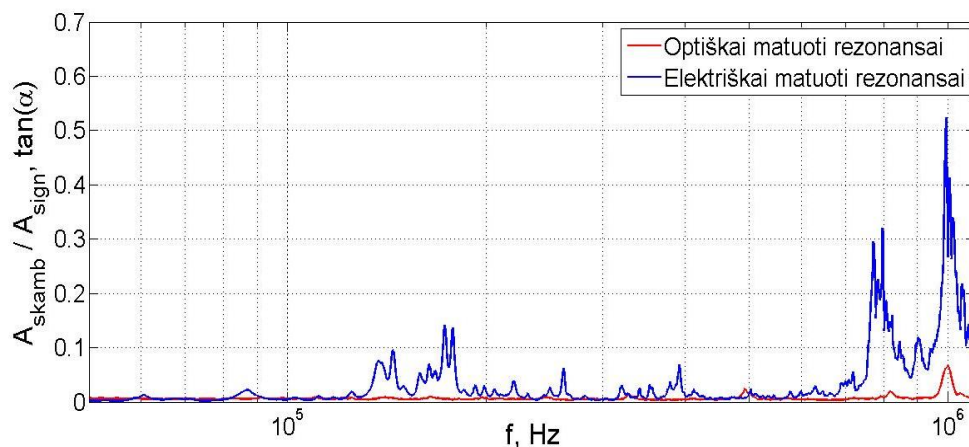
BBO2 ir BBO3 elementų charakteristikos vyrauja tokios pat kaip ir BBO1 elemento. BBO2 elemento kai kurie rezonansiniai maksimumai yra suskilę į dvi dalis. Taip yra todėl, kad Pokelso elemente esančių kristalų matmenys nėra identiški. Šios celės pagrindiniai akustiniai dažniai: 114 kHz, 454 kHz, 1033 kHz. Dėl kitokių BBO3 elemento kristalų matmenų – vienas iš pagrindinių nepriklausomas nuo harmonikų dažnis (456 kHz) yra pasislinkęs į didesnių dažnių pusę per 40 kHz. Šis elementas turi daugiau pagrindinių rezonansinių dažnių lyginant su kitais elementais. Pagrindiniai dažniai: 126kHz , 372kHz, 495 kHz, 620 kHz, 865 kHz, 932 kHz. Visuose trijuose BBO medžiagos Pokelso elementuose yra stebimos lyginės rezonansinių dažnių harmonikos matuojant rezonansus optiškai, bei nelyginės rezonansų harmonikos matuojant rezonansus akustiškai (žr. Priedą).

5 lentelė. BBO medžiagos Pokelso elementų pagrindiniai rezonansiniai dažniai

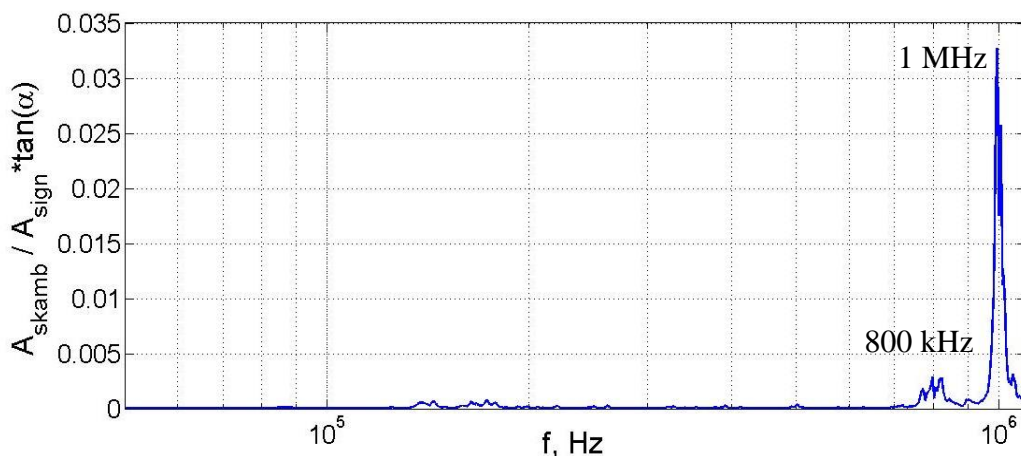
Pokelso elementas	Kristalų matmenys, mm	Pagrindiniai rezonansiniai dažniai
BBO1	4x4x20	114 kHz 456 kHz 1053 kHz
BBO2	4x4x20	114 kHz 454 kHz 1033 kHz
BBO3	3,5x4x22	126 kHz 372 kHz 495 kHz 620 kHz 865 kHz 932 kHz

Tais pačiais metodais buvo tiriamas Pokelso elementas su KTP kristalais. Optiškai ir elektriškai gautų rezonansų kreivės yra parodytos 19-ame paveiksle. Pastebėta, kad optiškai matuotoje rezonansinėje kreivėje vėl matosi žadinančiojo dažnio harmonikos, atsiradusios dėl žadinančiojo stačiakampio impulso. Akustinių virpesių nenulinis lygis yra stebimas visame dažnių diapazone. Jis yra didesnis lyginant su BBO medžiagos Pokelso elementais. Elektriškai matuota rezonansinė kreivė turi

plačius rezonansus ties 140 kHz, 175 kHz, 785 kHz ir 1 MHz. Atlikus kreivių koreliaciją išryškėjo du pagrindiniai dažniai – ties 800 kHz ir 1 MHz (20 pav.). Gautos smailės yra platesnės palyginti su BBO Pokelso celėmis. Šį išplatėjimą lemia nenulinis akustinių virpesių lygis visame dažnių diapazone.



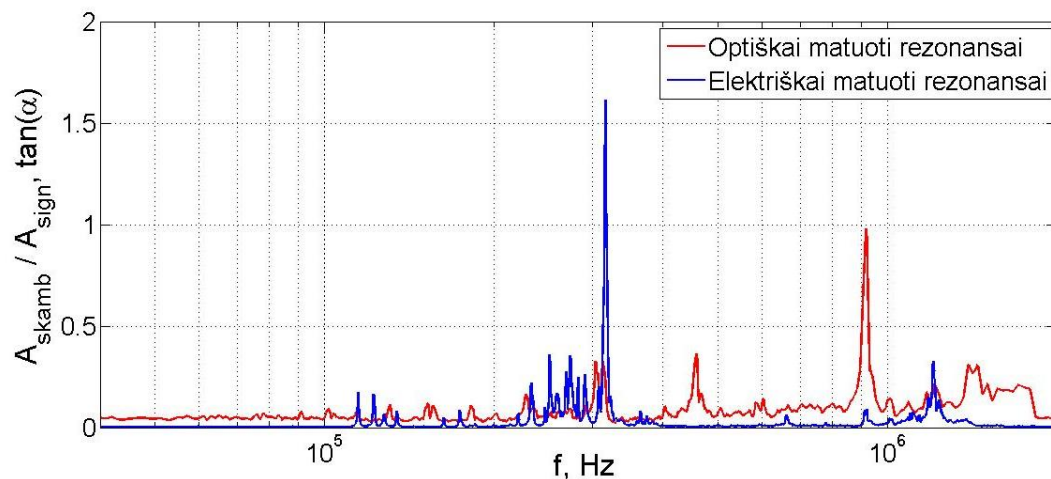
19 pav. KTP elemento elektriškai ir optiškai matuotų rezonansų kreivės



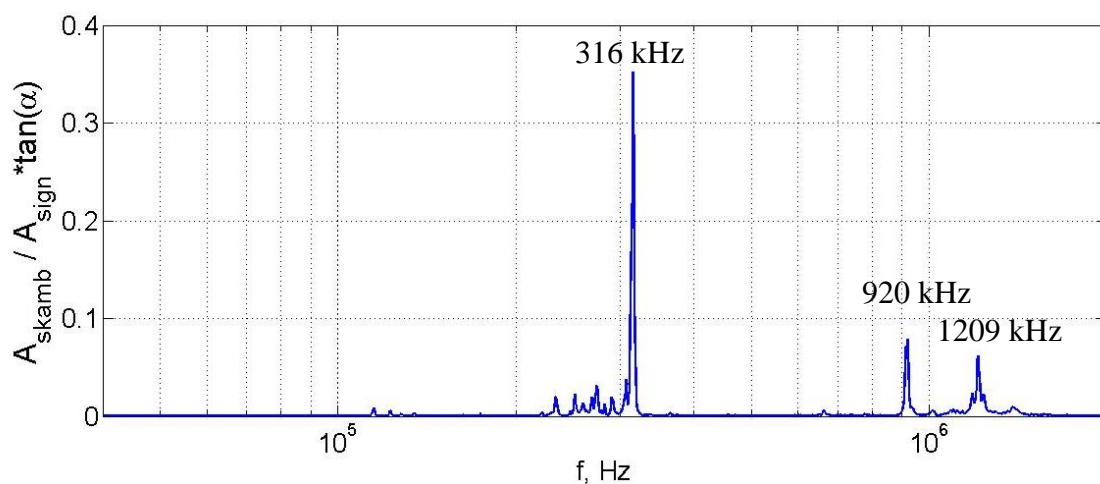
20 pav. KTP elemento elektriškai ir optiškai matuotų rezonansinių kreivių koreliacijos spektras

Kadangi KRTP medžiagos elementų ketvirčio bangos įtampos yra kelių šimtų voltų eilės ($U_{KRTP1}=650$ V, $U_{KRTP2}=330$ V), naudojant tą patį aukštos įtampos raktą, matavimai galėjo būti atlikti iki 2 MHz. Šių matavimų metu, stačiakampio elektrinio impulso trukmė buvo sumažinta iki 150 ns. Pamatavus KRTP1 ir KRTP2 Pokelso elementus gautos optiškai ir elektriškai matuotos kreivės yra pavaizduotos 21-ame ir 23-ame paveiksluose. Iš kreivių koreliacijos spektrų galima išskirti tris aktyviusius dažnius KRTP1 elemente ties: 316 kHz, 920kHz, 1209 kHz ir KRTP2 elemente ties: 144 kHz, 312 kHz, 1854 kHz. Optiškai matuotose rezonansų kreivėse, dėl stačiakampio žadinančiojo

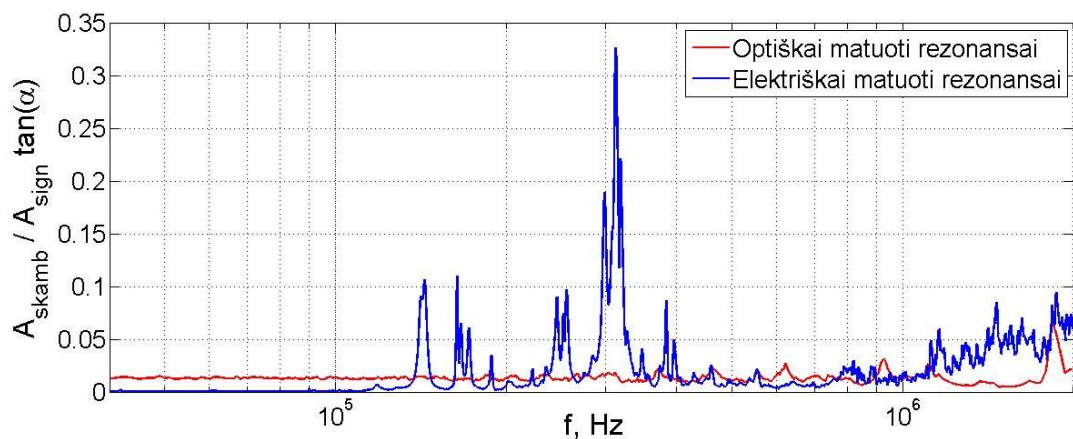
impulso taip pat stebimos dvigubo dažnio harmonikos. BBO1, BBO2 bei KRTP1 elemento optiškai matuotų rezonansų kreivėse atsikartoja rezonansinis dažnis ties ~ 450 kHz. Galima daryti išvadą, kad šis dažnis tiesiogiai susijęs su kristalo skersiniu (4 mm) matmeniu.



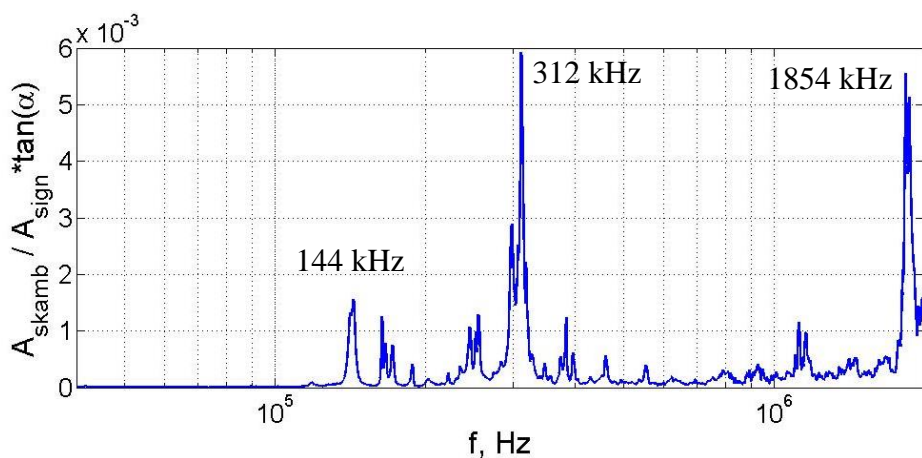
21 pav. KRTP1 elemento elektriškai ir optiškai matuotų rezonansų kreivės



22 pav. KRTP1 elemento elektriškai ir optiškai matuotų rezonansinių kreivių koreliacijos spektras



23 pav. KRTP2 elemento elektriškai ir optiškai matuotų rezonansų kreivės

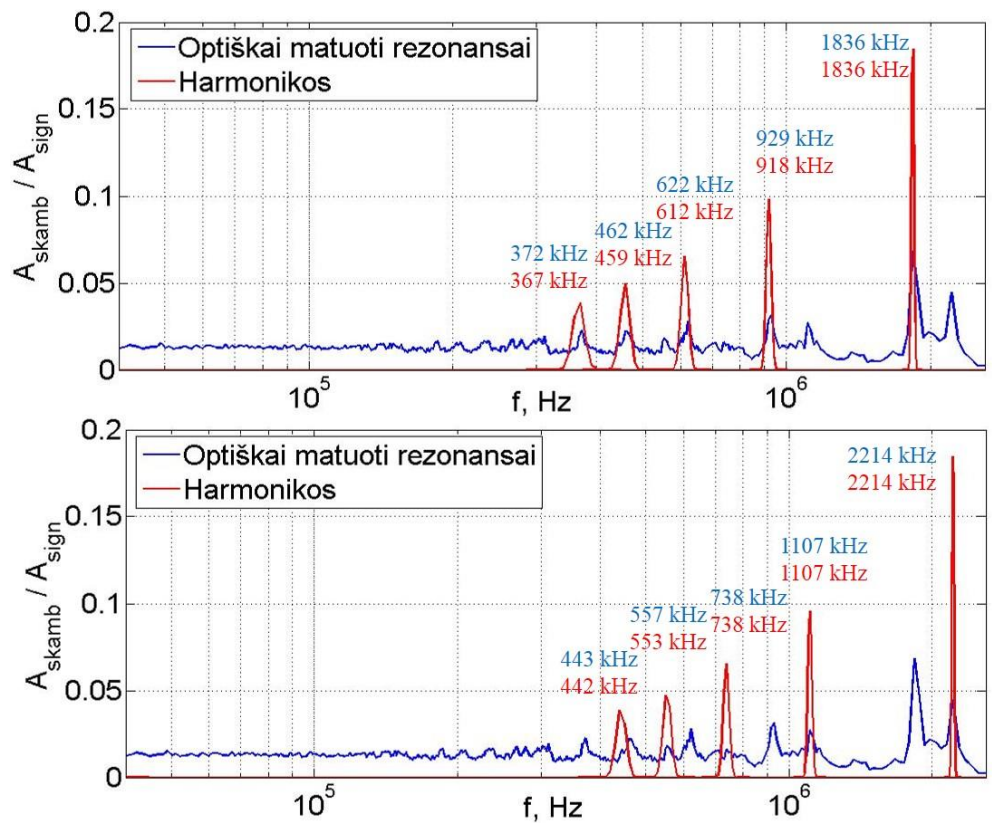


24 pav. KRTP2 elemento elektriškai ir optiškai matuotų rezonansinių kreivių koreliacijos spektras

6 lentelė. KTP ir KRTP medžagų Pokelso elementų pagrindiniai rezonansiniai dažniai

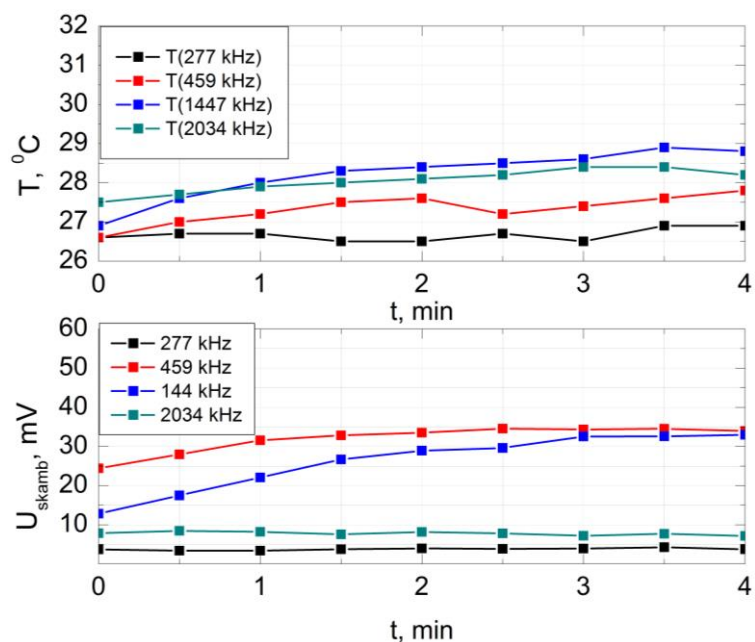
Pokelso elementas	Kristalų matmenys, mm	Pagrindiniai rezonansiniai dažniai
KTP	4x4x20	800 kHz, 1 MHz
KRTP1	4x4x20	316 kHz, 920 kHz, 1209 kHz
KRTP2	2x2x25	114 kHz, 312 kHz, 1854 kHz

Dėl skirtingų kristalų matmenų KRTP2 Pokelso elemento, kaip ir BBO2 elemento, rezonansiniai maksimumai yra skilę į dvi dalis (25 pav). Grafike matomi du pagrindiniai rezonansiniai dažniai (1836 kHz, 2214 kHz) ir žemesniuose dažniuose atsikartojančios šių rezonansinių dažnių harmonikos.

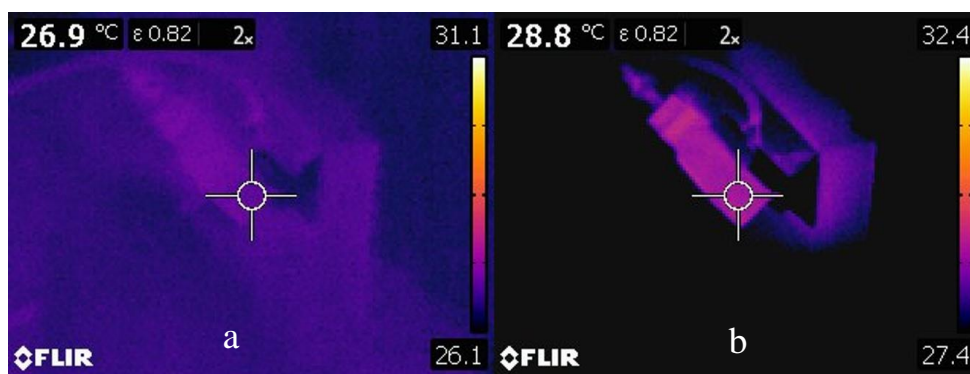


25 pav. KRTP2 elemento optiškai matuotos rezonansų harmonikos

Atliekant matavimus su KRTP1 Pokelso elementu buvo pastebėta, kad prie kai kurių dažnių akustinių bangų sukeltų optinių moduliacijų amplitudės bėgant laikui auga. Iš optiškai matuotos rezonansinės kreivės buvo pasirinkti keturi dažniai su skirtingo dydžio akustiniais rezonansais. Jų rezonansų amplitudės, bei kristalo temperatūra buvo stebimi laike (26 pav.). Matavimai atlikti su 150 ns trukmės stačiakampiais signalais, kur $U_{\text{sign}} = 780 \text{ mV}$. Didžiausi amplitudės pokyčiai stebimi ties 459 kHz ir 1447 kHz atitinkamai $\Delta U_{\text{skamb}} = 10,12 \text{ mV}$ ir $\Delta U_{\text{skamb}} = 20,1 \text{ mV}$. Tuo tarpu skambėjimo amplitudės pokyčiai ties 277 kHz ir 2034 kHz yra labai nežymūs ir siekia dešimtąsias milivolto dalis. Kristalo šilumos pokyčiai koreliuoja su skambėjimo amplitudės pokyčiais, tačiau nėra labai ryškūs. Didžiausias temperatūros pokytis stebimas ties 1447 kHz ir yra lygus 2° C . Termovizoriumi užregistruotos didžiausios temperatūros pokyčio termo nuotraukos yra pavaizduotos 27 –ame paveiksle.



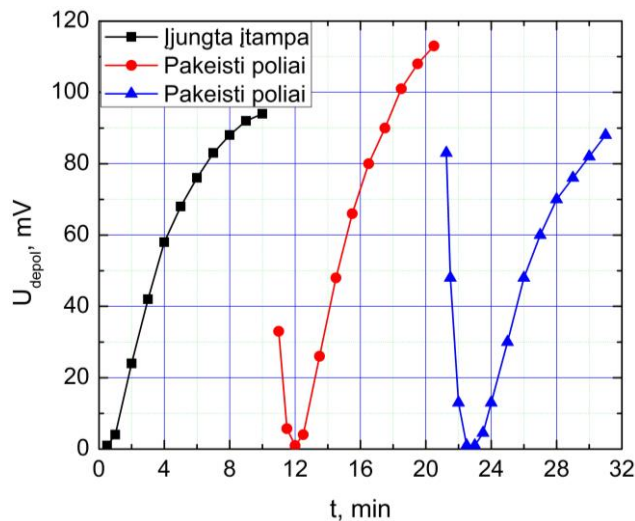
26 pav. KRTP1 elemento temperatūrinės ir skambėjimo amplitudžių priklausomybė nuo laiko



27 pav. Termo nuotraukos matuojant kristalo temperatūrinę priklausomybę ties 1447 kHz dažniu, kai: a) $t=0\text{s}$, b) $t=4\text{ min}$.

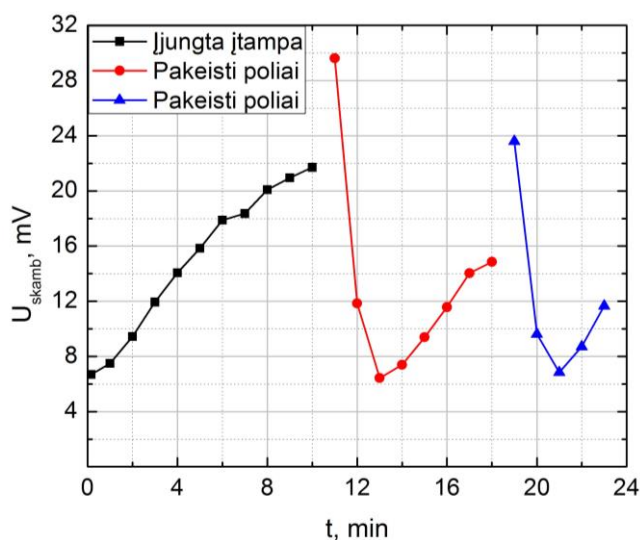
Toliau, siekiant išsiaiškinti skambėjimo amplitudės didėjimo bei kontrasto blogėjimo priežastis, buvo matuojamas KRTP1 Pokelso elemento kontrastas esant pridėtai nuolatinei įtampai. Šiam matavimui atlikti buvo naudojama 12-ame paveiksle pavaizduota schema. Esant pridėtai įtampai fotodiodu registruojame Pokelso elemento depoliarizuojamą osciliatoriaus impulsų vorą, kurios amplitudė laikui bėgant kinta nuo $<1\text{ mV}$ ir įsisotina ties $\sim 100\text{ mV}$. Kristalo temperatūra matavimo metu pakinta vos $0,2^\circ\text{C}$, kas yra artima termovizoriaus paklaidai. Matavimo metu, amplitudei beveik įsisotinus buvo pakeičiami pridėtos įtampos poliai. Matavimo kreivės pavaizduotos 28-ame paveiksle. Matome, kad sukeitus elektrinio lauko polių depoliarizuotos šviesos signalas kurį laiką mažėja, o paskui pradeda vėl augti. Kadangi šio matavimo metu kristalo temperatūra praktiškai nekito, galime daryti išvadą, pridėjus elektrinį lauką kristale esančios elektringos dalelės dreifuoja link vieno iš polių, keisdamos kristalo

elektrooptines savybes. Šio reiškinio poveikį galima būtų sumažinti, pagaminus valdymo elektroniką, kuri sukeistų Pokelso elemento elektrodų poliškumą kas antro atidarymo metu. Nors tai padidintu valdymo elektroninės grandinės sudėtingumą, bet sumažintų reikalavimus Pokelso elementams. Tai būtų ypač svarbu, kai jiems naudojami egzotiški, brangiai kainuojantys kristalai.



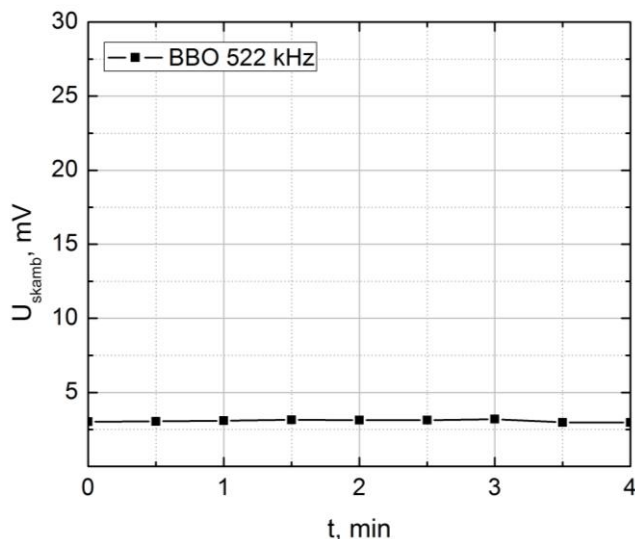
28 pav. Depoliarizuotos šviesos signalo kitimas keičiant elektrinio lauko polius, veikiant nuolatinei įtampai

Kontrasto matavimo eksperimentas su elektrinių polių pakeitimu buvo pakartotas esant dideliame pasikartojimo dažniui. Siekiant sugretinti matavimų situacijas, stačiakampio elektrinio signalo trukmė buvo pailginta iki 200 ns, o matavimo dažnis – 2034 kHz. Gautos matavimų kreivės pavaizduotos 29-ame paveiksle. Depoliarizuota skambėjimo impulsų voros amplitudė laikui bėgant didėja, o pakeitus polius matomas staigus išaugimas, kuris netrukus ima mažėti ir kreivė įgauna panašią formą, kurią gauname pridėjus nuolatinę įtampą.



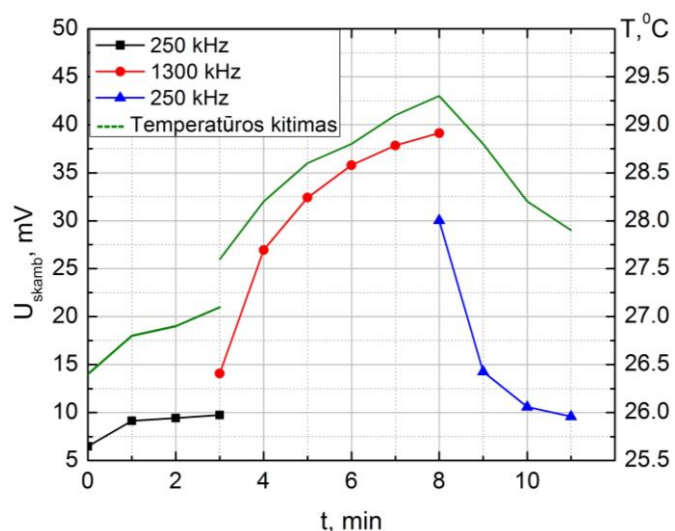
29 pav. Skambėjimo amplitudės kitimas prie 2034 kHz dažnio keičiant elektrinio lauko polius

Norint patvirtinti išvadą, kad depoliarizuotos amplitudės kitimas laike yra medžiagos savybė, buvo pamatuota BBO2 Pokelso elemento laikinė skambesio amplitudė esant 522 kHz dažniui. Kreivė atidėta tokioje pat skalėje, kaip ir skambesio amplitudžių kreivės pavaizduotos 30-ame paveiksle.



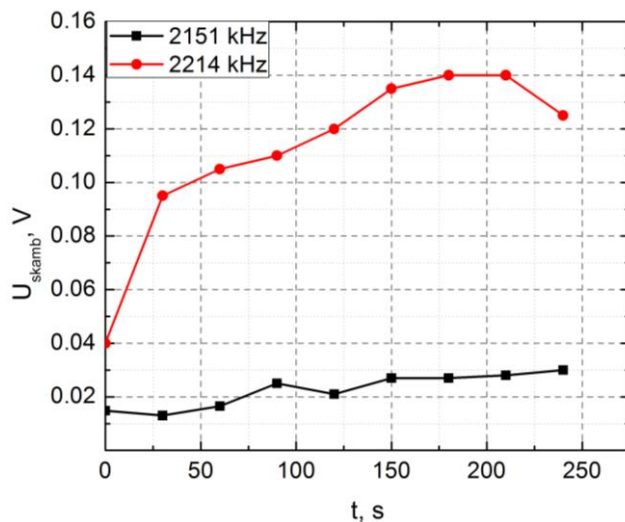
30 pav. BBO2 elemento skambesio amplitudės priklausomybė nuo laiko

Kristalo temperatūros pokyčiai $\Delta T \sim 2^\circ\text{C}$ atsiradę esant 459 kHz ir 1447 kHz dažniams gali būti aiškinami taip: dėl mechaninių virpesių kristale, rezonanso metu išsiskirianti mechaninė energija virsta šiluma, kuri sumažėja grįžus prie nerezonansinio dažnio. 31-ame paveiksle pavaizduota kreivė parodo, kaip kristalo temperatūra bei skambesio amplitudės kinta pereinant nuo rezonansinio (1447 kHz) prie nerezonansinio (250 kHz) dažnio.

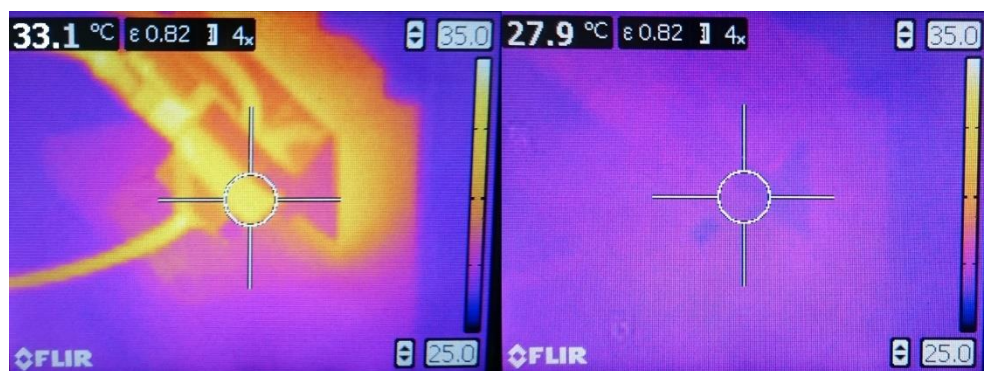


31 pav. Kristalo temperatūros ir akustinio rezonanso amplitudžių kitimas esant skirtingiems dažniams

Atliekant eksperimentus su KRTP2 Pokelso elementu esant pridėtai nuolatinei įtampai akustinių bangų amplitudė buvo pastovi ir laike nesikeitė. Amplitudės kitimas laike buvo stebimas atliekant eksperimentus esant tik aukštam pasikartojimo dažniui (2151 ir 2214 kHz). 32-ame paveiksle pavaizduotos šių dviejų dažnių rezonansinių amplitudžių kitimas gali būti paaiškinamas aukšto pasikartojimo dažnio akustinių bangų sukeltamų virpesių mechaninės energijos vartimu šiluma. Kristalo temperatūra atliekant matavimą dirbant 2214 kHz dažniu pakilo 5,2 °C (33 pav.).



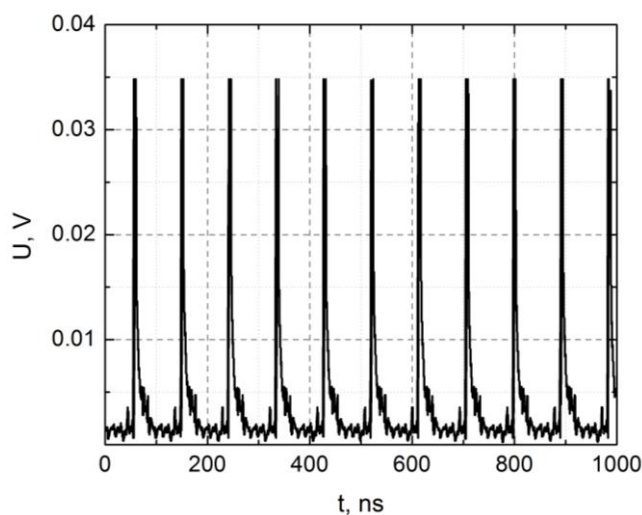
32 pav. KRTP2 elemento rezonansinių amplitudžių kitimas laike



33 pav. Termonuotraukos, kai kristalas: a) dirba 2214 kHz dažniu, b) nėra įjungtas

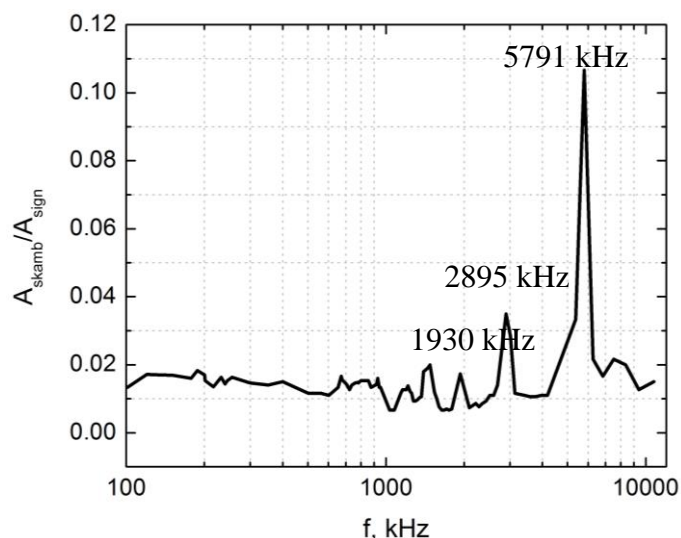
KRTP2 Pokelso elemento veikimas esant nuolatinei įtampai laikui bėgant nekito, priešingai negu KRTP1 elemente. Toks skirtingas Pokelso celių veikimas gali būti aiškinamas tuo, kad elementų kristalai buvo išpjauti ne iš tos pačios kristalo bulės, arba išpjauti iš skirtingų bulės vietų esant nehomogeniškai bulei.

Toliau buvo atliekami eksperimentai su KRTP2 Pokelso elementu ir „greitu“ aukštos įtampos generatoriumi su elektronikos valdymo plokšte, kuris gali generuoti stačiakampius elektrinius 20 ns trukmės impulsus. Dėl trumpų elektrinių impulsų iš osciliatoriaus generuojamos lazerinių impulsų voros buvo išrenkami pavieniai impulsai maksimaliu 10,755 MHz dažniu (34 pav.).



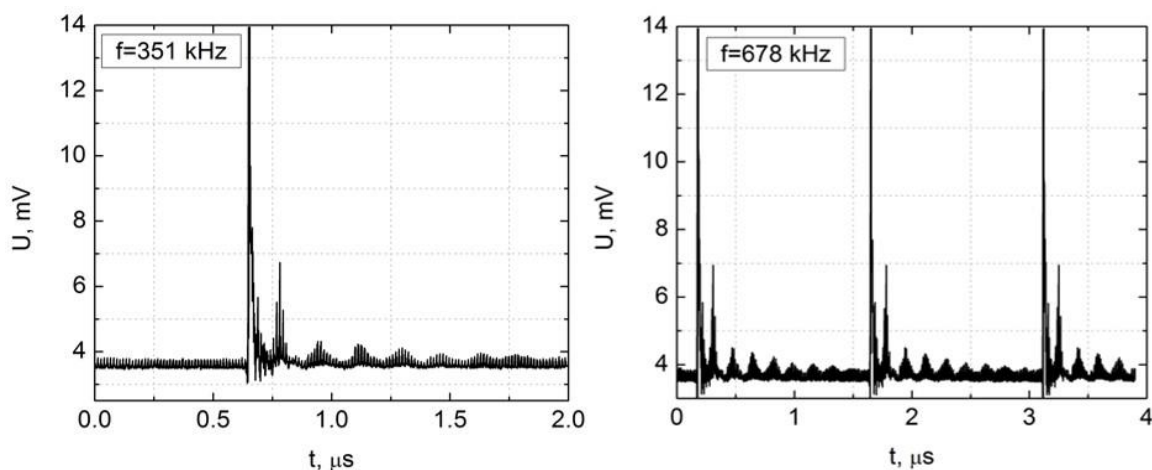
34 pav. 10,755 MHz dažnio osciliatoriaus impulsų vora

Dėl skersinių matmenų (2x2 mm), šio elemento ketvirčio bangos įtampa yra dar mažesnė - $U_{\lambda/4} = 330V$. Dėl mažos valdymo įtampos bei „greitos“ elektronikos valdymo plokštės KRTP2 Pokelso elementų rezonansinė kreivė buvo pamatuota iki maksimalaus 10,755 MHz dažnio (35 pav).



35 pav. KRTP2 elemento optiškai matuota rezonansų kreivė

Dėl stačiakampių žadinimo impulsų, rezonansų kreivėje vėl matomos atsikartojančios harmonikos. Ryškiausiai matomi rezonansai yra ties 5791 kHz, 2895 kHz ir 1930 kHz dažniais. Mažesniųjų dažnių srityje didelių rezonansų maksimumų nėra. Matuojant akustinių rezonansų amplitudes, buvo pastebėtas atsikartojantis harmoninis akustinių bangų sukeltas Pokelso elemento pralaidumo padidėjimas susidaręs už galinio elektrinio signalo fronto (36 pav.). Pamatavus laiko tarpus tarp pralaidumo padidėjimo maksimumų buvo paskaičiuotas akustinių bangų sukeltas pralaidumų periodas, kuris yra lygus ~ 172 ns. Šis periodas atsikartoja visame akustinių rezonansų matavimų ruože, todėl galime spėti, kad tai yra savitasis kristalo rezonansinis dažnis. Iš apskaičiuoto pralaidumo periodo galima surasti šių svyravimų dažnį, kuris yra 5,8 MHz ir jis sutampa su rezonanso kreivėje išmatuotu rezonansu. Galima teigti, kad šis dažnis yra žadinantysis.



36 pav. Harmoninis akustinių bangų rezonavimas esant skirtingiems dažniams

Pagrindinis šio darbo tikslas buvo pasiektas – su nauja „greita“ elektronikos valdymo plokšte ir mažos ketvirčio bangos valdymo įtampos KRTP2 Pokelso elementu galima iš 76 MHz dažnio osciliatoriaus generuojamos voros išrinkti pavienius impulsus.

Žadinančiojo aukšto dažnio harmonikų nebuvimas žemuose dažniuose gali būti aiškinamas žadinančiojo elektrinio signalo trukme. Paveikus kristalą trumpu 20 ns elektriniu impulsu išorinis elektrinis laukas spėja poliarizuoti tik gardelės elektronus, o medžiagos jonų atsako laikas į elektrinį lauką yra ilgesnis. Tokiu būdu kristalas mažiau mechaniškai įsivibruoja, taip sumažindamas rezonansų harmonikų kiekį visame dažnių diapazone.

Išvados

1. Pokelso elementus žadinant plataus spektro stačiakampio formos signalu, sužadinami kristalo savitieji akustiniai virpesiai, atitinkantys tiek pagrindinį žadinančio signalo dažnį, tiek jo harmonikas. Nelyginių harmonikų virpesiai dėl pjezoelektrinio efekto moduliuoja vidinį kristalo lauką ir, atitinkamai efektingą Pokelso elemento įtampą.
2. Elektriškai stebėti KTP Pokelso elemento rezonansai yra išplitę, o akustinės bangos dėl nenulinio akustinių virpesių lygio visame dažnių diapazone ženkliai blogina optinį tokio elemento kontrastą. Todėl toks elementas aukšto pasikartojimo dažnio lazerinėse sistemose netaikytinas.
3. KRTP Pokelso elementui dirbant dideliu pasikartojimo dažniu (ir, atitinkamai, santykinai ilgai esant prijungtam prie aukštos įtampos šaltinio), jo kontrastas mažėja kelių minučių laiko skalėje. Apkeitus valdymo įtampos poliškumą, kontrastas vėl pagerėja. Kontrasto mažėjimą taip pat lydi ir akustinių rezonansų amplitudės augimas, kuris koreliuoja ir su išmatuota celės temperatūra. Šio reiškinio mastas priklauso nuo konkretaus kristalo, naudojamo Pokelso elemente ir greičiausiai yra nulemtas įelektrintų defektų dreifo elektriniame lauke.
4. KRTP Pokelso elementą žadinant trumpu 20 ns stačiakampio formos signalu jame sužadinamos tik aukšto dažnio kristalo savitųjų virpesių harmonikos. Žemuose dažniuose dėl trumpo žadinimo impulso akustiniai rezonansai nesusižadina.
5. Pademonstruota, kad KRTP Pokelso elementu galima išrinkti impulsus iš femtosekundinio osciliatoriaus voros didesniu kaip 10 MHz dažniu.

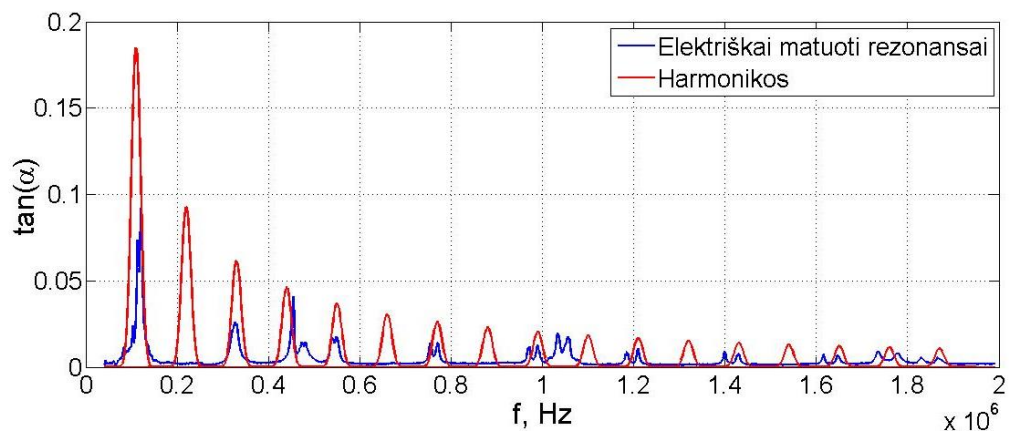
Literatūra

- [1] *Light Conversion*. Available: <http://lightcon.com/Products/femtosecond-lasers.html>, Tiktrinta: 2017-05-01
- [2] *Coherent*. Available: <https://www.coherent.com/lasers/laser/industrial-short-pulse-lasers/femtosecond-lasers/monaco>, Tiktrinta: 2017-05-01
- [3] M. Bass, C. DeCusatis, J. Enoch, V. Lakshminarayanan, G. Li, C. Macdonald, *et al.*, "Handbook of Optics, Third Edition Volume II: Design, Fabrication and Testing, Sources and Detectors, Radiometry and Photometry," ed: McGraw-Hill, Inc., 2010, p. 1264.
- [4] C. McGowan, D. T. Reid, Z. E. Penman, M. Ebrahimzadeh, W. Sibbett, and D. H. Jundt, "Femtosecond optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. **15**, pp. 694-701, 1998/02/01 1998.
- [5] K. Nakagawa, A. S. Shelkovnikov, T. Katsuda, and M. Ohtsu, "Fast frequency stabilization of a diode-laser-pumped monolithic Nd:YAG laser with an extra-cavity electro-optic modulator," *Optics Communications*, vol. **109**, pp. 446-450, 1994/07/15 1994.
- [6] X. D. Wang, P. Basséras, R. J. D. Miller, and H. Vanherzeele, "Investigation of KTiOPO₄ as an electro-optic amplitude modulator," *Applied Physics Letters*, vol. **59**, pp. 519-521, 1991.
- [7] G. D. Goodno, Z. Guo, R. J. D. Miller, I. J. Miller, J. W. Montgomery, S. R. Adhav, *et al.*, "Investigation of β -BaB₂O₄ as a Q switch for high power applications," *Applied Physics Letters*, vol. **66**, pp. 1575-1577, 1995.
- [8] A. van Hoek and A. J. W. G. Visser, "Pulse selection system with electro-optic modulators applied to mode-locked cw lasers and time-resolved single photon counting," *Review of Scientific Instruments*, vol. **52**, pp. 1199-1205, 1981.
- [9] D. Nickel, C. Stolzenburg, A. Beyertt, A. Giesen, J. Häußermann, F. Butze, *et al.*, "200 kHz electro-optic switch for ultrafast laser systems," *Review of Scientific Instruments*, vol. **76**, p. 033111, 2005.
- [10] T. S. Narasimhamurty, *Photoelastic and electro-optic properties of crystals*: Plenum Press, 1981.
- [11] R. W. Boyd, "Order-of-magnitude estimates of the nonlinear optical susceptibility," *Journal of Modern Optics*, vol. **46**, pp. 367-378, 1999/03/01 1999.
- [12] K. K. Wong, I. o. E. Engineers, and INSPEC, *Properties of Lithium Niobate*: INSPEC/Institution of Electrical Engineers, 2002.
- [13] R. M. White, "Surface elastic waves," *Proceedings of the IEEE*, vol. **58**, pp. 1238-1276, 1970.
- [14] S. Štaras, *Puslaidininkinės ir funkcinės elektronikos įtaisai*. Vilnius: Technika, 2005.
- [15] V. Kunigėlis, *Signalų valdymo įtaisai*. VU FF, 2005.
- [16] W. W. Manfred Thumm. *LC and Quartz Oscillators*. Available: http://www.atc.nsu.ru/lpimti/sites/default/files/ch_05.2_oscillator_ii15.pdf, Tiktrinta: 2017-05-01
- [17] C. Chuangtian, W. Bochang, J. Aidong, and Y. Guiming, "A new-type ultraviolet SHG crystal β -BaB₂O₄," *Science in China Series B-Chemistry, Biological, Agricultural, Medical & Earth Sciences*, vol. **28**, p. 235, 1985.
- [18] D. N. Nikogosyan, "Beta barium borate (BBO)," *Applied Physics A*, vol. **52**, pp. 359-368, 1991.
- [19] L. Zheshuai, J. Xingxing, K. Lei, G. Pifu, L. Siyang, and L. Ming-Hsien, "First-principles materials applications and design of nonlinear optical crystals," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. **47**, p. 253001, 2014.
- [20] D. Eimerl, L. Davis, S. Velsko, E. K. Graham, and A. Zalkin, "Optical, mechanical, and thermal properties of barium borate," *Journal of Applied Physics*, vol. **62**, pp. 1968-1983, 1987.
- [21] S. Dezhong and H. Chaoen, "A new nonlinear optical crystal KTP," *Progress in Crystal Growth and Characterization*, vol. **11**, pp. 269-274, // 1985.

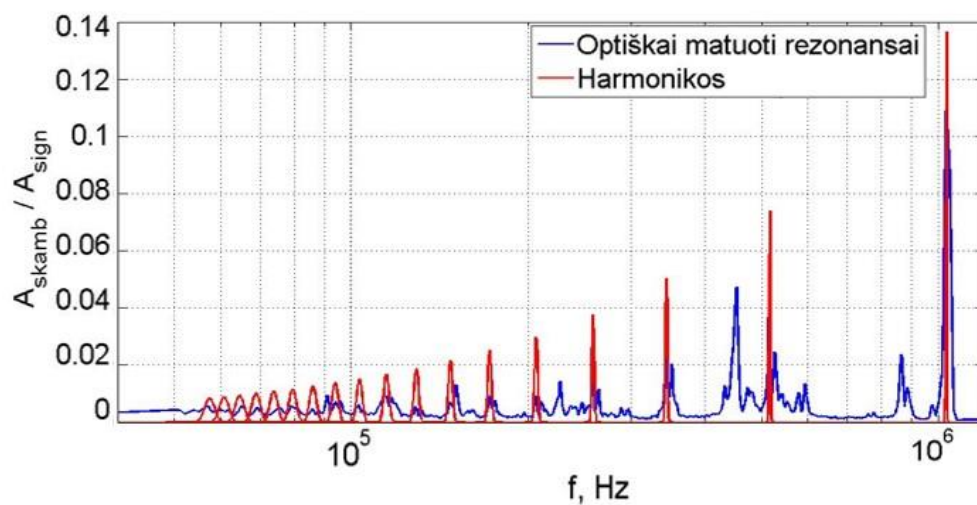
- [22] L. K. Cheng, L. T. Cheng, J. Galperin, P. A. M. Hotsenpiller, and J. D. Bierlein, "Crystal growth and characterization of KTiOPO₄ isomorphs from the self-fluxes," *Journal of Crystal Growth*, vol. **137**, pp. 107-115, 1994/03/02 1994.
- [23] Z. Kecong and W. Ximin, "Structure sensitive properties of KTP-type crystals," *Chinese Science Bulletin*, vol. **46**, pp. 2028-2036, 2001.
- [24] H. Albrecht, P. Villeval, and C. Bonnin, "Study of RTP Crystal Used as Electro-Optic Modulator," in *Advanced Solid-State Photonics*, Incline Village, Nevada, 2006, p. MB3.
- [25] G. G. Gurzadian, *Handbook of nonlinear optical crystals / V.G. Dmitriev, G.G. Gurzadyan, D.N. Nikogosyan*. Berlin ; New York: Springer-Verlag, 1991.
- [26] M. Roth, M. Tseitlin, and N. Angert, "Oxide crystals for electro-optic Q-switching of lasers," *Glass Physics and Chemistry*, vol. **31**, pp. 86-95, 2005.
- [27] M. Abarkan, J. P. Salvestrini, M. D. Fontana, and M. Aillerie, "Frequency and wavelength dependences of electro-optic coefficients in inorganic crystals," *Applied Physics B*, vol. **76**, pp. 765-769, 2003.
- [28] C. A. Ebbers, "Linear electro-optic effect in β -BaB₂O₄," *Applied Physics Letters*, vol. **52**, pp. 1948-1949, 1988.
- [29] J. D. Bierlein and C. B. Arweiler, "Electro-optic and dielectric properties of KTiOPO₄," *Applied Physics Letters*, vol. **49**, pp. 917-919, 1986.

Priedas

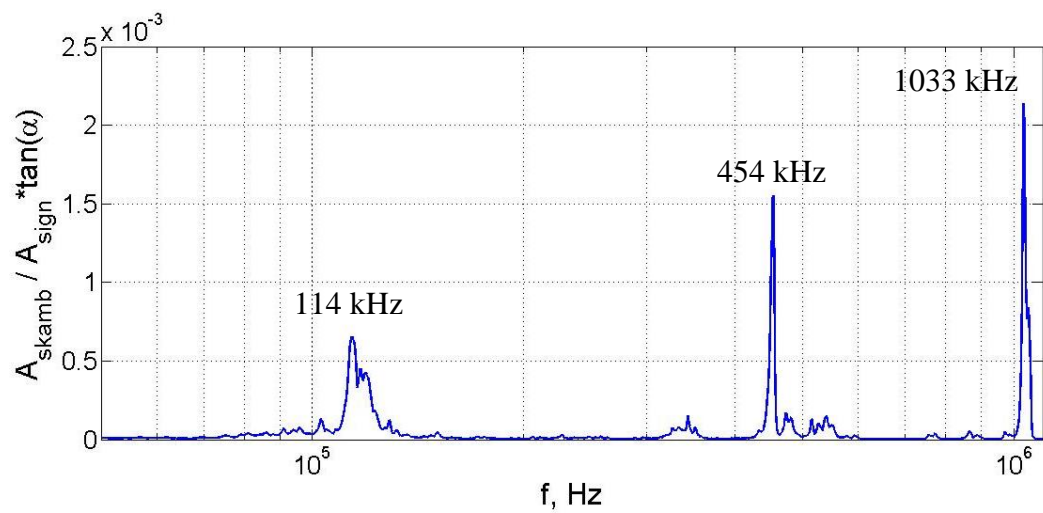
BBO ir KRTP medžiagų Pokelso elementų elektriškai ir optiškai matuotos rezonansų harmonikos ir rezonansinių kreivių koreliacijos



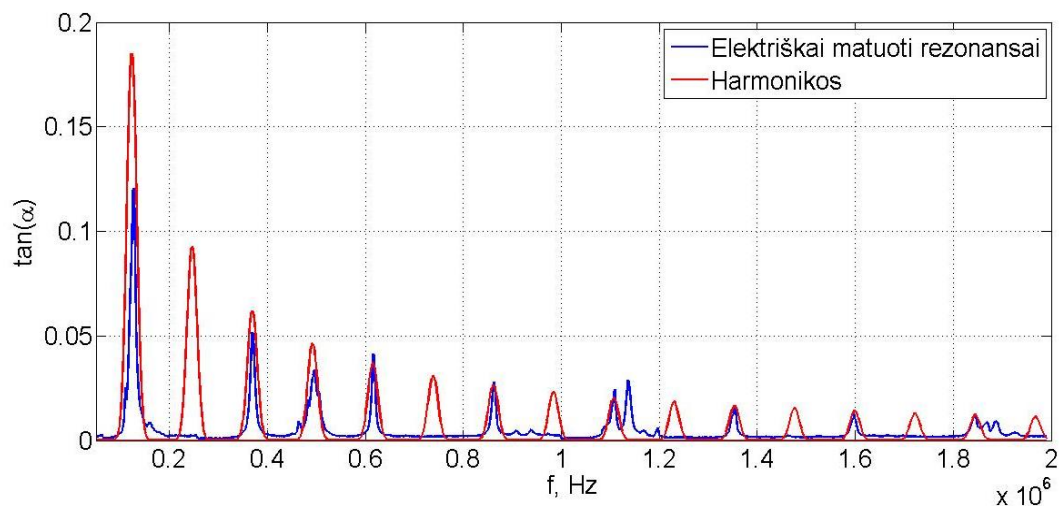
37 pav. BBO2 elemento elektriškai matuotos rezonansų harmonikos



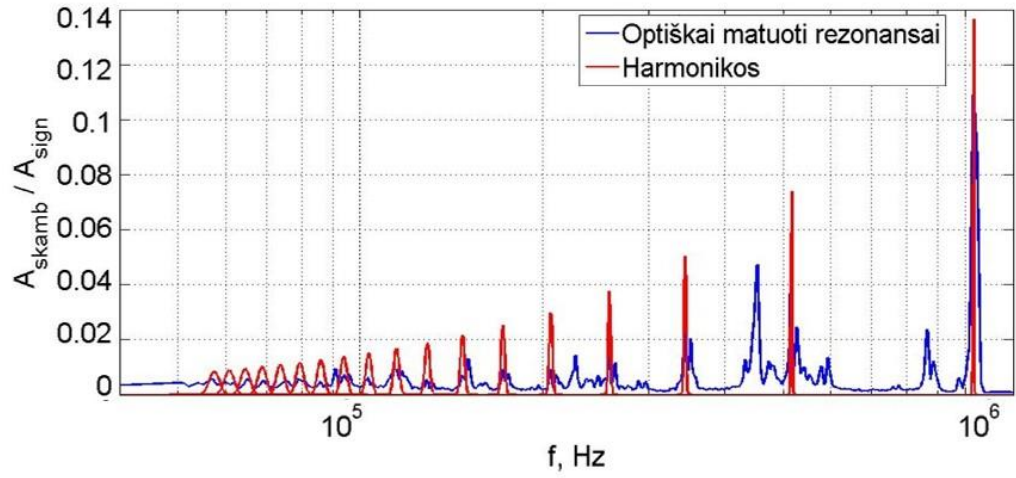
38 pav. BBO2 elemento optiškai matuotos rezonansų harmonikos



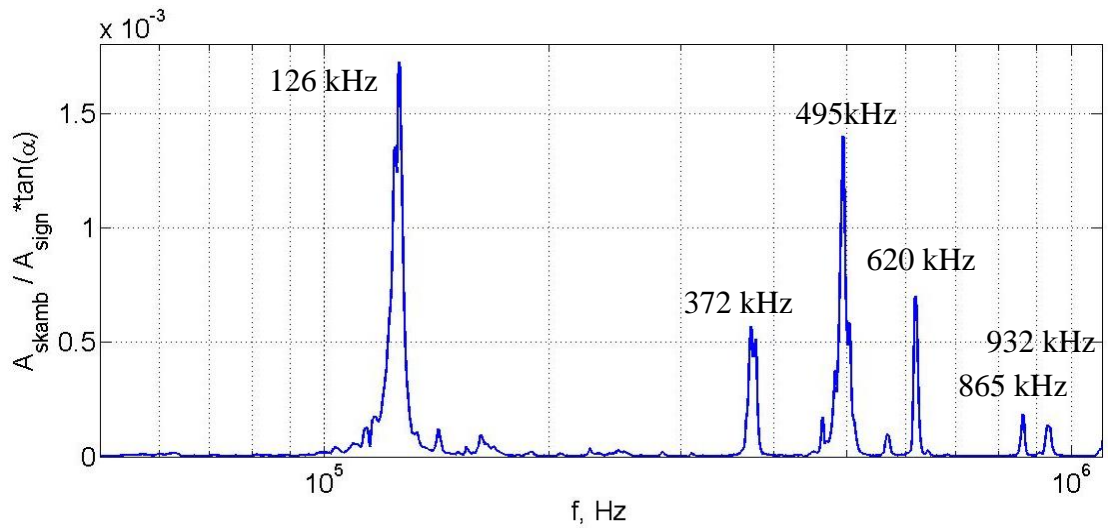
39 pav. BBO2 elemento elektriškai ir optiškai matuotų rezonansinių kreivių koreliacijos spektras



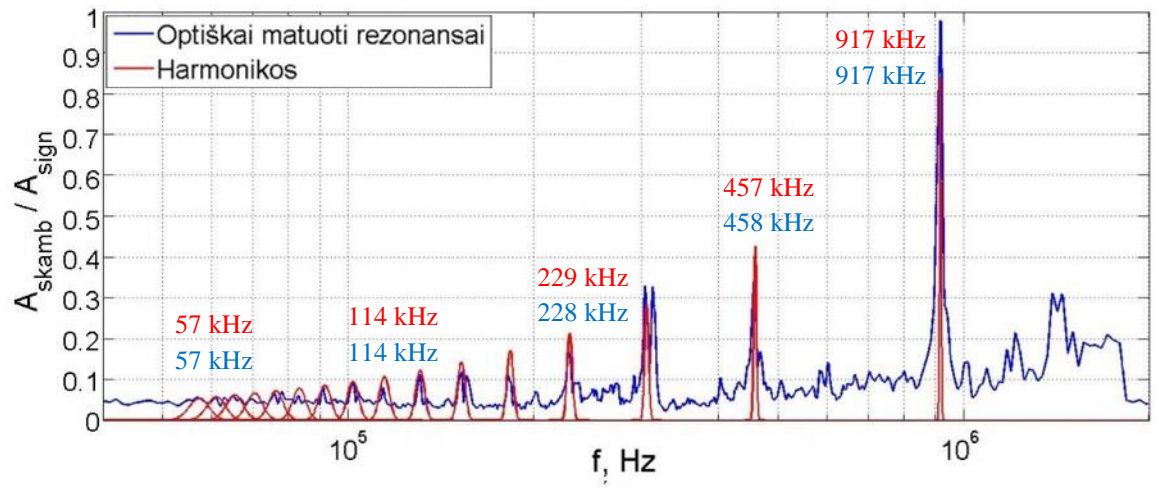
40 pav. BBO3 elemento elektriškai matuotos rezonansų harmonikos



41 pav. BBO3 elemento celės optiškai matuotos rezonansų harmonikos



42 pav. BBO3 elemento elektriškai ir optiškai matuotų rezonansinių kreivių koreliacijos spektras



43 pav. KRTP1 elemento celės optiškai matuotos rezonansų harmonikos

Santrauka

Justina Kalvelytė

POKELSO ELEMENTŲ, NAUDOJAMŲ AUKŠTO PASIKARTOJIMO DAŽNIO LAZERINĖSE SISTEMOSE, SAVYBIŲ TYRIMAS

Šio darbo metu buvo tirti šeši, trijų skirtingų medžiagų, Pokelso elementai, jų dažninės charakteristikos ir jas lemiantys fizikiniai reiškiniai. Dažninės charakteristikos buvo matuotos dviem skirtingais metodais: optiškai ir elektriškai. Matuojant optiškai buvo stebimas Pokelso elemento ir poliarizatoriaus sistemos pralaidumas, o matuojant elektriškai – Pokelso elemento talpos pokytis.

Atlikus eksperimentus buvo iširta, kad Pokelso elementus žadinant stačiakampio formos signalu, kristale yra sužadinamos kristalo savitųjų virpesių harmonikos, o BBO medžiagos Pokelso elementus žadinant harmoniniu signalu, dėl kristale atsiradusios šlyties deformacijos yra sužadinamos tik nelyginės pagrindinio elektroakustinio rezonanso harmonikos. KTP medžiagos Pokelso elemente akustiniai virpesiai žadinasi visame dažnių diapazone ir dėl jų suprastėja šio elemento optinis kontrastas. Moduliuojant KRTP medžiagos Pokelso elementą 20 ns trukmės stačiakampiu elektriniu signalu buvo pasiektas 10,755 MHz elemento veikos pasikartojimo dažnis, kuris yra eile didesnis nei šiuolaikinėse lazerinėse sistemose. Naudojant tokį elementą galima iš femtosekundinio osciliatoriaus, veikiančio 76 MHz dažniu, voros išrinkti pavienius impulsus dažniu siekiančiu 10 MHz.

Summary

Justina Kalvelytė

Investigation of Pockels Cells for High Repetition Rate Laser Systems

Six different Pockels cells of BBO, KTP and KRTP crystals were investigated in this work. Repetition rate characteristics were measured using two methods – optical and electrical. In optical method the transmission of Pockels cell and polarizer system was measured. Using electrical measuring method the changes of cells capacity was observed.

It was demonstrated that Pockels cell excited with rectangle electrical signal generates harmonics of crystal internal vibration frequency. BBO Pockels cells excited with harmonic electrical signal generates only odd harmonics of electro-acoustic resonance because of shear deformation in the crystal. In all measured frequency range KTP Pockels cell have acoustic ringing which causes rather poor contrast ratio. 10,755 MHz repetition rate was demonstrated using KRTP Pockels cell excited with 20 ns electrical pulse. Demonstrated repetition rate is around one order of magnitude higher compared to state of art devices and enables to pick single pulses from a 76 MHz femtosecond oscillator at a rate of 10 MHz.

Kalvelytė J. Pokelso elementų, naudojamų aukšto pasikartojimo dažnio lazerinėse sistemose, savybių tyrimas: Lazerinės technologijos magistro studijų baigiamasis darbas / vad. prof. dr. Mikas Vengris, – Vilnius: Vilniaus universiteto Fizikos fakultetas, 2017. – 48 psl.