

Electronics and electrical engineering Elektronika ir elektros inžinerija

PJEZOELEKTRINIŲ VIRPESIŲ POKELSO NARVELIO KALIO DIDEUTERIO FOSFATO IR BETA BARIO BORATO KRISTALUOSE TYRIMAS

Giedrius SINKEVIČIUS*, Algirdas BAŠKYS

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2018 m. birželio 11 d.; priimta 2018 m. birželio 20 d.

Santrauka. Darbe tiriami Pokelso narvelių su kalio dideuterio fosfato (DKDP) ir beta bario borato (BBO) kristalais pjezoelektriniai virpesiai. Pjezoelektriniams virpesiams tirti sukurtas matavimų stendas. Ištirta DKDP kristalų virpesių amplitudės priklausomybė nuo aukštosios įtampos impulso, žadinančio Pokelso narvelį, trukmės. Ištirtas aktyvus pjezoelektrinių virpesių slopinimas Pokelso narveliuose su DKDP kristalais. Išmatuoti Pokelso narvelių su DKDP kristalais pjezoelektrinių virpesių periodai. Tyrimai atlikti su „Eksma Optics“ Pokelso narvelių PC9SR, PC12SR, PCB3D/25 modeliais.

Reikšminiai žodžiai: Pokelso narvelis, pjezoelektriniai virpesiai, DKDP, BBO, elektrooptinis moduliatorius.

Įvadas

Darbe pateikti Pokelso narvelių, naudojamų kietojo kūno lazeriuose, tyrimai. Optinis Pokelso narvelio kristalo medžiagos kontrastas lemia lazerio išėjimo galią. Pjezoelektriniai skambesiai, sukelti Pokelso narvelio kristale dėl aukštosios įtampos impulsų moduliacijos, mažina medžiagos kontrasto vertę. Tai yra didelė problema lazerinėse sistemose, kuriose naudojamas Pokelso narvelis (Bergmann et al., 2015). Norint įgyvendinti virpesių slopinimą Pokelso narveliuose, reikalingi detalesni tyrimai.

Darbo tikslas – ištirti ir palyginti Pokelso narvelių kalio dideuterio fosfato (DKDP) ir beta bario borato (BBO) kristalų pjezoelektrinius skambesius. Ištirti skambesių priklausomybes nuo aukštosios įtampos impulso, žadinančio Pokelso narvelį, pločio. Detalių tyrimų su šios medžiagos kristalais nėra atlikta. Tyrimas atliktas su „Eksma Optics“ PC12SR (DKDP kristalas – $\varnothing 12 \times 24$ mm), PC9SR (DKDP kristalas – $\varnothing 9 \times 20$ mm) ir PCB3D/25 (dvigubas BBO kristalas $3 \times 3 \times 25$ mm) Pokelso narveliais.

1. Metodika

Tyrimo objektas – „Eksma Optics“ Pokelso narveliai su DKDP ir BBO kristalais. Šie kristalai naudojami kaip optiniai moduliatoriai lazerinėse sistemose su diodiniu arba lempiniu kaupinimu.

DKDP kristalai yra didelių matmenų ($\varnothing 12 \times 24$ mm), pasižymintys stipriu pjezoelektriniu efektu. Medžiagos pramušimo slenkstis ties 1064 nm bangos ilgiu žadinant 10 ns trukmės impulsais $< 850 \text{ MW/cm}^2$ (Robert, 2009).

BBO didelių matmenų kristalų gamyba sudėtinga. Todėl dažniausiai naudojami mažesni ($3 \times 3 \times 25$ mm) kristalai. Jie pasižymi silpnais pjezoelektriniais virpesiais, todėl gali būti naudojami kompaktinėse didelės galios sistemose. Medžiagos pramušimo slenkstis ties 1064 nm bangos ilgiu žadinant medžiagą 10 ns impulsais $< 20 \text{ GW/cm}^2$ (Goodno et al., 1995; Nakatani, Bosenberg, Cheng ir Tang, 1988).

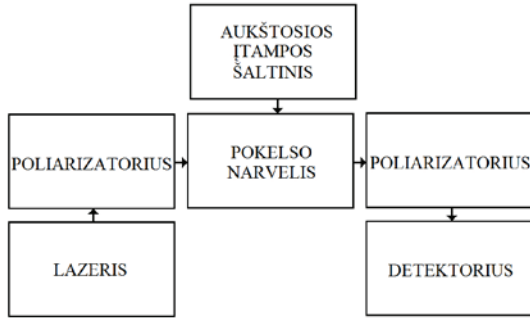
Pjezoelektriniams virpesiams tirti naudojamas stendas, kurio struktūrinė schema pateikta 1 paveiksle.

Šviesa sklinda per pirmąjį poliarizatorių ir Pokelso narvelį. Kai Pokelso narvelio kristalas nėra veikiamas išorinio elektrinio lauko, prasklidusią šviesą atspindi paskutinis poliarizatorius. Tokiu atveju detektoriuje fiksuojamas žemas šviesos intensyvumas.

Kai tam tikra įtampa, kuri vadinama pusės bangos įtampa, tiekiamą į Pokelso narvelį, sklindančios per narvelį šviesos poliarizacija pasukama 90° ir ji patenka į detektorius. Detektoriuje fiksuojamas aukštas šviesos intensyvumas.

Eksperimento metu kristalas Pokelso narvelyje buvo žadinamas skirtingos trukmės elektrinio lauko impulsais, sukeliama aukštosios įtampos impulsais, siunčiamais iš maitinimo šaltinio. Taikant tokią metodiką buvo aptinkami kristalų pjezoelektrinių virpesių stiprumo skirtumai.

*Autorius susirašinėti. El. paštas g.sinkevicius@eksmaoptics.com



1 paveikslas. Matavimų stendo, skirto Pokelso narvelių pjezoelektriniams virpesiams tirti, struktūrinė schema
Figure 1. Block diagram of piezoelectric ringing measurement stand of Pockels cells crystals

Aukštosios įtampos impulsai Pokelso narvelyje buvo formuojami „EksmaOptics“ aukštosios įtampos raktu (DPD-1000-2.9-A1 modelis). Juo galima formuoti impulsus, kurių trukmė – nuo 130 ns iki 5 μ s. Ilgesniems nei 5 μ s impulsams formuoti taikomas regeneracinis metodas (2 paveikslas).

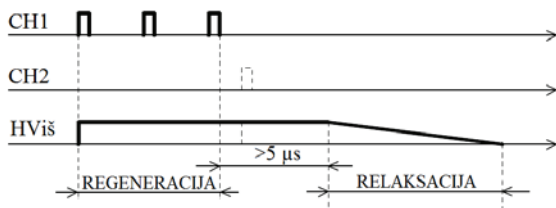
Tyrimams buvo naudotas 1064 nm bangos ilgio, 2 W galios nuolatinės veikos lazeris. Tyrimo objektai DKDP Pokelso narvelio kristalai (PC12SR ir PC9SR) yra išilginio, o BBO kristalai (PCB3D/25) – skersinio tipo modulatoriai. Priklausomai nuo moduliatoriaus tipo skiriasi aukštosios įtampos impulsų amplitudė, norint pasiekti tokį patį Pokelso efektą. DKDP pusės bangos įtampa apskaičiuojama pagal toliau nurodytą formulę (Andreev et al., 2011):

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{2r_{ij}n_0^3}. \quad (1)$$

BBO Pokelso narvelio kristalo pusės bangos įtampa apskaičiuota pagal formulę (Mat Nashim, Al-Tarawni, Aziz, Abdullah ir Bakar, 2017):

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

čia $U_{\lambda/2}$ – pusės bangos įtampa; n_0 – įprasto lūžio rodiklis; r_{ij} – elektrooptinis koeficientas; λ – bangos ilgis; d – atstumas tarp elektrodų; l – kristalo ilgis.



2 paveikslas. Aukštosios įtampos impulso trukmės Pokelso narveliui nustatymas regeneraciniu metodu: CH1 – aukštosios įtampos raktu atidarymo impulsai; CH2 – aukštosios įtampos raktu uždarymo impulsai; HViš – suformuotas aukštosios įtampos impulsas

Figure 2. Adjustment of the high-voltage pulse duration on the Pockels cell crystals: CH1 – opening pulses of high voltage driver. CH2 – shut-off pulses of high voltage driver. HViš – output of high voltage driver

Tyrimams naudoto aukštosios įtampos raktu, kurio tiekiamos impulsinės įtampos maksimali amplitudė 2,8 kV, nepakanka naudojant Pokelso narvelius su DKDP kristalais. Šviesa, sklindanti per kristalą, dėl per mažos įtampos iš aukštosios įtampos raktu, nebus pasukama 90° kampu (pusė bangos). Dėl tos priežasties matuojant DKDP Pokelso narvelio kristalo kontrastą papildomai buvo naudojamas elementas, pasukantis poliarizaciją 45°.

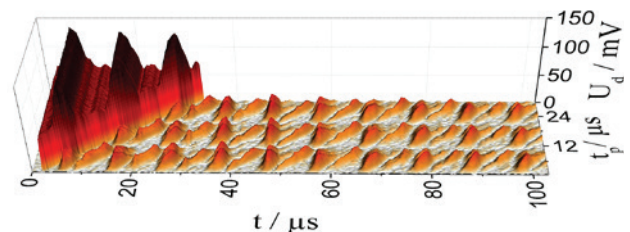
2. Rezultatai ir jų analizė

DKDP kristalo pjezoelektrinių virpesių tyrimas atliktas PC12SR modelio Pokelso narveliui. Pjezoelektrinių virpesių tyrimo stende (1 paveikslas) buvo keičiama Pokelso narvelio aukštosios įtampos impulso trukmė. Detektoriumi buvo fiksuojamos optinio signalo oscilogramos. Gauti detektoriaus įtampos virsmo procesai, atvaizduojantys virpesius Pokelso narvelyje esant skirtingiems aukštosios įtampos impulso pločiams, pavaizduoti 3 paveiksle. Jame U_d – įtampa, užfiksuota detektoriuje, t_p – aukštosios įtampos impulso / optinio impulso trukmė, t – laikas nuo oscilogramos sinchronizacinio impulso pradžios (aukštosios įtampos impulsas užvėlintas 50 ns).

Matavimų rezultatai, pateikti 3 paveiksle, buvo surinkti ir apdoroti autorių sukurta programine įranga, skirta šiam Pokelso narvelių pjezoelektrinių virpesių tyrimų stendui. Atlikti keturi matavimai su to paties tipo Pokelso narvelių kristalais. Standartinis nuokrypis ties mažiausia signalo amplitudės verte neviršija 5 %.

Iš oscilogramos, atvaizduotos 3 paveiksle, matomi optinio signalo svyravimai, kuriuos lemia DKDP kristalo patiriami pjezoelektriniai virpesiai. Juos sukelia staigus įtampos, tiekiamos į narvelį, pokytis (įtampos impulso fronto trukmė ~6 ns). Virpesiai, veikdami kristalą, keičia Pokelso narvelio optinę ašį lazerio spindulio atžvilgiu, dėl to svyruoja optinio signalo amplitudė.

Iš gautų rezultatų (3 paveikslas) galima teigti, kad kuo kristalo virpesių harmonikų periodo trukmė yra artimesnė Pokelso narvelio kristalą žadinančios aukštosios įtampos impulso trukmei, tuo silpnesni virpesiai, atsirandantys po aukštosios įtampos impulso galinio fronto. Tai nutinka dėl to, kad galinio fronto sukeliama pjezoelektriniai virpe-



3 paveikslas. DKDP Pokelso narvelio kristalo (PC12SR modelio) pjezoelektrinių virpesių oscilogramos esant skirtingiems aukštosios įtampos impulso pločiams
Figure 3. Piezoelectric ringing oscilograms of the DKDP Pockels cells crystal (PC12SR model) for different high-voltage pulse widths

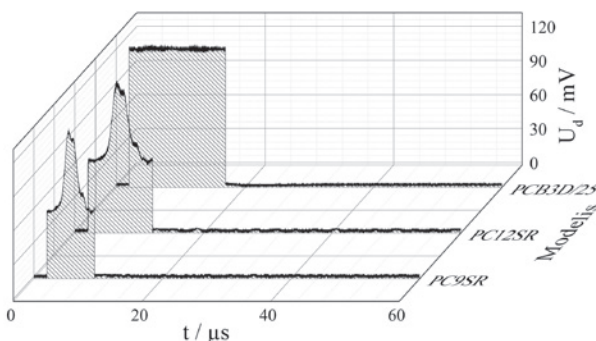
siai tuo momentu yra priešingos fazės, lyginant su priekinio fronto sukeltais virpesiais. Oscilogramose, pateiktose 3 paveiksle, užfiksuoti aukštosios įtampos impulsų pločiai, kurių metu Pokelso narvelio su DKDP kristalu pjezoelektriniai virpesiai slopinami su galinio fronto sukeltais virpesiais.

PC12SR pjezoelektrinių virpesių periodas yra 10 μ s. Eksperimentas buvo atliktas generuojant impulsus žemaisiais dažniais, t. y. impulsų trukmė keičiama nuo 0,2 μ s iki 30 μ s, esant pastoviam 100 Hz dažniui. Tokie parametrai buvo pasirinkti, kad pjezoelektrinio efekto sužadinti virpesiai būtų nuslopę iki verčių, kurios nepaveiktų kito periodo impulso (ištirta, kad virpesys nuslopsta iki 3 % pagrindinio signalo amplitudės po 2,1 ms).

Kituose tyrimo etapuose buvo atlikti matavimai su PC9SR (DKDP kristalas), PC12SR (DKDP kristalas) ir PCB3D/25 (BBO kristalas) Pokelso narvelių modeliais, kurie skiriasi savo matmenimis ir medžiaga. Eksperimentas buvo atliktas parenkant įtampos impulsų trukmes taip, kad būtų pasiektas maksimalus pjezoelektrinių virpesių slopinimas galiniu aukštosios įtampos impulso frontu. Tyrimų rezultatai pateikti 4 paveiksle.

Iš gautų rezultatų (4 paveikslas) matyti, kad maksimaliam virpesių slopinimui pasiekti skirtingo dydžio ir medžiagos kristalams reikalingi skirtingos trukmės aukštosios įtampos impulsai: PC12SR Pokelso narveliui – 10 μ s, PC9SR – 7,4 μ s. Galima teigti, kad kuo didesnis kristalas, tuo impulso trukmė, leidžianti slopinti virpesius, yra ilgesnė. Pokelso narvelio PCB3D/25 pjezoelektriniai virpesiai, sukelti aukštosios įtampos impulso priekinio fronto, yra nykstamai maži, lyginant su PC9SR (DKDP), PC12SR (DKDP) narveliais.

Iš tokių rezultatų galima teigti, kad BBO Pokelso narveliai pasižymi kur kas silpnesniais pjezoelektriniais virpesiais, lyginant su DKDP narveliais. Norint sužadinti didesnės amplitudės pjezoelektrinius virpesius BBO Pokelso narvelio kristale, reikia elementą veikti aukštesnio dažnio impulsais (Sinkevičius ir Baškys, 2017) arba padidinti



4 paveikslas. Pokelso narvelių modelių PC9SR, PC12SR ir PCB3D/25 pjezoelektrinių virpesių oscilogramos, esant maksimaliam virpesių slopinimui galiniu aukštosios įtampos impulso frontu

Figure 4. Oscilograms of the Pockels cell models PC9SR, PC12SR and PCB3D / 25 while dumping piezoelectric oscillations with the falling edge of the high voltage pulse

kontrastų matavimo schemas skiriamąją gebą, fiksuojant gerokai mažesnės amplitudės virpesius. Taip pat dėl stiprių pjezoelektrinių virpesių pakilo temperatūra Pokelso narvelio kristale. Temperatūrinis stabilumas yra labai svarbus Pokelso narveliams su DKDP kristalu (Kedyulich, Slivka, Gerzanich, Guivan ir Lukach, 2003; Starobor ir Palashov, 2016; Takeuchi, Yoshida, Tokita, Fujita ir Kawanaka, 2008).

Išvados

1. DKDP Pokelso narveliai pasižymi itin stipriais pjezoelektriniais virpesiais, kurie siekia iki 1/5 optinio impulso amplitudės.
2. Padidinus Pokelso narvelio DKDP kristalo tūrį 2,13 karto, kristalo pjezoelektrinių virpesių periodas pailgėja 1,35 karto.
3. Pjezoelektriniai virpesiai Pokelso narvelyje su DKDP kristalu, atsirandantys po aukštosios įtampos galinio fronto, yra tuo silpnesni, kuo kristalą žadinančio aukštosios įtampos impulso trukmė yra artimesnė kristalo virpesių harmonikų periodui, kurį lemia DKDP kristalo matmenys.

Literatūra

- Andreev, N. F., Babin, A. A., Davydov, V. S., Matveev, A. Z., Gararin, S. G., Dolgoplov, Y. V., Kulikov, S. M., Sukharev, S. A., & Tyutin, S. V. (2011). Wide-aperture plasma-electrode pockels cell. *Plasma Physics Reports*, 37(13), 1219-1224. <https://doi.org/10.1134/S1063780X1106002X>
- 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, 761-769. <https://doi.org/10.3390/app5040761>
- 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, 1575-1577. <https://doi.org/10.1063/1.113675>
- Kedyulich, V. M., Slivka, A. G., Gerzanich, E. I., Guivan, A. M., & Lukach, P. M. (2003). Vpliv temperaturi i tisku na anizotropiyu dielektrichnoī proniknosti kristaliv KDP i DKDP [Temperature and pressure effect on the anisotropy of dielectric permeability in KDP and DKDP crystals]. *Condensed Matter Physics*, 6(2(34)), 271-280. <https://doi.org/10.5488/CMP.6.2.271>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.01.013>
- Nakatani, H., Bosenberg, W. R., Cheng, L. K., Tang, C. L. (1988). Laser-induced damage in beta-barium metaborate. *Applied Physics Letters*, 53, 2587-2589. <https://doi.org/10.1063/1.100535>
- Robert, L. G. (2009). User's guide for BBO, KD*P, RTP & Lithium niobate q-switches & modulators for q-switching, chopping & pulse extraction. *FastPulse Technology, Inc. Lasermetrics*, 1-16.
- Starobor, A., & Palashov, O. (2016). Thermal effects in the DKDP Pockels cells in the 215–300 K temperature range. *Applied Optics*, 55, 7365-7370. <https://doi.org/10.1364/AO.55.007365>

Sinkevičius, G. ir Baškys, A. (2017). Investigation of frequency response of Pockels cells based on Beta Barium Borate crystals (pp. 1-4). 2017 *Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*.

<http://doi.org/10.1109/eStream.2017.7950307>

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, 03.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/112/3/032061>

INVESTIGATION OF PIEZOELECTRIC RINGING IN THE POCKELS CELLS BASED ON THE DKDP AND BBO CRYSTALS

G. Sinkevičius, A. Baškys

Abstract

The piezoelectric ringing in Dideutero Potassium Phosphate (DKDP) and Beta Barium Borate (BBO) Pockels cells has been investigated. The measurement model for the investigation was developed. The dependence of piezoelectric ringing amplitude on high voltage pulse duration in DKDP Pockels cells was analyzed. The active suppression of piezoelectric ringing in Pockels cells based on DKDP crystals has been investigated. The periods of piezoelectric ringing for different Pockels cells were measured. The investigations were performed using "Eksma Optics" Pockels cell models PC9SR, PC12SR and PCB3D/25.

Keywords: Pockel's cell, piezoelectric ringing, DKDP, BBO, electro-optic modulator.