

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(21) Paraiškos numeris: **2020 536**
(22) Paraiškos padavimo data: **2020-07-09**
(41) Paraiškos paskelbimo data: **2022-01-10**
(45) Patento paskelbimo data: **2022-04-25**

(73) Patento savininkas:
Vilniaus Universitetas, Universiteto g. 3, LT-01513 Vilnius, LT
(72) Išradėjas:
Patrik ŠČAJEV, LT
(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
Otilija KLIMAITIENĖ, 35, AAA Law, A. Goštauto g. 40B, Verslo centras „Dvyniai“, LT-03163 Vilnius, LT

LT 6908 B

(54) Pavadinimas:

Laikinės skyros diferencinės sugerties ir fotoluminescencijos elektro-optinis matavimo prietaisas ir sistema

(57) Referatas:

Išradimas priklauso medžiagų metrologijos sričiai, o būtent - puslaidininkinių medžiagų rekombinacijos trukmių ir jų spektrinių priklausomybių. Sužadinimui naudojami trumpi lazerio impulsai, o krūvininkų tankio kitimas matuojamas per jų sugerties ar liuminescencijos spektrų kitimą laike, 200–2000 nm spektriniame intervale ir gyvavimo trukmėmis virš 10 ps. Diferencinės sugerties režime plataus spektro halogeninių ir deuterio lempų šviesa kolimuojama ir fokusuojama į sužadinamą trumpu lazerio impulsu bandinį. Praėjusios šviesos sugerties pokytis laike po sužadinimo leidžia nustatyti spektrines rekombinacijos trukmes medžiagoje. Praėjusi šviesa kolimuojama ir praeina per elektro-optinį deflektorių su plačiatarpiu elektro-optiniu kristalu veikiamu aukštos įtampos reguliuojamo įtampos augimo greičiu. Deflektuotas pluoštas fokusuojamas lygiagrečiai vaizdinimo spektrografo plyšiui. Vaizdinimo spektrografą perėjusi šviesa sCMOS UV-VIS ar InGaAS CCD kameroje sukuria vaizdą su spektrine skyra horizontaliai ir laikine skyra vertikalčiai. Kelių dešimčių mikrometrų vaizdinimo spektrografo skyra leidžia gauti kelių pikosekundžių laikinę diferencinės sugerties skyrą. Fotoluminescencijos režime, trumpu lazerio impulsu sužadintame bandinyje generuojama liuminescencijos šviesa kolimuojama ir paduodama į tą pačią surinkimo sistemą kaip diferencinės sugerties režime, gaunant tas pačias skyras.

Išradimo sritis

Išradimas priklauso medžiagų metrologijos sričiai. Konkrečiau, tai puslaidininkinių medžiagų elektrinio krūvio transporto charakterizavimo priemonės - matavimo prietaisas ir sistema.

Technikos lygis

Šiam išradimui egzistuoja ankstesni analogai, tačiau veikiantys kitu principu ir/arba turintys nepakankamas charakteristikas ir/arba nepakankamai efektyvūs šiame išradime apibrėžtai techninei problemai spręsti.

Medžiagų krūvininkų sužadinimui ir relaksacijai (rekombinacijai) tirti, gali būti naudojamos „streak“ kameros, skirtos laike ir spektre išskirtų vaizdų registravimui. Tipinės „streak“ kameros, susidedančios iš besisukančio veidrodėlio arba daugiakanalinių plokštelinių fotodaugintuvų (micro-channel plate arba MCP), yra brangios, sudėtingos ir nepatvarios. Didelis veidrodėlio sukimosi greitis neleidžia pasiekti geros laikinės skyros, konstrukcija yra sudėtinga, bet geras spektrinis detektavimo ruožas. MCP tipo „streak“ kameros pasižymi geru jautriu ir laikine skyra, tačiau jų veikimas apribotas senstančiu fotokatodu, kuris taip pat įtakoja spektrinį jautrį (200–1600 nm) ir laikinę skyrą. Laikinis intervalas abiejose kamerose reguliuojamas arba veidrodėlio sukimosi greičiu ar įtampos kitimo sparta, kaip aprašyta JAV patentuose US5043584A (1989), US5278403A (1991), US5719623A (1993).

Pagal nepatentinį šaltinį [1] (1979), yra žinomas alternatyvus „streak“ kameros prototipas, kuris buvo pagamintas naudojant ličio niobato LiNbO_3 kristalo deflektorių. Šis įrenginys leido gauti 20 ps skyrą ir išskirti laike Nd:YAG impulsus, veikė dažnių juostoje nuo 350 nm iki 5200 nm, šviesos pluošto skleidimo laikinis intervalas iki 4 nanosekundžių. Tačiau, dėl LiNbO_3 kristalo fotorefrakcinio pažeidžiamumo, prietaisas neįgavo praktinio pritaikymo.

Panaši kristalinio deflektoriaus struktūra aprašyta JAV patente US4958231A (1988), čia nurodyta, kad elektro-optinis deflektorius nukreipia šviesos pluoštą dėl elektro-optinio efekto LiTaO_3 , BaTiO_3 , KTN arba AMO kristaluose, pakeičiant lūžio rodiklį. Šviesos deflektorių sudaro elektro-optinis kristalas ir elektrodai, deflektoriuje nenaudojamas fotokatodas, o šviesos pluoštas tiesiog nukreipiamas į kristalą.

Neseniai buvo sukurtas kristalinės „streak“ kameros prototipas, naudojantis laisvųjų krūvininkų fotorefrakciją [2], tačiau pastarasis techninis sprendimas reikalauja trumpų impulsų veikimui bei veikia ribotame laikinės skyros intervale.

Pastaruoju metu yra žinomi, pavyzdžiui, literatūros šaltinyje [3] aprašyti greiti kompaktiniai elektro-optiniai deflektoriai 400–750 nm ruože įgauna vis didesnę paplitimą, dėl jų pranašumo prieš akustooptinius, aprašytus [4]. Tačiau pažymėtina, kad pastarieji įrenginiai (greiti kompaktiniai elektro-optiniai deflektoriai 400–750 nm ruože) yra tinkami naudoti tik kolimuotos lazerinės spinduliuotės detekcijai, kas iš esmės skiriasi nuo dabartinio išradimo taikymo ir paskirties.

Be „streak“ kameros ir spektrografo, matavimo sistemose dažnai reikalingi ir kiti funkciniai elementai, bei matavimo ciklo įvykių juose sinchronizavimas ir valdymas. Pavyzdžiui, Hamamatsu [9] C13410 „streak“ kameros specifikacijoje pateikiama „streak“ kameros sistema su išvedimo optika, kamera bei duomenų analizatoriumi (kompiuteriu), tačiau neatskleista, ar šioje sistemoje galima registruoti puslaidininkinių medžiagų elektro-optines sužadinimo ir relaksacijos charakteristikas.

Išradimo esmė

Šio išradimo tikslas yra efektyviai išspręsti žinomų laikinės skyros elektro-optinio matavimo sprendimų trūkumus, su charakteristikomis, leidžiančiomis žadinimo ir elektro-optinio zondavimo būdu matuoti puslaidininkinių medžiagų elektrinį krūvį ir charakterizuoti medžiagos savybes.

Saulės elementų ir elektroninių komponentų medžiagose, laisvųjų krūvininkų gyvavimo trukmės charakterizavimas yra svarbus, ir tai pagrindžia minėtų medžiagų laikinės-skyros diferencinės sugerties (angl. Differential Absorption, DA) ir liuminescencijos (angl. PhotoLuminiscence, PL) matavimų poreikį. Esminės šių matavimų charakteristikos yra Saulės spektrą atitinkanti (1 pav.) šviesos 200–2000 nm bangos ilgių juosta, pakankama rekombinacijos (relaksacijos) ir sugerties proceso matavimų skyra, pasirenkamas relaksacijos matavimo trukmės diapazonas (matavimo trukmės intervalas), prietaiso konstrukcijos efektyvumas bei patikimumas.

Šiame išradime, matuojamo šviesos srauto elektro-optinio deflektavimo funkcijai atlikti naudojami patvaresni plačiatarpiai elektro-optiniai kristalai (pvz. KTP, DKDP kristalai, su panašiais, kaip ličio niobiato LiNbO_3 kristalų, elektro-optiniais koeficientais), ir leidžiantys gauti šviesos deflekciją 200–2000 nm spektriniame ruože

[7], [8] bei pasiekti spektrinę rezoliuciją 200–2000 nm intervale, spektro detekcijai naudojant termoelektriškai šaldomas silicio bei InGaAs kameras. Elektro-optiniai KTP, DKDP kristalai eksploatuojami, jų temperatūrą nustačius artimą Kiuri temperatūrai T_c (pavyzdžiui, DKDP kristalo atveju, $T_c = 229\text{ K } (-70^\circ\text{ C})$) - tam, kad sustiprinti jų elektro-optinį efektą [5]. Skyra laikiniame ruože pasiekama, naudojant aukštos įtampos puslaidininkinius jungiklius (tranzistorius, FET elementus) su mažu perjungimo laiko nestabilumu („jitter“) ir nanosekundine suveikimo sparta. Reguluojama suveikimo trukmė (pavyzdžiui, 2 ns – 2 ms diapazone) naudojama tam, kad matavimo prietaisas galėtų vykdyti tiek lėtų, tiek greitų rekombinacijos procesų matavimus tuose pačiuose medžiagų bandiniuose, kas atitinkamai leidžia puslaidininkinių medžiagų tiriamų savybių didelę įvairovę. Puslaidininkinio jungiklio paleidimas sinchronizuojamas su lazeriniu tiriamos medžiagos sužadavimo impulsu.

Taip pat, šiame prietaise galima taikyti žadinimo-zondavimo režimą, naudojant plačiaspektrinius šviesos šaltinius diferencinės sugerties zondavimui sužadintose medžiagose.

Dėl plataus spektrinio diapazono ir laikinio diapazono, šis prietaisas gali būti taikomas neseniai išpopuliarėjusių metalo-organinių perovskitinių medžiagų, skirtų pigioms ir efektyvioms saulės celėms [6], tyrimui. Įrenginys fiksuoja tiriamos medžiagos (puslaidininkio, perovskito) lazeriu sužadintų elektronų rekombinacijos iš laidumo juostos į valentinę juostą laiko periodą (kurio trukmė virš 10 pikosekundžių ir gali trukti iki milisekundžių), per kurį išspinduliuojamas fononas kaip šviesa (arba elektronų žadinimo periodą, kurio laikotarpiu sugerama plačiajuosčių lempų šviesa, taip diferencijuotai pakeičiamas jos spektras), ir toks pokyčių periodas atvaizduojamas kaip spektrograma 200–2000 nm bangos ilgio intervale. Tai yra, gaunamas matavimo rezultatas yra stačiakampis monochrominis vaizdas (skaičių 2D-masyvas), kuriame matomas sugertų arba išspinduliuotų spektrų kitimas laiko intervale po trumpo sužadavimo (x–ašis: bangos ilgis, y–ašis: laikas intervale nuo kelių nanosekundžių, su žingsniu iki kelių pikosekundžių (sužadavimo momentas paderinamas taip, kad patektų į matavimo langą ir būtų stebima sužadintos medžiagos relaksacija)).

Taip pat, gali būti kartojama keletas vienodų matavimų (vaizdų), kurių suskaičiuojamas vidurkis, kad pašalinti žadinimo impulsų intensyvumo fliktuacijas ir spektrą registruojančių kamerų elektroninius triukšmus. Tokia užregistruota ir

apdorota spektrinė-laikinė diagrama yra tiriamos medžiagos optinė-elektrinė charakteristika.

Brėžinių aprašymas

Išradimas paaiškintas brėžiniuose. Priedamos schemas ir brėžiniai yra išradimo aprašymo sudedamoji dalis ir pateikti kaip nuoroda į galimą išradimo įgyvendinimą, bet neturi riboti išradimo apimties. Brėžiniai ir schemas nebūtinai atitinka išradimo detalių mastelį. Detalės, kurios nėra būtinos aiškinant išradimo veikimą ir neturi ryšio, nėra pateikiamos.

1 pav. Matuojamų šviesos dažnių spektras (Saulės spektras) ir dažnių intervalas 200–2000 nm.

2 pav. Elektro-optinių KDP ir DKDP kristalų skaidrumas (pralaidumas) šviesai, procentais (%), bangos ilgio spektro intervale nuo 200nm iki 2000nm (pagal [7] ir [8]).

3 pav. Laikinės skyros diferencinės sugerties ir fotoluminescencijos elektro-optinio matavimo sistema ir prietaiso vidinė struktūra.

4 pav. Žadinimo ir relaksacijos įvykiai bei matavimo intervalo laikiniai parametrai, (a) visi sistemos elementai sinchronizuojami nuo pradinio momento t_0 . (b) laikinės skyros elementai (įtampos jungiklis, deflektorius) ir kamera sinchronizuojami nuo lazerio impulso su vėlinimo generatoriaus pagalba.

5 pav. kameros fotoluminescencijos signalo vaizdai gauti nuo $\text{FA}_{0.5}\text{MA}_{0.5}\text{PbBr}_3$ polikristalinio perovskitinio sluoksnio, sužadinto 10 ps trukmės 351 nm bangos ilgio lazerio impulsu, esant skirtingo intensyvumo (1, 2, 3) sužadinimams.

6 pav. vertikalūs bei horizontalūs 5 paveiksle parodytų vaizdų pjūviai, atitinkantys skleidimą laike ir bangos ilgio spektre. Paveiksle 6a - didėjant sužadinimo intensyvumui (bandymai su 1–3 intensyvumais didėjimo tvarka) relaksacijos greitėja; paveiksle 6b - dėl netiesinės rekombinacijos bei priverstinės emisijos, stebima papildoma emisijos linija ties 552 nm.

Brėžiniai – pažymėtų objektų aprašymas

1 Sužadinimo lazeris: Pharos Yb:KGW, Expla Nd:YLF, 0.2 ps, 10 ps;

2 Lazerio energijos atenuatorius;

3 Bandinys, kurio medžiaga žadinama ir tiriamos elektro-optinės charakteristikos;

4 Polichromatinis modulis;

5 Paraboliniai veidrodžiai;

6 Diafragma;

7 Achromatinis kolimatorius;

8 Elektro-optinis deflektorius, kvadrupolinis, su elektro-optiniu kristalu;

9 Greitas jungiklis, veikiantis 2 ns–2 ms matavimo laiko intervale;

10 Greitas fotodetektorius;

11 Vaizdinimo spektrografas UV-NIR, 200–2000 nm, dviejų portų;

12 InGaAs NIR (artimo-infraraudonojo spektro) kamera;

13 SCMOS UV-VIS (ultravioletinio ir matomojo spektrų) kamera;

14 Kompiuteris, apdorojantis kamerų užregistruotus duomenis;

15 Vėlinimo generatorius, 10 ps skyra;

16 Laiko skaitiklis.

Detalus išradimo aprašymas

Išradimas yra iš medžiagų metrologijos srities, būtent, puslaidininkinių medžiagų rekombinacijos trukmių ir jų spektrinių priklausomybių matavimo. Bandomos medžiagos (3) sužadimui naudojami trumpi lazerio impulsai, o krūvininkų tankio kitimas yra matuojamas per jų diferencijuotos sugerties (angl. Differential Absorption, DA) ir liuminescencijos (angl. PhotoLuminiscence, PL) spektrų kitimą laike. Šis prietaisas skirtas stebėti rekombinaciją puslaidininkinėse ir organinėse medžiagose su sugertimi ir/arba emisija 200–2000 nanometrų bangos ilgio intervale ir rekombinacijos gyvavimo trukmėmis ilgesnėmis nei 10 pikosekundžių. Matavimo prietaiso ir sistemos schema parodyta 2 paveiksle. Medžiagos bandiniui (3) sužadinti naudojamas trumpų impulsų lazeris (1), kurio intensyvumas valdomas atenuatoriumi (2). Sužadimo lazerio impulsai fokusuojami tiriamos medžiagos bandinyje (3).

Diferencijuotos sugerties (DA) režime, plataus spektro halogeninių ir deuterio

lempų šviesa yra kolimuojama polichromatiniame modulyje (4) ir fokusuojama į trumpu lazerio impulsu sužadinamą medžiagos bandinio (3) vietą. Praėjusios šviesos sugerties pokytis laike po sužadinimo leidžia nustatyti spektrines rekombinacijos trukmes medžiagoje. Praėjusi šviesa paraboliniiais veidrodžiais (5) pervaizduojama į diafragmą (6), praleidžiama per diafragmą, po to kolimuojama achromatiniu kolimatoriumi (7) ir praeina per kvadrupolinį elektro-optinį deflektorių (8), kurio konstrukcija yra sudaryta remiantis literatūros šaltiniu [1], tačiau realizuota su plačiatarpiu elektro-optiniu KDP arba DKDP kristalu (8), turinčiu skaidrumą šviesai (elektromagnetinei spinduliutei) 200–2000 nm bangos ilgio diapazone. Elektro-optinis kristalas (8) yra valdomas aukšta įtampa, su įtampos augimo greičiu, reguliuojamu iš aukštos įtampos greitaveikio jungiklio (9). Minėto jungiklio (9) paleidimas yra sinchronizuotas su greito fotodetektoriaus (10) reakcija į daliklio (D) atidalintą sužadinančio lazerio impulso dalį. Deflektoriuje (8) kintančia įtampa atlenkiamas šviesos pluoštas yra fokusuojamas į vaizdinimo spektrografo (11) plyšį - taip, kad šviesos pluošto deflekcijos kryptis būtų lygiagreti spektrografo (11) plyšiui. Vaizdinimo spektrografą (11) perėjusi šviesa yra registruojama sCMOS UV-VIS kameroje, 200–1000 nm intervale, (12) ir InGaAS CCD kameroje, 1000–1700 nm intervale (13), ir taip sukuria dvimatį (2D) vaizdą su spektrine skyra horizontaliai bei laikine skyra vertikalčiai. Kelių dešimčių mikrometrų vaizdinimo spektrografo (11) skyra leidžia gauti kelių pikosekundžių laikinę diferencinės sugerties skyrą. Abiejose kameroje užregistruoti spektro vaizdinimo duomenys perduodami į juos apdorojantį kompiuterį (14), kuriame pakartotų kelių matavimo rezultatų (2D-vaizdų) suskaičiuoto vidurkio pagalba gali būti papildomai padidinamas signalo-triukšmo santykis. Aukštos įtampos jungiklio (9) paleidimas ir deflektuoto vaizdo suderinimas laike yra atliekamas vėlinimo generatoriaus (15) pagalba pavieniams impulsams, o papildomai - su tikslaus aparatinio laiko skaitiklio (16) pagalba - daugkartinio vaizdo nuskaitymo atveju, siekiant kompensuoti vėlinimo trukmės nestabilumą („jitter“).

Fotoluminescencijos (PL) režime, trumpu fokusuotu lazerio impulsu sužadintame medžiagos bandinyje (3) yra sugeneruojama medžiagos liuminescencijos šviesa. Iš bandinio (3) išėjusi liuminescencijos šviesa paraboliniiais veidrodžiais (5) pervaizduojama į diafragmą (6), praleidžiama per diafragmą (6), kolimuojama achromatiniu kolimatoriumi (7) ir toliau apdorojama tais pačiais žingsniais ir tais pačiais sistemos elementais, kaip ir diferencinės sugerties (DA)

režime. Gautas rezultatas yra taip pat 2D-vaizdas su laikine ir spektrine skyra.

Matavimo intervalo laikiniai parametrai: trukmė, poslinkis atžvilgiu žadinimo pradžios ir laikinė skyra – sistemoje/prietaise keičiami plačiose ribose ir nustatomi operatoriaus pagal medžiagos charakteristikų matavimo pasirinktas aplinkybes bei tikslus. Paveiksle 4 pavaizduoti sužadavimo-relaksacijos matavimo įvykiai, valdomi kompiuteriu (14), vėlinimo generatoriumi (15) ir programinėmis priemonėmis. Tačiau, šie laiko įvykiai gali būti pikosekundžių eilės, todėl reikalingi aparatiniai elementai, užtikrinantys sinchronizavimą itin dideliu tikslumu bei minimalia laiko paklaida (sklaida, angl. „jitter“). Tai svarbu, kad atlikti kartotinius matavimus (2D-vaizdus), iš kurių skaičiuojamas rezultato vidurkis. Pagal 4 pav. laikinę diagramą, DA ir PL matavimo cikle atliekamas sinchronizuotas įvykių valdymas:

- 1) Ciklo pradžioje laiko momentu t_0 aktyvuojamos kameros (12, 13);
- 2) Laiko momentu t_s , įtampos jungiklis (9) pradeda didinti deflektoriaus (8) valdymo įtampą $U_{(9)}$;
- 3) Laiko momentu $t_0 + \Delta t$, generuojamas lazerio impulsas, kurio trukmė nuo 0.2 iki 10 pikosekundžių. Prasideda medžiagos (3) žadinimas, o lazerio šviesa per medžiagos bandinį (3) pasiekia fotodetektorių (4);
- 4) Priklausomai nuo nustatytų matavimo trukmės ir laikinės skyros, valdymo įtampa $U_{(9)}$ auga greičiau (1-oji augimo kreivė) arba lėčiau (2-oji augimo kreivė). Atitinkamai, deflektorius (8) spektrą skleidžia trumpesniame (1-ame) arba ilgesniame (2-ame) laiko intervale.

Taip sinchronizuojant įvykius, matavimo intervale registruojamas medžiagos žadinimas lazerio impulsu ir relaksacija.

Ši seka leidžia atlikti keletą vienodų matavimų, iš kurių skaičiuojamas jų vidurkis. Svarbu, kad kiekvieno pasikartojančio ciklo įvykiai prasidėtų nuo pradinio laiko momento t_0 , o įtampos jungiklio (9) ir lazerio (1) paleidimo momentai t_s ir $t_0 + \Delta t$ pasikartojančiuose cikluose būtų nekintantys. Tam tikslui naudojamas laikos skaitiklis (16), kuris paskaičiuoja laiko skirtumą tarp įtampos jungiklio (9) ir fotodetektoriaus (4) impulsų ir perduoda jį į kompiuterį, kuriame atliekamas vaizdų sustūmimas laike šio laiko skirtumo pagalba.

Jei registruojama relaksacija ne nuo sužadavimo pradžios, bet tam tikrame

vėlesniame relaksacijos intervale, tuomet kameros (12,13) gali būti aktyvuojamos ir skleidimo įtampa U_9 įjungžiama nuo fotodetektoriaus (4) suveikimo momento t_{FD} , su papildomu pavėlinimu Δt , tai yra $t_{FD} + \Delta t$. Šie įvykių valdymo variantai parodyti paveiksle 4 b.

1) Nuo generatoriaus aktyvuojamos kameros (kameros aktyvavimas turi elektroninį užvėlinimą).

2) Generuojamas lazerio impulsas, trunkantis nuo 0.2 iki 10 pikosekundžių. Prasideda medžiagos (3) žadinimas, o lazerio šviesa per medžiagos bandinį (3) pasiekia fotodetektorius (4).

3) Nuo fotodetektoriaus (4) paleidžiamas įtampos $U_{(9)}$ jungiklis (9).

4) Priklausomai nuo pasirinktų matavimo trukmės, laikinės skyros, ir intervalo pavėlinimo Δt – generuojama atitinkamos formos deflektoriaus (8) valdymo įtampa $U_{(9)}$ ir skleidžiamas atitinkamas spektro laike vaizdas.

5) Tokiu būdu gali būti padidintas dinaminis fotoluminescencijos signalo registravimo diapazonas, nes kameros nebus sotinamos pradiniu intensyviu fotoluminescencijos signalu.

Paveiksluose 5 ir 6 parodyti medžiagos bandinio matavimo, atlikto su aprašyta sistema, rezultatai. Paveiksle 5 parodyti kameros fotoluminescencijos signalo vaizdai gauti nuo $\text{FA}_{0.5}\text{MA}_{0.5}\text{PbBr}_3$ polikristalinio perovskitinio sluoksnio, sužadinto 10 ps trukmės 351 nm bangos ilgio lazerio impulsu, esant skirtingo intensyvumo (1,2,3) sužadinimams. Paveiksle 6 pateikti vertikalūs bei horizontalūs 5 pav. parodytų vaizdų pjūviai, atitinkantys skleidimą laike ir bangos ilgio spektre. Paveiksle 6a - didėjant sužadinimo intensyvumui (bandymai su 1–3 intensyvumais didėjimo tvarka) relaksacijos greitėja; Paveiksle 6b - dėl netiesinės rekombinacijos bei priverstinės emisijos, stebima papildoma emisijos linija ties 552 nm.

Nepatentinės literatūros sąrašas

- [1] C. L. M. Ireland, A 20 ps resolution crystal streak camera, Opt. Commun. 30, 99 (1979);
- [2] C. H. Sarantos and J. E. Heebner, Solid-state ultrafast all-optical streak camera enabling high-dynamic-range picosecond recording, Opt. Lett. 35, 1389 (2010);
- [3] Conoptics, Inc.: <https://www.conoptics.com>;
- [4] M. S. Woody, M. Capitanio, E. M. Ostap, and Y. E. Goldman, Electro-optic deflectors deliver advantages over acousto-optical deflectors in a high resolution, ultra-fast force-clamp optical trap, Woody, Opt. Express 26, 11181 (2018);
- [5] Y. Takeuchi, A. Yoshida, S. Tokita, M. Fujita, J. Kawanaka, Temperature dependences of the electro-optic coefficient in DKDP crystal, 2007 Conference on Lasers and Electro-Optics - Pacific Rim, DOI: 10.1109/CLEOPR.2007.4391521;
- [6] W. Nie, H. Tsai, R. Asadpour, J.-C. Blancon, A. J. Neukirch, G. Gupta, J. J. Crochet, M. Chhowalla, S. Tretiak, M. A. Alam, H.-L. Wang, A. D. Mohite, High-efficiency solution-processed perovskite solar cells with millimeter-scale grains, Science 347, 522 (2015).
- [7] A. Dyan et al. Transmission measurements in rapid growth KDP and DKDP crystals, Journal of Modern Optics, Volume 56, 2009 - Issue 1;
- [8] Xumin Cai et al. Rapid growth and properties of large-aperture 98%-deuterated DKDP crystals, High Power Laser Science and Engineering, (2019), Vol. 7, e46, 8 pages.
- [9] Hamamatsu, High dynamic range streak camera C1341 series https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/sys/SHSS0021E_C13410.pdf.

APIBRĖŽTIS

1. Laikinės skyros elektro-optinio matavimo įrenginys,

- žadinantis medžiagos bandinyje (3) elektrinius krūvininkus,
- formuojantis krūvininkų sugertos (DA) ir/arba krūvininkų rekombinacijos metu spinduliuojamos (PL) šviesos pluoštą,
- deflektuojantis šviesos pluoštą laikinės skyros matavimo intervale,
- laikinės skyros matavimo intervale vaizdina šviesos pluošto spektrą, jį registruoja ir apdoroja,

b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad sugeriamos ir/arba spinduliuojamos šviesos spektras vaizdinamas ir registruojamas 200–2000 nm bangos ilgio diapazone, o laikinė skyra ir matavimo intervalas diapazone nuo 10 ps iki rekombinacijos proceso pabaigos.

2. Įrenginys pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad taikomas registruoti puslaidininkinių ir perovskitinių medžiagų Saulės celėms elektro-optines charakteristikas.

3. Laikinės skyros elektro-optinio matavimo sistema registruoti medžiagų elektrinių krūvininkų žadinimo ir rekombinacijos procesus, apimanti:

- medžiagos (3) elektrinių krūvininkų žadinimo priemonės,
- sugertos ir/arba spinduliuojamos šviesos pluošto formavimo priemonės,
- šviesos pluošto laikinės skyros deflektorių (8),
- šviesos pluošto spektro vaizdinimo laike spektrografą (11) ir spektro registravimo bei apdorojimo priemonės,

b e s i s k i r i a n t i tuo, kad

- šviesos pluošto spektras vaizdinamas ir registruojamas 200–2000 nm bangos ilgio diapazone, kur šviesos pluošto deflektorius (8) yra kietakūnis elektro-optinis kristalas,
- sistema apima priemones formuoti spektro vaizdinimo bei registravimo laikinę skyrą, registravimo intervalo trukmę ir vėlinimą, daugkartinį vaizdo nuskaitymą.

4. Sistema pagal 3 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad šviesos pluošto deflektorius (8) yra kvadrupolinis DKDP arba kito kristalo deflektorius, skaidrus šviesai 200–2000 nm bangos ilgio diapazone.

5. Sistema pagal 3 ir 4 punktus, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad deflektoriaus (8) kristalo eksploatacijos temperatūra palaikoma artima Kiuri temperatūrai, kad sustiprinti kristalo elektro-optinį efektą.

6. Sistema pagal 3 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad spektro vaizdinimo mažiausia laikinė skyra yra 10 pikosekundžių.

7. Sistema pagal 3 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad matavimo laikinio intervalo formavimo priemonės yra laiko skaitiklis (16), deflektoriaus įtampos jungiklis (9), fotodetektorius (10) ir vėlinimo generatorius (15), kuriais

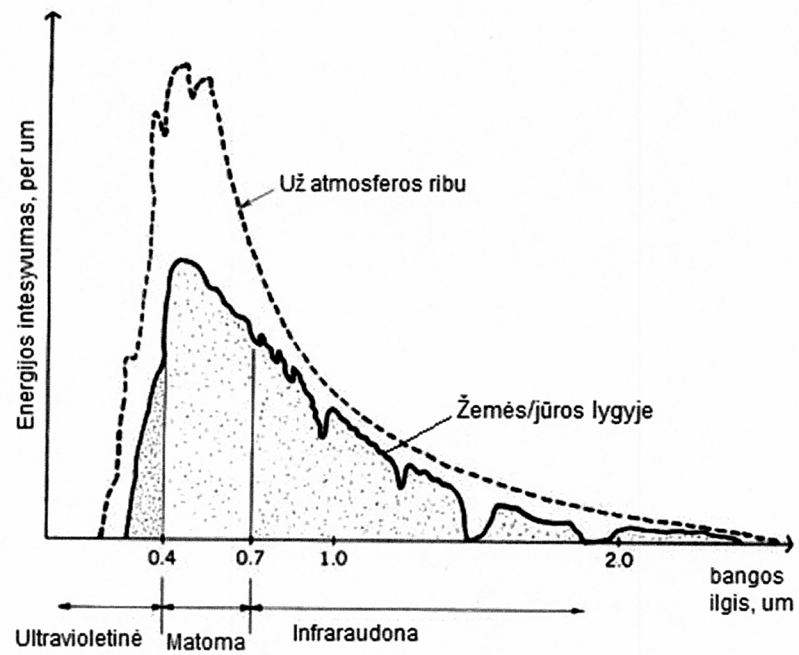
- matavimo laikinė skyra keičiama nuo 10 pikosekundžių,
- intervalo trukmė keičiama nuo 2 nanosekundžių iki 2 milisekundžių,
- atliekamas daugkartinis vaizdo registravimas ir matavimo intervalo vėlinimas.

8. Sistema pagal 3 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad veikia medžiagos bandinio (3) žadinimo-zondavimo režime, su plačiaspektriais šviesos šaltiniais zonuoti diferencinę sugertį (DA) sužadintose medžiagose.

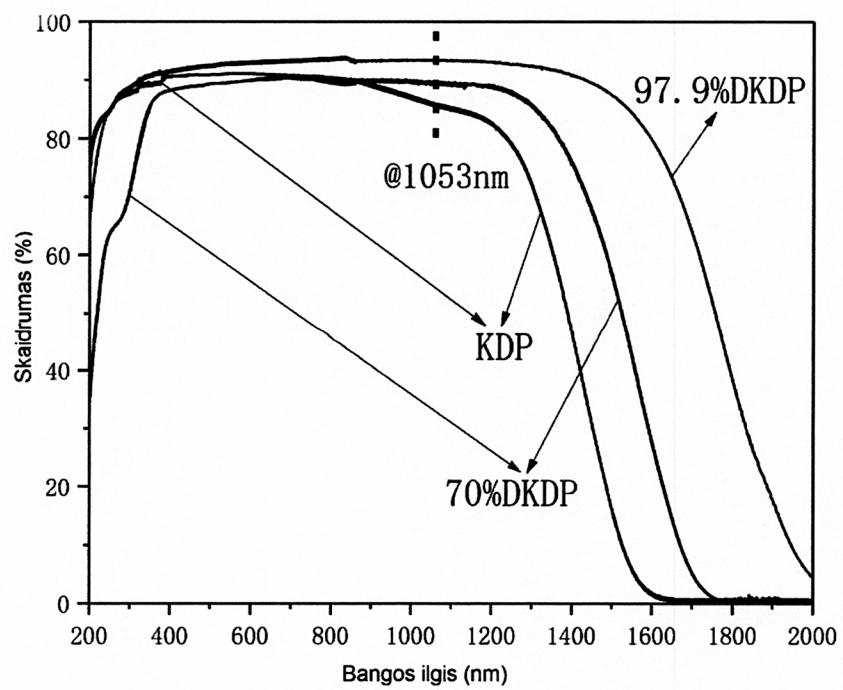
9. Sistema pagal 3 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad joje medžiagos bandinys (3) žadinamas lazerio (1) impulsu ir registruojamas krūvininkų rekombinacijos metu išspinduliuotos šviesos (PL) spektras.

10. Sistema pagal 3 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad vaizdinimo spektrografas (11) yra UV-NIR 200–2000 nm diapazono, o spektro vaizdas laikinės skyros matavimo intervale registruojamas sCMOS UV-VIS kameroje (12) ir InGaAS CCD kameroje (13), 200–2000 nm bangos ilgio diapazone.

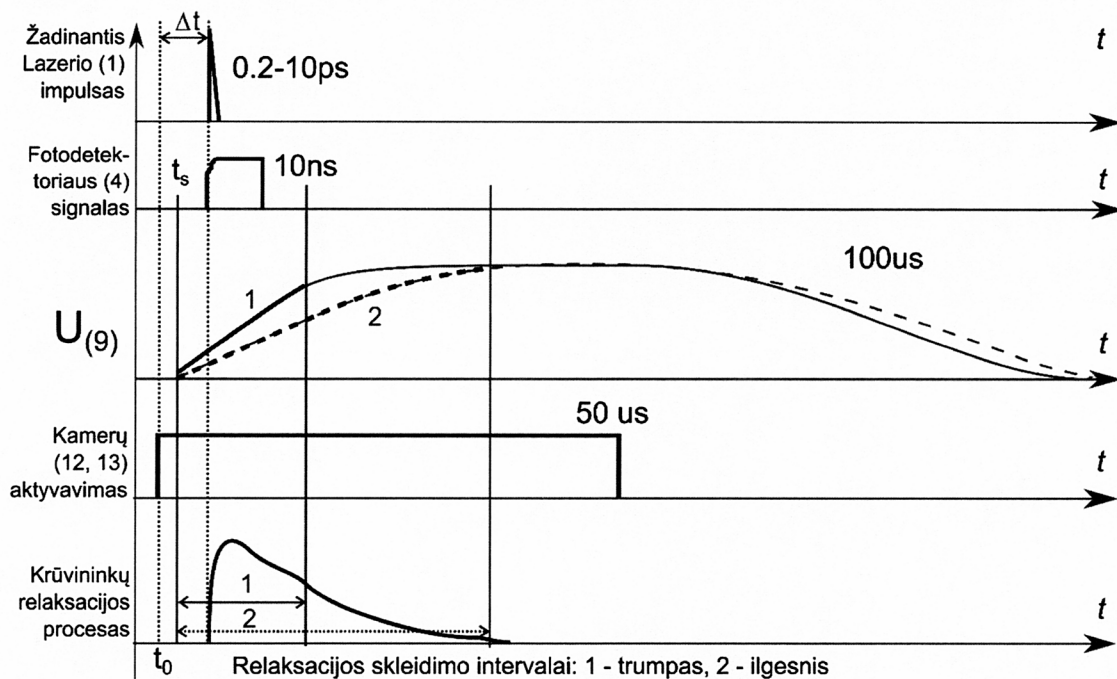
11. Sistema pagal 3 punktą, b e s i s k i r i a n t i tuo, kad apima priemonės kartoti matavimą daugiau nei vieną kartą, o matavimo rezultatas yra matavimo vaizdų vidurkis.



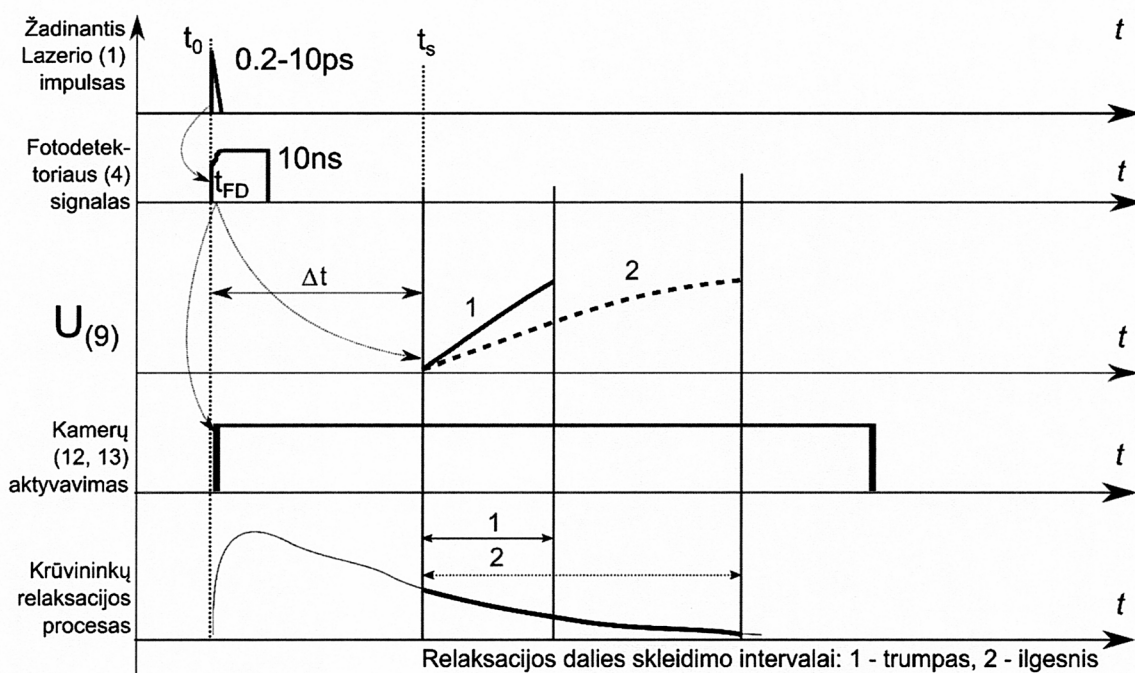
1 pav.



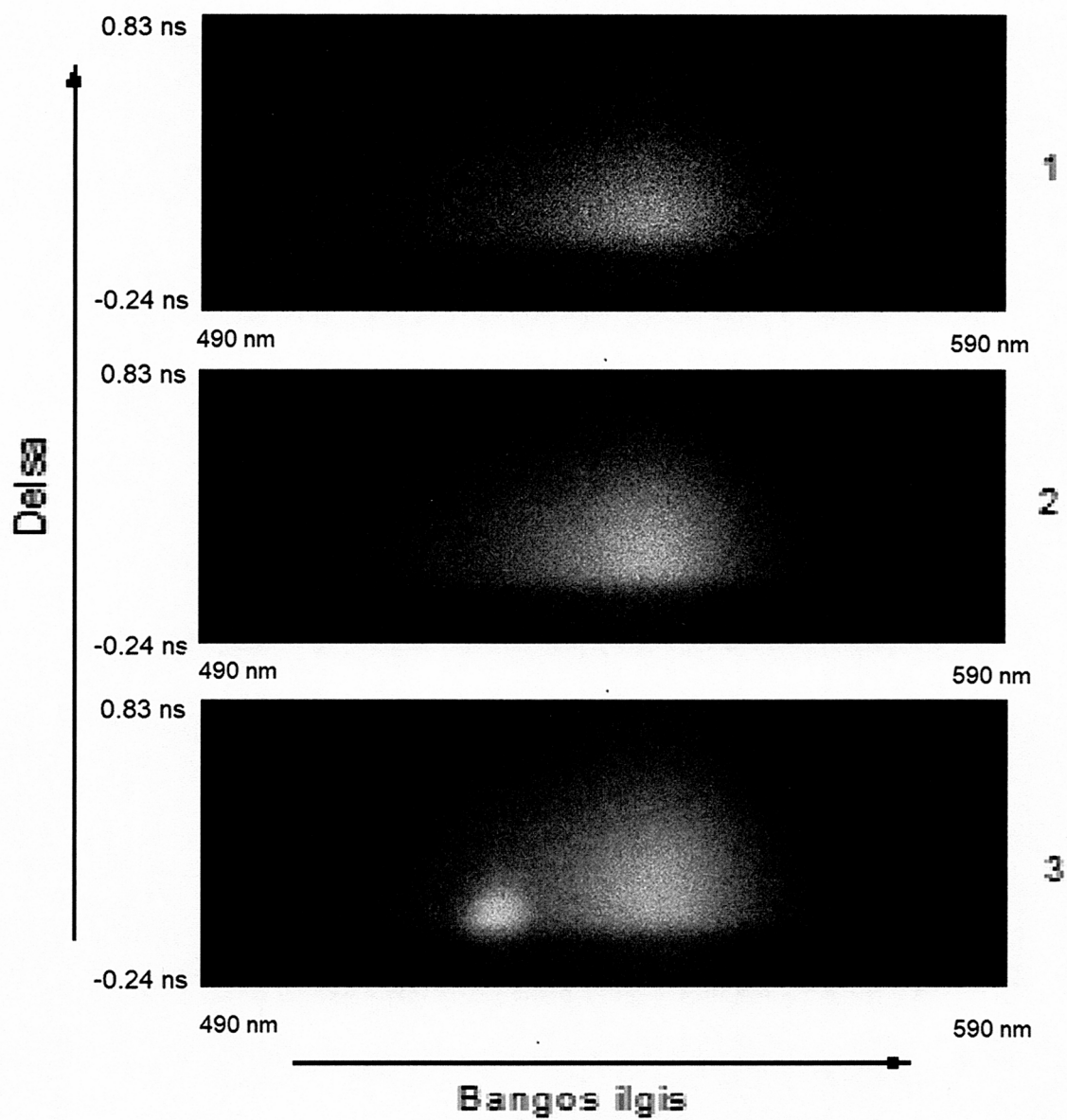
2 pav.

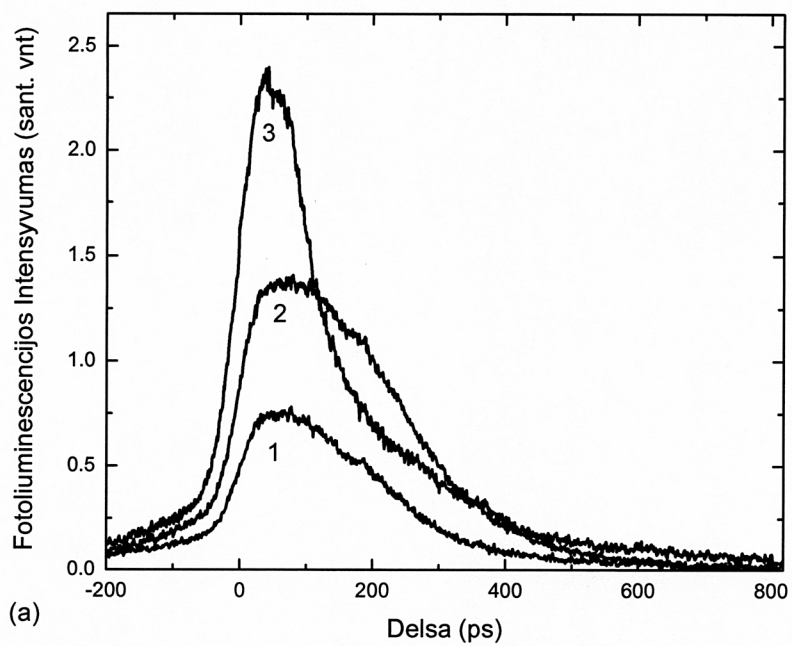


a)

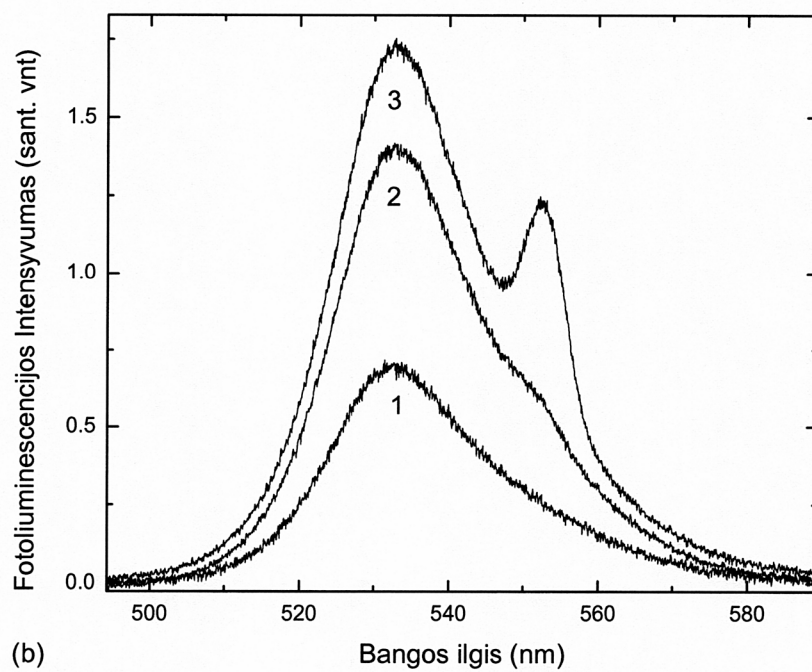


b)





a)



b)

6 pav.