

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(21) Paraiškos numeris: **2021 573**
(22) Paraiškos padavimo data: **2021-12-06**
(41) Paraiškos paskelbimo data: **2023-06-12**
(45) Patento paskelbimo data: **2023-07-10**

(73) Patento savininkas:
Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, Savanorių pr. 231, 02300 Vilnius, LT
(72) Išradėjas:
Tadas PAULAUSKAS, LT
Arūnas KROTKUS, LT
Ričardas NORKUS, LT
Ignas NEVINSKAS, LT
(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
Virgina Adolfina DRAUGELIENĖ, 8, UAB TARPINĖ, A.P.Kavoliuko g. 24-152, LT-04328 Vilnius, LT

LT 7003 B

(54) Pavadinimas:

Puslaidininkinių optoelektronikos prietaisų charakterizavimo įrenginys

(57) Referatas:

Išradimas priklauso puslaidininkinių optoelektronikos prietaisų spektrinių charakteristikų matavimo sričiai ir gali būti naudojamas tiriant įvairių optoelektronikos komponentų veikos charakteristikas. Pasiūlytas įrenginys apima femtosekundinį lazerį, veidrodį, dalinantį lazerio pluoštelį į dvi dalis, kur didesnio intensyvumo pluoštelio dalis yra nukreipta į tiriamąjį prietaisą, o mažesnio intensyvumo pluoštelio dalis aktyvuoja detektorius, kuri patenka tiriamajame prietaise sugeneruoti ir nuo jo atsispindėję spinduliuotės impulsai. Siekiant praplėsti matuojamą bangos ilgių diapazoną ir padidinti spektrinių matavimų tikslumą įrenginys turi optinį parametrinį stiprintuvą, pro kurį praeina pluoštelio dalis, nukreipta į tiriamąjį prietaisą ir kuriame sukuriamas kintamo bangos ilgio femtosekundinių šviesos impulsų pluoštelis. Šis pluoštelis patekęs į tiriamąjį prietaisą sugeneruoja terahercų (THz) spinduliuotės impulsus, kurie kartu su nuo prietaiso atspindėtais impulsais patenka į detektorius, kuris registruoja THz spinduliuotės impulsus. Registravimo priemonė nustato tiriamojo prietaiso spektrinę charakteristiką pagal detektoriuje užregistruotų THz impulsų formą laike.

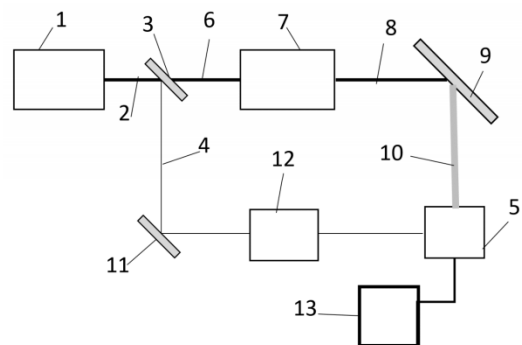


Fig. 1

TECHNIKOS SRITIS

Šis išradimas priklauso puslaidininkinių optoelektronikos prietaisų spektrinių charakteristikų matavimo sričiai ir gali būti naudojamas tiriant įvairių optoelektronikos komponentų, įskaitant daugiasandūrinius saulės elementus, veikos charakteristikų matavimuose.

TECHNIKOS LYGIS

Paprastai puslaidininkinių optoelektronikos prietaisų charakteristikos yra matuojamas apšviečiant prietaisą įvairaus bangos ilgio šviesos pluoštelio ir matuojant prietaiso kontaktuose atsiradusį elektrinį signalą. Tačiau tokiems optoelektroniniams prietaisams, kaip daugelio sandūrų saulės elementai (DSSE), monolitiškai integruoti viename darinyje, panašūs elektrinius kontaktus naudojantys matavimai yra neįmanomi, nes vidinių darinio sandūrų sluoksniai yra nepasiekiami. Todėl ši problema yra sprendžiama panaudojant kelis skirtingų bangos ilgių šviesos šaltinius.

Vienas tokių DSSE charakterizavimo įrenginių yra aprašytas darbe (S.W. Lim et al, „Analysis of spectral photocurrent response from multi-junction solar cells under variable voltage bias“, 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 000712-000716, DOI: 10.1109/PVSC.2010.5617046). Įrenginys buvo panaudotas matuojant trijų sandūrų InGaP/InGaAs/Ge saulės elemento išorinio kvantinio našumo spektrus. Saulės elementas yra vienu metu apšviečiamas trimis skirtingais šviesos pluošteliais. Du intensyvūs lazerio pluošteliai (raudonas ir mėlynas) stipriai sužadina InGaP ir Ge p-n sandūras, todėl bendra fotosrovė tekanti per prietaisą yra ribojama InGaAs sandūros, kuri yra apšviečiama per monochromatorių mažesnio intensyvumo ksenono lempos pluoštelio. Šis pluoštelis yra mechanškai karpomas, o fotosrovė yra registruojama sinchroniniu detektoriumi. Esant šiai eksperimento geometrijai, yra išmatuojamos vidurinės InGaAs sandūros charakteristikos; norint tokius tyrimus atlikti ir su likusiomis dviem p-n sandūromis, reikia atitinkamai parinkti skirtingų sandūrų optinės sugerties sritį atitinkančių bangos ilgių šviesos pluoštelių intensyvumus.

Žinomo charakterizavimo įrenginio trūkumas yra neišvengiamas matuojamojo prietaiso temperatūros pokytis veikiant didelio intensyvumo šviesos pluošteliams, skirtiems nematuojamų p-n sandūrų įtakai eliminuoti. Tas temperatūros pokytis gali reikšmingai įtakoti ir tiriamosios sandūros charakteristikas, ir kitų DSSE darinyje

esančių ribų tarp skirtingų medžiagų sluoksnių elektrinius parametrus. Be to, matavimo rezultatus gali paveikti ir liuminescencijos spinduliuotė iš stipriai sužadintų sandūrų su didesniu nei tiriamojame sandūroje draustinių energijų tarpu.

Puslaidininkų ir iš jų pagamintų prietaisų elektrines ir optines charakteristikas tirti nenaudojant elektrinių kontaktų yra įmanoma pasitelkus trumpus terahercinės (THz) spinduliuotės impulsus. JAV patente US 9,450,536 B2 (2016. 09. 20) – prototipas, yra aprašomi tokius impulsus panaudojantys puslaidininkų optoelektronikos prietaisų charakterizavimo būdas ir jį realizuojantis įrenginys. Įrenginį sudaro impulsinis lazeris, leidžiantis generuoti tris skirtingo bangos ilgio optinius impulsus ir naudojamas apšviečiant tiriamąjį DSSE, tų impulsų vėlinimo laike dalis, reikalinga išskiriant kiekvieno jų generuojamus THz spinduliuotės impulsus, ir THz impulsų detektavimo ir rezultatų apdorojimo dalys. Būdas yra paremtas THz spinduliuotės impulsų generavimo puslaidininkyje, apšviestame trumpu optiniu impulsu, reiškiniu. Skirtingo bangos ilgio šviesa yra sugerama skirtinguose DSSE sluoksniuose, o dėl šios sugerties atsiradę elektronai ir skylės bus veikiami atitinkamame sluoksnyje esančio vidinio elektrinio lauko ir perskiriama erdvėje vieni nuo kitų. Dėl šio persiskyrimo atsiradęs kintantis laike elektrinis dipolis yra pagrindinė spinduliuojamojo THz impulso atsiradimo priežastis. Iš THz impulso amplitudės galima įvertinti vidinio elektrinio lauko stiprį atskiruose DSSE darinį sudarančių medžiagų sluoksniuose. Šiuo būdu, pasitelkiant fokusuotą ir DSSE įrenginio paviršių skenuojantį THz impulsų generavimo spindulį, taip pat galima įvertinti skirtinguose gyliuose ir skirtingose įrenginio vietose esančius medžiagos defektus ir morfologinius pokyčius, kurie gali nulemti krūvininkų nespindulinę rekombinaciją bei vidinio elektrinio lauko pokyčius.

Minėtame patente yra siūlomi keli šį charakterizacijos būdą galintys realizuoti įrenginiai. Pirmajame iš jų optinių impulsų šaltinis yra femtosekundinis lazeris; greta pagrindinio lazerio bangos ilgio impulso yra naudojami lazerio antrosios ir trečiosios harmonikų impulsai, gauti praleidus pagrindinį impulsą per atitinkamus netiesiškus optinius kristalus. Antrosios ir trečiosios harmonikų impulsai vėlinimo linijose yra užlaikomi laike pagrindinės harmonikos impulso atžvilgiu tam, kad detektorius galėtų registruoti kiekvieno jų generuojamo THz impulsų amplitudes atskirai.

Antrajame minėtajame JAV patente siūlomame įrenginio realizacijos variante optinių impulsų šaltiniu pasirinktas „baltas“, superkontinumą generuojantis

femtosekundinis lazeris, kurio impulso spektras yra labai platus. Filtrais pasirenkamos trys skirtingos šio spektro dalys; jos leis gauti skirtingo bangos ilgio (ir ilgesnės už pradinę trukmės) optinius impulsus, kurie bus vėlinami ir naudojami apšviečiant DSSE panašiai, kaip tas daroma pirmojo realizacijos varianto atveju.

Abu šie variantai yra sunkiai realizuojami. AM0 Saulės spektras užima platų bangos ilgių ruožą nuo ~300 nm iki 1600 nm, didžiausio indėlio į elektronų ir skylių porų generavimą DSSE galime tikėtis siauresniame ruože, kuriame rasime daugiausiai fotonų. Iš fotonų su įvairia energija skaičiaus pasiskirstymo Saulės AM0 spektre matyti, kad techniškai įdomiausia yra šio spektro dalis, kurioje fotonų energijos yra tarp 1 eV ir 3 eV. Todėl, kalbant apie pirmąjį iš prototipe siūlomų variantų, kuriame matuojant yra pasitelkiami femtosekundinio lazerio pirmosios harmonikos bei padvigubinto ir patrigubinto jos dažnio impulsai, optimaliausias būtų 1 eV energijos šviesos kvantus generuojanti lazerinė sistema. Tokios sistemos rinkoje egzistuoja, jos remiasi aktyviosiomis terpėmis, legiruotomis Yb ar Nd jonais. JAV patente aptariamas Ti:safyro lazeris – plačiausiai iš visų femtosekundinių lazerių paplitęs prietaisas, netiks, nes jo kvanto energija yra ~1,5 eV, todėl trigubo dažnio fotonų energija sieks 4,5 eV – spektro ruožą, kuris Saulės energetikos požiūriu nėra aktualus.

„Baltos“ šviesos femtosekundinių impulsų spektras gali apimti ruožą nuo ~200 nm iki daugiau nei 1600 nm, tačiau tokie impulsai yra gaunami praleidus labai galingus pradinius, užkrato optinius impulsus per vienokią ar kitokią netiesišką optinę terpę: dujas ar skystį (*R. L. Fork, et al., „Femtosecond white-light continuum pulses“, Opt. Lett., 8, pp. 1-3 (1983), DOI:10.1364/OL.8.000001*) ar kietąjį kūną, pavyzdžiui, amorfinį kvarcą (*A. Saliminia et.al., „Ultra-broad and coherent white light generation in silica glass by focused femtosecond pulses at 1.5 μm“, Opt.Express, 13, pp. 5731-5738 (2005), DOI:10.1364/OPEX.13.005731*). Dėl šios priežasties gaunama spektro forma bus stipriai įtakojama netiesiškos terpės optinių rezonansų, o įvairių spektro dalių intensyvumas labai skirsis.

Dar vienas bendras prototipe siūlomo būdo ir įrenginių realizacijų trūkumas yra susijęs su kelių optinių impulsų sekos, kurioje atstumai tarp impulsų yra didesni už THz impulso generavimo trukmę, naudojimu. Pastarasis dydis yra apie 1 ps, tačiau krūvininkų gyvavimo trukmės saulės elementuose paprastai yra keliomis dydžių eilėmis ilgesnės, todėl nerekombinavę ar neištraukti į kontaktus elektronai

sąlygos THz impulsų sugertį ir iškraipys matavimų rezultatus.

SPRENDŽIAMA TECHININĖ PROBLEMA

Šiuo išradimu siekiama praplėsti matuojamą bangos ilgių diapazoną ir padidinti spektrinių matavimų tikslumą bei sukurti nesunkiai realizuojamą įrenginį įvairių optoelektronikos komponentų, įskaitant daugiasandūrinius saulės elementus, veikos charakteristikų matavimui.

UŽDAVINIO SPRENDIMO ESMĖ

Uždavinio sprendimo esmė yra pasiekama pagal išradimą pasiūlytu puslaidininkių optoelektronikos prietaisų charakterizavimo įrenginiu, apimančiu femtosekundinį lazerį, pusiau skaidrų veidrodį, dalinantį lazerio pluoštelį į pirmąją pluoštelio dalį ir antrąją pluoštelio dalį, kuri yra didesnio intensyvumo nei pirmoji pluoštelio dalis ir yra nukreipta į tiriamąjį prietaisą, vėlinimo liniją, keičiančią pirmosios pluoštelio dalies optinį kelią, terahercinių impulsų detektorius, aktyvuojamą pirmosios pluoštelio dalies ir registravimo priemonę, kur įrenginys turi optinį parametrinį stiprintuvą, kuris išdėstytas lazerio pluoštelio antrosios dalies optiniame kelyje tarp pusiau skaidraus veidrodžio ir tiriamojo prietaiso, kur antroji didesnio intensyvumo femtosekundinio lazerio pluoštelio dalis patenka į optinį parametrinį stiprintuvą, sukuriantį kintamo bangos ilgio femtosekundinių šviesos impulsų pluoštelį, kuris nukreipiamas kampu į tiriamojo prietaiso paviršių, kur tiriamajame prietaise sugeneruoti ir nuo jo atsispindėję teraherciniai (THz) spinduliuotės impulsai patenka į detektorius, kurį aktyvuoja praėjusi per vėlinimo liniją pirmoji pluoštelio dalis, o detektoriuje užregistruoti THz spinduliuotės impulsai patenka į registravimo priemonę, kuri nustato tiriamojo prietaiso spektrinę charakteristiką pagal detektoriuje užregistruotų THz impulsų formą laike.

IŠRADIMO NAUDINGUMAS

Tiriamojo optoelektronikos prietaiso spektrinis atsakas yra nustatomas matuojant THz impulsų formą, generuojamą tiriamajame prietaise, apšviestame įvairaus bangos ilgio optinio parametrinio stiprintuvo (OPS) impulsais. Surinktų

duomenų analizė gali būti atliekama integruojant THz impulsų formą laike, arba pasitelkus kompiuterinį krūvininkų dinamikos ir THz generavimo modeliavimą įrenginyje. OPS generuojamų impulsų bangos ilgį galima keisti plačiame spektriniame ruože nedideliais žingsniais, todėl jo panaudojimas leidžia išplėsti spektrinės charakteristikos nustatymo diapazoną ir padidinti jos matavimo tikslumą.

Skirtingo bangos ilgio OPS impulsai bus sugeriami skirtinguose tiriamojo prietaiso, pavyzdžiui DSSE, gyliuose – tuose sluoksniuose, kurių medžiagos draustinių energijų tarpas bus mažesnis nei OPS impulso kvanto energija. Femtosekundinis optinis impulsas sukurs atitinkamame sluoksnyje elektronus ir skyles, kurie, judėdami sluoksnyje esančiame vidiniame elektriniame lauke, bus erdvėje perskiriami vieni nuo kitų ir ekranuos jį. Ši lokali fotosrovė J keisis laike sukurdamą kintantį laike elektrinį dipolį, kuris sąlygos elektromagnetinės spinduliuotės impulso atsiradimą. Kadangi maksimalus fotosrovės kitimas vyks per optinio impulso trukmę, viso generuojamo elektromagnetinio impulso trukmė irgi bus keli šimtai femtosekundžių, o paties impulso spektras atitiks THz dažnių ruožą. Tokių dažnių impulsai sklis erdvėje kvazioptiškai, todėl jų parametrus bus galima matuoti nenaudojant jokių elektrinių kontaktų, o pats pasiūlytasis įrenginys bus nesunkiai realizuojamas įvairių optoelektronikos komponentų veikos charakteristikų matavimui.

TRUMPAS BRĖŽINIŲ APRAŠYMAS

Pateikti brėžiniai neriboja išradimo apimties.

Fig. 1. Siūlomojo įrenginio principinė schema.

Fig. 2. Žadinančio optinio impulso $LP4$ ir fotosrovės impulso J kitimas laike.

Fig. 3. Terahercinio impulso amplitudės kitimas laike.

Fig. 4. Optinio parametrinio stiprintuvo generuojamų impulsų trukmės priklausomybė nuo spinduliuotės bangos ilgio.

Fig. 5. P-I-N diodų su i-sritimis iš GaAsBi (trikampiai), GaAs (juodi skrituliai) ir AlGaAs (kvadratai) THz emisijos spektrai sunormuoti į pastovų fotonų skaičių šviesos impulse.

Fig. 6. Tandeminio saulės elemento THz emisijos spektrai sunormuoti į pastovų fotonų skaičių šviesos impulse.

IŠRADIMO REALIZAVIMO APRAŠYMAS

Pasiūlytas įrenginys apima femtosekundinį lazerį 1, kuris generuoja šviesos impulsus 2. Pusiau skaidriame veidrodyje 3 šviesos impulsų pluoštelis 2 yra padalijamas į dvi dalis: į pirmąją dalį 4, kuri yra mažesnio intensyvumo ir yra naudojama THz spinduliuotės impulsų detektoriui 5 aktyvuoti, ir didesnio intensyvumo antrąją dalį 6, patenkančią į optinį parametrinį stiprintuvą (OPS) 7. OPS 7 generuoja kintamo bangos ilgio femtosekundinės trukmės šviesos impulsus 8, kurie yra naudojami tiriamojo prietaiso 9 sužadinimui. Į tiriamąjį prietaisą 9 šviesos impulsai 8 krinta 45° kampu; jų atspindžio kelyje yra detektorius 5, registruojantis dėl femtosekundinių šviesos impulsų sugerties tiriamajame prietaise 9 generuojamus THz spinduliuotės impulsus 10. Detektorius 5 gali būti fotolaidi antena, pagaminta iš jautraus pluoštelio 4 bangos ilgiui puslaidininkio su trumpesnėmis nei 1 ps krūvininkų gyvavimo trukmėmis, arba elektrooptinis Pokelso efektą turinčios medžiagos kristalas. Pirmoji pluoštelio dalis 4 per veidrodį 11 ir vėlinimo liniją 12 yra nukreipiama į detektorių 5. Detektoriuje užregistruoti THz spinduliuotės impulsai patenka į registravimo priemonę 13, kuri nustato tiriamojo prietaiso 9 spektrinę charakteristiką pagal detektoriuje užregistruotų THz impulsų formą laike.

Priklausomai nuo praėjusio per OPS 7 pluoštelio 8 bangos ilgio, jis bus sugeriamas skirtingose tiriamojo optoelektroninio prietaiso 9 vietose – tose, kur medžiagos draustinių energijų tarpas bus mažesnis už pluoštelio 8 impulso fotonų energiją. Jei atitinkamoje dalyje bus vidinis elektrinis laukas, šviesos sugerties metu atsiradę nepusiausvyriniai krūvininkai sukurs greitai kintančios laike fotosrovės $J(t)$ impulsą. Ši fotosrovė indukuos elektromagnetinės spinduliuotės impulsą, kurio charakteringi dažniai bus THz diapazone, taigi jis galės sklisti erdvėje kvazioptiškai, o jo amplitudė bus proporcinga fotosrovės išvestinei laike $E_{THz} \sim dJ(t)/dt$.

Pluoštelio 8 ir fotosrovės J kitimai laike yra pavaizduoti Fig. 2. E_{THz} kitimas laike yra pavaizduotas Fig. 3. Kaip matyti iš šių paveikslėlių, THz impulso 10 amplitudė pasiekia savo maksimumą per optinio impulso trukmę, kuomet fotosrovės kitimas laike yra pats didžiausias. Be to, ši amplitudė priklausys nuo optinio impulso trukmės. Tuo tarpu, fotosrovės J amplitudės maksimumo pozicija laike atitinka THz impulso 10 trukmę, o jos vertė, kurią galima nustatyti integruojant laike $E_{THz}(t)$, nuo optinio impulso trukmės priklausys žymiai mažiau. Apšviečiant tiriamąjį darinį įvairaus bangos ilgio spinduliuotės impulsais generuojama fotosrovė priklausys nuo sugerties

koeficiento ir vidinio elektrinio lauko stiprio, o jos kitimas laike - nuo krūvininkų rekombinaciją lemiančių struktūrinių medžiagos faktorių konkrečioje prietaiso darinio vietoje.

TINKAMIAUSI ĮGYVENDINIMO VARIANTAI

Išradimo įgyvendinimui buvo sukurtas įrenginys, paremtas sustiprinta iterbiu legiruoto kalio ir gadolinio volframato Yb:KGW lazeriu 1 (PHAROS, Šviesos konversija), generavusio 1030 nm bangos ilgio, 160 fs trukmės ir 200 kHz pasikartojimo dažnio impulsus. Lazero 1 pluoštas 2 buvo nukreipiamas į optinį parametrinį stiprintuvą OPS 7 (ORPHEUS, Šviesos konversija), kurį perderinant buvo generuojami optiniai femtosekundiniai impulsai su bangos ilgiais, keičiamais nuo 640 nm iki 2600 nm. Trumpesni, 400 nm siekiantys bangų ilgiai buvo gaunami generuojant antrosios harmonikos impulsus beta bario borato kristale (BBO). Optiniai impulsai krito 45° kampu į tiriamąjį prietaisą 9, o THz spinduliuotės impulsas 10 buvo stebimas atspindžio kryptyje naudojant GaAsBi fotolaidžią anteną (UAB Teravil), kuri buvo aktyvuojama Yb:KGW lazerio pluoštelio dalimi 4, apšviečiančia detektorių 5 po praėjimo per kintamo ilgio vėlinimo liniją 11. Fig. 4 yra pavaizduota antrosios harmonikos autokoreliacijos būdu nustatyta OPS 7 generuojamų įvairaus bangos ilgio impulsų trukmė. Iš šios iliustracijos matyti, kad šis parametras visame diapazone kinta nedaug; didesnis jo pokytis yra stebimas tik pereinant nuo signalinės prie šalutinės OPS generuojamų bangų.

Buvo atlikti keturių prietaisų spektrinių charakteristikų matavimai: trijų vienos sandūros P-I-N diodų su iš skirtingų medžiagų – GaAs, GaAlAs ir GaAsBi pagamintais aktyviaisiais sugerties sluoksniais, bei dviejų sandūrų: GaAs ir AlGaAs, fotovoltinio elemento. Visi šie bandiniai buvo užauginti molekulinį pluoštelių epitaksijos įrenginyje Veeco ant GaAs padėklų.

GaAs diode aktyviosios sugerties srities storis buvo 2000 nm. AlGaAs diodo sugerties srities storis buvo lygus 450 nm, Al dalis trinariame AlGaAs junginyje buvo 33 %. Trečiajame diode 500 nm storio GaAsBi (su 4 % Bi) i-sluoksnis buvo įterptas tarp kontaktinių n- ir p-tipo GaAs sluoksnių. Tirtojo dviejų sandūrų saulės elemento sluoksnių sandara yra pavaizduota žemiau parodytoje lentelėje.

Sluoksnis	Medžiaga	Storis nm	Legiravimas cm-3
praskaidrinanti optinė struktūra	SiO ₂	60	-
praskaidrinanti optinė struktūra	HfO ₂	30	-
praskaidrinanti optinė struktūra	SiO ₂	10	-
langas-n	Al _{0.85} Ga _{0.15} As	30	4e18
emiteris-n	Al _{0.33} Ga _{0.67} As	100	1e18
bazė-p	Al _{0.33} Ga _{0.67} As	700	1e17
galinio lauko -p	Al _{0.90} Ga _{0.10} As	200	5e18
tunelinė sandūra-p	GaAs	20	5e19
tunelinė sandūra-n	GaAs	50	2e19
langas-n	Al _{0.90} Ga _{0.10} As	200	4e18
emiteris-n	GaAs	100	1e18
bazė-p	GaAs	1800	1e17
galinio lauko -p	Al _{0.20} Ga _{0.80} As	150	2e18
buferis-p	GaAs	200	4e18
padėklas-p	GaAs		

Visų trijų diodų matavimo rezultatai yra pavaizduoti Fig. 5. Matuojant tiriamas bandinys buvo apšviečiamas 6 mW vidutinės galios, S poliarizacijos pluoštelio, krintančiu 45° kampu į tiriamojo prietaiso (9) paviršiaus normalę. Visais trimis atvejais THz impulsų emisija prasidėdavo kai optinio impulso fotonų energija viršydavo diodo aktyviosios srities medžiagos draustinių energijų tarpą. Fig. 5 parodytos THz impulsų amplitudžių vertės yra normalizuotos į pastovų fotonų skaičių ir todėl leidžia tiksliai palyginti skirtingus tiriamus bandinius. GaAs ir AlGaAs diodų spektrai yra žymiai lygesni už GaAsBi spektrą. Pastarajame didesnių už draustinį tarpą fotonų energijų srityje stebimos stiprios THz impulsų amplitudės osciliacijos, kurias galima paaiškinti šviesos interferencijos efektais dėl atspindžių nuo GaAs padėklo, skaidraus šio spektrinio ruožo spinduliuotei.

Tandeminio saulės elemento, sudaryto iš dviejų subcelių: $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$ (draustinių energijų juostos tarpas ϵ_g yra lygus 1.85 eV) ir GaAs ($\epsilon_g=1.42$ eV) tyrimų rezultatai yra pavaizduoti Fig. 6. Šiame paveikslėlyje galima aiškiai išskirti abiejų tandeminio saulės elemento dalių sugerties ruožus bei skirtingas fotosrovės amplitudes. Akivaizdžiai matoma mažesnė generuojama fotosrovė GaAs subcelėje nei AlGaAs subcelėje. Šis rezultatas atitinka išorinio kvantinio našumo matavimus (EQE) bei įrenginio atspindžio spektro modeliavimo rezultatus. EQE matavime stebimas mažesnis GaAs subcelės kvantinis našumas, o atspindžio spektras rodo žymiai didesnį atspindį spektro ruože, kuriame sugeria šviesą GaAs subcelė. Tad mažesnė GaAs sluoksnio sugertis lemia mažesnę fotosrovės amplitudę THz impulsais grįstuose matavimuose.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Puslaidininkinių optoelektronikos prietaisų spektrinių charakteristikų matavimo įrenginys, apimantis

- femtosekundinį lazerį (1);
- pusiau skaidrų veidrodį (3), dalinantį lazerio (1) pluoštelį (2) į pirmąją pluoštelio dalį (4) ir antrąją pluoštelio dalį (6), kuri yra didesnio intensyvumo nei pirmoji pluoštelio dalis (4) ir yra nukreipta į tiriamąjį prietaisą (9);
- vėlinimo liniją (12), keičiančią pirmosios pluoštelio dalies (4) optinį kelią,
- terahercinių impulsų detektorių (5), kurį aktyvuoja pirmoji pluoštelio dalis (4) ir
- registravimo priemonę (13),

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

- įrenginys turi optinį parametrinį stiprintuvą (7), kuris išdėstytas lazerio pluoštelio antrosios dalies (6) optiniame kelyje tarp pusiau skaidraus veidrodžio (3) ir tiriamojo prietaiso (9), kur

antroji didesnio intensyvumo femtosekundinio lazerio (1) pluoštelio dalis (6) patenka į optinį parametrinį stiprintuvą (7), sukuriantį kintamo bangos ilgio femtosekundinių šviesos impulsų pluoštelį (8), kuris nukreipiamas kampu į tiriamojo prietaiso (9) paviršių, kur tiriamajame prietaise sugeneruoti ir nuo jo atsispindėję teraherciniai (THz) spinduliuotės impulsai (10) patenka į detektorių (5), kurį aktyvuoja praėjusi per vėlinimo liniją (12) pirmoji pluoštelio dalis (4), o detektoriuje užregistruoti THz spinduliuotės impulsai patenka į registravimo priemonę (13), kuri nustato tiriamojo prietaiso (9) spektrinę charakteristiką pagal detektoriuje užregistruotų THz impulsų formą laike.

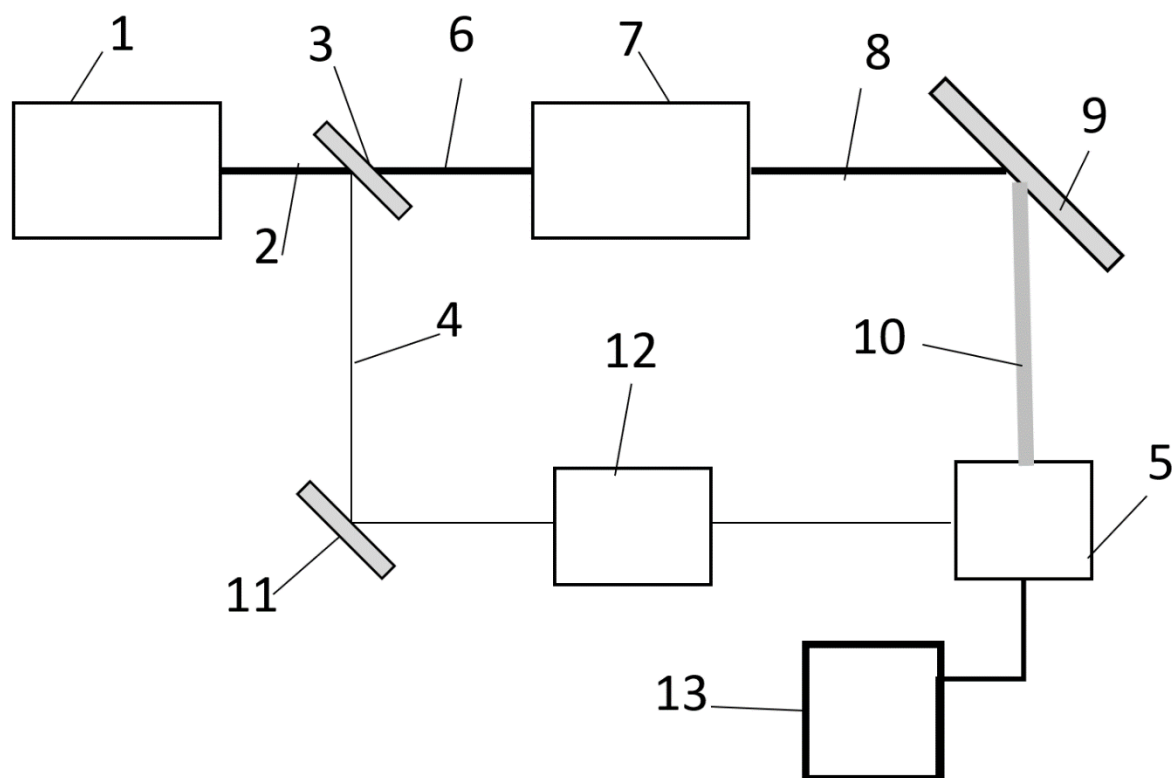


Fig. 1

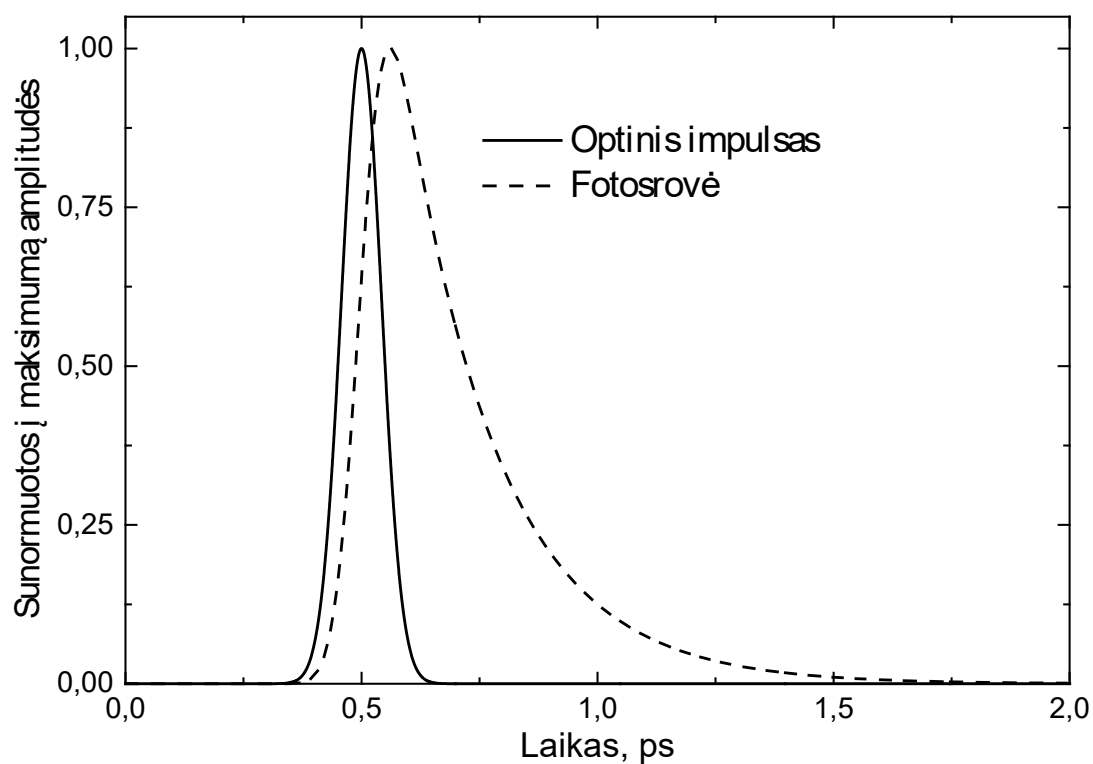


Fig. 2

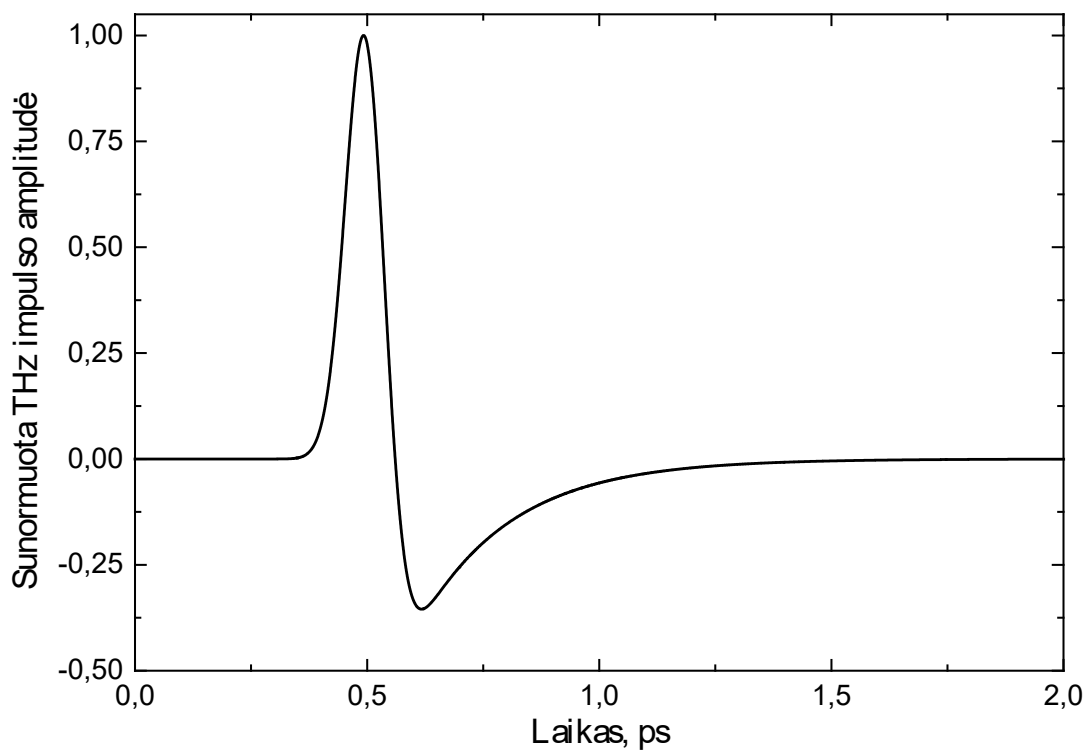


Fig. 3

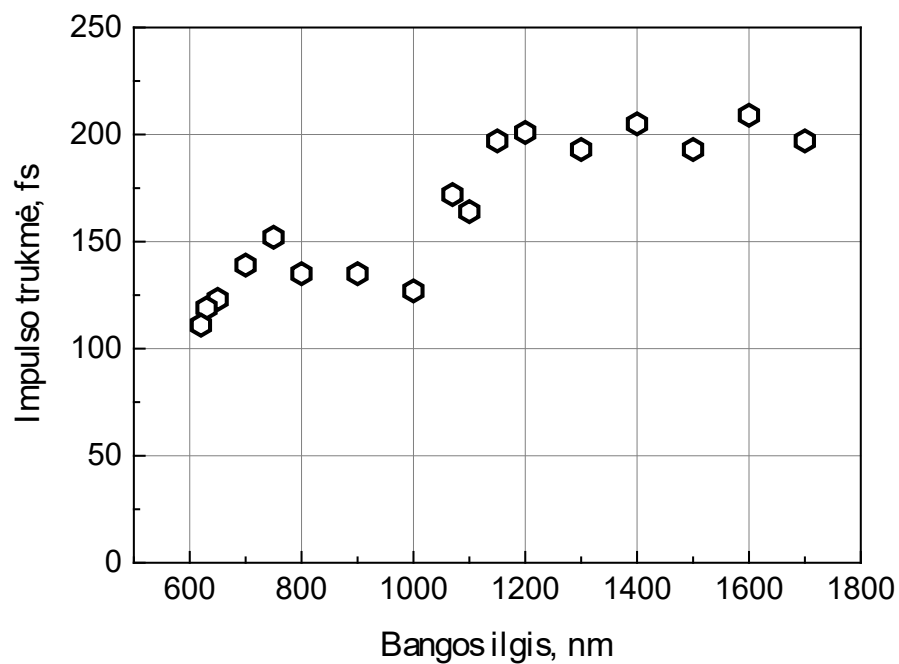


Fig. 4

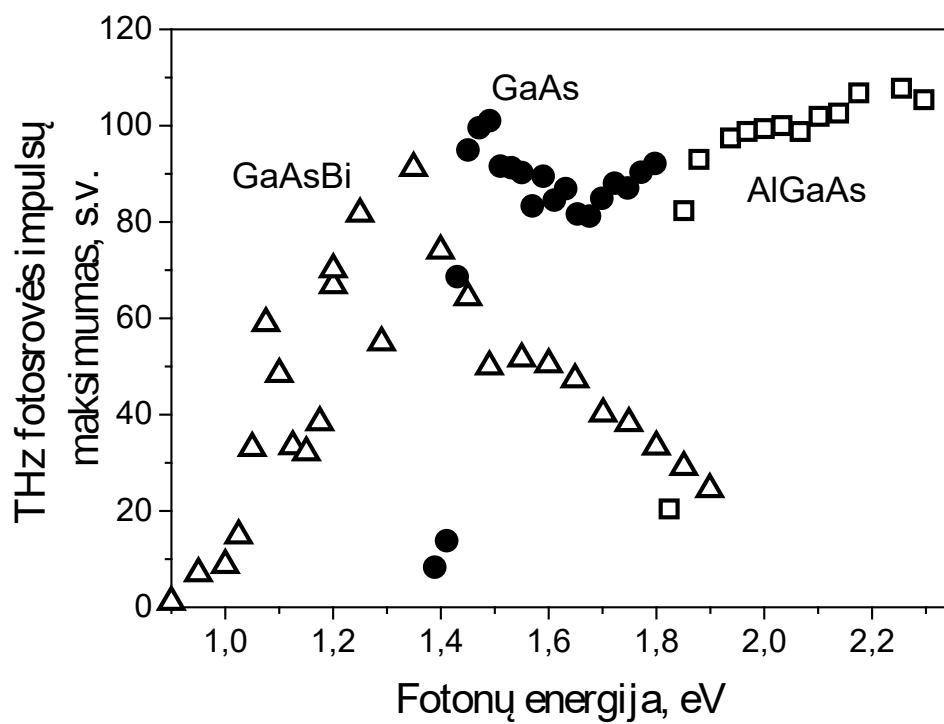


Fig. 5

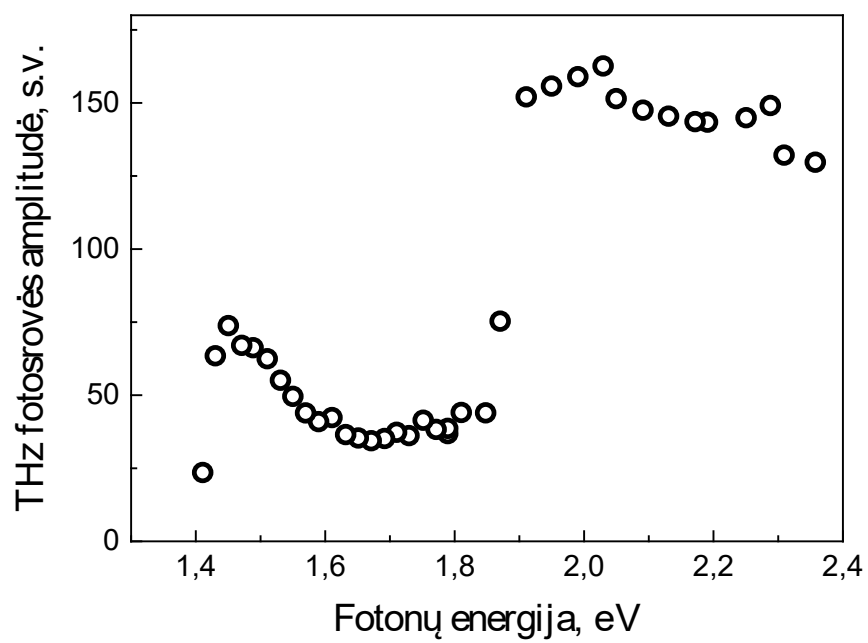


Fig. 6