

(19)



(10) **LT 5463 B**

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(11) Patento numeris: **5463**

(51) Int. Cl. (2006): **G01N 21/00**

(21) Paraiškos numeris: **2006 033**

(22) Paraiškos padavimo data: **2006 05 03**

(41) Paraiškos paskelbimo data: **2007 11 26**

(45) Patento paskelbimo data: **2008 01 25**

(62) Paraiškos, iš kurios dokumentas išskirtas, numeris: —

(86) Tarptautinės paraiškos numeris: —

(86) Tarptautinės paraiškos padavimo data: —

(85) Nacionalinio PCT lygio procedūros pradžios data: —

(30) Prioritetas: —

(72) Išradėjas:

Kęstutis JARAŠIŪNAS, LT
Ramūnas ALEKSIEJŪNAS, LT
Arūnas KADYS, LT
Markas SŪDŽIUS, LT

(73) Patento savininkas:

Vilniaus Universitetas, Universiteto g. 3, LT-01513 Vilnius, LT

(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:

Kęstutis JARAŠIŪNAS, Ežero g. 23, LT-14159 Antezeriai, Vilniaus r., LT

(54) Pavadinimas:

Puslaidininkinių kristalų fotolaidumo tipo nustatymo būdas

(57) Referatas:

Būdas puslaidininkinių kristalų fotolaidumo tipui nustatyti žadinimo iš giliųjų lygmenų sąlygomis, kai tiriamajame puslaidininkiniame dviejų spindulių interferencinis šviesos laukas suformuoja dinaminę difrakcinę gardelę, besiskiriantis tuo, kad yra įvedamas papildomas zondavimo pluoštelis, matuojamos zonduojančio pluoštelio difrakcijos efektyvumo laikinės priklausomybės prie skirtingų žadinimo energijos srauto tankių ir gardelės periodų, nustatoma efektinio difuzijos koeficiento priklausomybė nuo žadinimo energijos srauto tankio, iš kurios pobūdžio (efektinio difuzijos koeficiento vertės didėjimo ar mažėjimo) sprendžiama apie kristalo fotolaidumo tipą.

Siūlomas būdas yra iš medžiagų metrologijos srities ir yra skirtas momentinio fotolaidumo tipo nustatymui fotorefraktyviuose puslaidininkiniuose kristaluose, kai nepusiausvirieji krūvininkai yra generuojami iš giliųjų lygmenų apšviečiant tiriamąjį kristalą reikiamo bangos ilgio šviesos impulsais. Momentinis fotolaidumo tipas parodo, kad tiriamuoju laiko momentu šviesa sužadintame puslaidininkyje vyrauja nepusiausvirieji elektronai (n tipas) arba skylės (p tipas). Fotolaidumo tipas yra svarbi puslaidininkinių medžiagų, skirtų optoelektronikos įrenginiams, charakteristika, kurioje slypi informacija apie krūvininkų generacijos iš giliųjų lygmenų ypatumus bei šių lygmenų kompensacijos laipsnį. Siūlomas būdas yra pilnai optinis, todėl bekontaktis ir neardantis tiriamojo objekto.

Analogiškas metodas (toliau - analogas) fotolaidumo tipui nustatyti buvo pasiūlytas S. Juodkazio ir kt. (S. Juodkasis, V. Netiksis, M. Petrauskas, H. J. Eichler, B. Smandek, Y. Ding, „Contactless determination of the dominant photorefractive mobile charge by comparing cw and ps two-wave mixing“, Optics Communications, vol. 134 (1997) 227-232). Analogas yra paremtas fotorefraktyvinio stiprinimo matavimais dviejų bangų maišymo metodika. Yra atliekami du matavimų ciklai: stipraus impulsinio žadinimo pikosekundiniais šviesos impulsais režimu ir silpno žadinimo nenutrūkstamos veikos spinduliuote režimu. Stipraus žadinimo režime tiriamasis puslaidininkinis kristalas yra apšviečiamas dviem koherentiškais skirtingo intensyvumo pikosekundinės trukmės impulsų pluoštais, kurie sukuria dinaminę difrakcinę gardelę. Tiriamasis kristalas yra išpjauamas ir orientuojamas kristalografinių ašių atžvilgiu, pvz. dinaminės difrakcinės gardelės vektorius nukreipiamas išilgai kristalografinės $[110]$ ašies. Žadinančios šviesos bangos ilgis ir energijos srauto tankis parenkami taip, kad nepusiausvirieji krūvininkai būtų generuojami dvipakopiais ar dvifotoniniais šuoliais. Žadinimo režimo sąlygos priklauso nuo puslaidininkio (pvz., GaAs, CdTe galima naudoti 1064 nm bangos ilgio šviesą, kurios energijos srauto tankis $\sim 10 - 100 \text{ mJ/cm}^2$). Yra matuojamas silpnesniojo pluoštelio pralaidumo pokytis ΔT pasirinktai kristalo padėčiai, sukeltas stipresniojo žadinančio pluoštelio. Iš pralaidumo $\Delta T/T$ (čia T – pralaidumas, kai stipresnis žadinimo pluoštelis uždengtas) suskaičiuojamas fotorefraktyvaus stiprinimo koeficientas Γ naudojant apytikslę priklausomybę $\Delta T/T \approx (\Gamma \pm \Delta\alpha)L$, čia $\Delta\alpha$ yra sugerties koeficiento pokytis, L – kristalo storis. Sukant kristalą, išmatuojama priklausomybė $\Gamma=f_1(\phi)$, čia ϕ žymi kampą tarp kristalografinės $[110]$ ašies ir dinaminės difrakcinės gardelės vektoriaus. Yra daroma prielaida, kad

stipraus žadinimo režime kristale susidaro Demberio elektrinis laukas tarp elektronų ir skylių, kurio kryptį lemia judresni elektronai, todėl išmatuotoji priklausomybė $\Gamma=f_1(\phi)$ yra būdinga elektroninio fotolaidumo tipo kristalams. Po to išmatuojama priklausomybė $\Gamma=f_2(\phi)$ silpno žadinimo režime, kai žadinimui naudojamas nuolatinės veikos lazerinis šaltinis, kurio bangos ilgis ir galios tankis turi būti parinkti taip, kad nepusiausvirieji krūvininkai būtų generuojami iš giliųjų lygmenų. Kristalo fotolaidumo tipas nustatomas palyginus $\Gamma=f_2(\phi)$ su $\Gamma=f_1(\phi)$: jei šių priklausomybių kitimo fazės sutampa, tai kristalas yra elektroninio fotolaidumo tipo, o jei priklausomybės yra priešingos fazės – skylinio fotolaidumo tipo.

Analogas turi kelis esminius trūkumus. Analogas išnaudoja elektrooptinį netiesiškumą, kurio dėka vyksta energijų mainai tarp pluoštelių, todėl analogas tinkamas tik didelio elektrooptinio koeficiento kristalams be centrinės simetrijos. Šviesos interferencinio lauko sukeltas sugerties koeficiento pokytis, kuris nepriklauso nuo kristalo orientacijos, gali apsunkinti stiprinimo koeficiento Γ nustatymą. Analogo būdai yra reikalinga tiksli kristalo padėties orientacija kristalografinių ašių atžvilgiu. Analogo techninė realizacija yra sudėtinga ir brangi, nes reikia panaudoti du skirtingus lazerinius šviesos šaltinius ir dvi optines schemas.

Siūlomas būdas leidžia pašalinti išvardintus analogo trūkumus. Siūlomame būde, kuriame du interferuojantys žadinimo pluošteliai užrašo dinaminę difrakcinę gardelę, **naujai** yra įvedamas papildomas zondojuojantis pluoštelis, matuojamos šio pluoštelio difrakcijos efektyvumo laikinės priklausomybės prie skirtingų žadinimo energijos tankių ir gardelės periodų, nustatoma efektinio difuzijos koeficiento priklausomybė nuo žadinimo energijos srauto tankio, o iš šių priklausomybių sprendžiama apie kristalo fotolaidumo tipą. Siūlomas būdas nereikalauja specialios bandinio orientacijos bei jo sukimo, o tiriamasis kristalas nebūtinai turi pasižymėti elektrooptiniu efektu. Būdai realizuoti pakanka vieno spinduliuotės šaltinio, kuris leidžia keisti žadinimo intensyvumą plačiose ribose ir pasiekti tiek silpno, tiek ir stipraus (bipolinio) žadinimo režimus.

Siūlomas būdas yra paremtas fizikiniu reiškiniu, kai, dominuojant krūvininkų generacijai iš giliųjų lygmenų, nepusiausvirųjų krūvininkų pernaša yra veikiamas vidinio elektrinio lauko. Vidinis elektrinis laukas E_{sc} yra sukuriamas apšviečiant puslaidininkį erdviškai moduluoto intensyvumo šviesos lauku, kurio šviesos kvanto energija yra pakankama gilaus lygmens fotojonizacijai, bet mažesnė už puslaidininkio draustinių energijų tarpą. Šviesos kvantai jonizuoja giliuosius lygmenis ir taip sukuria nepusiausvirosius krūvininkus, kurie dėl difuzijos persiskirsto erdvėje ir sąlygoja vidinio elektrinio lauko atsiradimą tarp judrių krūvininkų ir nejudrių jonizuotų defektų. Vidinis elektrinis laukas, priklausomai nuo dominuojančių krūvininkų ženklo, skirtingai veikia elektronų

difuziją, todėl matuojant elektronų “efektinio” (t.y. įtakoto elektrinio lauko) difuzijos koeficiento D_{EF} priklausomybę nuo žadinimo energijos srauto tankio ir lyginant jo vertę su bipolinio difuzijos koeficiento D_B verte galima nustatyti kristalo fotolaidumo tipą. Bipolinis difuzijos koeficientas yra apibūdinamas kaip $D_B = 2D_n D_p / (D_n + D_p)$, čia D_n ir D_p yra elektronų ir skylių monopoliniai difuzijos koeficientai. D_B vertė yra išmatuojama stipraus žadinimo atveju, kai nepusiausvirieji krūvininkai generuojami dvipakopių ar dvifotoninių šuoliu metu, todėl elektronų ir skylių tankiai yra vienodi.

Efektinis difuzijos koeficientas D_{EF} siūlomame būde matuojamas išsigimusio keturių bangų maišymo metodu. Optinę matavimo schemą (Fig. 1) sudaro lazerinis impulsinės spinduliuotės šaltinis 1, optinis daliklis 2, pirminis optinio kaupinimo pluoštelis 3, optinis daliklis 4, du optinio žadinimo pluošteliai 5 ir 6, Glano poliarizacinė prizmė 7, optinis daliklis 8, optinio žadinimo kanalo dalis 9, tiriamasis bandinys 10, optinio zondavimo pluoštelis 11, optinio vėlinimo įrenginys 12, pro bandinį praėjusio zondavimo pluoštelio dalis 13, difragavęs pluoštelis 14, fotodetektoriai FD1, FD2, FD3 ir duomenų surinkimo blokas 15. Schemos elementų paskirtis – suformuoti optinio žadinimo kanalus, nukreipti juos į tiriamąjį puslaidininkio kristalą, zonduojančiu pluoštelio sekti vyksmus tiriamajame kristale ir registruoti jų ypatumus pagal zonduojančio pluoštelio difragavusios dalies charakteristikas.

Efektinis difuzijos koeficientas D_{EF} puslaidininkinėje medžiagoje yra matuojamas taip. Lazerinės spinduliuotės pluoštelis iš lazerinio šaltinio 1 (pvz. impulsinio pikosekundinio lazerio spinduliuotė, kurios kvanto energija $h\nu = 1,17$ eV) optiniu dalikliu (pvz. dielektriniu daliniu atspindžio veidrodžiu) dalinamas į du pluoštelių. 80-90 % pirminio pluoštelio energijos suformuoja optinio žadinimo pluoštelį 3, kuris optiniu dalikliu 4 padalinamas į du vienodo intensyvumo optinio žadinimo pluoštelių 5 ir 6. Elektrinio lauko komponentė optinio žadinimo pluošteluose yra vertikalios poliarizacijos. Optinio žadinimo pluoštelio 5 kelyje yra patalpinama Glano poliarizacinė prizmė, orientuota tokiu būdu, kad vertikaliai poliarizuota šviesa (pluoštelis 5) būtų praleidžiama. Optinis daliklis 8 (stiklo plokštelė) yra įstatomas žadinimo pluoštelio 6 kelyje ir atspindi dalį (~4%) energijos į fotodetektorius FD1. Optiniai pluošteliai 5 ir 6 vienu metu susikerta bandinyje 10 kampe Θ , interferuoja ir suformuoja dinaminę difrakcinę laisvųjų krūvininkų gardelę, charakterizuojamą gardelės periodu $\Lambda = \lambda / 2 \sin(\Theta/2)$, čia λ žymi žadinimo pluoštelio bangos ilgį. Optinis zondavimo pluoštelis 11, suformuotas optiniu dalikliu 2, patenka į optinį vėlinimo įrenginį 12 ir yra nukreipiamas į dinaminę difrakcinę gardelę Brego kampe. Išsigimusio keturių bangų maišymo atveju (zonduojančio ir sužadinančių impulsų bangos ilgis yra vienas) pluoštelių 11 ir 6 padėtis erdvėje turi tiksliai sutapti, o sklaidimo kryptys turi būti priešingos. Zondavimo pluoštelio 11

poliarizacija turi būti tiesinė ir statmena žadinimo pluoštelių poliarizacijai. Pro bandinį praėjusio zondavimo pluoštelio dalis 13 yra nukreipiama į fotodetektorių FD2. Nuo dinaminės difrakcinės gardelės difragavęs pluoštelis 14 Glano prizmėje yra atspindimas į detektorių FD3. Fotodetektoriai FD1, FD2 ir FD3 perduoda proporcingus registruojamoms energijoms elektrinius signalus į elektroninį duomenų surinkimo bloką 15. Iš surinktų duomenų suskaičiuojamas momentinis difrakcinis efektyvumas η , apibrėžiamas kaip difragavusiojo pluoštelio 14 energijos ir praėjusiojo pro tiriamąjį bandinį zondavimo pluoštelio energijų santykis $\eta = I_D/I_P$, matuojamas fotodetektoriais FD3 ir FD2.

Efektiniam difuzijos koeficientui D_{EF} , atitinkančiam tam tikrą žadinimo energijos srauto tankį E , nustatyti yra matuojamos laikinės difrakcijos efektyvumo priklausomybės $\eta=f(\Delta t)$, čia Δt žymi optinį zondo vėlinimą žadinančių impulsų atžvilgiu. Yra parenkama tokia optinio vėlinimo įrenginio 12 padėtis, kad zonduojantis impulsas pasiektų bandinį praėjus Δt_i laiko tarpui nuo dinaminės gardelės sukūrimo ir pamatuojamas šį vėlinimą atitinkantis difrakcijos efektyvumas η_i , po to procedūra kartojama įvairioms Δt vertėms. Laikinėje priklausomybėje turi būti pamatuotos ir kelios η vertės, atitinkančios neigiamas Δt vertes, kurios parodo foninį FD3 apšvietimą. Difrakcijos efektyvumo laikinė priklausomybė tam tikrame taške Δt_i yra aproksimuojama eksponente $\eta \sim \exp(-2t/\tau_G)$, kur τ_G – gardelės irimo trukmė. Matuojant laikinę difrakcijos efektyvumo priklausomybę įvairioms kampo tarp žadinančių pluoštelių 5 ir 6 vertėms yra išmatuojama gardelės irimo trukmės τ_G priklausomybė nuo dinaminės difrakcinės gardelės periodo Λ . Išmatuota funkcija $\tau_G^{-1}=f(\Lambda^{-2})$ yra aproksimuojama tiese $1/\tau_G=1/\tau_R + 4\pi^2 D/\Lambda^2$, iš kurios polinkio suskaičiuojamas difuzijos koeficientas D ; čia τ_R žymi nepusiausvirųjų krūvininkų gyvavimo trukmę. Difuzijos koeficiento vertės nustatomos kelioms energijos srauto tankio vertėms $E_1 < E_2 < \dots < E_n$. E_1 vertė turi būti mažesnė už energijos srauto tankio E_B vertę, reikalingą sukurti bipolinei krūvininkų plazmai, o E_n – artimas ar didesnis už E_B vertę, kuri priklauso nuo tiriamosios medžiagos savybių. Medžiagos fotolaidumo tipas nustatomas iš D_{EF} priklausomybės nuo E . Jei D_{EF} vertė, išmatuota mažoms energijos srauto tankio vertėms ($E_1 < E_B$), yra didesnė už D_B ir mažėja didinant žadinimo energijos srauto tankį, tai puslaidininkis yra p fotolaidumo tipo (optiškai sužadintame puslaidininkyje dominuoja skylės). Jei D_{EF} vertė, išmatuota mažoms energijos srauto tankio vertėms ($E_1 < E_B$), yra mažesnė už D_B ir didėja didinant žadinimo energijos srauto tankį, tai puslaidininkis yra n fotolaidumo tipo (optiškai sužadintame puslaidininkyje dominuoja elektronai).

Fotolaidumo tipo nustatymo pasiūlytuoju būdu pavyzdys pateiktas Fig. 2. Efektinio difuzijos koeficiento D_{EF} priklausomybė nuo žadinimo energijos srauto tankio buvo išmatuota dviejuose

skirtingo legiravimo InP kristaluose (geležimi legiruotas kristalas pažymėtas InP1, o nelegiruotas – InP2). Kristale InP1 keliant žadinimo energijos srauto tankį nuo $E = 0,3 \text{ mJ/cm}^2$ iki $E = 2,4 \text{ mJ/cm}^2$ D_{EF} vertė sumažėjo nuo $11 \text{ cm}^2/\text{s}$ iki $7 \text{ cm}^2/\text{s}$. Kristale InP2 keliant žadinimo energijos srauto tankį nuo $E = 0,3 \text{ mJ/cm}^2$ iki $E = 2,4 \text{ mJ/cm}^2$ D_{EF} vertė padidėjo nuo $0,5 \text{ cm}^2/\text{s}$ iki $8 \text{ cm}^2/\text{s}$. Išmatuotosios D_{EF} priklausomybės nuo E parodo, kad fotolaidumas InP1 kristale yra p tipo, o InP2 – n tipo.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

Būdas puslaidininkinių kristalų fotolaidumo tipui nustatyti žadinimo iš giliųjų lygmenų sąlygomis, kai tiriamajame puslaidininkiniame dviejų spindulių interferencinis šviesos laukas suformuoja dinaminę difrakcinę gardelę, **besiskiriantis** tuo, kad įveda papildomą zondavimo pluoštelį, matuoja zonduojančio pluoštelio difrakcijos efektyvumo laikines priklausomybes prie skirtingų žadinimo energijos srauto tankių ir gardelės periodų, nustato efektinio difuzijos koeficiento priklausomybę nuo žadinimo energijos srauto tankio, iš kurios pobūdžio (efektinio difuzijos koeficiento vertės didėjimo ar mažėjimo) sprendžia apie kristalo fotolaidumo tipą.

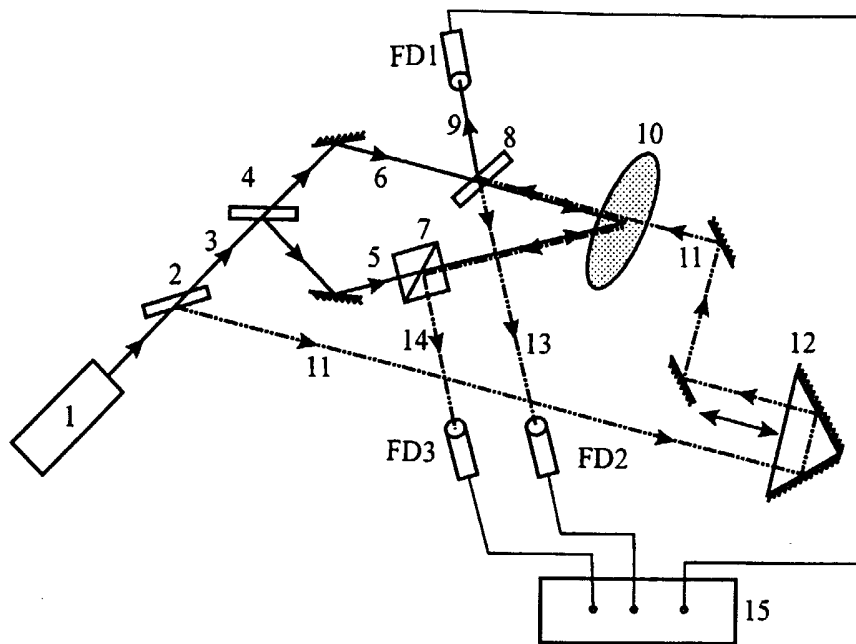


Fig. 1.

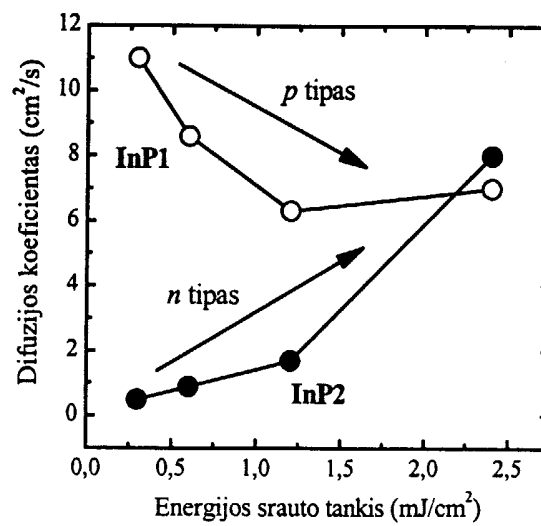


Fig. 2