

(19)



(10) **LT 5604 B**

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

- (11) Patento numeris: **5604** (51) Int. Cl. (2006): **G01N 21/17**
G03H 1/00
G01R 31/00
- (21) Paraiškos numeris: **2007 075**
- (22) Paraiškos padavimo data: **2007 12 03**
- (41) Paraiškos paskelbimo data: **2009 06 25**
- (45) Patento paskelbimo data: **2009 10 26**
- (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
Arūnas KADYS, LT
- (73) Patento savininkas:
Vilniaus Universitetas, Universiteto g. 3, LT-01513 Vilnius, LT
- (74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
Kęstutis JARAŠIŪNAS, Ežero g. 23, LT-14159 Antežeriai, Vilniaus r., LT

- (54) Pavadinimas:
Gilių lygmenų kompensavimo laipsnio puslaidininkiuose nustatymo būdas
- (57) Referatas:

Pasiūlymas yra iš medžiagų metrologijos srities, o būtent - puslaidininkinių medžiagų optinių savybių matavimo srities ir gali būti naudojamas gilių lygmenų kompensavimo laipsnio nustatymui didžiavaržiuose puslaidininkiniuose kristaluose. Pasiūlytas būdas gali būti taikomas mikroelektronikai bei optoelektronikai skirtų medžiagų charakterizavimui ir puslaidininkinių kristalų auginimo technologijos įvertinimui. Pasiūlytame būde, kuriame optiškai nustatomas gilių lygmenų pusiausvriosios užpildos arba kompensavimo laipsnis puslaidininkiuose, tiriamąjį objektą optiškai kaupinant dviem koherentiškais lazerinės spinduliuotės pluoštais priemaišinės krūvininkų generacijos sąlygomis ir suformuojant dinaminę difrakcinę gardelę, naujai įvedamas trečiasis optinis kanalas su zondo pluoštelio, matuojama zondo pluoštelio difrakcijos efektyvumo kinetika nuo atspindžio gardelės, išskiriamas difrakcijos signalas nuo sugerties koeficiento moduliacijos perelektrintuose giliuose centruose ir nuo dvifotonės sugerties gardelės, išmatuojami šių gardelių difrakciniai efektyvumai ir iš jų santykio nustatomas kristalo gilių lygmenų kompensavimo laipsnis.

Pasiūlymas yra iš medžiagų metrologijos srities, o būtent – puslaidininkinių medžiagų optinių savybių matavimo srities ir gali būti naudojamas gilių lygmenų kompensavimo laipsnio nustatymui didžiavaržiuose puslaidininkiniuose kristaluose. Pasiūlytas būdas gali būti taikomas mikroelektronikai bei optoelektronikai skirtų medžiagų charakterizavimui ir puslaidininkinių kristalų auginimo technologijos įvertinimui.

Žinomas optinis būdas gilių lygmenų kompensavimo laipsnio nustatymui puslaidininkinėse medžiagose yra aprašytas straipsnyje L.A. de Montmorillon, Ph. Delaye, G. Roosen, H. Bou Rjeily, F. Ramaz, B. Briat, J. G. Gies, J. P. Zielinger, M. Tapiero, H. J. von Bardeleben, T. Arnoux, J.C. Launay: “Correlations between microscopic properties and the photorefractive response for vanadium-doped CdTe” J. Opt. Soc. Am. B, tomas 13, psl. 2341-2351, 1996 m. Gilių lygmenų kompensacijos laipsnio nustatymui naudojama dviejų bangų fotorefraktyvaus maišymo metodika ir papildomi priemaišinės sugerties koeficiento matavimai.

Žinomas būdas remiasi tuo, kad dviejų skirtingo intensyvumo lazerio pluoštelių I_1 ir I_2 interferenciniu šviesos lauku tiriamajame kristale dėl priemaišinės krūvininkų generacijos ir jų pernašos sukuriamas periodinis erdvinio krūvio elektrinis laukas $E_{sc}(x)$, kuris erdviškai moduliuoja medžiagos lūžio rodiklį $n(x)$ ir sukuria difrakcinę elektrooptinę gardelę, pastumtą interferencinio šviesos lauko atžvilgiu per ketvirtį gardelės periodo. Praeinantis per gardelę I_1 pluoštelis kryptingai difraguoja į silpnesnįjį I_2 , todėl pastarojo pluoštelio energija sustiprinama dydžiu ΔI_2 . Išmatavus pluoštelio I_2 pokytį $A = \Delta I_2 / I_2$, pagal sąryšį $A = \exp(\Gamma L)$ yra surandama elektrooptinio stiprinimo koeficiento vertė $\Gamma = (2\pi/\lambda) n_0^3 r_{eff} E_{sc}$ (čia L yra kristalo storis, n_0 – lūžio rodiklis bangai, kurios bangos ilgis yra λ , r_{eff} – elektrooptinis koeficientas, susiejantis E_{sc} vertę su lūžio rodiklio pokyčiu). Iš stiprinimo koeficiento Γ priklausomybės nuo gardelės periodo Λ arba gardelės vektoriaus $k = 2\pi/\Lambda$ (1)

$$\Gamma = \frac{2\pi n_0 r_{eff}}{\lambda \cos \theta} \frac{kT}{e} \frac{\zeta_0 k}{1 + (k^2/k_0^2)} \quad (1)$$

aprosimacijos būdu nustatomi du parametrai: elektron-skylinės konkurencijos faktorius ζ_0 ir atvirkštinis Debajaus ekranavimo ilgis k_0 , susietas žinomu sąryšiu su efektyvia gilių centrų koncentracija N_{eff} :

$$k_0^2 = \varepsilon \varepsilon_0 kT / (e^2 N_{eff}) \quad (2)$$

Abu parametrai priklauso nuo gilių centrų koncentracijos $N_T = N^+ + N^0$ pagal sąryšius (3):

$$N_{eff} = \frac{N_0 N^+}{N_0 + N^+} \quad \text{ir} \quad \zeta_0 = \frac{s_n N_0 - s_p N^+}{s_n N_0 + s_p N^+}, \quad (3)$$

kurie susieja gilių lygmenų jonizuotas ir neutralias būsenas N^+ , N^0 su optinės sugerties koeficientu α bangos ilgiui λ :

$$\alpha = S_n N_0 + S_p N^+ \quad (4)$$

su žinomais fotojonizacijos skerspjūviais S_n , S_p . Pasinaudojant sąryšiais (2-3) bei sugerties koeficiento verte α , išskaičiuojamas gilios priemaišos kompensavimo laipsnis $R = N^+/N_T$.

Analogo trūkumas yra tai, kad jį naudojant tiriamasis kristalas turi būti išpjautas pagal atitinkamas kristalografines ašis ir išmatuota priklausomybė $\Gamma(k)$, keičiant gardelės periodą. Tai sukuria papildomų sunkumų paruošiant bandinį matavimams. Eksperimento atlikimas prie 6-8 gardelės periodų taip pat reikalauja nemažų laiko sąnaudų.

Analogo trūkumams pašalinti kompensacijos laipsnio puslaidininkinėse medžiagose nustatymo būde, kuriame optinį kaupinimo kanalą sudaro du koherentiniai lazerio spinduliuotės pluošteliai, fotosužadinantys tiriamąjį objektą priemaišinės krūvininkų generacijos sąlygomis, **naujai** įvedamas trečiasis optinis kanalas su zondo pluoštelio, matuojama zondo pluoštelio difrakcijos efektyvumo kinetika nuo atspindžio gardelės, išskiriamas difrakcijos signalas nuo sugerties koeficiento moduliacijos, išmatuojami difrakciniai efektyvumai nuo amplitudinės gardelės perelektrintuose giliuose centruose ir nuo dvifotonės sugerties gardelės, ir iš šių difrakcinių efektyvumų santykio nustatomas kristalo gilių lygmenų kompensavimo laipsnis.

Siūlomas būdas yra paremtas fizikiniais reiškiniiais, kai tiriamajame bandinyje impulsinio žadinimo sąlygomis vyksta priemaišinė krūvininkų generacija, jų pernaša bei tarpjuostinė dvifotonė krūvininkų generacija. To pasekmėje yra sukuriamą moduluota nepusiausvirųjų krūvininkų koncentracija ΔN , šviesos sugerties moduliacija $\Delta \alpha$ ir vidinio elektrinio lauko E_{SC} moduliacija. Šie procesai palydimi optinių savybių pokyčių, kurie stebimi zonduojančiojo pluoštelio difrakcijoje nuo vienu metu egzistuojančių fazinių bei amplitudinių dinaminų difrakcinių gardelių. Suminis difrakcijos efektyvumas η_{sum} bei jo kinetika aprašomi formule:

$$\eta_{sum}(t) = \left| K_{FC} \Delta N(t) + e^{i\pi/2} K_{PR} E_{SC}(t) + e^{i\pi/2} K_{ABS} \Delta \alpha(t) \right|^2 = |K_{FC} \Delta N|^2 + |K_{PR} E_{SC} + K_{ABS} \Delta \alpha|^2 \quad (5)$$

Čia K_{FC} , K_{PR} ir K_{ABS} yra moduliacijos koeficientai, priklausantys nuo tiriamojo kristalo. Kaip matyti, gardelė turi fazines (ΔN , E_{sc}) ir amplitudines ($\Delta\alpha = \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2$) moduliacijos komponentes; čia $\Delta\alpha_1$ yra sugerties moduliacija dėl gilių centrų perelektrinio ir $\Delta\alpha_2$ yra sugerties moduliacija dėl dvifotonės sugerties. Siūlomo būdo atveju kupinantys pluošteliai sužadina bandinį iš priešingų pusių, tad gardelės periodas yra labai mažas, $\Lambda = \lambda/2n$, t.y. tik kelios mikrono dalys. Esant tokiam periodui, šviesa sugeneruotų krūvininkų koncentracijos moduliacijos vertė ΔN sparčiai nyksta dėl difuzijos jau gardelės formavimosi metu ir neįtakoja η_{sum} vertės. Moduliacijos komponentių $\Delta\alpha_1$ ir E_{sc} įtaka difrakcijos signalui gali būti išmatuota, parinkus dvi ortogonalias kristalo kristalografinių ašių kryptis ir šviesos pluoštelių poliarizacijas, kurioms

$$\eta_{sum} = |K_{ABS}\Delta\alpha_1 + K_{PR}E_{sc}|^2 \text{ arba } \eta_{sum} = |K_{ABS}\Delta\alpha_1 - K_{PR}E_{sc}|^2 \quad (6)$$

Matavimai šiomis sąlygomis leidžia nustatyti difrakcijos nuo sugerties gardelės giliuose priemaišiniuose centruose vertę $\Delta\alpha_1$. Difrakcija nuo dvifotonės gardelės $\Delta\alpha_2(t) = \beta I_0(t)$ yra izotropinė ir įtakoja η_{sum} vertę visuomet, tačiau tik lazerio impulso veikimo metu.

Impulsinio piksekundinio fotosužadinimo sąlygomis išmatuotą $\eta_{sum}(t)$ kinetiką sudaro dvi dalys: pradinė greitoji dalis (rodanti $\Delta\alpha_2$ vertę, t.y. dvifotonės gardelės įtaką) ir po jos sekanti lėtesnė irimo komponentė (ji parodo sugerties gardelės giliuose centruose $\Delta\alpha_1$ įtaką). Iš difrakcijos kinetikos išskiriamos dvi difrakcijos efektyvumo vertės. Maksimali difrakcijos signalo amplitudės vertė $\eta_{sum}(t) = \eta_{max}$ paimama iš pradinės kinetikos dalies, kai žadinantys ir zonduojantis šviesos impulsai sutampa laike. Antroji signalo amplitudės vertė η_2 paimama iš lėtosios kinetikos dalies. Šių verčių santykis $R_a = \eta_2 / \eta_{max}$ ir kristalo gilių lygmenų kompensavimo laipsnis R skaitmeninio modeliavimo keliu gali būti susiejami sąryšiu

$$R_a \propto (S_n(1/R - 1) - S_p)^2, \quad (7)$$

kur S_n ir S_p yra atitinkamai elektronų ir skylių generacijos iš gilaus lygmens skerspjūviai. Iš šios priklausomybės yra nustatomas gilių lygmenų kompensavimo laipsnis tiriamajame puslaidininkyje R .

Kompensavimo laipsnio nustatymo būdo realizavimui naudojama optinė schema, pateikta paveiksle 1. Ją sudaro 25 ps impulso trukmės ir 1064 nm bangos ilgio šviesos lazerinis impulsinės spinduliuotės šaltinis 1, optiniai dalikliai 2, 3 ir 14, veidrodžiai 4, 9, 16 ir 17, Glano prizmė 5, optinio pluoštelio vėlinimo linija, sudaryta iš transliacinio stalelio 7 su elektromechanine pavara ir prizmės 8, poliarizacinė plokštelė 10, fotodetektoriai 6 ir 15,

tiriamas bandinys 12 ir duomenų surinkimo sistema 13. Schemos elementų paskirtis – suformuoti optinio žadinimo ir zondavimo kanalus, nukreipti juos į tiriamą puslaidininkinį kristalą, zonduojančiu pluoštelio sekti vyksmus kristale įvairiais laiko momentais ir registruoti šių vyksmų kinetiką pagal zonduojančio pluoštelio difragavusios dalies charakteristikas.

Puslaidininkinių medžiagų kompensavimo laipsnio nustatymo būdas realizuojamas taip. Lazerinės spinduliuotės pluoštelis iš šaltinio 1 sklinda optiniu kanalu. Optinis daliklis 2 iš šio kanalo nukreipia 10-20 % spinduliuotės į kanalą, naudojamą zondavimui. Likusioji spinduliuotės dalis optiniu dalikliu yra padalinama į dvi lygias dalis ir sukuria du optinius žadinimo kanalus. Dėka 4, 16 ir 17 veidrodžių optiniai žadinimų kanalai patenka į tiriamąjį bandinį iš priešingų jo pusių ir vienu metu. Zondavimo spinduliuotės pluoštelis veidrodžio 9 pagalba yra nukreipiamas į vėlinimo liniją (optinis stalelis 7 ir prizmė 8) ir iš jos veidrodžio 11 pagalba - į tiriamąjį bandinį. Zonduojančiojo pluoštelio kelyje patalpinta poliarizacine plokšte 10 parenkama pluoštelio poliarizacija, statmena optinio žadinimo kanalų spinduliuotės poliarizacijai. Dalis zonduojančios spinduliuotės pluoštelio praeina pro matuojamąjį bandinį ir patenka į detektorius 15. Difragavusi dalis Glano prizme yra nukreipiamas į detektorius 6. Fotodetektoriai 6 ir 15 perduoda proporcingus registruojamoms energijoms elektrinius signalus į elektroninį duomenų surinkimo bloką. Surinkti duomenys matematiškai apdorojami ir yra išskaičiuojamas momentinis difrakcinis efektyvumas η , kuris yra apibrėžiamas kaip difragavusio pluoštelio energijos santykis su praėjusio pro bandinį zonduojančio pluoštelio energija. Vėlinimo linija pakeitus zonduojančio pluoštelio atėjimo laiką į bandinį, yra išmatuojama difrakcinio efektyvumo kinetika $\eta(t)$.

Gilių lygmenų kompensavimo laipsnio puslaidininkiuose nustatymo būdas realizuotas galio arsenido (GaAs) kristaluose, kuriuose dominuoja gilus EL2 donorinis lygmuo. 2a paveiksle pateiktos eksperimentinės difrakcinio efektyvumo kinetikos išmatuotos naudojant aprašytąją schemą. Vienas iš GaAs kristalų specialiai buvo legiruotas siliciu – seklią donorine priemaiša, kuri padidino gilių lygmenų pradinę užpildą. Kompensavimo laipsnis tiriamuose bandiniuose nustatytas iš difrakcijos efektyvumo verčių, pamatuotų skirtingu laiku, santykio $R_a = \eta(0)/\eta(t)$; čia $\eta(0)$ – difrakcijos efektyvumas išmatuotas pradiniu laiko momentu, kai žadinantys ir zonduojantis šviesos impulsai sutampa laike, $\eta(t)$ – difrakcijos efektyvumas pamatuotas po laiko $t > \tau_L$, kur τ_L – lazerio impulso trukmė. Iš gautojo santykio verčių $R_a = 0,12$ ir $R_a = 0,006$ (atitinkamai pirmajam ir antrajam bandiniui) ir priklausomybės tarp šio santykio vertės ir kompensavimo laipsnio, kuri parodyta 2b

paveiksle, nustatytos Gilių lygmenų kompensavimo laipsnio vertės. Specialiai nelegiruotame GaAs kristale EL2 kompensavimo laipsnis $R = 0,62$, o legiruotame siliciu - $R = 0,37$.

Palyginus su analogu, pasiūlytas kompensavimo laipsnio (gilių lygmenų užpildos) nustatymo būdas yra paprastesnis ir universalesnis, nes nereikalauja elektrooptinio kristalo išpjovimo specifinėmis kristalografinėmis kryptimis. Be to, šį metodą galima panaudoti gilių lygmenų kompensavimo laipsniui nustatyti standartinėse, mikroelektronikoje naudojamose puslaidininkinėse plokštelėse, išpjautose augimo ašies [001] kryptimi.

Išradimo apibrėžtis

Gilių lygmenų kompensavimo laipsnio nustatymo puslaidininkiuose būdas, kuriame tiriamasis objektas optiškai kaupinamas dviem lazerinės spinduliuotės koherentiškais pluoštais prietaišinės krūvininkų generacijos sąlygomis, kurie suformuoja dinaminę difrakcinę gardelę, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad **naujai** įveda trečiąjį optinį kanalą su zondo pluoštelio, matuoja zondo pluoštelio difrakcijos efektyvumo kinetiką nuo atspindžio gardelės, išskiria difrakcijos signalus nuo sugerties koeficiento moduliacijos perelektrintuose giliuose centruose ir nuo dvifotonės sugerties gardelės, išmatuoja šių gardelių difrakcinius efektyvumus ir iš jų santykio nustato kristalo gilių lygmenų kompensavimo laipsnį.

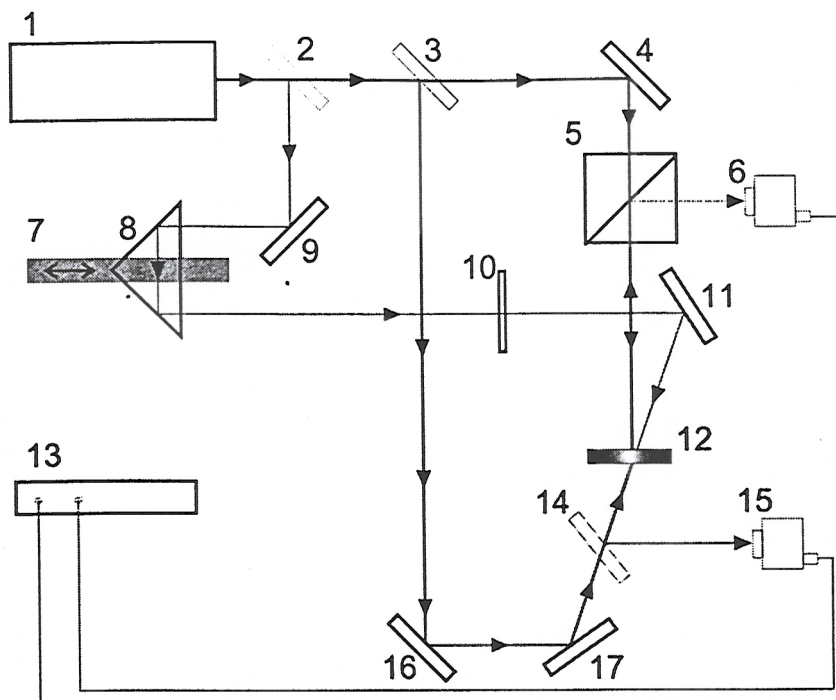
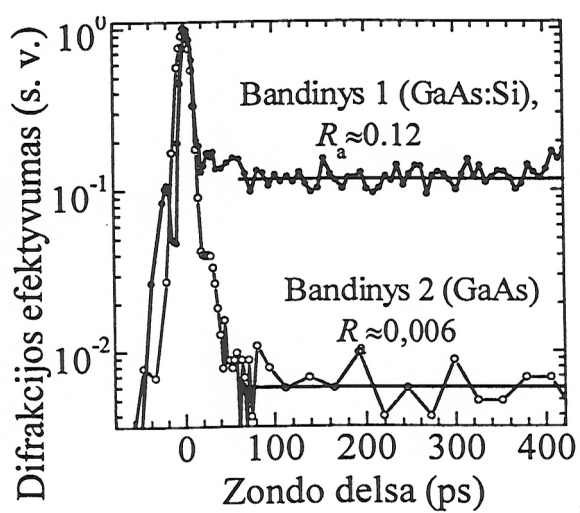
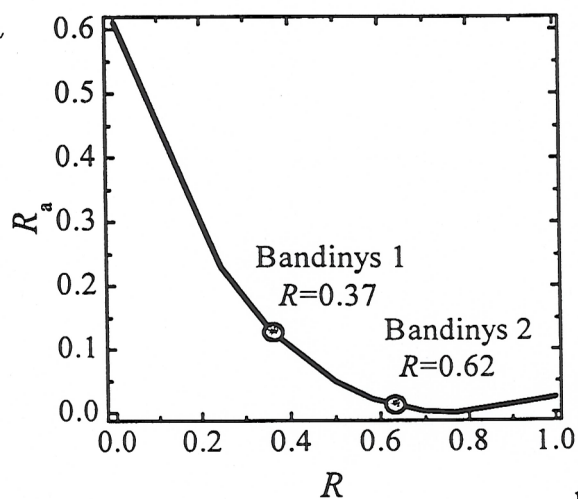


Fig. 1



a)



b)

Fig. 2