

(19)



(10) **LT 5461 B**

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(11) Patento numeris: **5461** (51) Int. Cl. (2006): **G01N 21/00**

(21) Paraiškos numeris: **2006 018**

(22) Paraiškos padavimo data: **2006 03 15**

(41) Paraiškos paskelbimo data: **2007 09 25**

(45) Patento paskelbimo data: **2007 12 27**

(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
Tadas MALINAUSKAS, 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:

Priverstinės spinduliuotės slenkstinės energijos nustatymo puslaidininkiuose būdas

(57) Referatas:

Pasiūlymas yra iš medžiagų metrologijos srities, o būtent - puslaidininkinių medžiagų optinių savybių matavimo srities, ir gali būti panaudotas nustatyti priverstinės spinduliuotės puslaidininkinėse medžiagose atsiradimui optinio kaupinimo sąlygomis. Pasiūlytas būdas gali būti taikomas medžiagų, skirtų puslaidininkinių lazerių gamybai, charakterizavimui bei šių medžiagų gamybos technologijos įvertinimui. Pasiūlytame priverstinės spinduliuotės slenkstinės energijos nustatymo puslaidininkiuose būde, kuriame tiriamąjį puslaidininkinį kristalą optiškai kaupina impulsiniu lazerinės spinduliuotės pluoštelio, naujai puslaidininkinį kristalą optiškai kaupina dviem koherentiškais impulsiniais lazerinės spinduliuotės pluošteliais, kuriais vienu metu apšviečia tiriamąjį objektą ir jame užrašo nepusiausviryų krūvininkų dinaminę gardelę, šią gardelę zondoja kitu optiniu pluoštelio, matuoja dinaminės gardelės difrakcinis efektyvumą prie įvairių kaupinimo pluoštelio energijos tankių, ir priverstinės spinduliuotės slenkstinę energiją nustato pagal kaupinimo pluoštelio energijos vertę, prie kurios stebimas

difrakcinio efektyvumo pilnas įsotinimas. Galimas kitas pasiūlytojo būdo variantas, kai naujai matuoja dinaminės gardelės difrakcinio efektyvumo kinetiką prie įvairių kaupinimo pluoštelio energijos tankių, o priverstinės spinduliuotės slenkstinę energiją nustato pagal kaupinimo energiją, prie kurios difrakcinio efektyvumo kinetikoje atsiranda greitoji irimo komponentė, kurios relaksacijos laikas atkartoja žadinančiojo pluoštelio impulso trukmę.

Pasiūlymas yra iš medžiagų metrologijos srities, o būtent - puslaidininkinių medžiagų optinių savybių matavimo srities, ir gali būti panaudotas nustatyti priverstinės spinduliuotės atsiradimą puslaidininkinėse medžiagose optinio kaupinimo sąlygomis. Pasiūlytas būdas gali būti taikomas medžiagų, skirtų puslaidininkinių lazerių gamybai, charakterizavimui bei šių medžiagų gamybos technologijos įvertinimui.

Žinomas optinis būdas priverstinės spinduliuotės slenkstinės energijos nustatymui optinio kaupinimo metodu, aprašytas knygoje "Group III Nitride Semiconductor Compounds: Physics and Applications. Ed. B.Gil, Clarendon Press, Oxford, 1998, psl.213-[J. J. Song, W. Shan, "Optical properties and lasing in GaN". In "Group III Nitride Semiconductor Compounds", ed. By Bernard Gil, Clarendon Press, Oxford, 1998]. Tiriamoji medžiaga kaupinama lazeriniu impulsu, kurio kvanto energija yra didesnė nei draustinės energijos juostos plotis, todėl sukurama didelė nepusiausvirųjų krūvininkų koncentracija. Naudojamos kelios optinės konfigūracijos, kurioms bendras yra tiriamojo kristalo paviršiaus žadinimas fokusuotu pluoštelio. Vienoje konfigūracijoje fotoemisijos signalas registruojamas iš bandinio briaunos, statmenos paviršiui, o kitoje šis signalas registruojamas atbulinės sklaidos kryptimi nuo žadinamojo paviršiaus. Abiem atvejais matuojamas fotoemisijos spektras bei jo intensyvumas prie įvairių žadinančio spindulio energijos tankių. Priverstinės rekombinacijos atsiradimo požymiai yra emisijos linijos spektro susiaurėjimas ir šios spektro linijos intensyvumo supertiesinė priklausomybė nuo žadinimo energijos. Priverstinės rekombinacijos slenkstinė energija nustatoma iš emisijos intensyvumo priklausomybės nuo žadinimo galios tankio ir atitinka žadinimo galios vertę, ties kuria prasideda emisijos intensyvumo supertiesinė augimo sparta.

Žinomo būdo analogo trūkumas yra tai, kad jį naudojant yra būtinas bandinio briaunos, statmenos žadinimo paviršiui, optinis paruošimas ir nuo šios briaunos kokybės priklausanti priverstinės spinduliuotės slenkstinės energijos vertė. Registruojant emisijos signalą atbulinės sklaidos kryptimi, priverstinės spinduliuotės slenkstinės energijos vertė dažnai priklauso nuo fokusuojamo žadinimo pluoštelio skerspjūvio ploto ties bandiniu (dėl pastarojo mikrostruktūros nevienalytiškumo).

Analogo trūkumams pašalinti priverstinės spinduliuotės slenkstinės energijos nustatymo būde, kuriame optinį kaupinimo kanalą sudaro impulsinis lazerinis pluoštelis, kuris apšviečia tiriamąjį puslaidininkį, **naujai** optinio kaupinimo kanale papildomai įveda antrąjį optinio kaupinimo pluoštelį, sudaro du optinio kaupinimo kanalus, kuriais vienu metu apšviečia tiriamojo objekto paviršių ir jame užrašo nepusiausvirųjų krūvininkų dinaminę gardelę, papildomai įveda zonduojantį optinį pluoštelį, kuriuo matuoja dinaminės gardelės difrakcinį efektyvumą prie įvairių kaupinimo pluoštelio energijos tankių, ir priverstinės spinduliuotės slenkstinę energiją nustato iš kaupinimo pluoštelio energijos vertės, prie kurios stebimas difrakcinio efektyvumo pilnas įsisotinimas.

Siūlomas būdas priverstinės spinduliuotės slenkstinės energijos E_s nustatymui remiasi rekombinacijos spartos priklausomybės nuo šviesa sukuriamų krūvininkų koncentracijos matavimu. Šiame būde momentinė nepusiausvirųjų krūvininkų koncentracija N , kuri auga didinant kaupinimo energiją E , apsprendžia dinaminį gardelių difrakcinio efektyvumo vertę $\eta \sim N^2$ ir jos augimą $\eta \sim E^2$ sąlyginai žemų kaupinimo energijų intervale $E < E_s$. Pasiiekus pakankamai didelę koncentraciją, kai kvazi-Fermi lygmenys atsiranda juostose, tarpjuostinės rekombinacijos sparta slenkstiškai išauga ir rekombinacijos laikas sutrumpėja. Išaugusi rekombinacinė sparta neleidžia sukaupti daugiau nepusiausvirųjų krūvininkų juostose. Kai pasiekama priverstinės spinduliuotės slenkstinė energija E_s , nei koncentracija N , nei η nebedidėja energijų intervale $E > E_s$.

Siūlomo būdo realizavimui nereikia nei specialaus bandinio briaunų paruošimo, nei spektrometrinės įrangos.

Priverstinės spinduliuotės slenkstinės energijos nustatymo būdą paaiškina optinė schema (Fig. 1), kurią sudaro lazerinis impulsinės spinduliuotės šaltinis 1, optinio kaupinimo pirminis kanalas 2, optinis daliklis 3, optinio kaupinimo pluoštelio dalis 4, pluoštelio daliklis 5, du optinio žadinimo kanalai 6 ir 7, tiriamas puslaidininkis 8, zonduojančio optinės spinduliuotės šaltinis 9, optinio vėlinimo įrenginys 10, optinio zondavimo kanalas 11, difragavusioji zondavimo pluoštelio dalis 12, fotodetektoriai FD1, FD2, FD3 ir duomenų surinkimo blokas 13. Schemos elementu 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.

Puslaidininkinių medžiagų fotoelektrinių parametrų holografinis matavimo būdas veikia sekančiai. Lazerinės spinduliuotės pluoštelis iš pirmojo šaltinio 1 (pvz. impulsinio pikosekundinio lazerio spinduliuotė, kurios kvanto energija $h\nu = 3.53$ eV) sklinda optinio kaupinimo pirminiu kanalu 2, padalijamas pluoštelio dalikliu 5 į du optinio žadinimo kanalus 6 ir 7, kurie susikerta tiriamojo puslaidininkio bandinyje 8 (pvz. galio nitrido sluoksnyje, kurio draustinės juostos energija $E_g = 3.51$ eV). Šviesos kvantai yra pilnai sugeriami ir sukuria erdviškai moduliuotą nepusiausvirųjų krūvininkų pasiskirstymą. Šie krūvininkai erdviškai pakeičia tiriamojo puslaidininkio 8 optines savybes - lūžio rodiklį arba (ir) sugerties koeficientą, tuo sudarydami dinaminę difrakcinę gardelę tiriamajame puslaidininkyje. Zondavimo spinduliuotės pluoštelis iš antrojo šaltinio 9, kurio bangos ilgis yra silpnai sugeriamas tiriamajame objekte 8, pereina per optinio vėlinimo liniją 10, sklinda optiniu zondavimo kanalu 11, praeina per tiriamąjį objektą 8 ir registruojamas fotodetektoriumi FD2, patalpintu zondavimo kanale už tiriamojo bandinio. Zondavimo pluoštelis, sklisdamas per tiriamąjį puslaidininkį 8, kuriant žadinimo pluošteliai 6 ir 7 sukūrė erdviškai moduliuotą nepusiausvirųjų krūvininkų pasiskirstymą, difraguoja nuo šios struktūros, sukurdamas difragavusį pluoštelį 12, kuris registruojamas fotodetektoriumi FD3. Fotodetektorius FD1, patalpintas stiklo plokšte 3 atšakotoje kaupinimo kanalo dalyje 4, registruoja signalą, proporcingą kaupinimo energijai E_0 . Fotodetektoriai FD1, FD2 ir FD3 perduoda proporcingus registruojamoms energijoms elektrinius signalus į elektroninį duomenų surinkimo bloką 13. Surinkti duomenys kompiuteriu matematiškai apdorojami ir suskaičiuojamas momentinis difrakcinis efektyvumas. Difrakcijos efektyvumas η apibrėžiamas kaip difragavusiojo pluoštelio 12 energijos ir praėjusiojo pro tiriamąjį bandinį zondavimo pluoštelio energijų santykis $\eta = I_D/I_P$, matuojamas fotodetektoriais FD3 ir FD2.

Spindulinės rekombinacijos slenksčio nustatymui yra matuojama *ekspozicinė difrakcijos charakteristika*, t.y. difrakcijos efektyvumo priklausomybė nuo kaupinimo energijos tankio, $\eta = f(E)$. Vėlinimo įrenginiu 10 parinkus zondavimo pluoštelio 11 nulinį vėlinimą atžvilgiu kaupinančių spindulių 6 ir 7, matuojamas ir skaičiuojama difrakcinio efektyvumo vertė η_1 fiksuotai kaupinimo pluoštelio energijai E_1 . Keičiant kaupinimo pluoštelio energiją intervale $E_1, \dots, E_K$, matuojamos difrakcinio efektyvumo vertės $\eta_1, \dots, \eta_K$, taip gaunama ekspozicinė charakteristika. Fig. 2. parodyta GaN epitaksinio sluoksnio ekspozicinė charakteristika. Priverstinės spinduliuotės slenkstinės energijos vertė E_s

nustatoma iš kaupinimo pluoštelio energijos vertės, prie kurios stebimas difrakcinio efektyvumo pilnas įsisotinimas. Pateiktame pavyzdyje ši vertė GaN epitaksiniam sluoksnyje yra lygi $1,3 \text{ mJ/cm}^2$. Matavimai $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N/GaN}$ heterosandaroje su skirtingu In kiekiu ($x = 8 \%$, 10% ir 15%) leido nustatyti E_s vertes $E = 1,8 \text{ mJ/cm}^2$ (kai $x = 8 \%$) ir $E = 0,8 \text{ mJ/cm}^2$ (kai $x = 10 \%$). Bandinyje su 15% In ši vertė kaupinimo energijos intervale iki $E = 4 \text{ mJ/cm}^2$ nebuvo pasiekta dėl didelio medžiagos defektiškumo.

Palyginus su analogu, pasiūlytas puslaidininkinių medžiagų priverstinės spinduliuotės slenkstinės energijos vertės nustatymo būdas yra paprastesnis ir universalesnis, nes nereikalauja specialaus bandinio briaunų paruošimo, spektrometrinės įrangos. Tai leidžia matavimus atlikti bet kurioje tiriamojo bandinio vietoje, t.y. skanuoti priverstinės spinduliuotės slenkstinės energijos pasiskirstymą tiriamoje medžiagoje. Siūlomas būdas tinka matavimams plačiame kaupinimo spinduliuotės spektriniame ruože, netgi visiškai priartinat kaupinimo bangos ilgį prie puslaidininkiai būdingos fotoemisijos linijos.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Priverstinės spinduliuotės slenkstinės energijos nustatymo puslaidininkiuose būdas, kuriame tiriamas puslaidininkinis kristalas optiškai kaupinamas impulsiniu lazerinės spinduliuotės pluoštelio, besiskiriantis tuo, kad puslaidininkinį kristalą optiškai kaupina dviem koherentiškais impulsiniais lazerinės spinduliuotės pluošteliais, kuriais vienu metu apšviečia tiriamąjį objektą ir jame užrašo nepusiausvirųjų krūvininkų dinaminę gardelę, šią gardelę zondoja kitu optiniu pluoštelio, matuoja dinaminės gardelės difrakcinį efektyvumą prie įvairių kaupinimo pluoštelio energijos tankių, ir priverstinės spinduliuotės slenkstinę energiją nustato pagal kaupinimo pluoštelio energijos vertę, prie kurios stebimas difrakcinio efektyvumo pilnas įsotinimas.
2. Būdas pagal 1 punktą, besiskiriantis tuo, kad matuoja dinaminės gardelės difrakcinio efektyvumo kinetiką prie įvairių kaupinimo pluoštelio energijos tankių ir priverstinės spinduliuotės slenkstinę energiją nustato pagal kaupinimo pluoštelio energijos vertę, prie kurios difrakcinio efektyvumo kinetikoje atsiranda greitoji irimo komponentė su relaksacijos laiku, atkartojančiu žadinančiojo pluoštelio impulso trukmę.

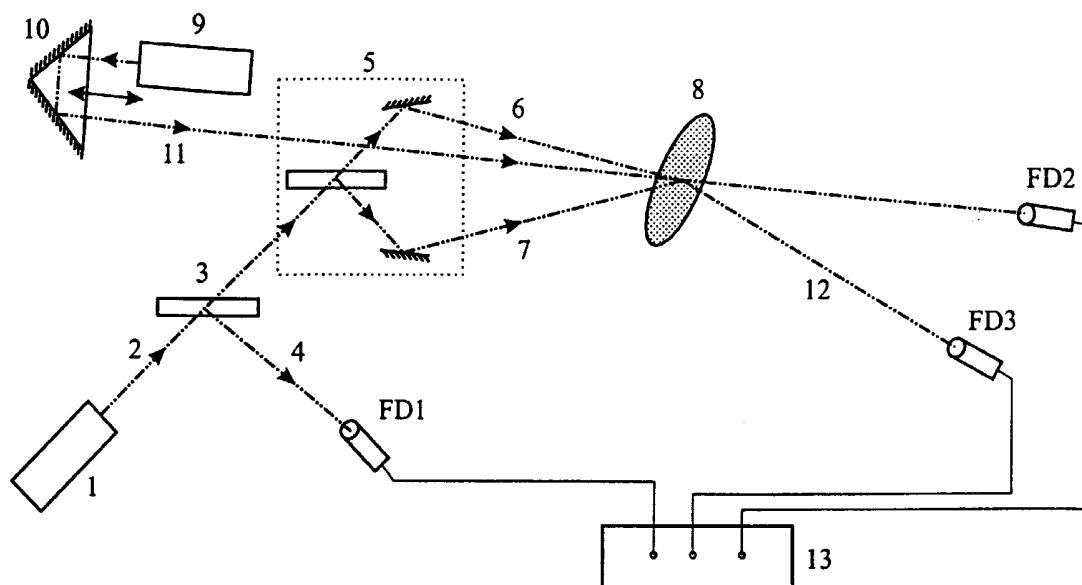


Fig. 1.

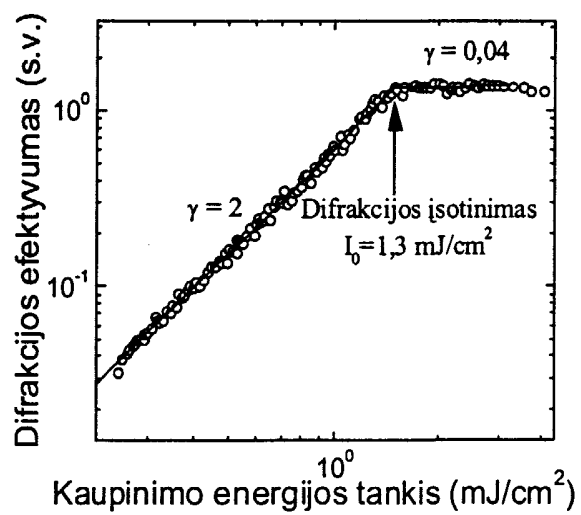


Fig. 2.