

(19)



(10) **LT 6388 B**

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

- (11) Patento numeris: **6388** (51) Int. Cl. (2017.01): **G01N 21/00**
G03H 1/00
G01R 31/00
- (21) Paraiškos numeris: **2015 048**
- (22) Paraiškos padavimo data: **2015-06-25**
- (41) Paraiškos paskelbimo data: **2017-01-25**
- (45) Patento paskelbimo data: **2017-04-25**
- (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
- (73) Patento savininkas:
Vilniaus Universitetas, Universiteto g. 3, LT-01513 Vilnius, LT
- (74) Patentinis patikėtinis/atstovas:
Kęstutis JARAŠIŪNAS, Ežero g. 23, LT-14158 Antezerių k., Zujūnų apyl., Vilniaus r., LT

- (54) Pavadinimas:
Krūvininkų tankio spektrinio pasiskirstymo InGaN šviestukuose nustatymo būdas

- (57) Referatas:

Pasiūlymas yra iš medžiagų metrologijos srities, o būtent - puslaidininkinių medžiagų optinių bei elektrinių savybių matavimo srities, ir gali būti panaudotas nustatyti elektriškai injektuotų krūvininkų tankio spektriniam pasiskirstymui puslaidininkinėse heterosandrose. Pasiūlytas būdas gali būti taikomas nitridinių puslaidininkinių heterosandarų charakterizavimui, bei medžiagų, skirtų puslaidininkinių šviestukų gamybai, technologijos įvertinimui. Pasiūlytame krūvininkų tankio spektrinio pasiskirstymo InGaN šviestukuose nustatymo būde, kuriame į tiriamo puslaidininkinio šviestuko heterosandros sritį elektronai ir skylutės injektuojami elektriškai, besiskiriantį, tuo, kad naujai įveda zondojuojantį plataus spektro optinį pluoštelį, zondojuojantį pluoštelį praleidžia per elektriškai sužadintą aktyvią heterosandros sritį, matuoja praėjusio pro šviesos diodo aktyviąją sritį zondojuojančio pluoštelio spektrą be išorinės įtampos ir ją prijungus, išskaičiuoja diferencinės sugerties spektrą visame spektro ruože tarp kvantinių šulinių sugerties krašto ir juose esančių žemiausių energetinių būsenų, ir iš diferencinio sugerties spektro charakteristikų prie skirtingų injekcijos srovių sprendžia apie krūvininkų tankio spektrinį pasiskirstymą šviesos diode. Galimas kitas pasiūlytojo būdo variantas, kai naujai įveda žadinantį optinį pluoštelį, žadinantį ir zondojuojantį

pluošteliu praleidžia per elektriškai sužadintą aktyvią heterosandaros sritį, matuoja praėjusio pro sandarą zondojančio pluoštelio spektrą be optinio ir su optiniu žadinimu esant fiksuotai elektrinės injekcijos vertei, išskaičiuoja zondojančio pluoštelio skirtuminės sugerties spektrą visame spektro ruože tarp kvantinių šulinių sugerties krašto ir juose esančių žemiausių energetinių būsenų, ir iš diferencinio sugerties spektro laikinės charakteristikos prie skirtingų elektrinės injekcijos srovių sprendžia apie krūvininkų tankio spektrinį pasiskirstymą šviesos diode.

Pasiūlymas yra iš medžiagų metrologijos srities, o būtent - puslaidininkinių medžiagų optinių bei elektrinių savybių matavimo srities, ir gali būti panaudotas nustatyti elektriškai injektuotų krūvininkų tankio spektriniam pasiskirstymui puslaidininkinėse heterosandaroje.

Pasiūlytas būdas gali būti taikomas šviesą emituojančių puslaidininkinių heterosandarų charakterizavimui, ypač iš indžio galio nitridų (InGaN) bei aliuminio galio nitridų (AlGaN) pagamintų šviestukų (angl. LED, light emitting diodes) kvantinio našumo tyrimui bei iš šių medžiagų pagamintų šviestukų gamybos technologijos įvertinimui.

Šviesą emituojančių heterosandarų pagrindinis parametras yra spinduliuotės kvantinis našumas η ir jo priklausomybė nuo injekcijos srovės tankio J arba injektuotų krūvininkų tankio N . Kvantinio našumo vertė parodo, kuri dalis injektuotų krūvio nešėjų kvantiniuose šuliniuose rekombinuoja spinduliniu būdu, t.y. paverčiama fotonais ir išspinduliuojama. Yra žinoma, kad heterosandarų kvantinis našumas stiprios injekcijos sąlygomis pradeda mažėti, ir šios problemos fizikinės priežastys nėra galutinai ištirtos iki šiol.

Šviesos emisijos iš heterosandarų savybių tyrimui ir kvantinio našumo matavimui naudojami fotoluminescencijos bei elektroluminescencijos metodai, kuriuose krūvio nešėjai heterosandaroje yra sužadinami arba optiškai (lazerio puoštelio) arba elektriškai (injektuojant krūvio nešėjus iš n - ir p -tipo elektrinių kontaktų, užaugintų ant sandaros apvalkalinių sluoksnių). Žinomas elektroluminescencija pagrįstas elektrooptinis būdas, kuriame šviesos diodo heterosandara su elektriniais kontaktais prijungiama prie išorinio srovės šaltinio, į aktyvią heterosandaros sritį elektriškai injektuojami krūvio nešėjai - elektronai iš n -tipo kontakto ir skylutės iš p -tipo kontakto, matuojamas sužadintų krūvio nešėjų elektroluminescencijos (EL) intensyvumas I_{EL} iš kvantinių duobių prie skirtingų srovės tankio verčių J , skaičiuojamas spektriškai integruotas kvantinis našumas $\eta_{EL} = I_{EL}/J$ ir jo priklausomybė nuo srovės tankio.

Žinomas elektrooptinis būdas ir elektroluminescencijos kvantinio našumo matavimai aprašyti straipsnyje N. I. Bochkareva, D.V.Tarkhin, Yu. T.Rebane, R.I Gorbunov, Yu.S. Lelikov, I.A. Martynov, Yu. G. Shreter „Quantum efficiency and formation of the emission line in LEDs based on InGaN/GaN quantum well

structures“, Semiconductors, tomas 41, Nr.1, psl. 87-93, 2007 m. Šiame analoge kvantinio efektyvumo nustatymui InGaN/GaN šviestuko sandara su 20 proc. indžio, turinti p -GaN ir n -GaN apvalkalinius sluoksnius su Ni/Au ir Al /Ti kontaktais, prijungiama prie pastovios įtampos šaltinio, matuojamas spektriškai integruoto EL signalo intensyvumas I_{EL} prie skirtingų išorinės įtampos verčių intervale $U=2,0-3,0$ V, paskaičiuojamos EL kvantinio našumo vertės prie skirtingų įtampų, atvaizduojama $\eta_{EL}(U)$ priklausomybė (kuri pateikta aprašomo žinomo būdo straipsnyje, 1 paveiksle). Šioje priklausomybėje stebima maksimali kvantinio našumo vertė yra $\eta_{EL}=0.1$ ties $U=2.6$ V ir jos mažėjimas didinant injekcijos srovę. Analoge aprašytas elektrooptinis būdas leido nustatyti kvantinio našumo verčių spektrinį pasiskirstymą 2,5-2,7 eV emisijos spektro intervale, iš to spręsti apie krūvininkų tankio spektrinį pasiskirstymą šiame šviesos diodo emisijos spektre.

Analogas turi esminį trūkumą. EL signalas registruojamas iš siauros spektro srities, kuri atitinka spindulinę emisiją iš 2,5-2,7 eV energijos intervalo, t.y. iš žemiausių energetinių būsenų InGaN kvantiniuose šuliniuose. Tačiau dėl kinetinės energijos pertekliaus, injektuojant krūvininkus elektriškai iš GaN, sužadinamos visos būsenos spektro dalyje žemiau 2,89 eV. Iš sužadintų aukštesnės energijos būsenų elektronai relaksuoja į žemesnės energijos būsenas 2,5-2,7 eV srityje, iš kurių stebima emisija. Relaksacija vyksta kartu su erdviniu sužadintų krūvininkų persiskirstymu, kurio metu užpildomos visos tarpinės būsenos. Analogas, besiremiantis spindulinės emisijos iš žemiausių energetinių būsenų registravimu, neleidžia stebėti pereinamųjų vyksmų tarpinėje aukštesnės energijos spektro dalyje tarp 2,89 ir 2,7 eV. Todėl analogas, tinkantis stebėti tik spindulinius procesus palyginti siauroje elektroluminescencijos spektro dalyje, negali nustatyti krūvininkų tankio spektrinio pasiskirstymo visame sužadintų būsenų spektro ruože.

Siūlomas elektrooptinis būdas leidžia pašalinti analogo trūkumą. Siūlomame būde, kuriame į šviesos diodo struktūros aktyvią heterosandaros sritį elektronai ir skylutės injektuojami elektriškai, naujai įveda zonduojantį plataus spektro optinį pluoštelį, jį praleidžia per elektriškai sužadintą aktyvią heterosandaros sritį, matuoja praėjusio pro sandarą zonduojančio pluoštelio spektrą be išorinės įtampos ir su išorine įtampa, išskaičiuoja skirtuminės sugerties spektrą visame spektro ruože tarp sugerties krašto ir žemiausių energetinių būsenų, ir iš skirtuminio sugerties spektro charakteristikų prie skirtingų injekcijos srovių sprendžia krūvininkų tankio spektrinį

pasiskirstymą šviesos diodo aktyvioje srityje.

Galimas kitas siūlomo būdo atvejas, kai papildomai įveda žadinantį optinį pluoštelį, žadinantį ir zonduojantį pluoštelius nukreipia į elektriškai sužadintą aktyvią heterosandaros sritį, matuoja praėjusio pro šviesos diodo heterosandarą zonduojančiojo pluoštelio spektrą be optinio ir su optiniu žadinimu esant fiksuotai elektrinės injekcijos srovei, išskaičiuoja zondo pluoštelio skirtuminės sugerties spektrą visame spektro ruože, ir iš skirtuminės sugerties spektro laikinės charakteristikos prie skirtingų injekcijos srovių ir/arba optinio žadinimo tankio sprendžia apie krūvininkų tankio spektrinį pasiskirstymą šviesos diodo aktyvioje srityje.

Krūvininkų tankio spektrinio pasiskirstymo nustatymo būdo schema parodyta Fig.1, kur skaičiais pažymėta: 1 - standartinė šviestuko sandara su aktyvia sritimi, apvalkaliniais *n*-GaN ir *p*-GaN sluoksniais, 2 - elektriniai kontaktai, 3 - išorinis maitinimo šaltinis, 4 - lazeris, 5- optinis parametrinis generatorius, 9 - spektrometras ir 10 - duomenų surinkimo sistema. Lazeris 4 ir optinis parametrinis generatorius 5 suformuoja optinio žadinimo 6 ir zondavimo 7 pluoštelius, kurie nukreipiami veidrodžiais į tiriamąją šviestuko sandarą 1. Pro sandarą praėjęs zonduojantis pluoštelis 8 praleidžiamas pro spektrometrą ir duomenų surinkimo sistemoje 10 registruojamas jo spektras.

Krūvininkų tankio spektrinio pasiskirstymo nustatymo būdas veikia sekančiai. Šviestuko sandara prijungiama prie išorinio šaltinio, parenkama jo įtampa U_1 ir injekcijos srovė J_1 , į šviestuko aktyviąją sritį iš *n*-GaN ir *p*-GaN sluoksnių per kontaktus 2 vyksta elektrinė krūvininkų injekcija. Tuo pat metu į šviestuko aktyviąją sritį nukreipiamas zondavimo pluoštelis 7 su plačiu spektru $\lambda_z = 330\text{--}700\text{ nm}$ intervale, matuojamas praėjusio pro šviestuko sandarą zondavimo pluoštelio 8 spektras $I_{zU_1}(\lambda_z)$ esant išorinei itampai U_1 , ir kai jos nėra $I_{z0}(\lambda_z)$, duomenų surinkimo sistemos kompiuteris išskaičiuoja skirtuminį pralaidumo spektrą $\Delta I_{z1}(\lambda_z) = I_{zU_1}(\lambda_z) - I_{z0}(\lambda_z)$, kuris atspindi injekcijos srovės J_1 sukeltą būsenų užpildymą plačiame spektro intervale, apimančiame sritį nuo InGaN kvantinių šulinių draustinės juostos krašto iki emisijos juostos. Skirtuminio pralaidumo $\Delta I_{z\lambda}$ vertė ties fiksuotu bangos ilgiu λ proporcinga elektrinės injekcijos srovės J sukeltai būsenų užpildai, t.y. injektuotų krūvininkų tankiui N_λ šioje būsenoje. Todėl skirtuminio pralaidumo spektrai leidžia

nustatyti krūvininkų tankio spektrinį pasiskirstymą šviesos diodo aktyvioje srityje prie įvairių injekcijos srovės J verčių.

Galimas kitas krūvininkų tankio spektrinio pasiskirstymo nustatymo būdas, kai papildomai panaudojama optinė krūvininkų injekcija į šviestuko aktyviąją sritį. Šiuo atveju, esant pasirinktai išorinio šaltinio įtampai U_1 ir injekcijos srovei J_1 , į šviestuko aktyviąją sritį papildomai nukreipiamas žadinimo pluoštelis 6, kurio bangos ilgis λ_k (arba kvanto energija) yra parenkamas toks, kad pluoštelis būtų sugertas InGaN kvantiniuose šuliniuose ir juose sužadintų elektronus ir skylutes, tačiau nesužadintų GaN kvantinių barjerų su didesniu draustinės energijos tarpu. Matuojamas praėjusio pro šviestuko sandarą zonduojančiojo pluoštelio 8 spektras $I_{zL1}(\lambda_z)$, kai yra optinis žadinimas, ir kai optinio žadinimo nėra $I_{zL0}(\lambda_z)$. Duomenų surinkimo sistemos 10 kompiuteris išskaičiuoja skirtuminį pralaidumo spektrą $\Delta I_{z1}(\lambda_z) = I_{zL1}(\lambda_z) - I_{zL0}(\lambda_z)$, kuris atspindi optinio žadinimo sukeltą papildomą būsenų užpildymą šviestuko aktyvioje srityje. Po to zondo pluoštelis pavėlinamas laiku $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ ir kartojami skirtuminio pralaidumo spektro matavimai $\Delta I_{z1}(\lambda_z) = I_{zL1}(\lambda_z) - I_{zL0}(\lambda_z)$ atitinkamais laiko momentais $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$. Tokiu būdu išmatuojama skirtuminio pralaidumo spektro laikinė charakteristika prie vieno optinio žadinimo energijos tankio ir fiksuoto elektrinės injekcijos lygio. Skirtuminio pralaidumo spektro laikinės charakteristikos matavimai leidžia nustatyti spektro sritis, kurias užima papildomai optiškai injektuoti krūvininkai ir nustatyti jų gyvavimo trukmes šiose spektro srityse

Analogiški laikinių charakteristikų matavimai prie skirtingų, vis didėjančių elektrinės injekcijos srovės verčių $J_2, J_3, \dots, J_n$ arba prie vis didėjančių optinio žadinimo energijos tankių $L_2, L_3, \dots, L_n$ gali suteikti informaciją apie elektriškai ir /arba optiškai injektuotų krūvininkų tankio momentinį spektrinį pasiskirstymą, tame tarpe ir optinio sužadavimo poveikį EL kvantiniam našumui

Pasiūlyto būdo realizacija iliustruojama Fig. 2-4 Fig.2 pateikti emisijos iš InGaN/GaN šviestuko matavimai, kai vyksta elektrinė ir optinė krūvininkų injekcija į aktyvią šviestuko sritį. Prie kelių fiksuotų srovės verčių $J = 0, 0.065 \text{ A}$, ir 5 A elektriškai injektuojama skirtinga, vis didėjanti krūvininkų koncentracija, o žadinantis optinis pluoštelis papildomai sukuria krūvininkus, todėl stebimas emisijos intensyvumo augimas. Šiuo atveju zonduojančio pluoštelio nėra, todėl registruojami tik vyksmai spektrinėje srityje, kuri atitinka emisiją iš lokalizuotų būsenų.

Fig. 3 pateiktas fotoluminescencijos signalo prieaugis (skirtuminis signalas pagal Fig. 2 duomenis), kai esant elektrinei injekcijai su 0,065 A arba 5A srove, papildomai optiškai sukuriama krūvininkai optinio žadinimo pluoštelio 3. Fig. 3 parodo prieaugio didėjimą ir įsotinimo tendenciją, kai pasiekiami dideli inekuotų krūvininkų tankiai (kreivė su polinkiu 0,95).

Fig. 4 pateikti skirtuminio pralaidumo spektro matavimai, kai į šviestuko aktyviąją sritį nukreipiami optinio žadinimo 3 ir zondavimo 7 pluošteliai. Šiuo atveju injekcijos srovė $J_1=0$. Platus zondo 7 spektras leidžia stebėti optinio žadinimo su 390 nm bangos ilgiu sukeltą būsenų užpildymą plačiame pralaidumo spektro intervale, apimančiame aukštas energetines būsenas (400-440nm spektro srityje). Skirtuminio pralaidumo spektro matavimai įvairiais laiko momentais (Fig. 4, septynių kreivių šeima, gauta pavėlinus zondo pluoštelį 17 ps, 125 ps, ..., 3850 ps) leidžia išmatuoti gyvavimo trukmes įvairiose pralaidumo spektro srityse ir jų kitimą, kai didinama injekcija (optinė arba elektrinė), iš to spręsti apie inekuotų krūvininkų tankio momentinį spektrinį pasiskirstymą. Fig. 4 parodytas fotoluminescencijos spektras 440 -470 nm intervale parodo rekombinacijos vyksmus tik energetiškai žemiausiose (lokalizuotose) būsenose.

Palyginus su analogu, pasiūlytas krūvininkų tankio spektrinio pasiskirstymo nustatymo būdas leidžia atlikti matavimus plačiame spektro intervale, kurį užpildo elektriškai inekuoti krūvininkai, ir ypač aukštesnės energijos spektro dalyje virš liuminescencijos spektro ruožo. Krūvininkams, užimantiems aukštesnės energijos būsenas, kurioms būdinga silpna krūvio nešėjų lokalizacija, galimas nešėjų pagavimas nespindulinės rekombinacijos centrais, ir tai gali vesti prie inekuotų krūvininkų skaičiaus praradimo nespinduliniu būdu. Todėl siūlomas būdas atveria galimybes tirti rekombinacinius vyksmus plačiame spektro intervale ir nustatyti emisijos kvantinio našumo sumažėjimo fizikines priežastis.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Krūvininkų tankio spektrinio pasiskirstymo InGaN šviestukuose nustatymo būdas, kuriame į tiriamo puslaidininkinio šviestuko heterosandaros sritį elektronai ir skylutės injektuojami elektriškai, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad naujai įveda zonduojantį plataus spektro optinį pluoštelį, jį praleidžia per elektriškai sužadintą aktyvią heterosandaros sritį, matuoja praėjusio pro šviesos diodo heterosandarą zonduojančio pluoštelio spektrą be išorinės įtampos ir ją prijungus, išskaičiuoja zondo pluoštelio skirtuminės sugerties spektrą visame spektro ruože tarp kvantinių šulinių sugerties krašto ir juose esančių žemiausių energetinių būsenų, ir iš skirtuminės sugerties spektro charakteristikų prie skirtingų injekcijos srovių sprendžia apie krūvininkų tankio spektrinį pasiskirstymą šviesos diodo aktyvioje srityje.

2. Būdas pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad naujai įveda žadinantį optinį pluoštelį, žadinantį ir zonduojantį pluošteliu praleidžia per elektriškai sužadintą aktyvią heterosandaros sritį, matuoja praėjusio pro šviesos diodo heterosandarą zonduojančiojo pluoštelio spektrą be optinio ir su optiniu žadinimu esant fiksuotai elektrinės injekcijos srovei, išskaičiuoja zondo pluoštelio skirtuminės sugerties spektrą visame spektro ruože tarp kvantinių šulinių sugerties krašto ir juose esančių žemiausių energetinių būsenų, ir iš skirtuminės sugerties spektro laikinės charakteristikos prie skirtingų injekcijos srovių sprendžia apie krūvininkų tankio spektrinį pasiskirstymą šviesos diodo aktyvioje srityje.

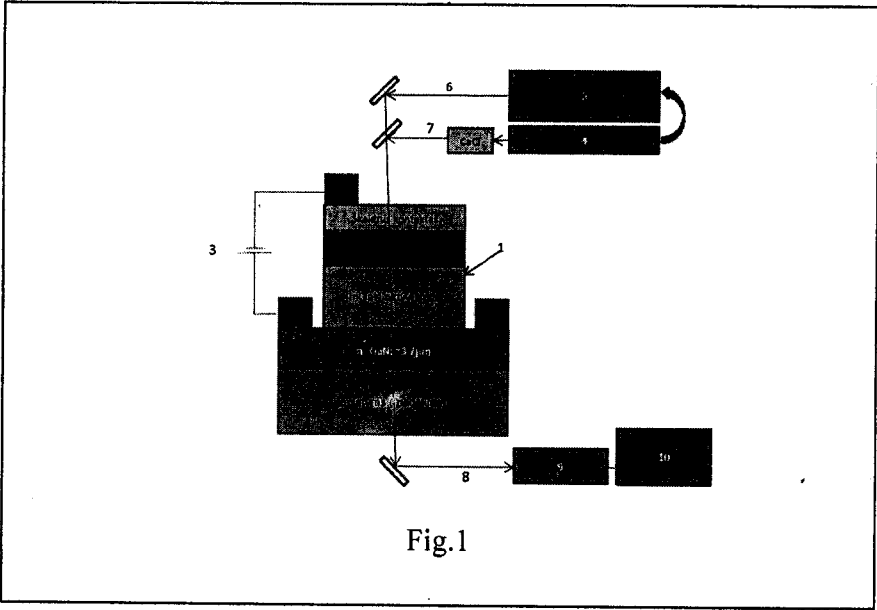


Fig.1

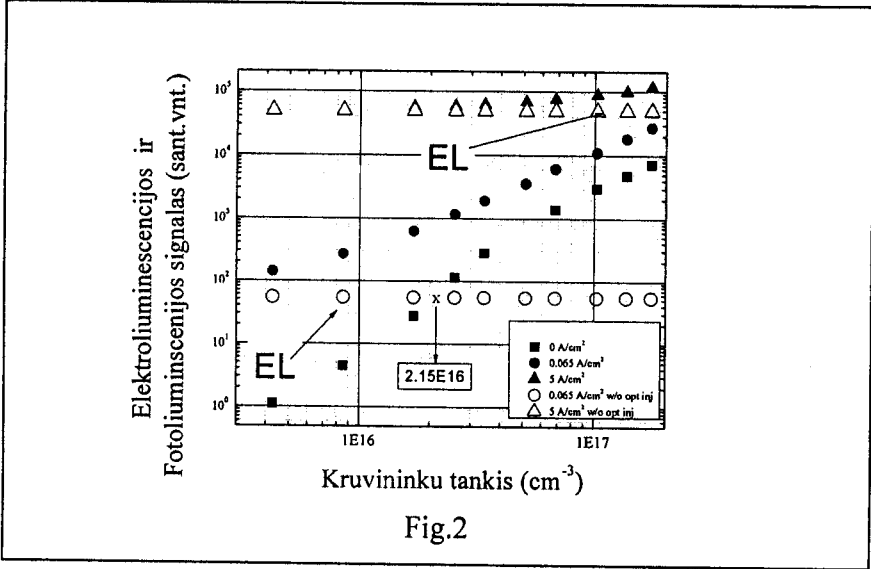


Fig.2

