

(12) **PARAIŠKOS APRAŠYMAS**

(21) Paraiškos numeris: **2021 565**

(22) Paraiškos padavimo
data: **2021-10-25**

(41) Paraiškos
paskelbimo data: **2023-05-10**

(71) Pareiškėjas:

**Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir
technologijos mokslų centras, Savanorių pr. 231,
02300 Vilnius, LT**

(72) Išradėjas:

Arūnas KROTKUS, LT
Vaidas PAČEBUTAS, LT
Vytautas KARPUS, LT

(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:

**Virgina Adolfina DRAUGELIENĖ, 8, UAB TARPINĖ,
A.P.Kavoliuko g. 24-152, LT-04328 Vilnius, LT**

(54) Pavadinimas:

Puslaidininkinis šviesos šaltinis

(57) Referatas:

Šis išradimas priklauso puslaidininkinių šviesos šaltinių sričiai ir gali būti naudojamas artimojo ir viduriniojo infraraudonojo diapazono šviesos ir lazeriniuose dioduose. Pasiūlytas šaltinis apima padėklą iš puslaidininkinės medžiagos, šviesą skleidžiantį sluoksniuotą darinį, užaugintą ant padėklo, kur sluoksniuotas darinys apima: a) kvantinės duobės sluoksnį, pagamintą iš pirmosios puslaidininkinės medžiagos, b) du apauginimo sluoksnius, išdėstytus iš abiejų kvantinės duobės sluoksnio pusių ir pagamintus iš antrosios puslaidininkinės medžiagos, c) du barjero sluoksnius, išdėstytus, atitinkamai, ant minėtų apsauginių sluoksnių, pagamintus iš trečiosios puslaidininkinės medžiagos, kur kvantinės duobės sluoksniai iš pirmosios medžiagos turi savyje bismuto atomų.

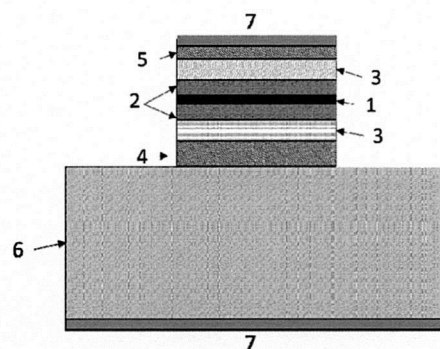


Fig. 4

PUSLAIDININKINIS ŠVIESOS ŠALTINIS

Technikos sritis, kuriai priklauso išradimas

Šis išradimas priklauso puslaidininkinių šviesos šaltinių sričiai ir gali būti naudojamas artimojo ir viduriniojo infraraudonojo diapazono šviesos ir lazeriniuose dioduose.

Technikos lygis

Vidurinysis infraraudonųjų bangos ilgių diapazonas (VIR) yra apibrėžiamas kaip elektromagnetinės spinduliuotės spektro dalis, esanti tarp optiniam ryšiui naudojamų artimojo IR diapazono (nuo $\sim 2 \mu\text{m}$) iki trumpabangio THz spinduliuotės bangos ilgių ($30 \mu\text{m}$). Ypač svarbi yra VIR diapazono dalis tarp $2 \mu\text{m}$ ir $4 \mu\text{m}$, nes šiame bangos ilgių diapazone galime aptikti daugelio technologiškai reikšmingų medžiagų molekulių rotacinius ir vibracinius rezonansus, leidžiančius aptikti šias molekules. Todėl spektrinius VIR matavimus naudojantys justukai yra svarbūs eilei taikymų gamtosaugoje, medicinoje, saugos technikos ir karinėje pramonėje, bene svarbiausiam justukų komponentui – atitinkamo bangos ilgio šviesos šaltiniui, visą laiką egzistuoja nenutrūkstamas poreikis.

Tradicinių tipų lazeriai, pavyzdžiui, turintys tuliu, yterbiu, erbiu ar holmiu legiruotą aktyvųjį elementą – kietąjį kristalą ar skaidulą, spinduliuoja šioje spektrinėje srityje, tačiau tik atskiras siauras linijas, todėl juos naudojant nėra įmanoma perkloti visą reikalingą bangos ilgių diapazoną. Ši tikslą įmanoma pasiekti naudojant puslaidininkinius šviesos šaltinius, pagamintus A3B5 junginių pagrindu ir parenkant atitinkamas medžiagas ir atitinkamus prietaisų darinius.

Pavyzdžiui, dvigubos I tipo heterostrukūrų užaugintų ant GaSb padėklų pagrindu pagamintų lazerinių diodų spinduliuojamas bangos ilgis gali viršyti 3 μm (*Grau et al., "Room-temperature operation of 3.26 μm GaSb-based type-I lasers with quaternary AlGaInAsSb barriers" 2005, Applied Physics Letters, 87, pp. 241 104-1-241 104-3*). Jeigu aktyviajame sluoksnyje yra storas GaSb sluoksnis, didžiausias pasiekiamas bangos ilgis yra 1,8 μm , naudojant GaSb kvantines duobes, jis dar sumažėja. Todėl kvantinėse duobėse tenka naudoti mažesnius draustinių energijų tarpus ε_g turinčius trinaris ar keturnarius junginius, tokius kaip GaInSb or GaInAsSb, barjero sluoksniams pasitelkti ir dar sudėtingesnius penkianarius AlGaInAsSb junginius. Visa tai kelia nemažai technologinių problemų ir ženkliai sumažina prietaisų patikimumą ir pakelia jų gamybos kaštus.

Tokių problemų galima išvengti pasitelkus gerai išvystytas GaAs ar InP padėklus naudojančias epitaksinio auginimo technologijas. Ypač patrauklu būtų gaminti VIR šviesos šaltinius pasitelkiant brandžią InP technologinę platformą, bet iki šiol net ir geriausi iš VIR prietaisų, kuriuos gaminant ji buvo panaudota – InAs kvantinių lazeriai, emituoja ne ilgesnes kaip 2,8 μm bangas (*D. Jung, et.al., "2.8 μm emission from type-I quantum wells grown on InAsP/InP metamorphic graded buffers", Appl. Phys. Lett., 101, 251107 (2012).*). GaAs platformos pagrindu sukurtų šviesos šaltinių spinduliuotės spektras nesiekia ir 1 μm .

Yra žinoma, kad ant GaAs ar InP auginamų puslaidininkinių junginių draustinių energijų tarpus galima ženkliai sumažinti, o jų spinduliuojamus bangos ilgius padidinti, į jų kristalinę gardelę įterpus palyginti nedidelius bismuto atomų kiekius. GaAsBi epitaksinio auginimo technologija yra aprašyta (*T. Tiedje, et. all., „Gallium arsenide semiconductor material incorporating bismuth and process for epitaxial growth“, WO Patent, 2009/079777 A1*). Fotolumescencijos spektro maksimumas GaAsBi su 6% Bi siekė 1.2 μm , mikrodiskiniai lazeriniai diodai iš

šios medžiagos generavo 1,4 μm bangos ilgio signalą (X. Liu, et.all., “Continuous wave operation of GaAsBi microdisk lasers at room temperature with large wavelengths ranging from 1.27 to 1.41 μm ”, *Photonics Research* 7 (2019) 508–512.). Šioje srityje didžiausias proveržis būtų pasiektas tuomet, jei pavyktų GaAs padėklų pagrindu sukurti skaiduliniam optiniam ryšiui tinkamus 1.55 μm bangos ilgio lazerinius diodus.

Tinkama medžiaga InP atveju galėtų būti GaInAsBi, teoriškai su InP suderinto šio junginio spinduliuojama šviesa galėtų būti net 6 μm bangos ilgio. Tam reiktų įterpti apie 34% Bi, bet technologija šiandien leidžia auginti tik ~7% Bi turinčius GaInAsBi sluoksnius ir tai tik pakankamai plonus. Fig.1 yra parodyta GaAsBi ir GaInAsBi draustinių energijos juostų priklausomybės nuo įterptojo Bi dalies šių junginių gardelėse. Kvantinėse GaInAsBi duobėse su AlInAs barjeriais stebėtos fotoluminescencijos spektro maksimumas siekė 2,4 μm (R. Butkute, et.all., “Photoluminescence at up to 2.4 μm wavelengths from GaInAsBi/AlInAs quantum wells, *Journal of Crystal Growth* 391 (2014) 116–120.), maždaug tokie pat bangos ilgiai buvo pasiekti ir tokias kvantines duobes turinčiuose šviesos dioduose (V. Pačebutas, “Single quantum well diodes from GaInAsBi emitting at wavelengths up to 2.5 μm , *Infrared Physics and Technology*, 111, (2020) 103567.). Tuo tarpu tokio, 6% Bi turinčio GaInAsBi sąstato draustinių energijų juostos tarpą atitinkančios spinduliuotės bangos ilgis turėtų būti lygus 3,1 μm , taigi bent 0,7 μm didesnis, nei pasiektas eksperimente. Savo išradime mes siūlome padidinti šviesos šaltinio spinduliuojamos bangos ilgį aktyviojoje jo srityje sudarant sudėtinės kvantines duobes su papildomais kitos puslaidininkinės medžiagos sluoksniais.

JAV patente US 6,900,467 B2 yra aprašytas puslaidininkinis šviesos šaltinis su iš trijų medžiagų sluoksnių sudarytomis sudėtinėmis kvantinėmis duobėmis.

Pirmoji medžiaga, kurios draustinių energijų tarpas ε_{g1} yra mažiausias, o storis yra lygus L_Z sudaro kvantinės duobės sluoksnį.

Antrosios medžiagos su draustinių energijų tarpu $\varepsilon_{g2} > \varepsilon_{g1}$ sluoksniais iš abiejų pusių apauginamas pirmosios medžiagos sluoksnis. Laidumo juostos kraštas šioje medžiagoje turi būti ne mažiau kaip per 100 meV aukščiau už pagrindinį elektronų energijos lygmenį E_{e1} kvantinėje duobėje.

Iš trečiosios medžiagos ($\varepsilon_{g3} > \varepsilon_{g2} > \varepsilon_{g1}$) auginami sluoksniai, sudarantys kvantinės duobės barjerus (B1 ir B2); jų laidumo juostos kraštai turi būti ne mažiau kaip per 100 meV virš antrosios medžiagos sluoksnių laidumo juostos kraštų.

Tokiame šviesos šaltinio darinyje krūvininkų spindulinė rekombinacija vyksta tik pirmosios medžiagos sluoksnyje, o jų efektyvesnį surinkimą o, tuo pačiu, didesnį spinduliuotės intensyvumą bei spartesnį dinaminį atsaką užtikrina papildomi antrosios medžiagos sluoksniai. Tačiau dėl elektronų kvantinės sąspraudos atsiradęs pagrindinio elektronų energijos lygmens kvantinėje duobėje poslinkis ΔE_{e1} padidina spinduliuojamų šviesos kvantų energiją ir sumažina šaltinio bangos ilgį.

Sprendžiama techninė problema

Išradimu siekiama praplatinti šviesos šaltinių panaudojimo optiniuose dujų ir cheminiuose jutikliuose galimybes padidinant jų spinduliuojamos bangos ilgį iki verčių, artimų kvantinės duobės sluoksnio medžiagos optinės sugerties kraštui.

Išradimo esmės atskleidimas

Uždavinio sprendimo esmė pagal pasiūlytą išradimą yra ta, kas puslaidininkiniame šviesos šaltinyje, apimančiame padėklą iš puslaidininkinės medžiagos, šviesą skleidžiantį sluoksniuotą darinį, užaugintą ant padėklo, kur sluoksniuotas darinys.

apima: a) kvantinės duobės sluoksnį, pagamintą iš pirmosios puslaidininkinės medžiagos, b) du apauginimo sluoksnius, išdėstytus iš abiejų kvantinės duobės sluoksnio pusių ir pagamintus iš antrosios puslaidininkinės medžiagos, c) du barjero sluoksnius, išdėstytus, atitinkamai, ant minėtų apsauginių sluoksnių, pagamintus iš trečiosios puslaidininkinės medžiagos, kur kvantinės duobės sluoksniai iš pirmosios medžiagos turi savyje bismuto atomų; dviejų apauginimo sluoksnių iš antrosios medžiagos draustinių energijų juostos tarpas ε_{g2} yra didesnis už tokį tarpą pirmojoje medžiagoje ε_{g1} , o laidumo juostos trūkis ΔE_{c12} sandūroje su pirmąja medžiaga yra mažesnis už valentinės juostos trūkį ΔE_{v12} ;

dviejų barjerų sluoksnių iš trečiosios medžiagos draustinių energijų juostos tarpas ε_{g3} yra didesnis nei antrojoje medžiagoje, o laidumo juostos trūkis ΔE_{c23} sandūroje su antrąja medžiaga yra didesnis už valentinės juostos trūkį ΔE_{v23} .

Padėklas yra iš InP, pirmoji medžiaga yra GaInAsBi, antroji medžiaga yra GaInAs, o trečioji medžiaga yra AlInAs.

Padėklas yra iš GaAs, pirmoji medžiaga yra GaAsBi, antroji medžiaga yra GaAs, o trečioji medžiaga yra AlGaAs.

Išradimo naudingumas

Siūlomas puslaidininkinis šviesos šaltinis, kurio aktyviojoje srityje yra sudėtinės kvantinės duobės sudarytos iš trijų skirtingų medžiagų sluoksnių: duobės sluoksnio iš pirmosios medžiagos, apauginimo sluoksnių iš antrosios medžiagos ir barjerų sluoksnių iš trečiosios medžiagos. Laidumo juostos trūkis heterosandūroje tarp pirmosios ir antrosios medžiagų ΔE_{c12} privalo būti mažesnis už valentinės juostos trūkį ΔE_{v12} šioje sandūroje; laidumo juostos trūkis heterosandūroje tarp antrosios ir trečiosios medžiagų ΔE_{c23} privalo būti didesnis už valentinės juostos trūkį ΔE_{v23} .

Daugumoje heterosandūrų, sudarytų iš A3B5 grupės puslaidininkų, $\Delta E_c > \Delta E_v$, todėl pirmąją sąlygą yra sunku patenkinti. Tam tinka puslaidininkiniai junginiai, kuriuose dalis penktos grupės atomų yra pakeisti bismutu. Bismuto įterpimas daugiau paveikia valentinės juostos lygmenų energinę padėtį, todėl heterosandūrose tarp bismidų ir kitų A3B5 junginių valentinės juostos trūkiai yra didesni nei laidumo juostoje.

Tai, kad siūlomuose šviesos šaltiniuose kvantinių duobių sluoksniuose yra panaudoti bismidiniai junginiai, gali turėti porą papildomų pranašumų. Visų pirma, Bi įvedimas ne tik mažina draustinių energijų juostos tarpą, bet ir didina dėl sukinių orbitinės sąveikos atsiradusį valentinės juostos suskilimą (SO). GaInAsBi SO energija viršija ε_g kuomet junginyje yra 3.5% Bi, o GaAsBi tai atsitinka prie 9% Bi. Tokiomis sąlygomis nebegali vykti Auger rekombinacijos procesai, kuriuose dalyvauja skylės iš SO valentinės juostos ir šviesos sugertis dėl krūvininkų šuolių į šią juostą. Dėl to sumažės ir nespindulinių elektronų šuolių tikimybė, ir šiluminiai nuostoliai šviesos šaltiniuose. Kitas bismidų pranašumas yra mažesnė nei kituose A3B5 puslaidininkiuose jų draustinių energijų tarpo priklausomybė nuo temperatūros, kas, pavyzdžiui, lazerinių diodų atveju sumažins energijos nuostolius maitinant diodo temperatūrą stabilizuojančius termoelektrinius šaldiklius.

Trumpas brėžinių aprašymas

Norint geriau suprasti išradimą ir įvertinti jo praktinius pritaikymus, pateikiami šie aiškinamieji brėžiniai. Brėžiniai pateikiami tik kaip pavyzdžiai, kurie neriboja išradimo apimtį.

Fig.1 yra pavaizduota GaInAsBi draustinių energijų tarpo priklausomybė nuo bismuto dalies junginyje.

Fig.2 yra pavaizduota GaInAsBi/AlInAs kvantinės duobės energijų juostų diagrama..

Fig.3 yra pavaizduota siūlomo šviesos šaltinio aktyviosios srities kvantinių duobių energijos juostų diagrama

Fig.4 yra pavaizduota šviesos diodo darinio sluoksnių struktūra.

Fig.5 yra pavaizduoti neapaugintos GaInAs papildomais sluoksniais QW1 ir apaugintos jais QW2 pavienių GaInAsBi kvantinių duobių su 6 proc. Bi fotoluminescencijos FL spektrai. Strėlėmis nurodytos teorinės FL maksimumų vertės.

Fig.6 yra pavaizduoti šviesos diodų su viena neapauginta QW1 ir viena apauginta papildomais GaInAs sluoksniais QW2 GaInAsBi su 5,5 proc. Bi proc. Bi kvantinėmis duobėmis elektroluminescencijos EL spektrai. Strėlėmis nurodytos teorinės EL maksimumų vertės.

Fig.7 yra pavaizduoti šviesos diodų su trimis neapaugintomis QW1 ir trimis apaugintomis papildomais GaInAs sluoksniais QW2 GaInAsBi su 6 proc. Bi kvantinėmis duobėmis elektroluminescencijos EL spektrai. Strėlėmis nurodytos teorinės EL maksimumų vertės.

Fig.8 yra pavaizduotos trinarių GaAsBi ir GaInAs draustinių energijų juostos pločio priklausomybės nuo Bi ir In atomų dalies juose.

Išradimo realizavimo pavyzdžiai

Išradimą galima įgyvendinti, kuomet šviesos šaltinis yra pagaminamas iš puslaidininkių, kurių heterostruktūroje kvantinės duobės sluoksnį sudaro medžiaga, turinti bismuto atomų. Tokie bismuto turintys puslaidininkiai gali, pavyzdžiui, būti GaAsBi ar GaInAsBi. Šiuose A3B5 grupės puslaidininkiniuose junginiuose Bi

atomų įvedimas pakelia valentinės juostos energijos lygmenis mažai įtakodamas laidumo juostos energijos lygmenų padėtį. Todėl laidumo juostos lygmenų trūkiai atitinkamose heterosandūrose: GaAsBi/GaAs ir GaInAsBi/GaInAs, yra nedideli, pavyzdžiui, pirmojoje iš išvardintųjų heterosandūrų laidumo juostos trūkiui tenka tik nuo 20% iki 30% GaAs ir GaAsBi draustinių energijų tarpų skirtumo.

Norint, kad GaAsBi draustinių energijų tarpas pasiektų 0,4 eV (atitinkamas bangos ilgis bus 3,1 μm), reikia įvesti apie 15% Bi. Todėl VIR diapazono šviesos šaltiniams tinkamesnis bus antrasis medžiagų derinys. Minėtas draustinių energijų tarpas neįtemptame GaInAsBi yra pasiekiamas jau įterpus apie 6% Bi (Fig. 1). Žinomame kvantinės duobės darinyje, kurio energijos juostų struktūra yra pavaizduota Fig.2, elektronų ir skylių energijos lygmenys pasislenka. Mažesnių nei skylės efektinę masę turinčių elektronų energijos lygmuo E_{1e} pasislenka daugiau už sunkiųjų skylių lygmenį E_{1hh} , todėl optinio šuolio energija tampa didesnė nei draustinių energijų tarpas ir spinduliuotės bangos ilgis ženkliai išauga.

Siūlomas šviesos šaltinis, kurio darinys yra pavaizduotas Fig. 3, turi šviesą spinduliuojantį kvantinės duobės puslaidininkinis sluoksnį 1, apauginimo puslaidininkinius sluoksnius 2, išdėstyti iš abiejų kvantinės duobės sluoksnio 1 ir barjero puslaidininkinius sluoksnius 3, išdėstyti ant apauginimo sluoksnių 2. Minėtasis aktyvusis sluoksnių darinys yra užaugintas ant puslaidininkinio padėklo 4; auginimas pradedamas buferiniu puslaidininkiniu sluoksniu 5 ir baigiasi apsauginiu puslaidininkiniu sluoksniu 6. Ant išorinių sluoksnių 4 ir 6 yra suformuojami elektriniai kontaktai 7.

Toliau pateikiame pasiūlyto šviesos šaltinio gaminimą

Ant p-tipo InP padėklo 4 yra užauginamas 100 nm storio $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ buferinis sluoksnis 5, 5 nm storio $\text{Al}_{0.49}\text{In}_{0.51}\text{As}$ barjeras 3, 10 nm storio apauginimo sluoksnis iš $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ 2, 5 nm storio kvantinės duobės sluoksnis 1 iš $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}_{0.95}\text{Bi}_{0.05}$ ir antrieji apauginimo sluoksnis 2 ir barjero sluoksnis 3. Sritis, apribota barjeriais 3 sudaro sudėtinę kvantinę duobę, kurių šviesos šaltinio darinyje gali būti viena arba kelios. Darinio sluoksnių seka baigiasi apsauginiu 10 nm storio $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$ sluoksniu 6 ir ant abiejų darinio pusių užgarintais elektriniais kontaktais 7.

Kvantinių duobių su apauginimo sluoksniais (Q2) ir be jų (Q1) fotoluminescencijos ir elektroluminescencijos spektrai yra palyginti Fig.5 ir Fig.6. Abiejuose eksperimentuose naudotos skirtingos bandinių poros, tačiau auginant kiekvieną iš jų stengiasi GaInAsBi sluoksniuose įvesti tokį pat bismuto atomų kiekį. Luminescencijos spektrai buvo matuojami FTIR spektrometru Bruker Vertex 80; fotoluminescencija buvo žadinama 808 nm bangos ilgio lazerio spinduliuote, o šviesos diodų elektroluminescencijos spektrai matuoti per juos tekant 1A srovei. Iš šių iliustracijų matyti, kad abiem atvejais duobės apauginimo sluoksnių įvedimas sąlygojo ženklų spinduliuotės spektro raudonąjį poslinkį. Be to, apaugintų duobių spinduliuotės intensyvumas abiem atvejais irgi išaugo dėl pagerėjusio elektronų ir skylių surinkimo į duobes.

Kitas įgyvendinimo variantas, galintis turėti svarbių taikymų skaidulinio optinio ryšio prietaisų technologijoje, galėtų būti paraiškoje siūlomas šviesos šaltinis, pagamintas ant GaAs padėklo. Šiuo atveju pirmoji medžiaga būtų GaAsBi, antroji – GaAs, o trečioji medžiaga – AlGaAs. Į GaAs įvedus Bi, jo draustinių energijų tarpas mažėja daugiau nei 10 kartų sparčiau, nei įvedus In atomus. GaAsBi draustinių energijų tarpas tampa mažesnis už 0,8 eV kai Bi dalis pasiekia 10%, kas šiuo metu jau yra nesunkiai pasiekama. Todėl panaudojus papildomus apauginimo

sluoksnius yra įmanoma pasiekti trečiojo skaidulinio ryšio optinio lango bangos ilgį, lygų $1,55 \mu\text{m}$.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Puslaidininkinis šviesos šaltinis, apimantis:

- padėklą iš puslaidininkinės medžiagos,
- šviesą skleidžiantį sluoksniuotą darinį, užaugintą ant padėklo, kur sluoksniuotas darinys apima:

- a) kvantinės duobės sluoksnį, pagamintą iš pirmosios puslaidininkinės medžiagos
- b) du apauginimo sluoksnius, išdėstytus iš abiejų kvantinės duobės sluoksnio pusių ir pagamintus iš antrosios puslaidininkinės medžiagos,
- c) du barjero sluoksnius, išdėstytus, atitinkamai, ant minėtų apsauginių sluoksnių, pagamintus iš trečiosios puslaidininkinės medžiagos, besiskiriantis tuo, kad kvantinės duobės sluoksniai iš pirmosios medžiagos turi savyje bismuto atomų; dviejų apauginimo sluoksnių iš antrosios medžiagos draustinių energijų juostos tarpas ε_{g2} yra didesnis už tokį tarpą pirmojoje medžiagoje ε_{g1} , o laidumo juostos trūkis ΔE_{c12} sandūroje su pirmąja medžiaga yra mažesnis už valentinės juostos trūkį ΔE_{v12} ;

dviejų barjerų sluoksnių iš trečiosios medžiagos draustinių energijų juostos tarpas ε_{g3} yra didesnis nei antrojoje medžiagoje, o laidumo juostos trūkis ΔE_{c23} sandūroje su antrąja medžiaga yra didesnis už valentinės juostos trūkį ΔE_{v23} .

2. Puslaidininkinis šviesos šaltinis pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad padėklas yra iš InP, pirmoji medžiaga yra GaInAsBi, antroji medžiaga yra GaInAs, o trečioji medžiaga yra AlInAs.

3. Puslaidininkinis šviesos šaltinis pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad padėklas yra iš GaAs, pirmoji medžiaga yra GaAsBi, antroji medžiaga yra GaAs, o trečioji medžiaga yra AlGaAs.

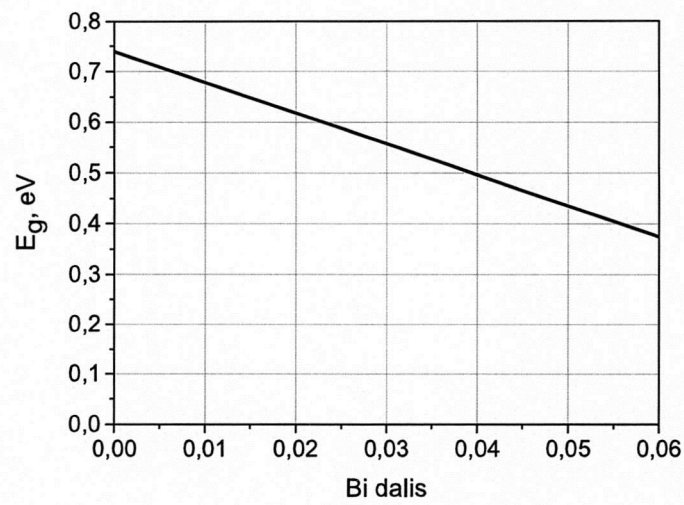


Fig. 1

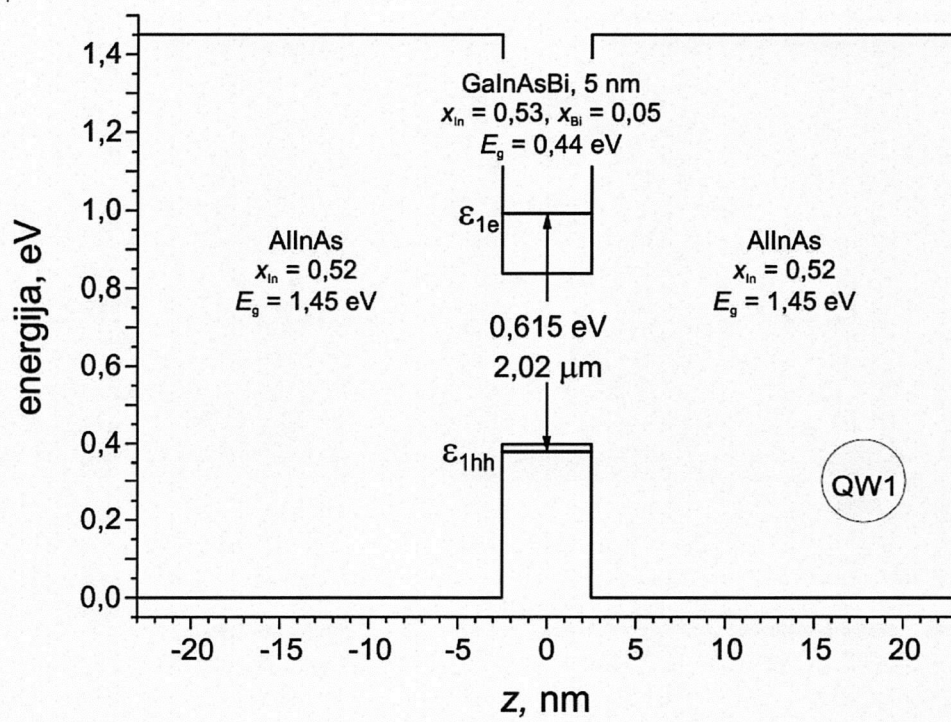
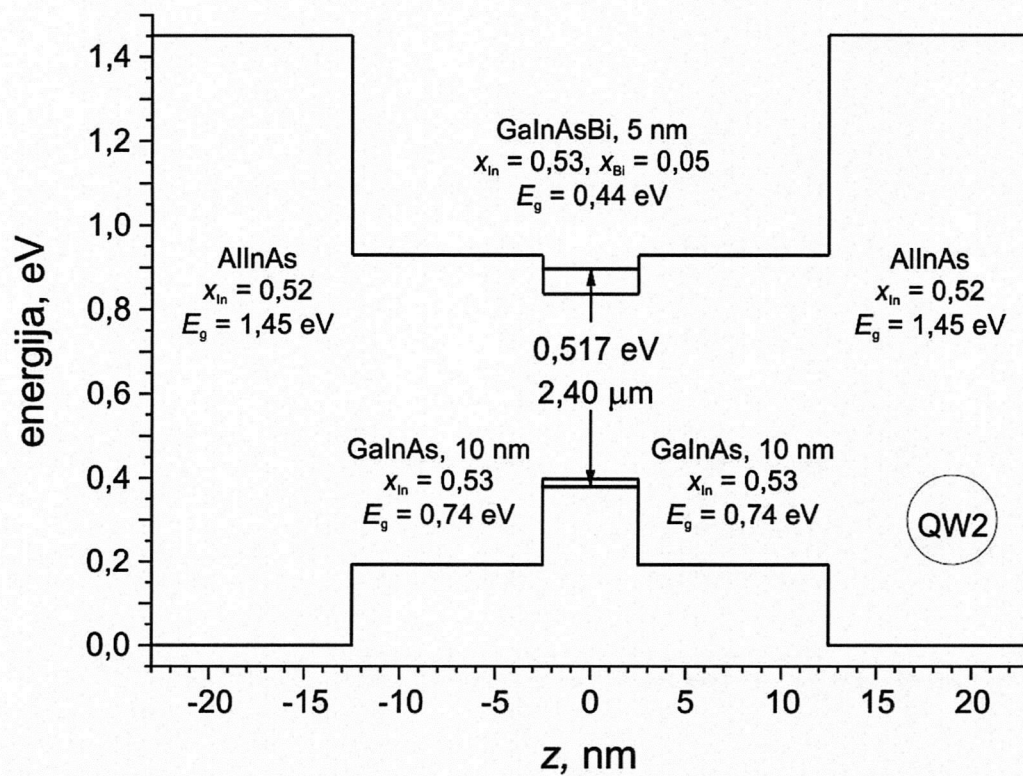
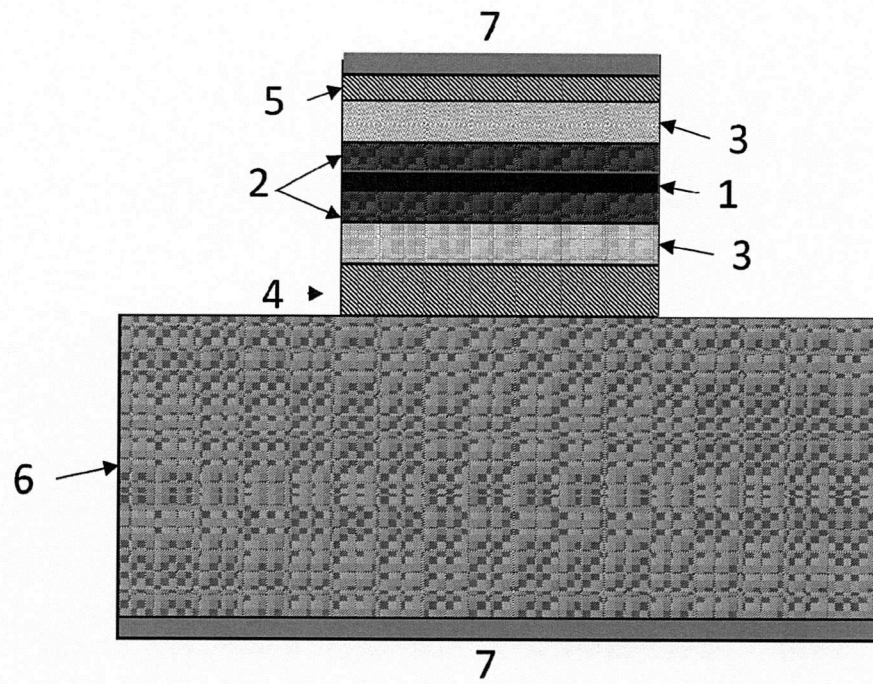
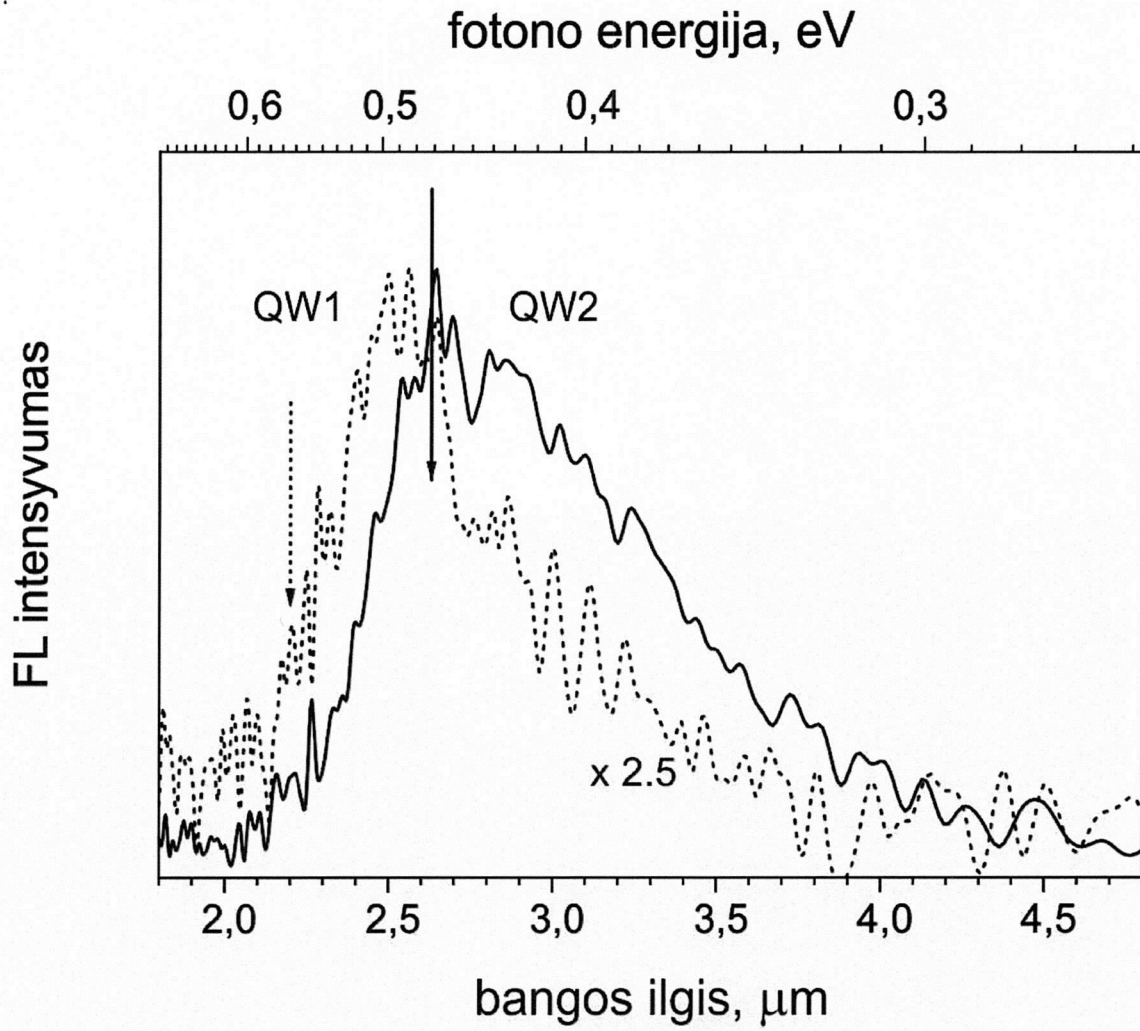
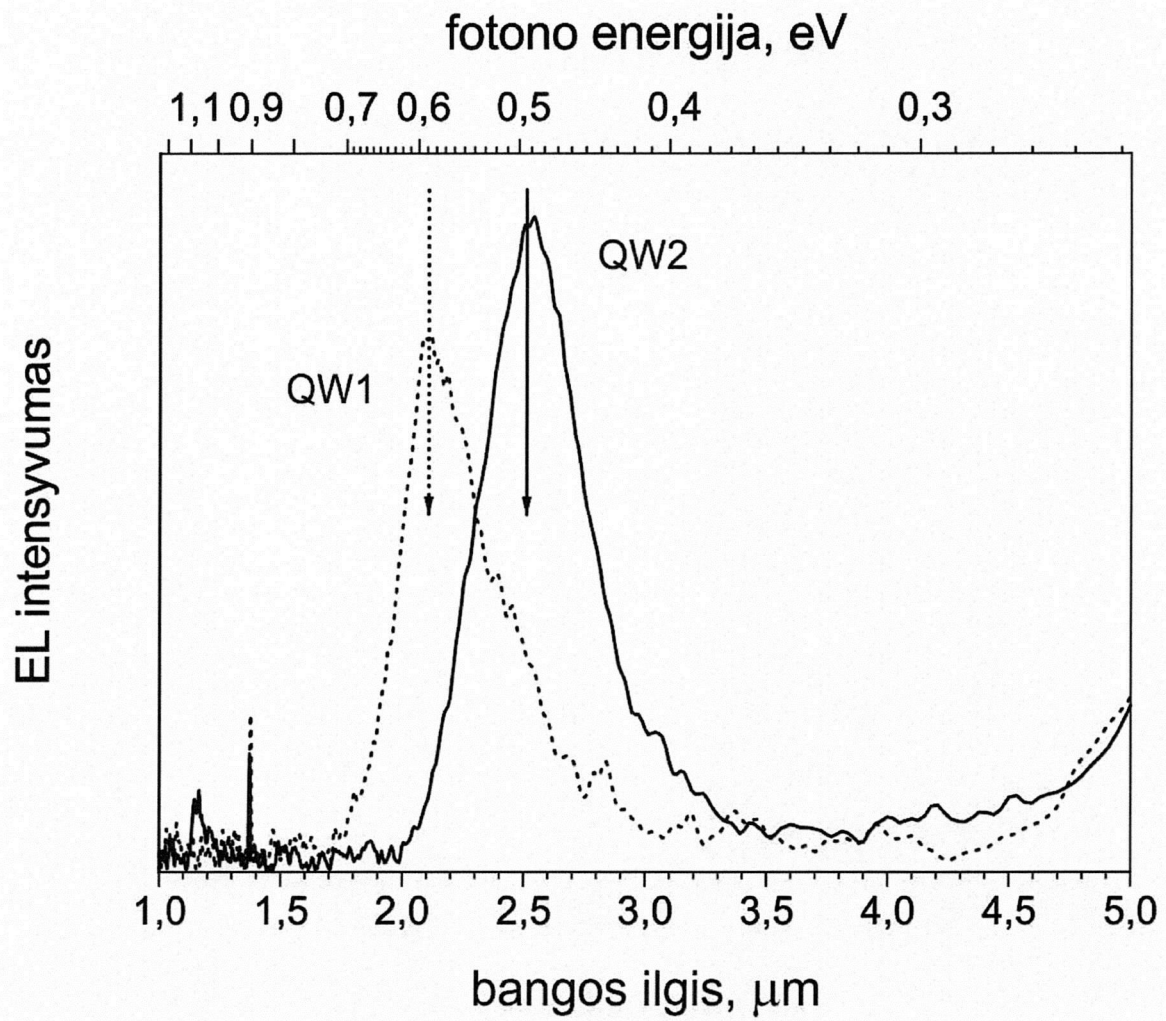


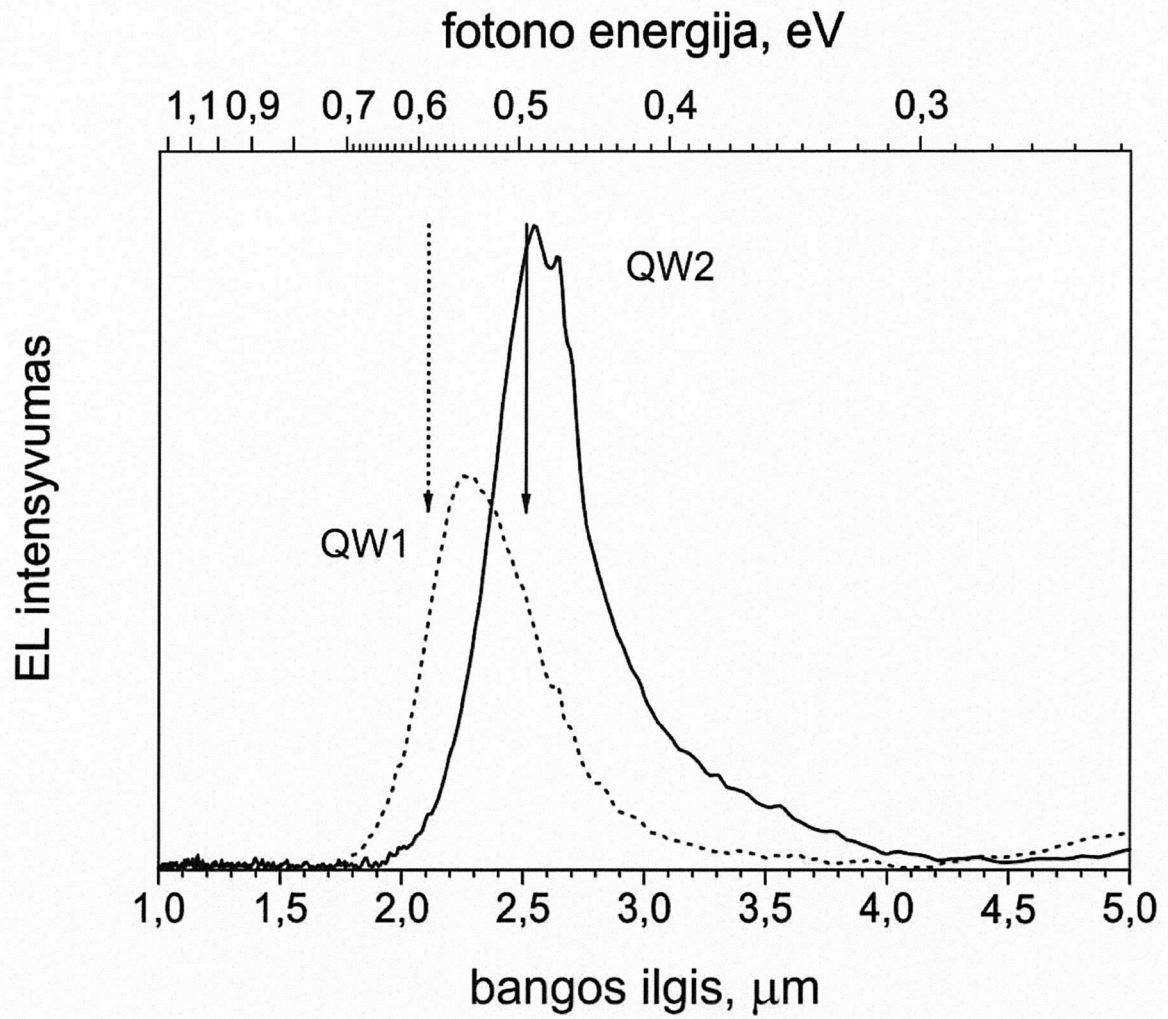
Fig. 2

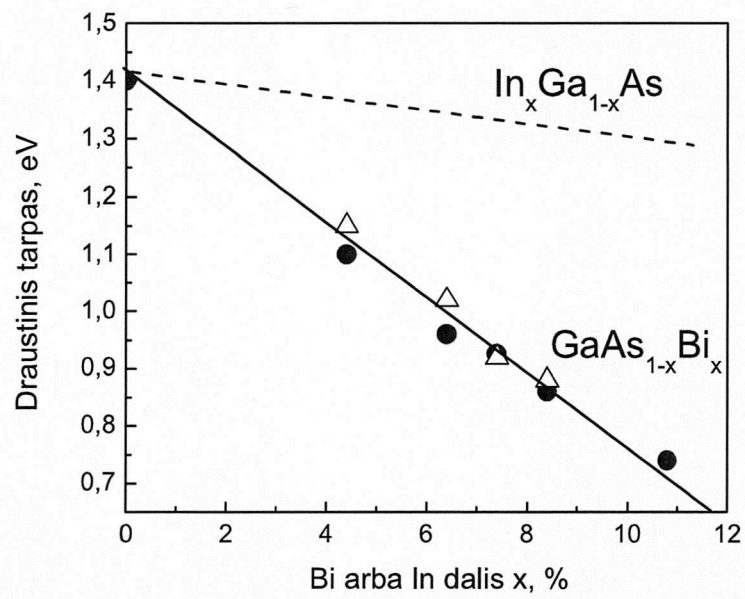
*Fig. 3*

*Fig. 4*

*Fig. 5*

*Fig. 6*

*Fig. 7*

*Fig. 8*