

(19)



(10) **LT 6044 B**

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(11) Patento numeris: **6044** (51) Int. Cl. (2014.01): **H01L 31/00**

(21) Paraiškos numeris: **2013 077**

(22) Paraiškos padavimo data: **2013 07 22**

(41) Paraiškos paskelbimo data: **2014 02 25**

(45) Patento paskelbimo data: **2014 06 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:

Arūnas KROTKUS, LT
Andrėjus GEIŽUTIS, LT
Vaidas PAČEBUTAS, LT

(73) Patento savininkas:

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

(74) Patentinis patikėtinis/atstovas:

Lina MEŠKAUSKIENĖ, Advokatų kontora Meškauskienė ir Tuzovaitė, A.
Mickevičiaus g. 6/Karaimų g. 1, LT-08119 Vilnius, LT

(54) Pavadinimas:

Didelės spartos fotodiodas

(57) Referatas:

Judančių vieno tipo krūvininkų fotodiodas yra pagamintas iš puslaidininkinių, kurių heterostrukčiūje sugėriklio sluoksnį sudaro medžiaga, turinti bismuto atomų. Tokie bismuto turintys puslaidininkiai gali, pavyzdžiui, būti GaAsBi, InPBi ar GaInAsBi. Šiuose A₃B₅ grupės puslaidininkiniuose junginiuose Bi atomų įvedimas pakelia valentinės juostos energijos lygmenį mažai įtakodamas laidumo juostos energijos lygmenį padėti. Todėl laidumo juostos lygmenų trūkiai atitinkamose heterosandūrose: GaAsBi/GaAs, InPBi/InP ir GaInAsBi/GaInAs, yra nedideli. Kitame įgyvendinimo variante, bismuto atomų dalis sugėriklio junginyje tolygiai mažėja, einant tolyn nuo sugėriklio sluoksnio ribos su kolektoriaus sluoksniu.

TECHNIKOS SRITIS

Šis išradimas priklauso puslaidininkinių fotodetektorių sričiai ir gali būti naudojamas didelio pasikartojimo dažnio, tame tarpe ir terahercinio dažnio, optinių signalų detektavimui, matavimui ir vertimui elektriniais signalais.

TECHNIKOS LYGIS

Pasiūlyme aprašytas didelės spartos fotodetektoriaus darinys ir jo gamybos technologija gali būti naudojami gaminant plačiajuosčius optoelektroninius komponentus ir sistemas, tame tarpe optinio ryšio sistemų imtuvus ir terahercinius emiterius, apšviečiamus dviejų skirtingų bangos ilgių lazerių pluoštais.

Ypač platų pritaikymą spartūs fotodiodai turi telekomunikacijose. Ten jie naudojami šviesolaidžiais perduodamų signalų detektavimui. Kuo spartesnis naudojamas fotodiodas, tuo daugiau informacijos galima perduoti šviesolaidžio linija. Taip pat spartūs fotodiodai naudojami laikinės skyros spektroskopijoje, impulsinių lazerių spinduliuotės charakterizavimui (impulso trukmės ir laikinės gaubtinės formos nustatymui) ir kituose taikymuose, kur reikia užregistruoti ultra trumpus infraraudonosios spinduliuotės signalus.

Spartūs fotodiodai, registruojantys infraraudonosios spinduliuotės, kurios bangos ilgis yra tarp $1\ \mu\text{m}$ ir $1,5\ \mu\text{m}$, signalus, paprastai turi sugėriklio sluoksnius, pagamintus iš puslaidininkio su atitinkamu draustiniu energijų tarpu $\varepsilon_g = 1.24 / \lambda_g$, kur λ_g yra ilgiausias bangos ilgis spinduliuotės, kuriai fotodiodas dar yra jautrus. Žinomas tokio prietaiso pavyzdys yra vadinamasis PIN diodas, kuriame iš puslaidininkio su mažesniu draustiniu tarpu pagamintas sugėriklio sluoksnis (i-sluoksnis) yra įterptas tarp dviejų platesnio draustinio tarpo puslaidininkio sluoksnių, legiruotų akceptorinėmis ir donorinėmis priemaišomis - atitinkamai, p-tipo ir n-tipo sluoksniai. P-n sandūros viduryje esančiame i-sluoksnyje susidaro vidinis elektrinis laukas, kuris verčia judėti šviesos sukurtus elektronus ir skyles ir taip indukuoja fotosrovę. Infraraudonojo diapazono PIN diodų sugėriklio sluoksnis dažniausiai gaminamas iš InGaAs ar InGaAsP junginių. Šiose medžiagose, kaip ir kituose A_3B_5 grupės puslaidininkiuose, skylių judris yra žymiai mažesnis už elektronų judrį, todėl būtent šviesos sukurtųjų skylių judėjimas riboja PIN fotodiodų spartą ir jų ribinį dažnį, kuris šiuose prietaisuose tesiekia kelias dešimtis GHz. Norint pagerinti šiuos parametrus tenka mažinti i-sluoksnio storį, tuo pačiu mažinant ir paties fotodiodo jautrį, tačiau ir

tokiu atveju yra pasiekiami tik apie 100 GHz dydžio ribiniai dažniai. Kitas PIN diodų trūkumas yra tai, jog dėl lėto skylių ištraukimo iš i-sluoksnio jame susidaro erdvinis krūvis sąlygojantis fotosrovės sotį ir fotojautrio mažėjimą jau palyginti nedideliuose optinio sužadavimo lygiuose.

Siekiant pašalinti PIN diodams būdingus trūkumus buvo pasiūlyta keletas sprendimų.

JAV patentas Nr. US5818096 aprašo fotodiodą su judančiais vieno tipo krūvininkais (angl. UniTravelling Carrier - UTC - photodiode). UTC fotodiodo sluoksnių darinys yra pavaizduotas Fig. 1, jo juostinė diagrama yra parodyta Fig. 2.

Iš esmės, UTC fotodiodą sudaro:

I P-tipo elektrinio laidumo sugėriklio sluoksnis iš siaurą draustinių energijų tarpą ε_{g1} turinčios medžiagos (siauratarpio puslaidininkio) (1);

II N-tipo elektrinio laidumo sluoksnis iš platesnį draustinių energijų tarpą ε_{g2} turinčios medžiagos (plačiatarpio puslaidininkio) (2);

III Skiriamasis nelegiruotas arba silpnai legiruotas kolektoriaus sluoksnis iš platesnio draustinių energijų tarpo ε_{g2} medžiagos (plačiatarpio puslaidininkio) (3);

IV Barjero sluoksnis iš p-tipo laidumo plačiatarpio puslaidininkio (4). Šio sluoksnio funkcija - stabdyti elektronų difuziją į anodo kontaktą (5);

V Metalinis anodo kontaktas (5);

VI Metalinis katodo kontaktas (6);

VII Kristalinis padėklas (7).

Fotodiodo darinio p-tipo sluoksnis (1) yra pagamintas iš siaurą draustinių energijų tarpą ε_{g1} turinčio puslaidininkio, o n-tipo sluoksnis (2) yra pagamintas iš platesnį draustinių energijų tarpą ε_{g2} turinčio puslaidininkio. Abu šiuos sluoksnius skiria nelegiruotas arba silpnai legiruotas platesnio draustinių energijų tarpo ε_{g2} puslaidininkio sluoksnis (3). Siauratarpio p-tipo puslaidininkio sluoksnis (1) ribojasi su to paties laidumo tipo sluoksniu iš plačiatarpio puslaidininkio (4). Fotodiodas yra jautrus spinduliuotei, kurios kvanto energija kinta nuo ε_{g1} iki ε_{g2} .

Optinė spinduliuotė yra sugerama sugėriklyje (1), kuriame yra tenkinama elektrinio neutralumo sąlyga. Sugėriklyje (1) atsiradę fotosužadintieji elektronai

difuzijos būdu patenka į silpnai legiruotą plačiatarpio puslaidininkio sluoksnį (3) (kolektoriaus sluoksnis), kuriame yra stiprus elektrinis laukas, pernešantis elektronus į donorinėmis priemaišomis legiruotą n-tipo sluoksnį (2), pagamintą iš plačiatarpio puslaidininkio. Sugėriklyje (1) šviesos signalo sukurtos nepusiausvyrinės skylės susimaišo su šiame sluoksnyje esančiomis pusiausvyrinėmis skylėmis: papildomos skylės per laiką, lygų dielektrinės relaksacijos trukmei $\tau_d = \epsilon/\sigma$ (čia ϵ yra puslaidininkio dielektrinė skverbtis, o σ - jo elektrinis laidumas), iškeliauja į katodo kontaktą. Tipiškame A_3B_5 grupės puslaidininkyje su skylių koncentracija, lygia 10^{18} cm^{-3} , τ_d yra kelių femtosekundžių eilės dydis, todėl, skirtingai nei PIN fotodiodo atveju, nepusiausvyrųjų skylių dinamika neturi didesnės įtakos UTC prietaiso tamsinės būsenos atsistatymo spartai. Šis parametras, o tuo pačiu ir UTC fotodiodo ribinis dažnis, yra apsprendžiamas nepusiausvyrųjų elektronų lėkio per kolektoriaus sluoksnį (3) trukmei, kuri yra lygi $\tau_e = L_c / v_s$. Čia L_c yra kolektoriaus sluoksnio (3) ilgis, o v yra elektronų dreifinio judėjimo soties greitis kolektoriaus sluoksnio (3) medžiagoje. Kuomet kolektoriaus sluoksnio ilgis yra 200 nm, o elektronų dreifo greitis yra lygus $2 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$, gauname $\tau_e = 1 \text{ ps}$, taigi UTC fotodiodų tamsinės būsenos atsistatymo trukmė galėtų užtikrinti labai plačią, 1 THz dydžio ir platesnę jų dažninę charakteristiką. To pasiekti neleidžia kitas prietaiso spartą ribojantis faktorius - elektronų patekimo iš sugėriklio (1) į kolektorių (3) trukmė. Kuomet sugėriklio sluoksnyje (1) vidinio elektrinio lauko nėra, elektronai iš šio sluoksnio į kolektorių (3) patenka tik dėl difuzijos; šio proceso charakteringą trukmę galima įvertinti kaip $\tau_b \approx L_s^2 / 4D_e$ (čia L_s yra sugėriklio sluoksnio (1) plotis, o D_e , yra elektronų difuzijos koeficientas to sluoksnio medžiagoje). Įstatydarni į šią išraišką tipiškas sugėriklio sluoksnio, pagaminto iš InGaAs vertes: $L_s = 200 \text{ nm}$ ir $D_e = 100 \text{ cm}^2/\text{s}$ gausime $\tau_b \approx 10 \text{ ps}$, tai yra dešimt kartų didesnę trukmę nei elektronų lėkio per kolektorių trukmė. Šį parametą galima sumažinti siaurinant sugėriklio sritį (1), tačiau dėl to sumažėja šviesos sužadintų krūvininkų koncentracija ir, tuo pačiu, fotodiodo jautris. Kitas elektronų pernašos iš sugėriklio sluoksnio (1) į kolektoriaus sluoksnį (3) paspartinimo būdas yra susijęs su kintančios sudėties sugėriklio sluoksnio sudarymu.

Besikeičianti sluoksnio sudėtis sąlygoja nuo koordinatės priklausančią draustinį energijų tarpą ir dėl to atsirandantį kvazi-elektinį lauką, verčiantį elektronus judėti link kolektoriaus sluoksnio (3). Tokio fotodiodo elektronų energijos juostų diagrama yra pavaizduota Fig.3.

UTC fotodiodo jautrį stipriai įtakoja tai, kaip heterosandūroje, esančioje riboje tarp siauratarpio puslaidininkio sugėriklio sluoksnio (1) ir plačiatarpio puslaidininkio kolektoriaus sluoksnio (3), esantis draustinių energijų tarpų skirtumas $\varepsilon_{g2} - \varepsilon_{g1} = \Delta\varepsilon_c + \Delta\varepsilon_v$, pasiskirsto tarp laidumo ir valentinių juostų trūkių $\Delta\varepsilon_c$ ir $\Delta\varepsilon_v$. InGaAs/InP heterosandūroje tarp sugėriklio ir kolektoriaus sluoksnių tradiciniuose UTC fotodioduose laidumo juostai tenka ~80 procentų viso heterosandūrą sudarančių medžiagų draustinių energijų tarpų skirtumo. Dėl to elektronams, judantiems iš sugėriklio sluoksnio į kolektorių atsiranda didelis potencinis barjeras, trukdantis fotosužadintųjų elektronų judėjimui ir bloginantis daugumą prietaiso veikos parametrų.

Fig. 4 yra parodytos UTC fotodiodų jautrio spektrinės priklausomybės dariniuose su sugėriklio ir kolektoriaus sluoksniais iš medžiagų su tokiais pat draustinių energijų tarpais ($\varepsilon_{g1} = 0.8$ eV ir $\varepsilon_{g2} = 1.42$ eV), bet skirtingu laidumo ir valentinių juostų trūkių $\Delta\varepsilon_c$ ir $\Delta\varepsilon_v$, santykiu.

Fig. 5 parodytos UTC fotodiodų su sugėriklio sluoksniais iš skirtingo draustinių energijų tarpo medžiagų jautrio spektrinės charakteristikos. Matyti, kad jautri galima padidinti naudojant medžiagą su mažesniu ε_{g1} . Kita vertus, mažesnio draustinių energijų tarpo medžiagos naudojimas leidžia ploninti sugėriklio storį tuo pačiu gerinant fotodiodo dinamines charakteristikas.

IŠRADIMO ESMĖ

Šiuo išradimu siekiama išspręsti aukščiau paminėtas problemas ir sukurti fotodiodą su judančiais vieno tipo krūvininkais, kurio charakteristikos būtų geresnės nei tradicinių tokio tipo fotodiodų su InGaAs sugėriklio sluoksniais ir InP kolektoriaus sluoksniais.

Siūlomas puslaidininkinis fotodiodas, sudarytas iš p-tipo laidumo sugėriklio sluoksnio, nelegiruoto kolektoriaus sluoksnio ir dviejų n-tipo ir p-tipo laidumo kontaktinių sluoksnių, kur sugėriklio sluoksnis yra pagamintas iš puslaidininkio, turinčio savyje bismuto atomų. Taip sumažinami laidumo juostos lygmenų trūkiai.

Todėl naudojant sugėriklio sluoksnyje Bi turinčią puslaidininkinę medžiagą, galima pagerinti tokius fotodiodo veikos parametrus kaip jo jautrį ir spartą.

TRUMPAS BRĖŽINIŲ FIGŪRŲ APRAŠYMAS

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

Fig.1. Fotodiodo su judančiais vieno tipo krūvininkais sandara;

Fig.2. Fotodiodo su judančiais vieno tipo krūvininkais elektronų energijos juostų diagrama;

Fig.3. Fotodiodo su judančiais vieno tipo krūvininkais ir kintamu sugėriklio draustinių energijų tarpu elektronų energijos juostų diagrama;

Fig.4. Fotodiodų su judančiais vieno tipo krūvininkais jautrio spektrinės priklausomybės dariniuose su sugėriklio ir kolektoriaus sluoksniais iš medžiagų su tokiais pat draustinių energijų tarpais ($\varepsilon_{g1} = 0.8$ eV ir $\varepsilon_{g2} = 1.42$ eV), bet skirtingu laidumo ir valentinių juostų trūkių $\Delta\varepsilon_c$ ir $\Delta\varepsilon_v$, santykiu;

Fig.5. Fotodiodų su judančiais vieno tipo krūvininkais ir sugėriklio sluoksniais iš skirtingo draustinių energijų tarpo medžiagų jautrio spektrinės charakteristikos. Laidumo juostos trūkis visais atvejais buvo laikomas lygiu $\varepsilon_c = 40\%$;

Fig.6. Draustinių energijų tarpo kitimo palyginimas GaAsBi ir InGaAs puslaidininkiuose, didėjant Bi ir In koncentracijai, atitinkamai;

Fig.7. Trinarių InGaAs ir GaAsBi junginių gardelių konstantų nukrypimas nuo GaAs gardelės konstantos priklausomybės nuo junginio draustinių energijų tarpo pokyčio GaAs atžvilgiu.

TINKAMIAUSI ĮGYVENDINIMO VARIANTAI

Tinkamiausiame išradimo įgyvendinimo variante, judančių vieno tipo krūvininkų fotodiodas yra pagamintas iš puslaidininkų, kurių heterostrukūroje sugėriklio sluoksnį sudaro medžiaga, turinti bismuto atomų. Tokie bismuto turintys puslaidininkiai gali, pavyzdžiui, būti GaAsBi, InPBi ar GalnAsBi. Šiuose A_3B_5 grupės puslaidininkiniuose junginiuose Bi atomų įvedimas pakelia valentinės juostos energijos lygmenį mažai įtakodamas laidumo juostos energijos lygmenį padėję. Todėl laidumo juostos lygmenų trūkiai atitinkamose heterosandūrose: GaAsBi/GaAs, InPBi/InP ir GalnAsBi/GalnAs, yra nedideli, pavyzdžiui, pirmojoje iš išvardintųjų heterosandūrų laidumo juostos trūkiui tenka tik nuo 20% iki 30% GaAs ir GaAsBi draustinių energijų tarpo.

Reikia pabrėžti, kad GaAsBi sugėriklio sluoksnio naudojimas suteikia unikalią galimybę gaminti infraraudonajai spinduliuotei jautrius fotodiodus ant GaAs padėklų. Eksperimentiniai GaAsBi tyrimai parodė, kad šio junginio draustinių energijų tarpas įvedant Bi mažėja labai sparčiai - po 90 meV kiekvienam įvesto Bi procentui. Todėl $\varepsilon_{g1} = 0.8$ eV galima pasiekti jau tada, kai į GaAs yra įvesta vos 10% Bi, o GaAsBi su 15% Bi draustinių energijų tarpas sumažės net iki $\varepsilon_{g1} = 0.4$ eV. Palyginimui galima pastebėti, jog trinario junginio InGaAs draustinių energijų tarpas augant In daliai mažėja kur kas lėčiau - įvedus į GaAs net 30% In, draustinių energijų tarpas sumažėja tik iki 1 eV. Bi koncentracija arba jos kitimas gali būti parenkami pagal tai, kokios yra siekiamos fotodiodo charakteristikos. Šios srities specialistui turėtų būti akivaizdu, kaip keičiant Bi priemaišų koncentraciją, galima gauti norimą fotodiodo spartą ir jautrį.

Pav. 6 abiejų trinarių junginių - InGaAs ir GaAsBi - charakteristikos yra palygintos tarpusavyje, rodant, kaip abiejų jų gardelių konstantų nukrypimas nuo GaAs gardelės konstantos priklauso nuo junginio draustinių energijų tarpo pokyčio GaAs atžvilgiu. Penkis kartus mažesnis nei InGaAs atveju, GaAsBi gardelės konstantos nukrypimas nuo GaAs padėklo gardelės leidžia tikėtis geresnės epitaksinių sluoksnių kristalinės kokybės, didesnių elektronų judrių ir ilgesnių jų gyvavimo trukmių šiuose sluoksniuose. Šie parametrai tiesiogiai lemia fotodiodų jautrį ir jų spartą.

Kitame išradimo įgyvendinimo variante siūlomas puslaidininkinis fotodiodas, sudarytas iš p-tipo laidumo sugėriklio sluoksnio, nelegiruoto kolektoriaus sluoksnio ir dviejų n-tipo ir p-tipo laidumo kontaktinių sluoksnių, kurio sugėriklio sluoksnis yra pagamintas iš puslaidininkio, turinčio savyje bismuto atomų, o bismuto atomų dalis junginyje tolygiai mažėja einant tolyn nuo sugėriklio sluoksnio ribos su kolektoriaus sluoksniu.

Tokio fotodiodo p-tipu legiruotame sugėriklyje (1) valentinės juostos krašto padėtis nuo koordinatės nepriklausys, tuo tarpu laidumo juostos krašto energija tolygiai augs nuo sugėriklio ribos su kolektoriumi (3) iki ribos su barjero sluoksniu (4). Šis augimas sukurs jėgą, veikiančią tik elektronus ir verčiančią juos judėti link kolektoriaus. Tokiu būdu ir išauga fotodiodo jautris (daugiau šviesos sužadintų elektronų dalyvauja fotosrovėje), ir padidėja šio prietaiso sparta (sutrumpėja laikas, per kurį elektronai pasiekia kolektorių). Dėl to, kad Bi įvedimas keičia juostinę

diagramą kur kas stipriau nei kiti atomai, kintamo draustinių energijų tarpo (varizoniniai) puslaidininkų, turinčių savyje bismuto atomų, sluoksniai geriausiai tinka fotodiodų sugėrikliams, nes didelį laidumo juostos krašto energijos gradientą galima gauti palyginti mažai keičiant Bi koncentraciją.

Naudodamasis aukščiau aprašytais pavyzdžiais, šios srities specialistas gali pasiūlyti ir daugiau skirtingų heterostrukūrų kompozicijų, skirtų šviesos detektavimui infraraudonosios spinduliuotės bangų ruože, tačiau šio išradimo apsauga turėtų apimti visas judančių vieno tipo krūvininkų fotodiodų sandaros variacijas, kur sugėriklio medžiagoje naudojami bismuto atomai, kurie sumažina laidumo juostos lygmenų trūkumus, dėl ko pagerėja tokio fotodiodo jautrį ir spartą.

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Judančių vieno tipo krūvininkų fotodetektorius, turintis heterostruktūrą, turinčią bent barjero, p-tipo sugėriklio, kolektoriaus ir laidumo sluoksnius b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad sugėriklio sluoksnis yra sudarytas iš puslaidininkinės medžiagos, turinčios bismuto atomų.
2. Fotodetektorius pagal 1 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad bismuto atomų dalis sugėriklio junginyje tolygiai mažėja, einant tolyn nuo sugėriklio sluoksnio ribos su kolektoriaus sluoksniu.
3. Fotodetektorius pagal vieną iš 1-2 punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad heterostruktūra yra viena iš GaAsBi/GaAs, InPBi/InP, GalnAsBi/GalnAs, InGaAsBi/AlInAs.
4. Fotodetektorius pagal vieną iš 1-3 punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad bismuto atomų procentas GaAsBi sugėriklio medžiagoje yra tarp 5 ir 15 procentų arba kinta tarp bet kurių verčių - nuo 5 iki 15 procentų ruože.
5. Fotodetektorius pagal vieną iš 1-4 punktų, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad jis yra pritaikytas veikti viename iš IR spektroskopijos, laikinės skyros spektroskopijos, duomenų perdavimo, spinduliuotės impulsų charakterizavimo, terahercinių bangų generavimo taikymų.

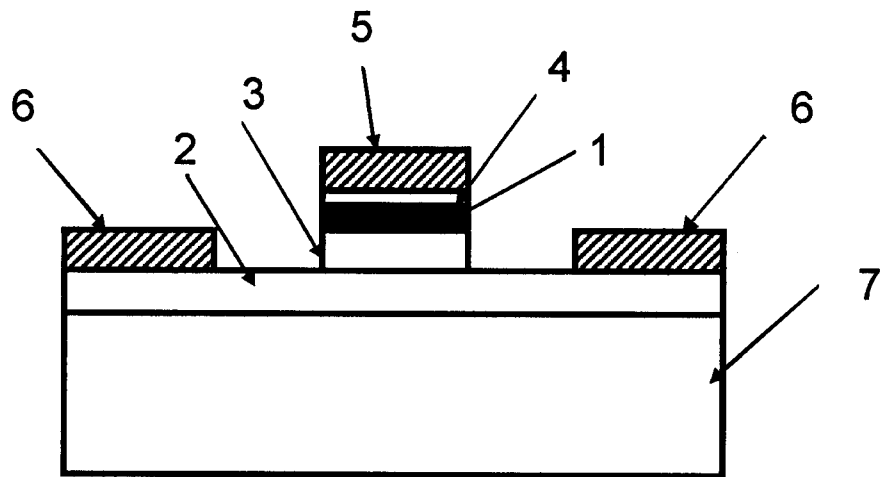


Fig. 1

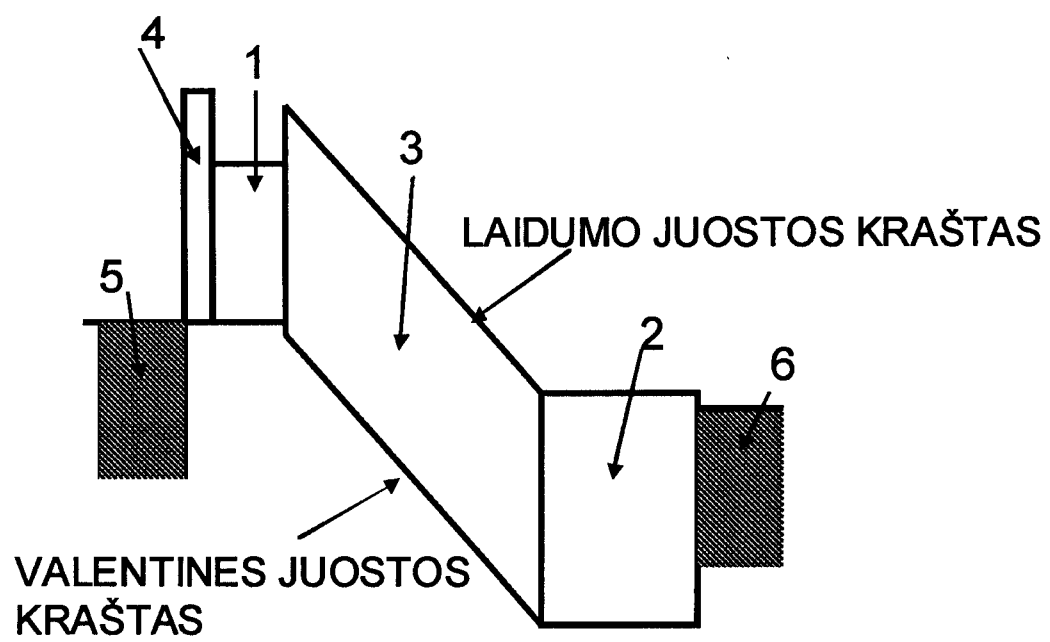


Fig. 2

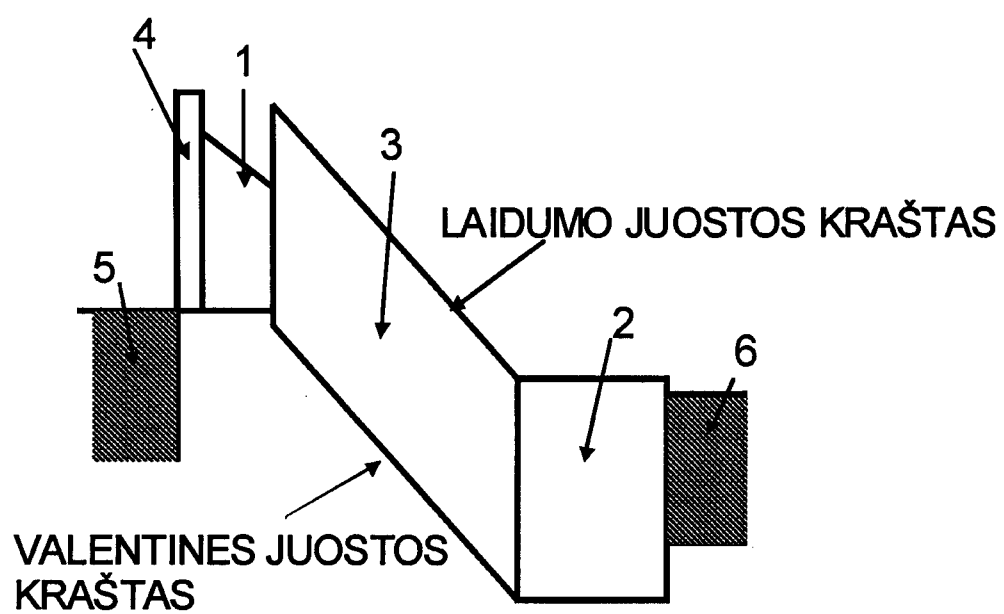


Fig. 3

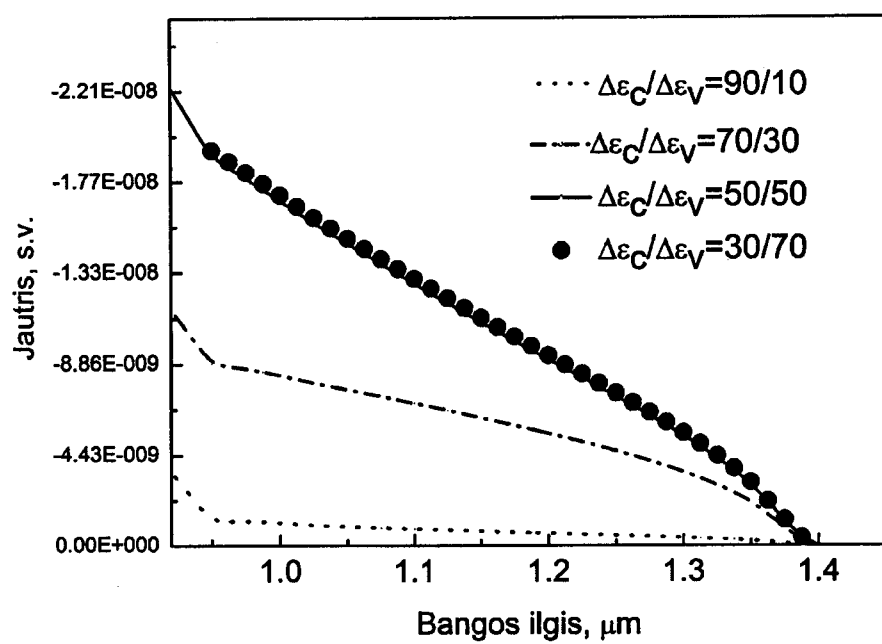


Fig. 4

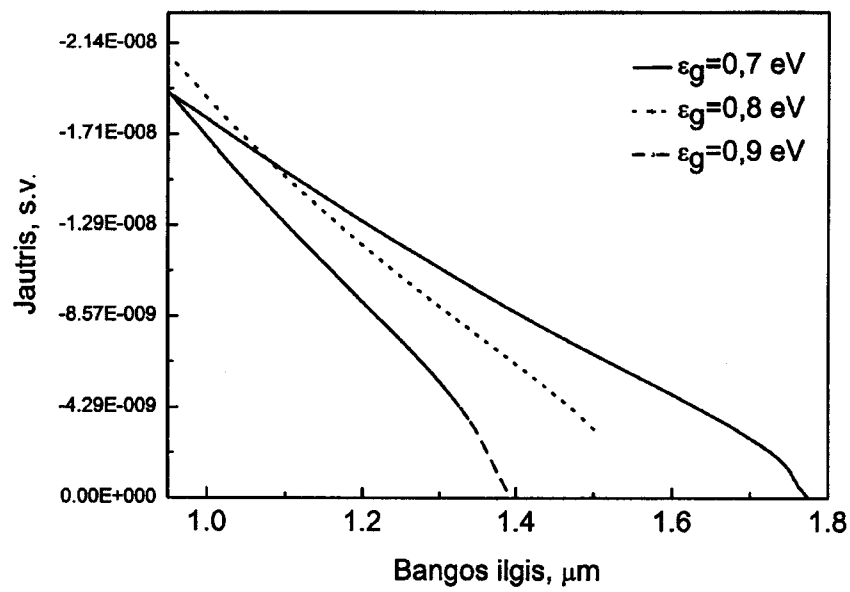


Fig. 5

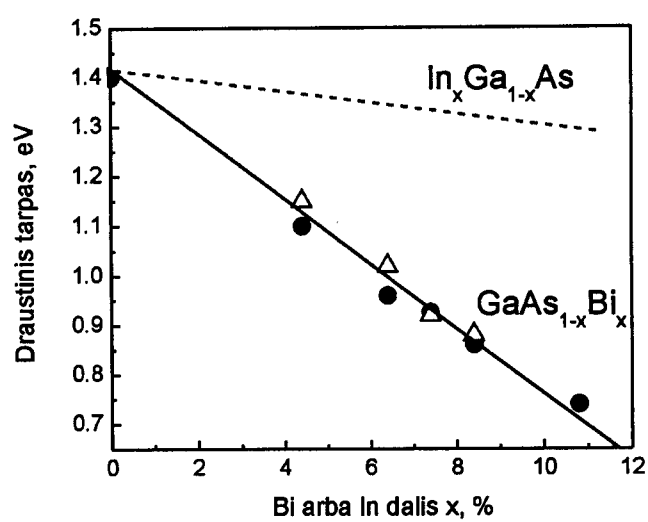


Fig. 6

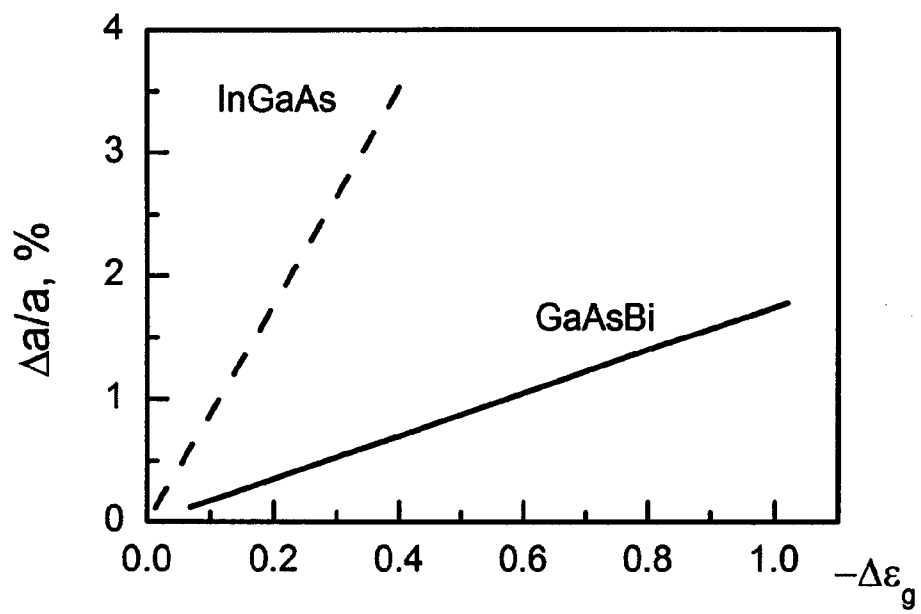


Fig. 7