

(12) **PATENTO APRAŠYMAS**

(21) Paraiškos numeris: **2023 008**
(22) Paraiškos padavimo data: **2023-02-17**
(41) Paraiškos paskelbimo data: **2023-08-25**
(45) Patento paskelbimo data: **2023-10-10**

(73) Patento savininkas:
**VšĮ Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius, LT
Valstybinis mokslinių tyrimų institutas Fizinių ir
technologijos mokslų centras, Savanorių pr. 231, LT-
02300 Vilnius, LT**
(72) Išradėjas:
**Jonas GRADAUSKAS, LT
Steponas AŠMONTAS, LT
Algirdas SUŽIEDĖLIS, LT
Oleksandr MASALSKYI, LT
Ihor ZHARCHENKO, LT**

(54) Pavadinimas:
Reketinis plataus spektro spinduliuotės jutiklis

(57) Referatas:

Išradimas skirtas elektronikos sričiai, susijusiai su elektromagnetiniais spinduliuotės jutikliais. Išradimo esmė yra ta, kad reketinio spinduliuotės jutiklio aktyviajame sluoksnyje asimetris elektrinis potencialas yra sukuriamas heterosandūriniame varizoniniame darinyje tarp dviejų elektroninio laidumo puslaidininkių 1 ir 2, pasižyminčių, atitinkamai, siauru E_{g1} ir platesniu E_{g2} draudžiamosios energijos tarpu, o potencialo gradientas formuojamas puslaidininkio 2 epitaksinio auginimo metu palaipsniui keičiant jo E_{g2} dydį nuo maksimalios jo vertės E_{g2max} iki minimalios $E_{g2min} = E_{g1}$ vertės, tokiu būdu gaunant puslaidininkinį darinį, kurio laidumo juostos dugno lygis vertikalioje energijų skalėje nuo žemiausios padėties, atitinkančios 1 puslaidininkį, staigiai pakyla iki maksimalios padėties, atitinkančios E_{g2max} vertę 2 puslaidininkyje, ir palaipsniui leidžiasi iki žemiausios padėties tol, kol E_{g2} tampa lygus E_{g1} . Tokie aktyvieji sluoksniai, turintys asimetrinį potencialą, užauginami nuosekliai numatytą skaičių kartų, reikalingą dideliam jutiklio jautriui gauti. Pagal išradimą pasiūlytas reketinis spinduliuotės jutiklis detektuoja spinduliuotę, kurios fotono energija yra tiek mažesnė, tiek ir didesnė už siauriausią aktyviojo sluoksnio draudžiamosios energijos tarpą.

TECHNIKOS SRITIS

Išradimas skirtas elektronikos sričiai, susijusiai su elektromagnetiniais spinduliuotės jutikliais. Labiausiai išradimas yra susijęs su lazerinės spinduliuotės aptikimu ir jos galios matavimu.

TECHNIKOS LYGIS

Spinduliuotės (šviesos) jutiklis yra pasyvus elektronikos elementas konvertuojantis elektromagnetinės spinduliuotės energiją į elektrinį signalą. Tokie jutikliai yra neįkainojami įrankiai daugelyje pramonės šakų, ypač jų poreikis yra aktualus sparčiai besivystančioms šiuolaikinėms lazerinėms technologijoms. Kadangi tipinio šviesos jutiklio veika yra susijusi su šviesos fotono sugertimi jutiklio medžiagoje, jie paprastai yra skirstomi į dvi rūšis, į:

- kvantinius jutiklius ir
- šiluminius jutiklius.

Puslaidininkiniai fotovaržai, fotodiodai ir fototranzistoriai yra tipiniai kvantinių šviesos jutiklių atstovai. Kvantinis jų pobūdis yra sąlygotas puslaidininkio draudžiamosios energijos tarpu, priemaišinių lygmenų energijos juosta ar kitais energijos lygmenimis. Todėl šie jutikliai yra selektyvūs - jų veikos spektras yra apribotas šiomis energijomis. Be to, infraraudonosios, o ypač tolimosios infraraudonosios, srities kvantinių jutiklių darbas paprastai reikalauja žemų kriogeninių temperatūrų. Šiluminiai jutikliai, tokie kaip bolometrai ar piroelektriniai detektoriai, naudoja elektromagnetinę spinduliuotę kaip šilumos šaltinį; dažniausiai jų jautris yra mažesnis, o sparta lėtesnė.

Technikoje reketas - tai mechanizmas, suteikiantis velenui periodinį sukimosi judesį viena kryptimi. Klasikinis filosofinis mechaninio reketo - amžinojo variklio - pavyzdys yra Brauno (*Brown*) ar Feinmano-Smoluchovskio (*Feynman-Smoluchowski*) reketas - tai įtaisas galintis atsitiktinį šiluminį dalelių judėjimą panaudoti kryptiniam judesiui sukurti, t.y., šiluminę energiją paversti mechaniniu darbu. Elektroniniai reketai - tai įtaisai turintys periodinį asimetrinį elektrinio potencialo pasiskirstymą ir galintys atsitiktiniam elektringųjų dalelių judėjimui suteikti kryptinį pobūdį. Tokiu būdu, elektroniniai reketai gali lyginti atsitiktine tvarka, chaotiškai osciliuojančius elektrinius

signalus, tokius kaip, pavyzdžiui, elektrinis šiluminis triukšmas, ir taip tiekti vienakryptę srovę ar įtampą.

Yra išskiriami dviejų rūšių elektroniniai reketai: 1) žybsintis (angl. *flashing*) reketas, kuriame asimetrinis potencialas yra pakartotinai sukuriamas ir panaikinamas išoriniu elektriniu signalu, ir 2) sukrečiantis (angl. *rocking*) reketas, kuriame visas asimetrinis periodinis potencialas yra pakreipiamas, ar „sukrečiamas“, išoriniu poveikiu. Abiem atvejais išorinio poveikio vidurkis laike yra lygus nuliui.

Pagrindinė elektroninių reketų realizavimo problema kyla dėl sudėtingų, smulkios litografijos būdu gaminamų struktūrų, kvantiškai apribotų heterodarinių bei/ar jų panaudojimo kriogeninėse temperatūrose. Buvo pademonstruoti kambario temperatūroje funkcionuojantys elektroniniai reketai turintys periodinę eilę lauko tranzistoriaus tipo asimetrinių sklendžių (patentas US20180145271; *E.M. Roeling ir kiti, Organic electronic ratchets doing work, Nat. Mater.* 10, p. 51, 2011). Efektyvi tokių reketų veika yra ribojama poreikiu naudoti organinius puslaidininkius pasižyminčius mažu krūvio nešėjų tankiu bei judriu (paprastai mažesniu už $1 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$). Taipogi, buvo parodytas žybsinčio reketo, sukurto AlGaAs/GaAs puslaidininkių pagrindu, veikimas irgi kambario temperatūroje, tačiau jo gamyba reikalavo sudėtingos puslaidininkinių nanovielučių bei nanometrų matmenų asimetrinių metalinių sklendžių Šotkio (Schottky) kontakto pagrindu realizavimo (*T. Tanaka, Y. Nakano, S. Kasai, GaAs-Based Nanowire Devices with Multiple Asymmetric Gates for Electrical Brownian Ratchets, Jpn. J Appl. Phys.* 52, p. 06GE07, 2013).

Artimiausias analogas yra teorinis elektroninio reketinio jutiklio modelis, kuriame periodinis asimetrinis potencialas laidžiajame silicio sluoksnyje yra sukuriamas mechaninių tampriųjų deformacijų gradientais atsirandančiais dėl Si ir ant jo paviršiaus nusodinto $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ kristalinių gardelių konstantų skirtumo (*B. Lau, O. Kedem, M. Kodaimati, M.A. Ratner, and E.A. Weiss, A Silicon Ratchet to Produce Power from Below-Bandgap Photons, Adv. Energy Mater.* 7, p. 1701000, 2017). Fotovoltinis efektas pasiekiamas apšviečiant reketą tolimosios infraraudonosios srities spinduliuote. Analogas turi eilę trūkumų, kaip antai:

- kintamo germanio kiekio (x dalies) parinkimas $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ medžiagoje tinkamam asimetriniam potencialui gauti ir jos periodinis viendimensinis nusodinimas ant specialiai paruošto paviršiaus kelių šimtų nanometrų periodu išlaikant pastovų sudėties gradientą yra sudėtinga technologinė operacija;

- aktyviojo jutiklio Si sluoksnio storis yra tik apie 100 nm, nes jis yra ribojamas tampriosios deformacijos prasiskverbimu gilyn į silicij; tokiame ploname sluoksnyje

a) nėra efektyviai sugerama krintanti spinduliuotė, b) jo homogeniškumas, reikalingas efektyviam krūvininkų transportui, gali būti neigiamai įtakojamas paviršinių defektų, c) tokio elektros srovės šaltinio vidinė varža yra didelė dėl mažo planarinio skerspjūvio ploto;

- asimetrinio periodinio elektrinio potencialo periodų skaičius yra ribojamas aktyviojo sluoksnio ilgiu;

- šis jutiklis yra numatytas dirbti apšviečiant jį spinduliuote, kurios fotono energija yra mažesnė už aktyviojo puslaidininkinio sluoksnio draudžiamosios energijos tarpą.

Sprendžiama techninė problema

Išradimu siekiama sukurti analogo trūkumų neturintį elektroninį reketinį spinduliuotės jutiklį, kuriam būdinga paprastesnė technologinė gamyba, neribojamas aktyviosios srities, kurioje sugerama spinduliuotė, storis, neribojamas periodinio asimetrinio potencialo periodų skaičius, ir kuris detektuoja plataus spektro elektromagnetinę spinduliuotę.

IŠRADIMO ESMĖ

Uždavinio sprendimo esmė pagal pasiūlytą išradimą yra ta, kad reketinio spinduliuotės jutiklio aktyviajame sluoksnyje asimetrinis elektrinis potencialas yra sukuriamas heterosandūriniam varizoniniame, t.y., kintamo draudžiamosios energijos tarpo, darinyje tarp dviejų elektroninio laidumo (n-tipo) puslaidininkių 1 ir 2, pasižyminčių skirtingu draudžiamosios energijos tarpu, atitinkamai, siauru E_{g1} ir platesniu E_{g2} , o potencialo gradientas formuojamas platesniojo draudžiamosios energijos tarpo puslaidininkio 2 sluoksnyje jo auginimo metu palaipsniui mažinant E_{g2} dydį nuo maksimalios jo vertės E_{g2max} iki minimalios $E_{g2min} = E_{g1}$ vertės (ar palaipsniui didinant E_{g2} dydį nuo $E_{g2min} = E_{g1}$ vertės iki maksimalios E_{g2max} vertės - priklausomai nuo sluoksnio auginimo metodo), tokiu būdu gaunant puslaidinikinį darinį, kurio laidumo juostos dugno lygis vertikalioje energijų skalėje nuo žemiausios padėties, atitinkančios 1 puslaidininkį, staigiai pakyla iki maksimalios padėties, atitinkančios

E_{g2max} vertę 2 puslaidininkyje, ir palaipsniui leidžiasi iki žemiausios padėties tol, kol E_{g2} tampa lygus E_{g1} .

Skirtumas tarp laidumo juostos aukščiausios ir žemiausios padėčių, t.y., potencialinio barjero aukštis yra nuo 100 meV iki 500 meV priklausomai nuo jutiklio spektrinio jautrio poreikio bei nuo naudojamų puslaidininkinių medžiagų parametrų.

Atstumas, kuriame puslaidininkio 2 laidumo juostos dugnas palaipsniui leidžiasi nuo aukščiausios iki žemiausios padėties, atitinkamai jos E_{g2} mažėjant nuo E_{g2max} iki $E_{g2min} = E_{g1}$ vertės, yra didesnis už elektronų difuzijos nuotolį.

Elektronų tankis aktyviajame sluoksnyje parenkamas toks, koks yra reikalingas pakankamai dideliam jutiklio jautriui gauti.

Reketinio jutiklio veikimo principas yra grindžiamas karštųjų krūvininkų reiškiniu. Nesant spinduliuotei, laisvieji elektronai yra sukoncentruoti laidumo juostos periodinio potencialo duobėse (Fig. 1, a). Veikiant spinduliuotei, vidutinė elektronų energija padidėja, jie tampa karštaisiais elektronais; vertikalioje energijų skalėje jie pakyla virš potencialinio barjero ir difunduoja į abi puses išilgai x-ašies (Fig. 1, b). Elektronams prarandant energiją, t.y., jiems atšalant, jie nusileidžia ant laidumo juostos dugno ir, veikiami elektrinio potencialo gradiento, nudreifuoja į potencialinės duobės dugną (Fig. 1, c). Dalis elektronų, perėjusių per potencialo viršūnę, pasiekia gretimą potencialo duobę; kita dalis elektronų, difundavusių į priešingą pusę, sugrįžta į potencialo duobę, kurioje ir buvo iki pakaitimo. Tokiu būdu jutiklio galuose yra indukuojama elektrovara, o uždaros grandinės atveju teka elektros srovė.

Šios srities specialistas supranta, kad pagal išradimą pasiūlytas reketinis jutiklis veikia ir karštųjų skylių reiškiniu pagrindu. Šiuo atveju heterosandūrinis darinys yra sudaromas tarp dviejų skylinio laidumo (p-tipo) puslaidininkinių 1 ir 2, o periodinis asimetrinis potencialas yra formuojamas atitinkamai keičiant darinio valentinės juostos viršaus padėtį vertikaliojoje energijų skalėje.

Išradimo naudingumas

Pagal išradimą pasiūlytas reketinis spinduliuotės jutiklis nuo analogo skiriasi tuo, kad periodinis elektrinis potencialas yra suformuojamas darinio tūryje jo auginimo metu (skystafazės, molekulinės, dujinės epitaksijos ar kitu būdu), ir todėl jutiklio aktyviajam sluoksniui nedaro įtakos darinio paviršiaus kokybė, o jo storis ribojamas tik elektronų difuzijos nuotolio ilgiu.

Tokio jutiklio, kaip srovės šaltinio, vidinė varža yra ženkliai mažesnė už analogo, o epitaksinis auginimas sudaro sąlygas suformuoti didelį skaičių periodiškai išsidėsčiusių asimetrinių potencialinių duobių, kas padidina spinduliuotės sugerties efektyvumą ir susidarančios elektrovaros didumą.

Pagal išradimą pasiūlytas reketinis spinduliuotės jutiklis detektuoja spinduliuotę, kurios fotono energija $h\nu$ (čia h yra Planko konstanta, o ν yra spinduliuotės dažnis) yra mažesnė už mažiausią aktyviojo sluoksnio draudžiamosios energijos tarpą E_{g1} ; šiuo atveju visa fotono energija yra panaudojama elektronams kaitinti. Taip pat jis detektuoja ir spinduliuotę, kurios fotono energija yra didesnė už E_{g1} vertę; šiuo atveju fotono energijos dalis likusi po elektronas- skylė poros generacijos, t.y., energijos kiekis $h\nu - E_g$, yra panaudojama elektronams, kurių efektinė masė puslaidininkiuose yra mažesnė už skylių efektinę masę, kaitinimui. Tokių karštųjų elektronų sukuriama elektrovaros poliškumas sutampa su $h\nu < E_{g1}$ atvejo elektrovaros poliškumu, o jutiklio jautris yra didesnis, nes tarpjuostinė sugertis puslaidininkiuose yra keliomis eilėmis stipresnė už spinduliuotės sugertį laisvaisiais krūvininkais.

BRĖŽINIŲ APRAŠYMAS

Išradimąs detaliau paaiškinamas brėžiniais, kur

Fig. 1 pavaizduotas reketinio jutiklio periodinis potencialas ir laidumo juostos elektronų scheminis pasiskirstymas: a) nesant spinduliuotės; b) karštųjų elektronų difuzija abiem kryptimis; c) elektronų relaksacija ir persiskirstymas tarp potencilo duobių. E_c žymi laidumo juostos dugną, pliusas ir minusas skrituliukuose rodo susidarančios elektrovaros poliškumą. Sritis 1 žymi puslaidininkį, kurio draudžiamosios energijos tarpas yra E_{g1} , o sritis 2 - puslaidininkį, kurio draudžiamosios energijos tarpas kinta nuo E_{g2max} iki $E_{g2min} = E_{g1}$.

Fig. 2 pavaizduoti trys scheminiai galimi valentinės juostos viršaus E_v profiliai gauti varizoniniame puslaidininkyje (puslaidininkyje su kintamu draudžiamosios energijos tarpu) formuojant periodinį laidumos juostos potencialą. E_v padėtis vertikalios energijų ašies atžvilgiu: a) kinta simetriškai E_c padėčiai; b) nekinta; c) kyla ir leidžiasi kartu su E_c . Elektronų (pilni skrituliukai) ir skylių (tušti skrituliukai) poros yra generuojamos spinduliuote, kurios fotono energija $h\nu > E_{g1}$, o horizontalios rodyklės

rodo jų judėjimą formuojant elektrovarą. Visais trim atvejais indukuojamos elektrovaros poliškumas yra toks pats, o jutiklio jautris, t.y., elektrinio signalo didumas esant tai pačiai spinduliuotės galiai, yra didžiausias c atveju.

Fig. 3 pavaizduota reketinio GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As jutiklio:

a) energijos juostų diagrama (ištisinės linijos) ir elektronų tankio pasiskirstymas (taškinės linijos);

b) indukuotos elektrovaros impulsai jutiklį apšviečiant 2,0 μm bangos ilgio ($h\nu < E_{g1}$) 1 nanosekundės trukmės ir 0,532 μm ($h\nu > E_{g1}$) bangos ilgio 6 nanosekundžių trukmės lazerio spinduliuotės impulsais; impulsų galios nenormuotos;

c) reketinio jutiklio jautris (detektuojamos įtampos santykis su krintančia spinduliuotės galia) esant skirtingo bangos ilgio spinduliuotei.

VIENAS IŠ IŠRADIMO REALIZAVIMO PAVYZDŽIŲ

Reketinis spinduliuotės jutiklis sudarytas iš dešimties GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As varizoninių sluoksnių, kurių periodas, t.y. atstumas, kuriame puslaidininkio 2 srities laidumo juostos dugnas palaipsniui leidžiasi nuo aukščiausios padėties, atitinkančios puslaidininkio sudėtį Al_{0.3}Ga_{0.7}As, iki žemiausios padėties, atitinkančios GaAs puslaidininkį I, yra lygus 200 nm. Kelių varizoninių jutiklio sluoksnių laidumo juostos dugno energetinė diagrama ir elektronų pasiskirstymas yra pavaizduoti Fig. 3a atitinkamai ištisinėmis ir taškinėmis linijomis. Apšvietus raketinį jutiklį 2,0 μm bangos ilgio lazerio spinduliuotės impulsais, kurios fotonų energija $h\nu = 0,62$ eV yra mažesnė už GaAs draudžiamosios energijos tarpą $E_{g\text{GaAs}} = 1,42$ eV, bei apšvietus jutiklį 0,532 μm bangos ilgio lazerio spinduliuotės impulsais, kurios fotonų energija $h\nu = 2,33$ eV yra didesnė už GaAs draudžiamosios energijos tarpą, abiem atvejais yra indukuojama to paties poliškumo elektrovara (Fig. 3b). 0,532 μm bangos ilgio šviesos sugerties koeficientas galio arsenide yra apie 3000 kartų didesnis už 2,0 μm bangos ilgio sugerties koeficientą, todėl ir jautris trumpesniam bangai yra didesnis (Fig. 3c).

IŠRADIMO APIBRĖŽTIS

1. Reketinis plataus spektro spinduliuotės jutiklis, kurio aktyviajame spinduliuotę sugeriančiame sluoksnyje yra suformuotas asimetrinis elektrinis potencialas, *b e s i s k i r i a n t i s* tuo, kad puslaidininkinio aktyviojo sluoksniu vienetinis elektrinio potencialo periodas yra kuriamas heterosandūriniame varizoniniame darinyje tarp dviejų elektroninio laidumo (n-tipo) puslaidininkių 1 ir 2, pasižyminčių skirtingu draudžiamosios energijos tarpu, atitinkamai, siauru E_{g1} ir platesniu kintančiu E_{g2} , o potencialo gradientas formuojamas platesniojo draudžiamosios energijos tarpo puslaidininkio 2 sluoksnyje palaipsniui keičiant E_{g2} dydį nuo maksimalios jo vertės E_{g2max} iki minimalios $E_{g2min} = E_{g1}$ vertės, tokiu būdu gaunant puslaidinikinį darinį, kurio laidumo juostos dugno lygis vertikalioje energijų skalėje nuo žemiausios padėties, atitinkančios 1 puslaidininkį, staigiai pakyla iki aukščiausios padėties, atitinkančios E_{g2max} vertę 2 puslaidininkyje, ir palaipsniui leidžiasi 2 puslaidininkyje iki žemiausios padėties tol, kol E_{g2} tampa lygus E_{g1} , o periodo plotis yra didesnis už elektronų difuzijos nuotolį.

2. Jutiklis pagal 1 punktą, *b e s i s k i r i a n t i s* tuo, kad 1 punkte aprašytas vienetinis asimetrinis elektrinis potencialas yra nuosekliai periodiškai formuojamas numatyta skaičių kartų, reikalingą dideliu jutiklio jautriui gauti.

3. Jutiklis pagal 1 punktą, *b e s i s k i r i a n t i s* tuo, kad puslaidininkinio aktyviojo sluoksniu vienetinis elektrinio potencialo periodas yra kuriamas heterosandūriniame varizoniniame darinyje tarp dviejų skylinio laidumo (p-tipo) puslaidininkių 1 ir 2, pasižyminčių skirtingu draudžiamosios energijos tarpu, atitinkamai, siauru E_{g1} ir platesniu kintančiu E_{g2} , o potencialo gradientas formuojamas platesniojo draudžiamosios energijos tarpo puslaidininkio 2 sluoksnyje palaipsniui keičiant E_{g2} dydį nuo maksimalios jo vertės E_{g2max} iki minimalios $E_{g2min} = E_{g1}$ vertės, tokiu būdu gaunant puslaidinikinį darinį, kurio valentinės juostos viršaus lygis vertikalioje energijų skalėje nuo aukščiausios padėties, atitinkančios 1 puslaidininkį, staigiai leidžiasi iki žemiausios padėties, atitinkančios E_{g2max} vertę 2 puslaidininkyje, ir palaipsniui kyla 2 puslaidininkyje iki aukščiausios padėties tol, kol E_{g2} tampa lygus E_{g1} ,

o periodo plotis yra didesnis už skylių difuzijos nuotolį.

4. Jutiklis pagal 3 punktą, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad 3 punkte aprašytas vienetinis asimetrinis elektrinis potencialas yra nuosekliai periodiškai formuojamas numatytą skaičių kartų, reikalingą dideliame jutiklio jautriui gauti.

5. Jutiklis pagal 1 ir 2 punktus, b e s i s k i r i a n t i s tuo, kad puslaidininkis 1 yra GaAs, puslaidininkis 2 yra $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, o elektrinio potencialo gradientas sukuriamas periodiškai 200 nm atstumu keičiant AlAs molinės dalies kiekį nuo $x = 0,3$ iki $x = 0$.

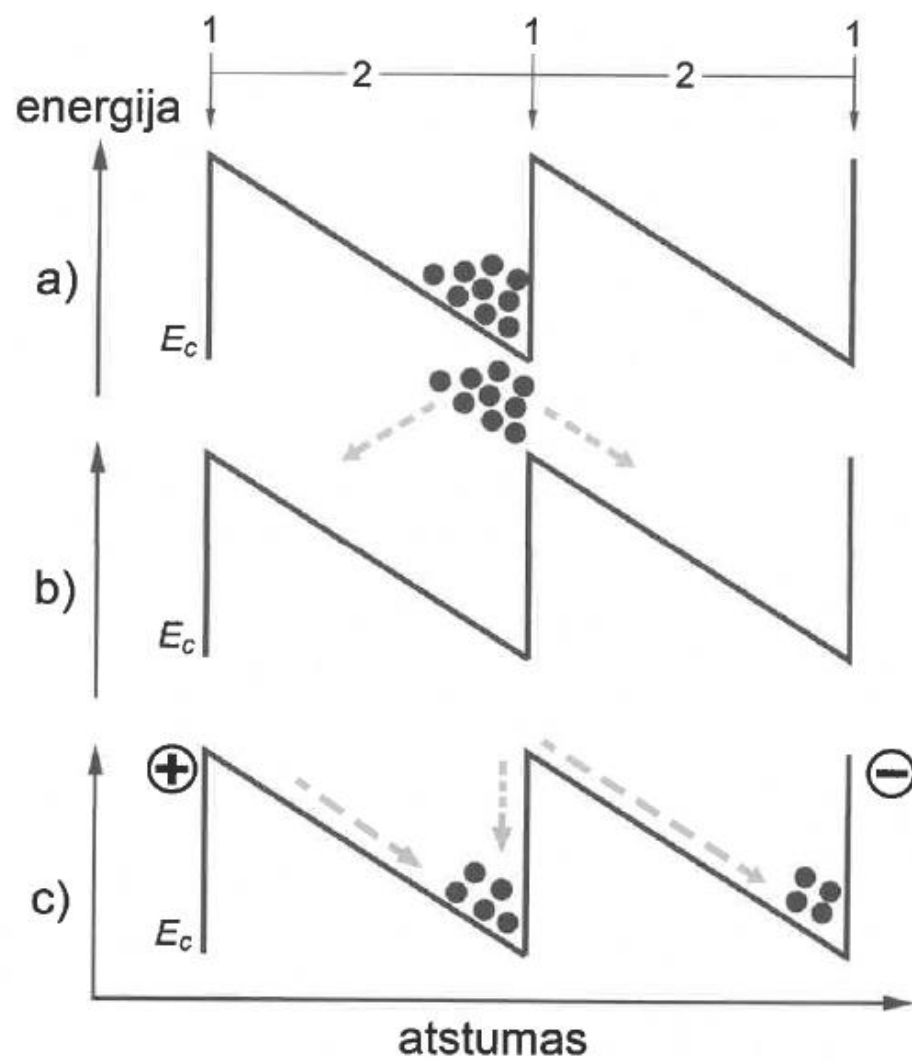


Fig. 1

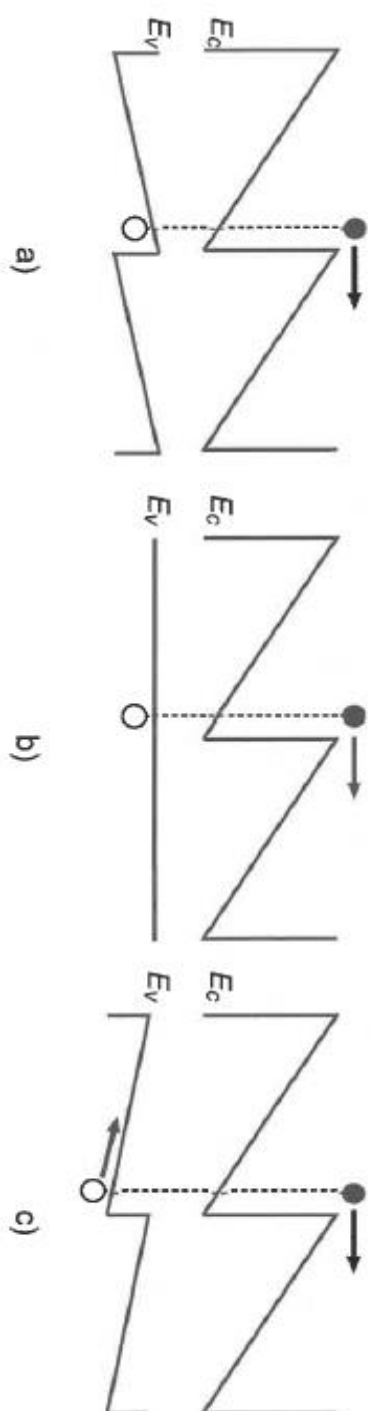


Fig. 2

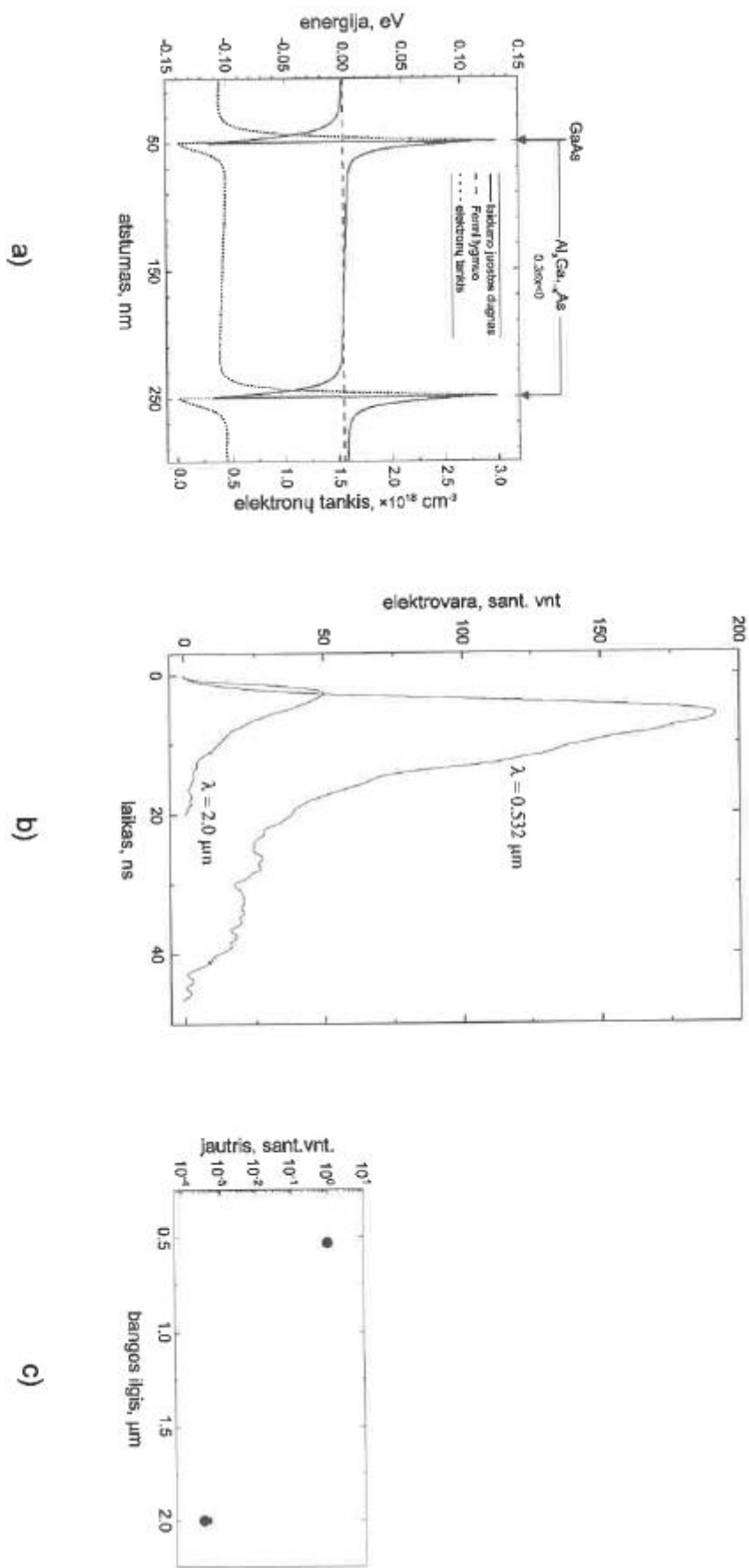


Fig. 3