

VILNIUS PEDAGOGICAL UNIVERSITY

**Vytautas Lapeika**

**THERMOSTIMULATION GENERATION OF  
CHARGE CARRIERS IN STRONG ELECTRIC  
FIELDS IN THE PRESENCE OF THE  
SCHOTTKY BARRIER**

*Abstract of doctoral dissertation  
Physical sciences, physics (P260)*

Vilnius, 2001



## Temos aktualumas

Pastaraisiais dešimtmečiais aktyviai tiriama fizikiniai procesai, vykstantys sandūroje metalas – puslaidininkis su Šotkio barjeru. Šie procesai nėra elementarus teoriniu požiūriu. Ligšioliniai tyrimai, atlikti daugelio autorių, negali vienareikšmiškai atsakyti į klausimą: koks yra vyraujantis krūvio pernešimo per Šotkio barjerą mechanizmas. Gilesnis šio proceso supratimas įtakotų puslaidininkinių diodų gamybos technologijos plėtrą, o tai savo ruožtu leistų sukurti norimų parametru šviesos diodus, varikapus ir kitus puslaidininkinius prietaisus. Todėl šie tyrimai yra aktualūs moksliniu ir praktiniu požiūriu.

Eksperimentiškai stebimos voltamperinės charakteristikos (VACH) laidžia ir atgaline kryptimi įvairių autorių aiškinamos, naudojant tokius krūvio pernešimo Šotkio barjere mechanizmus: viršbarjerinė termoemisija, krūvininkų tuneliniai šuoliai per barjerą, krūvininkų rekombinacija – generacija nualintoje srityje ir krūvininkų rekombinacija neutralioje puslaidininkio srityje. Remiantis tais mechanizmais, sukurtos įvairios krūvio pernašos per barjerą teorijos.

Pagal termoemisijos teoriją manoma, kad atgalinės srovės VACH turi įtakos barjero aukščio mažėjimas, didinant prijungtą įtampą. Šotkio barjero aukštis yra labiausiai kontroliuojamas šiuose dioduose parametras. Nustatant barjero aukštį iš  $I(U)$  matavimų pagal termoemisijos teoriją, gaunamas nesutapimas su kitais metodais gautais rezultatais. Eksperimentinėse VACH nestebimas atgalinės srovės išsotinimas. Norint paaiškinti stebimus eksperimento nesutapimus su teorija, bandoma atsižvelgti į papildomus faktorius. Tai paviršinės elektronų būsenos riboje metalas-puslaidininkis, barjero erdvinis nevienalytiškumas, nuotėkio srovės, puslaidininkio varža. Manoma, kad priklausomai nuo sąlygų veikia keletas mechanizmų. Daugelio konkuruojančių mechanizmų įskaitymas kelia problemą, nustatant jų dominavimo ribas. Šotkio diodų atgalinės srovės temperatūrinės ir voltamperinės priklausomybės sunkiai aprašomos minėtomis teorijomis.

Bandymais nustatytas atgalinės srovės ypatybės Šotkio dioduose [1] buvo sėkmingai aiškinamos, naudojant fononais stimuliuotų elektronų tunelinių šuolių iš gilaus centro teoriją. Mūsų darbe tyrimai praplėsti, tiriant  $A^3B^5$ ,  $A^2B^6$  tipo puslaidininkines medžiagas, kurių paviršiuje suformuotas Šotkio barjeras. Krūvio generacijos procesas tiriamose struktūrose nustatomas, tiriant srovės stiprio priklausomybes nuo temperatūros ir atgalinės įtampos. Šiame darbe atlikti sisteminiai tyrimai parodė, kad stebimas eksperimentines atgalinės srovės priklausomybes nuo įtampos ir temperatūros galima aiškinti krūvininkų generacijos proceso ypatybėmis.

## Disertacinio darbo tikslas

Nustatyti laisvųjų krūvininkų generacijos mechanizmą, sąlygojantį eksperimentiškai stebimus atgalinės srovės stiprio dėsningumus  $A^3B^5$ ,  $A^2B^6$  struktūrose su Šotkio tipo barjeru. Siekiant tų tikslų, buvo eksperimentiškai išmatuota: atgalinės srovės stiprio temperatūrinės priklausomybės, esant skirtingoms įtampoms, VACH skirtingose temperatūrose, elektroliuminescencijos (EL) skaisčio priklausomybės nuo įtampos ir temperatūros. Gautos eksperimentinės priklausomybės palygintos su įvairiais teoriniais modeliais.

## Praktinė nauda ir naujumas

Šiame darbe, remiantis eksperimentiniais matavimais ir jų palyginimu su teoriniais modeliais, parodyta, kad atgalinės srovės dioduose priklausomybės nuo temperatūros ir atgalinės įtampos lemia krūvininkų generacijos procesas, kurio pagrindiniai mechanizmai yra elektronų tuneliniai šuoliai, dalyvaujant fononams ir Frenkelio termoemisija. Nustatytos tunelinio ir Frenkelio mechanizmų dominavimo ribos.

Gauti rezultatai yra svarbūs, aiškinant fizikinius procesus, vykstančius tirtoje struktūroje, esant stipriam elektriniam laukui. Atlikti tyrimai leidžia giliau suprasti krūvio pernešimo mechanizmą Šotkio barjere. Darbe naudota metodika leidžia pakankamai tiksliai nustatyti elektrinio lauko stiprį barjere bei įvertinti kitus centrų parametrus: elektrono ir fonono sąveikos konstantą, elektronų paviršinių būsenų tankį.

## Disertacijos ginamieji teiginiai

1. Srovės stiprio priklausomybę nuo atgalinės įtampos ir temperatūros n/GaP dioduose su Šotkio barjeru sąlygoja paviršinių elektroninių būsenų metalo ir puslaidininkio riboje tunelinė jonizacija.
2. Atgalinės srovės priklausomybės nuo temperatūros bei įtampos  $SiO_2$ -n/Si,  $SiO_2$ -n/GaAs dariniuose lemia krūvininkų tunelinių šuolių iš oksido-metalo sandūroje esančių elektroninių būsenų į puslaidininkį procesas.
3. p/InP dioduose su Šotkio barjeru pagrindinis srovės pernešimo mechanizmas yra fononais stimuliuotas tuneliavimas, kuris vyrauja stiprių laukų srityje. Aukštose temperatūrose ir silpnėsiuose laukuose ženklią įtaką turi Frenkelio termoemisijos mechanizmas.
4. Elektroliuminescuojančiose struktūrose su SrS:Ce plėveliniu liuminoforu elektroliuminescencijos skaisčio priklausomybę nuo įtampos sąlygoja

laisvųjų elektronų generacijos procesas. Čia elektronų šaltinis yra dviejų gylių paviršiniai centrai liuminofores. Jų pagrindinis jonizacijos mechanizmas yra fononais stimuliuotas tuneliavimas.

## Disertacijos aprobacija

Pagrindiniai darbo rezultatai buvo pateikti 31 - 33-oje Nacionalinėse fizikos konferencijose (Vilnius, 1996, 1997, 1999), Sąjunginėje konferencijoje "Физика и применение контакта металл-полупроводник" (Kijevas, 1987), Sąjunginėje konferencijoje liuminescencijos klausimais (Angarskas, 1991), Tarptautinėje konferencijoje liuminescencijos klausimais (Maskva, 1994), "The first International conference on Material Science of chalcogenide and Diamond-structure semiconductors" (Černovcai, 1994), Trečioje tarptautinėje konferencijoje "Physical problems in material science of semiconductors" (Černovcai, 1999).

## Darbo sandara

Disertacinį darbą sudaro įvadas, 4 skyriai, priedas, išvados ir panaudotos literatūros sąrašas. Bendra apimtis 74 puslapiai, 27 brėžiniai ir 93 pavadinimų literatūros sąrašas.

## Turinio išdėstymas

**I skyrius.** Jame apžvelgiama literatūra, susijusi su Šotkio barjero tyrimais, pateikiami pagrindiniai teoriniai krūvininkų pernešimo pro barjerą modeliai. Remiantis literatūros apžvalga, padarytos išvados apie modelių tinkamumą, aiškinant krūvininkų pernešimą.

**II skyrius.** Jame aprašoma bandinių sandara, eksperimentiniams tyrimams naudota aparatūra bei tyrimo metodika.

**GaP** diodams paviršiniai barjerai buvo pagaminti ant epitaksinio sluoksnio su azoto priemaiša, gauto iš skystos fazės. Laisvųjų elektronų koncentracija kambario temperatūroje buvo  $N=(6-12) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Paviršiaus normalės orientacija (111). Barjerą formuojančiu elektrodu buvo 1 ir 1,4 mm skersmens aliuminio diskas, apsuptas omino kontakto žiedu.

**Al-SiO<sub>2</sub>-n/Si** struktūros pagrindą sudarė Si n-tipo ( $N=2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) plokštelė. Paviršiaus normalės orientacija (111). Plonas oksido SiO<sub>2</sub> sluoksnis ant Si buvo gautas, termiškai oksiduojant paviršių sauso deguonies atmosferoje, esant 700 °C temperatūrai. Oksido sluoksnio storis 4 ir 60 nm. Barjerą formuojančiu

elektrodu tarnavo ant oksido užgarintas 0,8 mm skersmens aliuminio diskas. Kitoje plokštelės pusėje buvo suformuotas ominis kontaktas.

Al-SiO<sub>2</sub>-n/GaAs struktūros gamintos ant GaAs n-tipo ( $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) plokštelės. Paviršiaus normalės orientacija (100). Vienoje plokštelės pusėje buvo plazmocheminiu būdu uždėtas silicio dioksido sluoksnis. Ant oksido sluoksnio užgarintas 1 mm skersmens aliuminio elektrodas. Kitoje plokštelės pusėje suformuotas ominis kontaktas. Oksido sluoksnio storis 40 nm.

Buvo tirtos Al-n/GaAs nuosavas oksidas struktūros. Gaminant šią struktūrą, GaAs paviršius oksiduotas deguonies atmosferoje 40 min. 510 °C temperatūroje.

Al-p/InP diodai pagaminti epitakcijos būdu iš cinku legiruoto indžio fosfido. Krūvio nešėjų koncentracija, nustatyta kambario temperatūroje iš voltamperinių charakteristikų, buvo lygi  $1,8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

Plonos elektroliuminescuojančios ITO-SiO<sub>2</sub>/SiON-SrS:Ce-SiON/SiO<sub>2</sub>-Al plėvelinės struktūros - aktyvatoriumi liuminofore buvo įvestas 0,1 mol % koncentracijos CeCl<sub>3</sub>. Plėvelių storiai: SiO<sub>2</sub> ~(30-50) nm, SiON ~(200-250) nm, SrS:Ce~(0.7-1.4) nm. Tirtos struktūros, veikiant kintamai įtampai, emitavo joms būdingą spinduliuotę.

### **Tyrimų metodika**

Atliekant srovės stiprio priklausomybės nuo temperatūros ir įtampos matavimus, tiriamieji bandiniai buvo talpinami į vakuuminį arba azotu prapučiamą kriostatą. Vakuuiniame kriostate slėgis buvo palaikomas  $p < 10^{-3}$  Pa. Azotu prapučiamą kriostatą sudarė du vienas į kitą sumauti kvarciniai vamzdeliai. Iš susidariusio tarpo tarp vamzdelių išsiurbtas oras, o vamzdelių galai buvo užvirinti. Azoto garams tekant vidiniu vamzdeliu, galima reguliuoti bandinio temperatūrą, keičiant paduodamo azoto garų kiekį ir jį šildant spiraliniu šildytuvu. Bandinys talpinamas ant liežuvėlio šalia vario-konstantano termoelemento. Temperatūra matuojama 0,1 K tikslumu. Matavimai atlikti 120-400 K temperatūros intervale. Matuojant temperatūrines srovės stiprio ir EL skaičio priklausomybes, buvo stengiamasi išlaikyti vienodą bandinio kaitinimo greitį. Priklausomai nuo bandinio matmenų kaitinimo greitis buvo 0,04-0,09 K/s. Maitinimo šaltiniu tarnavo stabilizuoti nuolatinės įtampos lygintuvai. Srovė matuota elektrometru ЭД-05 ir dvikoordinatiniu potenciometru ПДП4-002. Talpuminiai C(U) matavimai atlikti Pusulaidininkų fizikos institute.

Tiriant plonų plėvelių elektroliuminescenciją, ji buvo žadinama stačiakampiais įtampos impulsais. Švytėjimas registruotas fotodaugintuvu, iš kurio signalas paduodamas į atmintinį oscilografą arba stiprintuvą.

Tuneliavimo tikimybės skaičiuotos personaliniu kompiuteriu, naudojant “*Turbo Paskalio*” ir “*Mathematica 4*” programų paketus.

### III skyrius

#### Atgalinė srovė Šotkio dioduose

Šiame skyriuje pateikti eksperimentiniai atgalinės srovės Šotkio dioduose priklausomybės nuo prijungtos įtampos ir temperatūros tirtose struktūrose duomenys bei gautų priklausomybių palyginimas su naudoto teorinio modelio duomenimis.

3.1 skirsnyje aptarti eksperimentiniai srovės stiprio priklausomybės nuo atgalinės įtampos ir temperatūros Al-n/GaP, Al-n/GaP:S struktūrose duomenys. Tirtos struktūros pasižymėjo tuo, kad atgalinės srovės jose turėjo stiprią priklausomybę nuo temperatūros, esant mažoms atgalinės įtampos vertėms. Tokio tipo srovės stiprio temperatūrinės priklausomybės sunku paaiškinti įprastomis Šotkio diodų teorijomis [2-8]. Todėl mes jas aiškinome remdamiesi modeliu, pasiūlytu [1], aiškinant atgalinės srovės VACH GaAs dioduose. Tariaama, kad minėtuose dioduose krūvio nešėjų šaltinis yra elektroninės būsenos puslaidininkyje arti sandūros metalas-puslaidininkis. Elektronai patenka į puslaidininkio laidumo juostą, jiems tuneliuojant iš šių būsenų.

Gautos eksperimentinės I(U) priklausomybės palygintos su teorinėmis elektrono tuneliavimo per barjerą tikimybės priklausomybėmis nuo lauko stiprio. Lyginimas remiasi prielaida, kad elektronai, tuneliaivę iš savo lygmens į laidumo juostą, yra neišsklaidomi ir nespėja rekombinuoti, kol palieka puslaidininkio barjero sritį. Tuneliavimo spartos apskaičiuotos pagal [9] darbo (16) formulę:

$$W(T, F) = \exp[-a(2n+1)] \times \sum_{S=0}^{S_m} \sum_{K=0}^{K=S} \frac{eFa^S (n+1)^K n^{S-K}}{2 \left\{ 2m^* [\Delta - \hbar\omega(S-2K)] \right\}^{1/2} K!(S-K)!} \times \exp \left( \frac{4\sqrt{2m^*}}{3e\hbar F} [\Delta - \hbar\omega(S-2K)]^{3/2} \right) \left( 1 - \xi e^{\xi^2} [1 - \Phi(\xi)] \sqrt{\pi} \right)^2 \quad (1)$$

Čia

$$\xi = \frac{\hbar\omega(S-2K)\sqrt{2m^*}}{2\sqrt{e\hbar F} \sqrt[4]{\Delta + \hbar\omega(S-2K)}}$$

$$\Phi(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi e^{-y^2} dy \quad \text{-paklaidų integralas, } S_m \text{ - maksimalus procese}$$

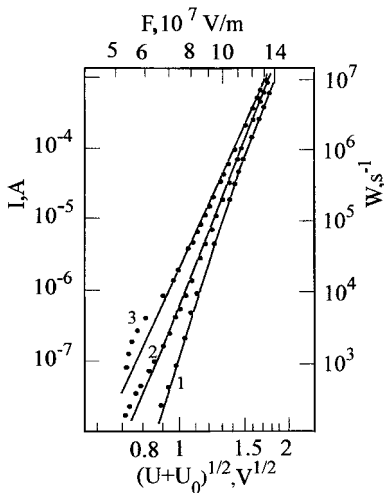
dalyvaujančių fononų skaičius,  $a$  - elektrono ir fonono sąveikos konstanta,

$n = [\exp(\hbar w / kT) - 1]^{-1}$ ,  $\hbar w$  - fonono energija,  $m^*$  - efektinė elektrono masė,  $D$  - centro gylis,  $F$  - elektrinio lauko stipris.

Skaiciavimai atlikti, esant įvairioms elektrono ir fonono sąveikos konstantos  $a$  vertėms. Lyginame visą  $I(U)$  priklausomybių šeimą su  $W(F)$ , esant skirtingoms temperatūroms. Elektrono ir fonono sąveikos konstanta parenkama taip, kad gautųsi geras eksperimentinių taškų sutapimas su teorinėmis tikimybės eigomis. Lyginant buvo tariama, kad lauko stipris barjere  $F$  proporcingas  $(U + U_0)^{1/2}$ , kur  $U$  - prijungta įtampa,  $U_0$  - difuzinis potencialas. Difuzinio potencialo vertė  $U_0$  nustatoma iš  $C(U)$  matavimų. Manoma, kad atgalinės srovės stipris proporcingas lokalizuotų elektronų paviršiniam tankiui  $N$  ir jų delokalizacijos (tuneliavimo) per sekundę tikimybei  $W$ , t.y.

$$I_{atg} = WNeS, \quad (2)$$

kur  $S$  - barjerinio elektrodo plotas,  $e$  - elektrono krūvis.



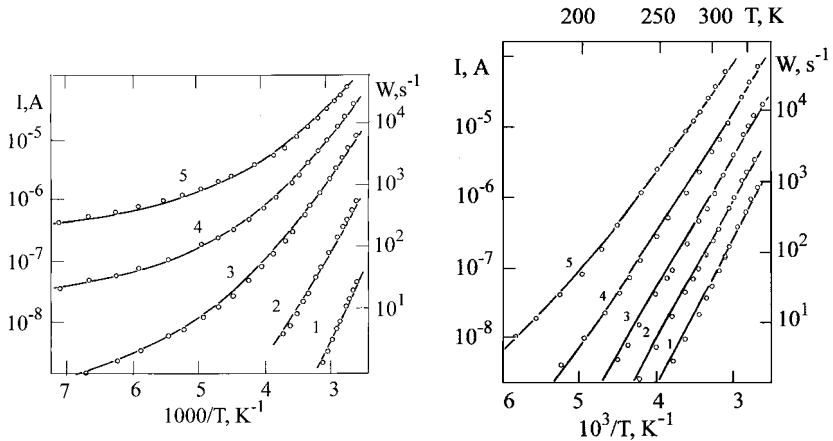
1 pav. Atgalinės srovės stiprio  $I$  priklausomybė nuo įtamos  $(U + U_0)$  GaP diodams (taškai) ir teorinės tuneliavimo tikimybės  $W$  priklausomybės nuo elektrinio lauko stiprio  $F$  (išsitiesinės linijos). Teorinės kreivės skaičiuotos, esant  $D = 0,64$  eV,  $m^* = 0,16 m_e$ ,  $a = 6$ ,  $\hbar w = 0,046$  eV. Difuzinis potencialas  $U_0 = 0,5$  V. T, K: 1-230, 2-310, 3-370.

1 paveiksle pateiktas Al-n/GaP bandinių atgalinės srovės stiprio, esant skirtingoms temperatūroms, palyginimas su teorinėmis tuneliavimo, dalyvaujant fononams, tikimybės  $W(F)$ .



Eksperimentines priklausomybes palyginus su teorinėmis tikimybėmis  $W$ , įvertintas paviršinių būsenų tankis. Jis gautas  $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  Al-n/GaP bandiniams ir  $9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  Al-n/GaP:S bandiniams. Srovės stiprio priklausomybėje nuo įtampos GaP:S bandiniams galima išskirti tris sritis: 1) srovės stiprio priklausomybė nuo įtampos ( $U < 8\text{V}$ ) ir temperatūros, kurią galima paaiškinti daugiafononine tuneliavimo teorija ir Frenkelio mechanizmu, 2) įtampų sritis su staigiu srovės augimu, didėjant įtampai, paaiškinama smūginio lavininiu procesu ( $U > 8$ ) [10], 3) sritis su tiesine srovės stiprio priklausomybe nuo įtampos ( $U > 17\text{V}$ ).

3.2 skirsnyje aptariamos darinių Al-SiO<sub>2</sub>-n/Si, Al-SiO<sub>2</sub>-n/GaAs, Al-n/GaAs su nuosavu oksidu srovės stiprio temperatūrinės ir VACH, esant įjungtai atgalinei įtampai. 2 paveiksle pateikta srovės stiprio priklausomybė nuo temperatūros SiO<sub>2</sub> plėvelėse. Iš InI priklausomybių nuo  $1/T$ , vaizduojamų tiesiomis



2 pav. Srovės stiprio  $I$  priklausomybė nuo temperatūros  $T$ , esant skirtingoms atgalinėms įtampoms vertėms, Al-SiO<sub>2</sub>-n/Si struktūroms (rutuliukai) ir teorinės tuneliavimo tikimybės  $W$  priklausomybės nuo temperatūros (ištisinės linijos), apskaičiuotos, kai:  $D=0,6 \text{ eV}$ ,  $m^*=0,33 m_e$ ,  $\hbar\omega=0,063 \text{ eV}$ ,  $a=6$ . U,V: 1-1; 2-2; 3-4; 4-6; 5-8. F,  $10^7 \text{ V/m}$ : 1-3,8; 2-5,5; 3-7,2; 4-8,3; 5-9,3. SiO<sub>2</sub> plėvelės storis  $d=60 \text{ nm}$ .

3 pav. Srovės stiprio  $I$  priklausomybė nuo temperatūros  $T$ , esant skirtingoms atgalinėms įtampoms vertėms, Al-SiO<sub>2</sub>-n/GaAs struktūroms (rutuliukai) ir teorinės tuneliavimo tikimybės  $W$  priklausomybės nuo temperatūros (ištisinės linijos), apskaičiuotos, kai  $D=0,5 \text{ eV}$ ,  $m^*=0,068 m_e$ ,  $a=8$ ,  $\hbar\omega=0,036 \text{ eV}$ . U,V: 1-0,2; 2-0,5; 3-1,0; 4-1,4; 5-4,0. F,  $10^7 \text{ V/m}$ : 1-0,7; 2-0,9; 3-1,3; 4-1,8; 5-2,3. SiO<sub>2</sub> plėvelės storis  $d=40 \text{ nm}$ .

linijomis mažų įtampų srityje, apskaičiuota terminės aktyvacijos energija, kuri lygi 0,6 eV Al-SiO<sub>2</sub>-n/Si diodams. 3 paveiksle pavaizduota srovės temperatūrinė priklausomybė Al-SiO<sub>2</sub>-n/GaAs diodams. Tokios pat priklausomybės gautos ir Al-n/GaAs su nuosavu oksidu diodams. Esant mažoms įtampoms, Al-SiO<sub>2</sub>-n/GaAs dioduose ln I priklausomybės nuo 1/T vaizduojamos tiesiomis linijomis su terminės aktyvacijos energija 0.5 eV. Gautos eksperimentinės I(T) priklausomybės palygintos su teorinėmis elektronų tuneliavimo tikimybės priklausomybėmis nuo temperatūros. Iš 2 ir 3 paveikslų matyti, kad yra geras teorinių ir eksperimentinių priklausomybių atitikimas. Įvertintas būsenų tankis paviršiniame sluoksnyje. Jis gautas 1,2x10<sup>12</sup> cm<sup>-2</sup> Al-SiO<sub>2</sub>-n/Si bandiniams, 2,8x10<sup>12</sup> cm<sup>-2</sup> Al-SiO<sub>2</sub>-n/GaAs ir 3.7x 10<sup>11</sup> cm<sup>-2</sup> Al-n/GaAs su nuosavu oksidu. Tirtų struktūrų VACH taip pat gerai derinasi su teoriniu modeliu. Šis modelis panaudotas interpretuoti temperatūrinėms srovės stiprio priklausomybėms struktūrose Al-SiO<sub>2</sub>-n/Si (oksido storis buvo 140 nm), pateiktom [11] darbe. Cituojamo darbo eksperimentiniai rezultatai gerai derinasi su mūsų naudojamu teoriniu modeliu. Iš palyginimo įvertintas paviršinių būsenų tankis, kuris sutapo su cituojamo darbo autorių įvertinimu ir lygus 2x10<sup>11</sup> cm<sup>-2</sup>.

3.3 skirsnyje pateikti p/InP diodų srovės stiprio priklausomybių nuo temperatūros ir atgalinės įtampos tyrimų eksperimentiniai duomenys. VACH turi stiprią temperatūrinę priklausomybę. Kreivių polinkis, didinant temperatūrą, mažėja (4 pav.).

Stebimas srovės stiprio temperatūrinės priklausomybės aiškname modeliu, pagal kurį skylutės tuneliuoja iš būsenų metalo-puslaidininkio riboje į valentinę puslaidininkio juostą. Tariame, kad srovės stipris per barjerą proporcingas tuneliavimo tikimybei  $W$ . 4 paveiksle  $W(F)$  priklausomybės pavaizduotos punktyrinėmis linijomis. Iš palyginimo matyti, kad teorinės  $W(F)$  kreivės (punktyrinės linijos) nesiderina su eksperimentinėmis VACH kreivėmis (taškai). Patenkinamas sutapimas su tuneline teorija yra tik stiprių laukų srityje. Ypač didelis skirtumas tarp eksperimento ir teorijos matomas aukštesnėse temperatūrose.

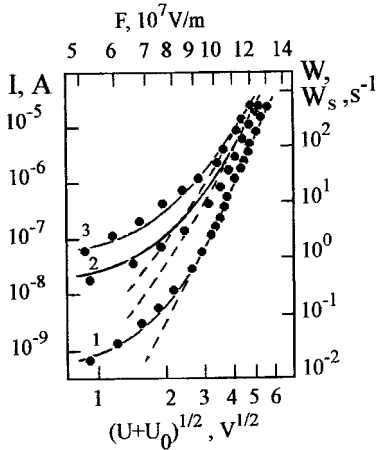
Teorinių priklausomybių nesutapimas su eksperimentinėmis gali būti paaiškintas tuo, kad be tunelinės emisijos pasireiškia ir kiti mechanizmai. Tunelinis mechanizmas yra vyraujantis stipresnių laukų ir žemesnių temperatūrų srityje, o silpnesniuose laukuose ir aukštesnėse temperatūrose dominuoja kitas mechanizmas. Tai gali būti Frenkelio emisija, kuriai būdinga stipri temperatūrinė priklausomybė ir mažiau išreikšta tikimybės priklausomybė nuo lauko stiprio, negu tunelinio atveju. Veikiant abiem nepriklausomiems mechanizmomis, tikimybės sumuojamos:

$$W_S = W + W_F,$$

kur  $W$ -tuneliavimo tikimybė, paskaičiuota pagal (1) formulę,  $W_F$  -tikimybė pagal Frenkelio formulę [12]:

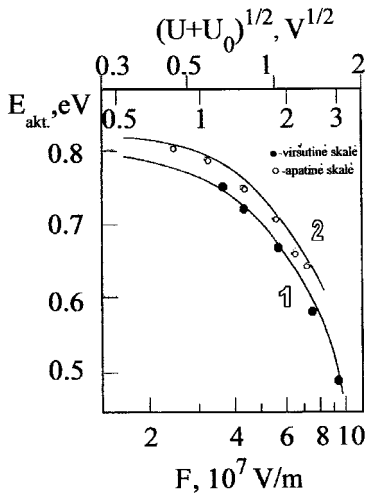
$$W_F(T, F) = v_0 e^{-\frac{\epsilon_T - \beta \sqrt{F}}{kT}} \quad (3)$$

kur  $v_0$  - dažnuminis daugiklis,  $b = (e^3 / 4\pi\epsilon_0 \epsilon_e)^{1/2}$ ,  $\epsilon_T$  - termininės aktyvacijos energija,  $\epsilon_0$  - elektrinė konstanta,  $\epsilon_e$  - medžiagos dielektrinė skvarba,  $e$  - elektro- no krūvis. Suminės tikimybės  $W_s(F, T)$  priklausomybės 4 paveiksle vaizduojamos ištisinėmis linijomis.



4 pav. Atgalinės srovės stiprio  $I$  priklausomybė nuo įtampos  $(U+U_0)$  p/InP diodams, esant skirtingoms temperatūroms ( $T=(1) 294, (2) 343, (3) 364$  K) ir palyginimas su tuneliavimo teorijos tikimybe  $W$  ir su  $W_s$  priklausomybe nuo elektrinio lauko stiprio  $F$ . Skaičiavimai atlikti, esant parametrams:  $D=0,75$  eV,  $m^*=0,5 m_e$ ,  $a=6$ ,  $\hbar w=0,042$  eV,  $n_0=3 \times 10^8$  s $^{-1}$ ,  $\epsilon=12,5$ ,  $U_0=0,5$  V,  $S=0,5$  mm $^2$ .

Iš 4 paveikslo matyti, kad eksperimentiniai duomenys gerai sutampa su teorinėmis priklausomybėmis. Jeigu laikysimės anksčiau priimtoms prielaidoms, kad visos skylutės, išlaisvintos iš centro, palieka nuskurdintą sritį nerekombinavusios, tai srovės stipris bus aprašomas (2) formule. Iš eksperimentinių ir teorinių duomenų palyginimo įvertintas  $N=5 \cdot 10^{13}$  cm $^{-2}$ .



5 pav. Al-p/InP diodų aktyvacijos energijos  $E_{akt}$  priklausomybė nuo atgalinės įtampos (taškai), gauta iš srovės stiprio temperatūrinės priklausomybės ir teorinės aktyvacijos energijos priklausomybės nuo elektrinio lauko stiprio  $F$  (1 kreivė). Tokios pat priklausomybės pateiktos Au-p/InP diodui iš [13] darbo (rutuliukai, 2 kreivė).

5 paveiksle pateikta aktyvacijos energijos priklausomybė nuo įtampos Al-p/InP bandiniui (taškai) ir Au-p/InP bandiniui iš [13] darbo (rutuliukai), paskaičiuota iš  $I(U, T)$  priklausomybių. Iš paveikslo matyti, kad aktyvacijos energija, didinant įtampą, o tuo pačiu ir elektrinio lauko stiprį, mažėja. Panašias aktyvacijos energijos priklausomybes nuo elektrinio lauko stiprio gauname ir tą energiją nustatius iš teorinių  $\ln W(F, T)$  priklausomybių nuo  $1/T$  polinio (5 pav. ištininės linijos). Šios aktyvacijos energijos priklausomybės palygintos viena su kita.

Gautos  $E_{akt}$  priklausomybės nuo lauko stiprio  $F$  yra tokios pat, kaip stebimos barjero aukščio priklausomybės, nustatytos iš  $I(U, T)$  grafikų. Tai leidžia padaryti išvadą, kad eksperimentiškai stebimas aktyvacijos energijos mažėjimas, didėjant įtampai, yra pasekmė stimuluoto fononais tuneliavimo, kuris yra pagrindinis krūvio pernešimo per Šotkio barjerą mechanizmas, esant atgalinei įtampai.

#### IV skyrius

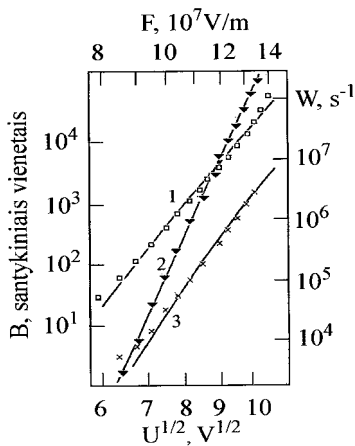
##### Tunelinių procesų vaidmuo elektroliuminescencijos sužadinime

Plonų elektroliuminescuojančių plėvelių švytėjimas, gaunamas įjungus žadinančią įtampą, yra rezultatas visos eilės procesų, vykstančių aktyviame sluoksnyje (liuminofo), iš kurių galima išskirti laisvųjų krūvininkų generaciją ir jų pagreitinimą elektriniu lauku iki energijų, pakankamų švytėjimo centrų smūginiam sužadinimui. Literatūriniuose šaltiniuose teigiama, kad EL skaisčio augimą, didėjant temperatūrai, gali sąlygoti pirminių elektronų generacijos greičio didėjimas, augant temperatūrai.

4.1 skirsnyje pateikta EL skaisčio B priklausomybė nuo įtampos ir temperatūros Al-n/GaP ir Al-n/GaP:S darinuose. GaP diodų švytėjimo skaisčio priklausomybė nuo įtampos ir temperatūros turi panašią eigą, kaip ir srovės stiprio priklausomybė nuo tų pačių parametrų. Gavome gerą skaisčio temperatūrinių priklausomybių sutapimą su tuneliavimo tikimybe, gauta remiantis daugiafononinio tunelinio proceso stipriame elektriniame lauke teoriniu modeliu. GaP:S struktūrų B(U) priklausomybėms būdingas didelis kreivių statumas (jis negali būti paaiškintas tuneline teorija) ir išotinis, atsirandantis esant aukštomis įtampoms.

4.2 skirsnyje pateikiami eksperimentiniai SrS:Ce liuminoforo skaisčio priklausomybės nuo žadinančios įtampos ir temperatūros duomenys. Tirtų struktūrų EL skaisčio priklausomybės nuo įtampos amplitudės, išmatuotos skirtingose temperatūrose, parodytos 6 paveiksle. Stebimą B(U) formą galima paaiškinti tuo, kad EL sužadinti reikalingi elektronai tiekiami iš dviejų skirtingo gylio centrų. Žemesnėse temperatūrose B(U) charakteristikoms įtakos turi mažesnio gylio centrai. Gilūs centrai turi lemiamą įtaką B(U) charakteristikai aukštesnėse temperatūrose. Tai patvirtina B(U) lyginimas su W(F) priklausomybėmis. Tuneliavimo tikimybę, nustatytą pagal (1) formulę 0,55 eV gylio centrui, vaizduoja ištisinės 1 ir 3 linijos ir 1,0 eV gylio centrui – 2 linija. Iš 6 paveiklo matyti, kad teorinės kreivės gerai derinasi su eksperimentiniais taškais.

Tirtose struktūrose stebimas ryškiai išreikštas elektrofotoluminescencijos efektas, kuris pasireiškia tuo, kad UV šviesa apšviestą bandinį paveikus įtampos impulsu, gaunamas šviesos blyksnis, daug kartų viršijantis blyksnio dydį, kai bandinys nebuvo apšviestas UV šviesa. Tokio blyksnio atsiradimo priežastis yra ta, kad apšvietus bandinį, gaudyklės yra užpildomos elektronais. Prijungus



6 pav. EL skaisčio B priklausomybė nuo įtampos SrS:Ce (0,1mol%) bandiniams skirtingose temperatūrose: 1 - 293 K, 2 - 420 K, 3 - 160 K. Ištisinės linijos vaizduoja teorinę W(F) priklausomybę, apskaičiuotą parametrams:  $m^*=0,43 m_e$ ,  $a=4$ ,  $\hbar w=0,043$  eV,  $D=0,55$  eV kreivėms 1, 3 ir  $D=1,0$  eV kreivei 2.

žadinančią įtampą, tos gaudyklės yra ištuštinamos, jas jonizuojant elektriniu lauku. Laisvieji elektronai, pagreitinti elektriniu lauku, smūginiu būdu sužadi- na švytėjimo centrus. Iš EL blyksnio gesimo buvo išmatuotas relaksacijos laikas  $\tau$ , kuris charakterizuoja laiką, per kurį blyksnio amplitudė sumažėja e kartų. Atvirkštinė jo reikšmė  $1/\tau$  lygi elektrono išlaisvinimo iš gaudyklių tikimybei [14]. Eksperimentiškai nustatytos  $1/\tau$  dydžio priklausomybės nuo temperatūros ir įtampos.  $1/\tau$  priklausomybė nuo įtampos palyginta su teorine  $W(F,T)$  priklausomybe, apskaičiuota pagal formulę (1). Gautas geras teorinių  $W(F,T)$  priklausomybių sutapimas su eksperimentinėmis  $1/\tau$  vertėmis. Reikia pažymėti, kad čia gautos  $W$  atitinka išlaisvinimo tikimybes lauku, kadangi terminio išlaisvinimo tikimybė bus žymiai mažesnė. Lauko stipris šiuo atveju yra  $(4-8) \times 10^7$  V/m (manoma, kad delokalizacija vyksta Šotkio barjere, kuriame maksimalus lauko stipris proporcingas kvadratinei šakniai iš prijungtos įtampos).

**Priede** pateiktos tirtų Al-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-p/Si struktūrų, turinčių žymiai didesnio storio oksidus, negu anksčiau nagrinėjome, srovės stiprio priklausomybės nuo įtampos ir temperatūros.

Struktūra metalas-oksidas-puslaidininkis gaminta Puslaidininkių fizikos institute. Jos pagrindą sudarė p-tipo silicio plokštelės, aktyvuotos boru, tokių parametru: paviršiaus orientacija (111), krūvininkų koncentracija  $N=20 \times 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>, savitoji varža (0,92-1,1)  $\Omega$  m. Ant plokštelės užgaminamas tantalas, kurio storis 0,1 ir 0,5  $\mu$ m. Tantalas oksiduojamas deguonies aplinkoje. Ant oksido paviršiaus užgaraminti Al kontaktai (elektrodas) 0,5 mm skersmens. Ominis kontaktas, kitoje silicio plokštelės pusėje, užnešamas garinant Al vakuuminiu būdu.

Srovės stiprio priklausomybės matuotos, esant neigiamam ir teigiamam įtampos ženklui ant Al elektrodo. Gautas srovės stiprio priklausomybes nuo temperatūros negalima paaiškinti, remiantis Poole-Frenkelio arba Schottky mechanizmais [15]. Pagal šias teorijas temperatūrinės priklausomybės vaizduojamos tiesėmis, kurių polinkis mažėja, stiprinant veikiantį elektrinį lauką. [16] darbe tokios priklausomybės, gautos SiO plėvelėse, aiškinamos remiantis prielaida, kad laisvieji elektronai atsiranda, jiems tuneliuojant iš pagavimo centrų per barjerą, esant stipriam elektriniam laukui, dalyvaujant gardelės fononams. Manome, kad pagrindinį vaidmenį krūvininkų perėjimuose tose temperatūrose vaidina optiniai fononai. Elektrono efektinės masės vertė 0,35  $m_e$  [17]. Centrų gylis buvo įvertintas iš srovės stiprio priklausomybės nuo temperatūros kreivių polinkio, esant mažoms įtampų vertėms (jis yra 0,8 eV). Gautas geras eksperimentinių duomenų sutapimas su teoriniais skaičiavimais. Krūvininkų šaltiniu gali būti Si-oksidas ir oksidas-metalas sandūroje esančios elektroninės būsenos. Registruojant nuolatinę srovę, reikia turėti omenyje, kad būsenos, būdamos elektronų šaltiniais, pastoviai užpildomos elektronais iš elektrodų.

Priede dar palyginti [18] darbe pateikti struktūrų metalas-SiO<sub>2</sub> - Si matavimų duomenys su mūsų darbe naudoto teorinio modelio duomenimis. Palyginimas parodė pakankamai gerą eksperimentinių matavimų ir teorinio modelio sutapimą.

## PAGRINDINĖS IŠVADOS

1. Nustatyta, kad srovės stiprio temperatūrinės priklausomybės tirtose struktūrose turi termoaktyvacinį pobūdį. Esant mažoms atgalinės įtampos vertėms, priklausomybė  $\ln(I/T)$  yra tiesinė. Iš gautų priklausomybių tiesinių dalių nustatyta terminės aktyvacijos energija. Ji gauta: Al-n/GaP - 0,64 eV; Al-n/GaP:S - 0,68 eV; Al-SiO<sub>2</sub>-n/Si - 0,6 eV, Al-SiO<sub>2</sub>-n/GaAs - 0,5 eV; Al-p/InP - 0,75eV (T>280 K) ir 0,51eV (T<280K).

2. Atgalinės srovės temperatūrinės ir voltamperines charakteristikas tirtose GaAs-SiO<sub>2</sub>, Si-SiO<sub>2</sub>, GaAs su nuosavu oksidu diodinėse struktūrose lemia fononais stimuliuojamas elektronų tuneliavimas iš paviršinių elektroninių būsenų, esančių puslaidininkyje arti sandūros metalas-puslaidininkis, į puslaidininkį.

3. Atgalinės srovės stiprio priklausomybių nuo įtampos ir temperatūros palyginimas su teorinėmis daugiafononinio tuneliavimo tikimybėmis leidžia nustatyti: elektrono ir fonono sąveikos konstantą, paviršinių būsenų tankį, elektrinio lauko stiprį barjere. Iš palyginimo nustatyti būsenų tankiai paviršiniuose sluoksniuose tirtose struktūrose: Al-SiO<sub>2</sub>-n/Si -  $1,2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , Al-SiO<sub>2</sub>-n/GaAs -  $2,8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , Al-n/GaAs su nuosavu oksidu -  $3,7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ .

4. Parodyta, kad srovės stiprio priklausomybės nuo atgalinės įtampos n/GaP dioduose su Šotkio barjeru sąlygoja taip pat elektronų tuneliniai šuoliai iš paviršinių elektroninių būsenų metalo ir puslaidininkio riboje, į puslaidininkį. Nustatyta, kad GaP diodų EL skaisčio temperatūrinę priklausomybę sąlygoja laisvųjų krūvininkų generacijos procesas stipraus lauko srityje. Įvertintas maksimalus lauko stipris barjere, lygus (9-12)  $10^7 \text{ V/m}$  ir būsenų tankis paviršiniame sluoksnyje, kuris lygus  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  Al-n/GaP bandiniui ir  $9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  - Al-n/GaP:S.

5. Eksperimente stebimą srovės stiprio augimą, didinant temperatūrą ir atgalinę įtampą p/InP dioduose, lemia krūvininkų tuneliniai šuoliai, stimuliuoti fononų ir Frenkelio viršbarjerinė emisija. Aukštesnių temperatūrų (T>280 K) ir silpnėsių laukų atveju dominuoja Frenkelio mechanizmas.

6. Nustatyta, kad plėvelinėse sandarose su SrS:Ce liuminoforu EL skaisčio priklausomybę nuo sužadinančio lauko stiprio lemia pirminių laisvųjų krūvininkų generacijos procesas, kurio mechanizmas yra tuneliniai šuoliai, dalyvaujant gardelės fononams. Eksperimentiškai stebimą B(U) priklausomybę lemia dviejų gylių centrai: aukštesnės nei kambario temperatūros srityje pagrindinis elektronų šaltinis yra gilūs centrai (1,0 eV), o žemesnės temperatūros srityje - mažesnio gylio (0,55 eV) centrai.

7. Elektronų išlaisvinimo tikimybių priklausomybės nuo temperatūros ir įtampos, nustatytos iš EL blyksnio relaksacijos, tirtose plėvelinėse struktūrose sutampa su teoriškai apskaičiuotomis elektronų išlaisvinimo tikimybių W(T,F) vertėmis.

8. Nustatyta, kad fononais stimuliuojamas krūvininkų tuneliavimo mechanizmas paaiškina srovės stiprio voltamperines charakteristikas ir jų temperatūrinės variacijas Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ir SiO<sub>2</sub> plėvelėse.

## Disertacijos tema paskelbti straipsniai:

1. Р.С. Бразис, П.А. Пипинис, А.К. Римейка, В.А. Лапейка. Туннелирование в барьерах Al-n-GaP при напряжениях обратного смещения. ФТП, 20, 1716-1718 (1986).
2. Р.С. Бразис, П.А. Пипинис, А.К. Римейка, В.А. Лапейка. Вольтамперные характеристики и электролюминесценция диодов Al/n-GaP при напряжениях обратного смещения. Лит.Физ.Сбор. 28, 351-357 (1988).
3. R. Brazis, P. Pipinys, A. Rimeika, V. Lapeika. Electron transport in Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films. Journal of materials science letters. **9**, 266-267 (1990).
4. П. Пипинис, В. Лапейка, А. Пипинене, А. Римейка. Уровни захвата в пленочных электролюминофорах на основе щелочноземельных сульфидов и их влияние на электролюминесцентные характеристики. Lietuvos fizikos žurnalas, 34, 512-518 (1994).
5. П.А. Пипинис, В.А. Лапейка, О.Н. Созарь. Электролюминесценция и электрофотолюминесценция топкопленочных излучателей на основе SrS:Ce. Журнал прикладной спектроскопии, 62, 135-141 (1995)
6. P. Pipinys, A. Rimeika, V. Lapeika. On the current transport mechanism in metal-silicon dioxide-silicon structures. Lietuvos fizikos žurnalas, **36**, 67-72 (1996).
7. П. Пипинис, А. Пипинене, А. Римейка, В. Лапейка. Температурная зависимость обратного тока в Al-p-InP диодах. Lietuvos fizikos žurnalas, 38, 547-551 (1998).
8. П.А. Пипинис, А.К. Римейка, В.А. Лапейка. Температурная зависимость обратного тока в диодах с барьером Шоттки. ФТП, 32, 882-885 (1998).
9. P. Pipinys, V. Lapeika. Comment on “ modelling of trap-assisted electronic conduction in thin thermally nitrated oxide films” by H.Wong and YC. Cheng. Solid-State Electronics, **43**, 1963-1965 (1999).
10. П.А. Пипинис, А.К. Римейка, В.А. Лапейка, А.В. Пипинене. Механизм обратного тока в диодах с барьером Шоттки Al/p-InP. ФТП, 35, 188-194 ( 2001).



## SUMMARY

The introduction motivates the topicality and novelty of the research. The aim of the research is to establish the mechanism of charge transport in metal-semiconductor and metal-oxide-semiconductor structures in the presence of the Schottky barrier.

In Chapter One we analyse the existing papers on the research of the Schottky mechanism, and the main theoretical models of charge transfer with the barrier are being presented. On the basis of the analyzed literature conclusions are made about the suitability of the models for analyzing the dependence of the reverse current on voltage and temperature.

In Chapter Two we describe the technology of preparing samples, the research methods and the equipment which has been used for experiment.

In Chapter Three and Four we analyse the experimental data. In Chapter Three the experimental data on the dependence of the reverse current on voltage and temperature in the analyzed structures are presented and the obtained dependences are compared with a theoretical model of an electron-tunneling from a deep centres assisted by phonons. At the beginning of the chapter the experimental data on the dependence of current strength on the reverse voltage and temperature in Al-n/GaP, Al-n/GaP:S structures are discussed. These structures are characterised by the reverse current having a strong dependence on temperature at low reverse voltage values. The experimental data are compared with the theoretical  $W(F,T)$  probabilities. We assume that the current flowing through the barrier is proportional to the tunneling probability and that none of the electrons that tunnel from their energy level into conduction band are scattered, or recombined, before they leave the barrier region of the semiconductor. The experimental data are in good agreement with the theoretical probability.

In Chapter Three we discuss the temperature and current-voltage dependence on structures Al-SiO<sub>2</sub>-n/Si, Al-SiO<sub>2</sub>-n/GaAs and Al-n/GaAs with its own oxide with the reverse voltage being switched on. The current dependence on temperature for different reverse voltages have been measured. The mentioned current strength had a thermoactive character and the energies of activation were 0,5-0,6 eV. In the mentioned structures at low voltage values the dependence  $\ln I (1/T)$  was linear. At higher voltages the plots of  $\ln I=f(1/T)$  deviate substantially from straight lines because of the weaker temperature dependence of the current at low temperatures. The obtained dependences may be explained by the model according to which the source of charge carriers was the electronic state in the junction of oxide-semiconductor. Electrons enter the conduction band of the semiconductor as a result of phonon-assisted tunnel-

ing from these levels. On this basis we have compared the experimental temperature dependences of the current with the temperature dependence of the tunneling probability calculated to the quantum-mechanical theory of phonon-assisted tunneling. The obtained experimental  $I(T)$  is in a good agreement with the theoretical  $W(T)$  dependences.

The field strength in the Schottky barrier and density of surface electron states in the interfacial layer of the semiconductor are estimated by comparing the experimental results with a tunneling theory.

In the last part of the chapter the experimental research data of the current dependences on temperature and reverse voltage for p/InP diode current are given. I-V characteristics have got a strongly expressed temperature dependence. The slope of the curves decreases as temperature increases. The temperature dependence of the current at different reverse bias voltages are explained by the model according to which the holes tunnel from the states in the metal-semiconductor boundary to the valence semiconductor band. After the analysis of the measurement data it was shown that the tunneling mechanism is prevailing in the region of strong fields and low temperature while in a weaker fields and at higher temperature the Frenkel emission is dominating. It has been observed that the energy of activation decreases when the values of applied voltage are increased. The observed dependences of barrier height on the voltage determined from  $I(T,U)$  characteristics by the phonon stimulated tunneling mechanism.

In Chapter Four we describe the excitation mechanism of electroluminescence (EL). It is followed by a description of the dependence of brightness on voltage and temperature in the Al-n/GaP and Al-n/GaP:S structures. The dependence of the brightness of the glow of the GaP diodes on voltage and temperature has a similar shape as the dependence of the current strength on voltage and temperature. It is following investigation analyse the experimental dependence of brightness EL of luminophor SrS:Ce on exciting voltage and temperature. In these luminophors an illuminated sample by UV light acted on the voltage impulse gives a high intensity light flash. The analysis of the kinetics of the flashes allowed us to determine the release of electron from traps probability which is compared with the theoretical values.

In the Appendix we discuss the mechanism of charge transfer in  $Ta_2O_5$  films. Here are given the I-V characteristics and the dependences of the current strength on the temperature. The obtained experimental dependences are compared with a theoretical model.

## MAIN CONCLUSIONS

1. It has been established that the current strength dependences on temperature in the structures under analyses have a thermoactive character. At low reverse voltage values the dependence  $\ln I(1/T)$  is linear. The following energies of thermal activation have been established from the linear part of the obtained dependences: Al-n/GaP - 0,64 eV; Al-n/GaP:S - 0,68 eV; Al-SiO<sub>2</sub>-n/Si - 0,6 eV, Al-SiO<sub>2</sub>-n/GaAs - 0,5 eV; Al-p/InP - 0,75eV ( $T > 280$  K) and 0,51eV ( $T < 280$ K).

2. The temperature and volt-ampere characteristics of reverse current in the analyzed diode structures GaAs-SiO<sub>2</sub>, Si-SiO<sub>2</sub> and GaAs with its own oxide are determined by the phonon-assisted tunneling. The tunneling takes place from the surface electric states in the semiconductor near the junction metal-semiconductor to a semiconductor.

3. The comparison of the dependences the reverse current with the theoretical probabilities of multiphonon tunneling allows us to determinate the constant of an electron-phonon interaction, the concentration of surface centres, the electric field strength in the barrier. The comparison reveals in the analyzed structures the following densities in the surface layers: : Al-SiO<sub>2</sub>-n/Si -  $1,2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , Al-SiO<sub>2</sub>-n/GaAs -  $2,8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ , Al-n/GaAs with its own oxide -  $3,7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ .

4. It is shown that the dependences of the reverse current on voltage in n/GaP diodes with the Schottky barrier are stimulated by the phonon-assisted tunneling from the surface electronic states in the metal and semiconductor boundary. It is established that the temperature dependence of EL brightness of the GaP diodes is affected by the process of the generation of free chargers in the region of a strong field. The maximum field strength in the barrier has been measured is (9-12)  $10^7 \text{ V/m}$ . The density of state in the surface layer is  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  in Al-n/GaP sample and  $9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  in sample Al-n/ GaP:S.

5. The increase of the current with increasing of the temperature and reverse voltage observed in the experiment is caused by the phonon-assisted tunneling and the Frenkel emission in p/InP diodes. In the case of higher temperatures ( $T > 280$  K) and a weaker fields the Frenkel mechanism is dominating.

6. It has been established that in the film structures with SrS:Ce luminophor the dependence of EL brightness on exciting field strength is determined by the process of the generation of primary free electrons the mechanism of which being the phonon-assisted electron tunneling. The experimentally observed dependence  $B(U)$  is determined by two centres of different depths: in the region a higher than room temperature the main source of electrons is deep centres of 1,0 eV depth, and at a lower temperature the shallow centres of 0,55 eV depth.

7. Dependences of the electron release probabilities on temperature and voltage determined from the relaxation of the EL flash in the analyzed film

structures are in agreement with the theoretically calculated electron release probability values  $W(T,F)$ .

8. It is established that the phonon-assisted charge tunneling mechanism explains as well the volt-ampere characteristics of current strength and their temperature variation in  $Ta_2O_5$  and  $SiO_2$  films.

### **Santraukoje panaudota literatūra**

1. R. Brazis, P. Pipinys, A. Rimeika, L. Gėgžnaitė. Solid - State Commun., **55**, 25 (1985).
2. C. R. Crowel, S.M. Sze. Solid - State Electron., **9**, 1035 (1966).
3. F. A. Padovani, R. Stratton. Solid - State Electron., **9**, 695 (1966).
4. C. R. Crowell, V.L. Rideout. Solid - State Electron., **12**, 89 (1969).
5. Ching-Yuan Wu. J. Appl. Phys., **53**, 5947 (1982).
6. K. Maeda, I. Umezu, H. Ikoma, T. Yoshimura. J. Appl. Phys., **68**, 2858 (1990).
7. А. Н. Король, В.И. Стриха, Д.И. Шека. ФТП, **14**, 80 (1980).
8. Ю. А. Гольдберг, Т.В. Львова, Б. В. Царенков. ФТП, **15**, 2339 (1981).
9. Ф. И. Далидчик. ЖЭТФ, **74**, 472 (1978).
10. С. М. Зи. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1, Мир, М., с.455, (1984).
11. Р. Н. Литовский, В.С. Лысенко, А.Н. Назаров Т.Е. Руденко. Микроэлектроника, **16**, 427 (1987).
12. Я. И. Френкель. ЖЭТФ, **8**, 1292 (1938).
13. A. Singh, P. Cova, R. A. Masut. J. Appl. Phys., **76**, 2336 (1994).
14. P. Pipinys, A. Rimeika, A. Kiveris. Phys. Stat. Sol.(a), **87**, K89 (1985).
15. S. Ezhilvalavan, Tseung-Yuen Tseng. J. Appl. Phys., **83**, 4799 (1998).
16. R. Brazis, P. Pipinys, A. Rimeika. Phys. Stat. Sol.(a), **83**, K69 (1984).
17. P. L. Young. J. Appl. Phys. **47**, 235 (1976)
18. B. L. Yang, H. Wong, Y.C. Cheng. Solid-State Electron., **39**, 385 (1996).

VYTAUTAS LAPEIKA  
TERMOSTIMULIUOTAS KRŪVININKŲ GENERAVIMAS STIPRIAME  
ELEKTRINIAME LAUKE, ESANT ŠOTKIO BARJERUI  
*Daktaro disertacijos santrauka*  
*Fiziniai mokslai, fizika, kondensuotosios medžiagos (P260)*

Tir. 50 egz. 1,25 sp.l. Užsakymo Nr. 97  
Išleido Vilniaus pedagoginis universitetas, Studentų g. 39, LT-2004 Vilnius  
Maketavo ir spausdino VPU leidykla, T. Ševčenkos g. 31, LT-2009 Vilnius  
Kaina sutartinė