



2007–2013 m. Žmogiškųjų išteklių plėtros veiksnių programos 2 prioriteto „Mokymasis visą gyvenimą“ VP1-2.2-ŠMM-09-V priemonės „Studijų programų plėtra Nacionalinėse kompleksinėse programose“

Projektas

„I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

Projekto numeris VP1-2.2-ŠMM-09-V-01-005

PUSLAIDININKIŲ VARŽOS PRIKLAUSOMYBĖS NUO TEMPERATŪROS TYRIMAS

Praktinio užsiėmimo konspektas
magistrantūros programos
„Saulės elementų ir modulių inžinerija“
studentams

Parengė
doc., dr. D. Jasaitis
prof., dr. A. Jukna
dr. V. Valuntaitė

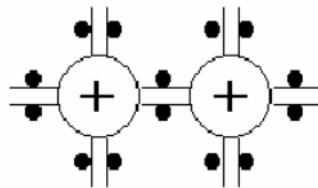
Vilnius 2012

Darbo tikslu šiame darbe yra puslaidininkio termorezistoriaus varžos priklausomybės nuo temperatūros matavimas ir puslaidininkio aktyvacijos energijos skaičiavimas.

Puslaidininkiai – tai medžiagos, kurios pagal laidumą elektros srovei yra tarpinės tarp laidininkų ir dielektrikų. Jų specifinė varža yra nuo 10^{-5} iki $10^7 \Omega \cdot m$. Tai germanis (Ge), silicis (Si), galio arsenidas (GaAs), vario oksidas (Cu_2O) ir kitos medžiagos.

Puslaidininkių laidumas elektros srovei kokybiškai skiriasi nuo metalų laidumo. Laisvųjų krūvininkų metaluose yra apie 10^{22} cm^{-3} , o puslaidininkiuose – apie 10^{12} cm^{-3} . Didėjant temperatūrai, metalų laidumas mažėja, o puslaidininkių – eksponentiškai didėja. Ir atvirkščiai – sumažinus temperatūrą iki 0 K, metalai pasidaro superlaidūs, o puslaidininkiai tampa dielektrikais.

Puslaidininkių laidumas priklauso nuo priemaišų juose, taip pat nuo daugybės išorinių veiksnių: temperatūros, greitųjų dalelių srauto, šviesos srauto, magnetinio lauko, elektrinio lauko. Priemaišos padidina krūvininkų skaičių puslaidininkyje iki 10^{16} cm^{-3} . Puslaidininkiuose kristaluose valentiniai elektronai tarp gretimų atomų sudaro stiprius kovalentinius ryšius. Sudarydamas kovalentinį ryšį su greta esančiu, atomas atiduoda „bendram naudojimui“ vieną savo valentinį elektroną ir lygiai taip pat įsigyja kaimyno elektroną. Kadangi elektronai niekuo nesiskiria vienas nuo kito ir atomai gali pasikeisti elektronais, visi valentiniai elektronai vienodai priklauso visiems kristalo atomams. Paveiksluose tokie kristalai sąlygiškai vaizduojami kaip plokščios figūros (1 pav.). Tuos ryšius suardžius temperatūros, šviesos ar kitokiu poveikiu, puslaidininkis tampa laidus elektros srovei.

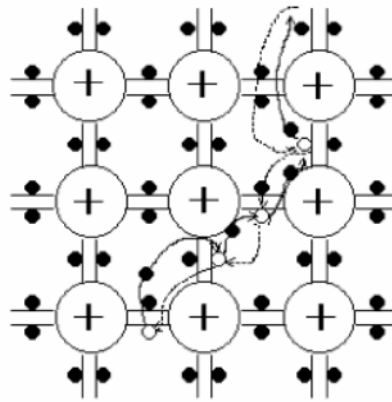


1 pav. Keturvalenčio puslaidininkio kristalo schema.

Elektroninis laidumas. Absoliutiniajam nuliui artimoje temperatūroje visi kristalo atomai susiję kovalentiniais ryšiais, kuriuose dalyvauja visi valentiniai elektronai. Jie vienodai priklauso visiems kristalo atomams ir gali pereiti iš vieno atomo į kitą. Bet kurį elektrono šuolį iš vieno atomo į kitą lydi priešingas šuolis; tiesioginis ir priešingas šuoliai vyksta vienu metu, krūviai juda nekryptingai. Superžemų temperatūrų sąlygomis puslaidininkiuose laisvųjų elektronų nebūna, todėl tokie kristalai elektrai nelaidūs. Kylant temperatūrai, elektronai įgyja papildomos energijos. Tam tikromis sąlygomis elektrono energija pasidaro didesnė už kovalentinio ryšio energiją, ir jis, nutraukęs šį ryšį, pereina į kristalo tarpmazgio erdvę – pasidaro „laisvas“, t. y. tampa neigiamu

krūvininku. Toks elektronas gali laisvai judėti kristalo tarpmazgio erdvėje nepriklausomai nuo kitų elektronų judėjimo.

Skylinis laidumas. Laisvųjų elektronų atsiradimas, kylant temperatūrai, yra tik viena puslaidininkio laidumo priežasčių. Kita priežastis – kristalo valentinių ryšių struktūros pasikeitimas dėl valentinių elektronų šuolių į tarpmazgius. Kiekvienas elektronas, iššokęs į tarpmazgį ir tapęs laisvu elektronu, palieka kristalo valentinių ryšių sistemoje laisvą vietą – „skylutę“. Į tą laisvą vietą gali persokti valentinis elektronas iš bet kurio gretimo atomo. Į šio elektrono vietą savo ruožtu gali pereiti kito atomo elektronas ir t. t. (2 pav.) (Tamsus rutuliukas – elektronas, šviesus – skylutė.).



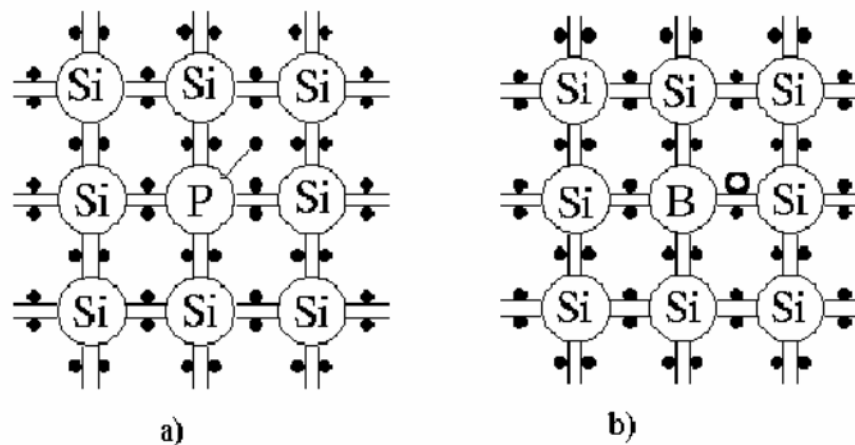
2 pav. Puslaidininkio krūvininko judėjimas

Tokie elektronų šuoliai į likusias laisvas vietas jau nesusiję su būtinais priešpriešiniais šuoliais (tokiais kaip pilnoje kristalo valentinių ryšių sistemoje), todėl atsiranda galimybė kryptingai pernešti krūvį kristalu. Elektronų nuoseklus šuolis į skylutes tolygus pačių skylių šuoliui priešinga kryptimi. Kiekviena skylutė turi teigiamą krūvį, kurio skaitinė vertė lygi elektrono krūviui.

Elektroninį laidumą nulemia laisvųjų elektronų judėjimas kristalo tarpmazgyje, o skylinis laidumas susijęs su elektronų šuoliais iš vieno atomo į kitą kristalo kovalentinių ryšių sistemoje. Toks puslaidininkio elektroninis ir skylinis laidumas vadinamas *savuoju laidumu*.

Priemaišinis puslaidininkio laidumas. Ypač svarbią reikšmę puslaidininkio laidumui turi priemaišos. Jos padidina laisvųjų krūvininkų skaičių kristale dešimtis ir šimtus kartų, nors jų atomų skaičius sudaro tik vieną milijonąją bendrojo atomų skaičiaus dalį. Pavyzdžiui, į silicį įterpiame V grupės elemento fosforo (P) priemaišų. Tuomet fosforo atomai savo keturiais iš penkių valentinių elektronais sudaro kovalentinius ryšius su silicio atomų valentiniais elektronais. O penktasis fosforo valentinis elektronas bus silpniau pririštas prie priemaišos atomo (3 pav. a). Kylant temperatūrai, jis

lengvai išsilaisvina. Puslaidininkiai, kurių laidumas, įterpus priemaišas, padidėja laisvųjų elektronų atsiradimo dėka, vadinami elektroninio laidumo puslaidininkiais, arba, sutrumpintai, n – tipo puslaidininkiais. Į silicio kristalą įterpus III grupės elemento, pvz. boro (B), priemaišų, trys boro atomo valentiniai elektronai sudarys kovalentines jungtis su trimis kaimyniniais Si atomais, o ketvirtoji jungtis bus nepilna (3 pav. b). Padidinus temperatūrą, Si atomų ryšio elektronas pereina į neužpildytą priemaišos atomo ryšį, priemaiša tampa neigiamu jonu, o toje vietoje, iš kurios išėjo elektronas atsiranda skylutė, kuri laisvai judėdama kristalu gali pernešti krūvį. Puslaidininkiai, kurių laidumas, įterpus priemaišas, padidėja skylių dėka, vadinami skylinio laidumo puslaidininkiais, arba p – tipo puslaidininkiais. Priemaišos, kurios padidina elektronų skaičių kristale, vadinamos donorinėmis, o kurios padidina skylių skaičių – akceptorinėmis. Puslaidininkinės medžiagos, kuriose yra donorinių ar akceptorinių priemaišų, vadinamos legiruotomis.



3 pav. Silicio kristalas: a) su fosforo (donorinėmis) priemaišomis; b) su boro (akceptorinėmis) priemaišomis.

Realiame puslaidininkyje yra ne tik pagrindiniai krūvininkai, būdingi to tipo puslaidininkiui, bet ir šiek tiek šalutinių. Pavyzdžiui, n – tipo silicio kristale pagrindiniai krūvininkai yra elektronai, tačiau yra ir skylių, kurios atsiranda dėl medžiagos dalelių judėjimo, suirus kovalentiniams ryšiams. Šalutinių krūvininkų yra žymiai ($10^6 \div 10^{10}$ karto) mažiau nei pagrindinių. Didinant priemaišų kiekį, pagrindinių krūvininkų skaičius didėja, o šalutinių mažėja.

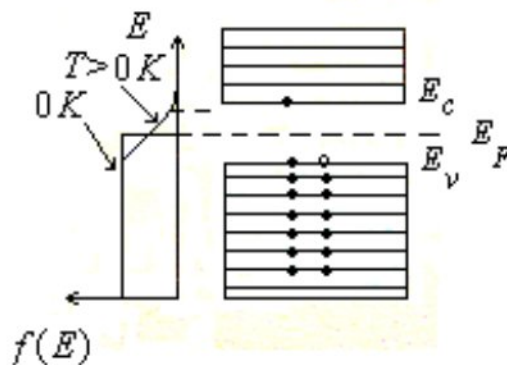
Puslaidininkių laidumo temperatūrinė priklausomybė. Iš valentinių elektronų būsenų susidariusios valentinės juostos puslaidininkiuose ir dielektrikuose absoliutaus nulio temperatūroje yra užpildytos: visos galimos būsenos yra užimtos, o aukštesniųjų energijų juostos yra tuščios, bet atskirtos didesne (dielektriku) ar mažesne (puslaidininkiu) draustinių energijų juosta E_g . Šis santykinis skirstymas atliekamas palyginant E_g su elektronų toje temperatūroje vidutine energija kT (dielektrikams $E_g \gg kT$) Gi metalų didžiausių energijų juostoje yra laisvų būsenų, ir elektronai gali

keisti savo energiją vien nestipraus elektrinio lauko veikiami – medžiagoje krūvininkai gali judėti. Puslaidininkiuose aukščiausia užpildyta juosta, kai $T = 0 K$, vadinama valentine, o pirmoji tuščia galimų energijų juosta yra laidumo juosta.

Kaip elektronai užpildo leistinų energijų juostas, kai $T > 0 K$ nurodo Fermio ir Dirako (Fermi, Dirack) skirstinys:

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/kT} + 1} \quad (1)$$

Čia E_F yra Fermi energija arba Fermi lygmens energija, o $f(E)$ yra nuo elektrono energijos priklausanti tikimybė, kad šis lygmuo yra užimtas. E_F yra lygi didžiausiai krūvininkų kristaluose energijai, kurią šie gali užimti, kai $T = 0 K$. Iš kitos pusės, nepriklausomai nuo temperatūros, kai $E = E_F$, $f(E) = 1/2$, taigi tai energija tokio energinio lygmens, kurį užimti tikimybė lygi $1/2$. Fermio funkcijos grafikas pateiktas 4 pav., kur kartu pavaizduotas ir elektronų pasiskirstymas, kai $T > 0 K$.



4 pav. Fermio funkcijos grafikas ir elektronų pasiskirstymas esant $T > 0 K$

Kai temperatūra didėja, elektronų energijos pakanka, kad jie peršoktų draustinių energijų juostą, taptų laisvi, atitrūkdami nuo atomų, t.y. būtų sužadinti – pereitų iš valentinės juostos viršutinio lygmens E_v į laidumo juostos dugną E_c . Taip savajame, nepriemaišiniame puslaidininkyje atsiranda dviejų rūšių elektros krūvininkai: elektronai laidumo juostoje ir skylės, teigiamos kvazidalelės, valentinėje juostoje. Skylės elektriniame lauke juda taip, kad į tą vietą, kur buvo elektronas ir susidarė skylė, gali pereiti elektronas iš kito lygmens, o skylė atsiranda tame lygmenyje, iš kur atėjo elektronas ir t.t. Tai ekvivalentiška skylės „grimzdimui“ į valentinės juostos gilumą veikiant elektriniam laukui. Elektronų sudaromas laidumas vadinamas elektroniniu (n tipo), o skylių sudaromas laidumas yra skylinis (p tipo). Savojo laidumo puslaidininkyje elektronų koncentracija n_e yra lygi skylių koncentracijai p_p .

Dažnai puslaidininkyje susidaro tokios sąlygos, kad $E_F = \frac{1}{2} E_g$ ir Fermio energija yra draustinių energijų juostos viduryje. Todėl supaprastintai galima manyti, kad Fermio energija atspindi vidutinę laisvųjų krūvininkų energiją.

Teorija leidžia apskaičiuoti pusiausvyrinę elektronų ir skylių koncentraciją neišsigimusiuose (klasikiniamis fizinės statistikos dėsniais paklūstančiuose) puslaidininkuose:

$$n_e = N_c e^{-E_g/2kT}, p_p = N_v e^{-E_g/2kT}. \quad (2)$$

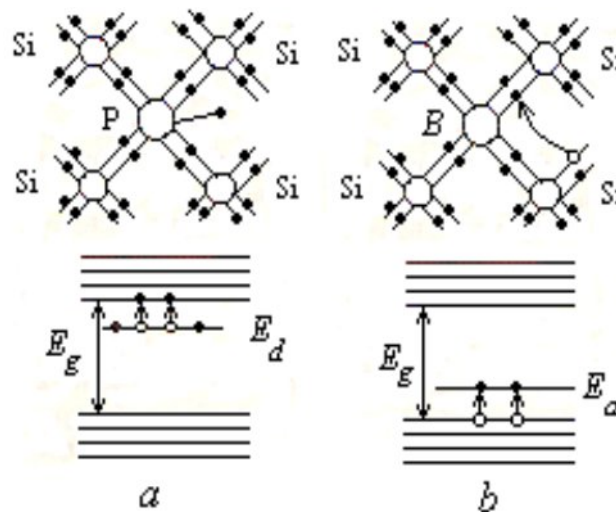
Čia N_c ir N_v yra efektyvus būsenų tankis laidumo ir valentinėje juostose, k – Bolcmano konstanta. Taigi, laisvųjų krūvininkų skaičius puslaidininkyje eksponentiškai didėja kylant temperatūrai. Elektrinis laidumas σ pagal klasikinį apibrėžimą yra lygus dalelių krūvio e , jų koncentracijos n ir krūvininkų judrumo μ (lygaus krūvininkų greičiui įgytam vienetinio stiprio elektriniame lauke v/E) sandaugai:

$$\sigma = en\mu. \quad (3)$$

Todėl judrumui silpnai priklausant nuo temperatūros savojo laidumo puslaidininkui galima parašyti, kad laidumas priklauso nuo temperatūros panašiai, kaip ir krūvininkų koncentracija:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_g/2kT}. \quad (4)$$

Priemaišos, t.y. atomai, kurių valentingumas skiriasi nuo pagrindinio kristalo atomų valentingumas, lemia, kad draustinių energijų juostoje gali susidaryti papildomi donoriniai E_d (5 pav. a) arba akceptoriniai E_a (5 pav. b) lygmenys.



5 pav. Draustinių energijų juostoje susidarę papildomi donoriniai E_d (a) arba akceptoriniai E_a (b) lygmenys.

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

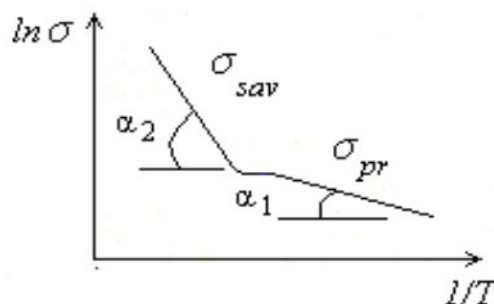
Donorinių priemaišų atomai (pav. P į Si) turi valentinių elektronų daugiau, nei pagrindiniai atomai, todėl kovalentinių ryšių sudarymui jie tampa nebereikalingi ir lengvai atitrūksta nuo atomų. Taip atsiranda vieno ženklo krūvininkai, nes pasilikusi teigiama sritis yra susijusi su atomu ir judėti negali. Kitaip yra, jei į gardelę įterpiami akceptoriniai atomai, kurių valentingumas yra mažesnis (pav. B į Si), nei pagrindinių atomų. Trijų boro elektronų nepakanka sudaryti kovalentinį ryšį su kaimyniniais pagrindiniais atomais, ir vienas ryšių lieka nesukomplektuotas. Šis ryšis gali pagauti elektroną. Jei elektronas pagaunamas iš gretimo ryšio, toje vietoje atsiranda skylė, kuri savo ruožtu gali pagauti elektroną iš dar tolimesnio ryšio. Taip skylė gali klajoti po kristalą, o „prisiplakęs“ prie atomo elektronas susijęs su priemaišiniu atomu judėti negali, todėl tokiuose puslaidininkiuose susidaro tik teigiami krūvininkai – skylės.

Svarbūs tie donorinių priemaišų sąlygoti energiniai lygmenys, kurių sužadanimui reikia mažesnės energijos, nei draustinių energijų juosta, t.y. tie, kurie yra arčiau laidumo juostos, ir tie akceptoriniai lygmenys, į kuriuos iš valentinės juostos yra lengviau patekti elektronams, kad valentinėje juostoje susidarytų elektronų trūkumas – skylės. Dėl tokių krūvininkų susidarymo „vidutinė“ krūvininkų energija (ją atspindi Fermio lygmuo) pakinta, elektronų prisotintuose kristaluose Fermio lygmuo nuslenka arčiau laidumo juostos dugno, o akceptoriniuose – arčiau valentinės juostos.

Žemose temperatūrose laidumą lemia priemaišiniai krūvininkai, o aukštesnėse, kai priemaišinis laidumas pasiekia sotes vertę, laidumą ima lemti savasis puslaidininkių laidumo mechanizmas. Bendruoju atveju laidumą galima išreikšti priemaišinio ir savojo laidumų suma:

$$\sigma = \sigma_{sav} + \sigma_{pr} = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{2kT}} + \sigma_{pr0} e^{-\frac{E_{a,d}}{2kT}}. \quad (5)$$

Pastarojoje lygtyje $E_{a,d}$ yra donorų arba akceptorių sužadavimo energijos. Išmatavus laidumo priklausomybę nuo temperatūros (5) galima praktiškai įvertinti priemaišų energinius parametrus (tangentas polinkio $\alpha_1 = f(E_{a,d})$) arba draustinių energijų plotį (tangentas polinkio $\alpha_2 = f(E_g)$) (6 pav.).



6 pav. Priemaišinio elektrinio laidumo logaritmo priklausomybės nuo atvirkštinės temperatūros.

Puslaidininkių varžos priklausomybė nuo temperatūros. Puslaidininkių elektroninį laidumą lemia laidumo juostoje esantys elektronai ir valentinėje juostoje esančios skylės. Chemiškai gryniems puslaidininkiams elektronų ir skylių koncentracijos vienodos. Tokie puslaidininkiai vadinami savaisiais, o jų elektrinis laidumas vadinamas savuoju. Jei $T = 0$, tokie puslaidininkiai yra idealūs dielektrikai, o jų varža be galo didelė. Kai $T > 0$, jų varža mažėja didėjant temperatūrai. Varžos priklausomybė nuo temperatūros aprašoma formule:

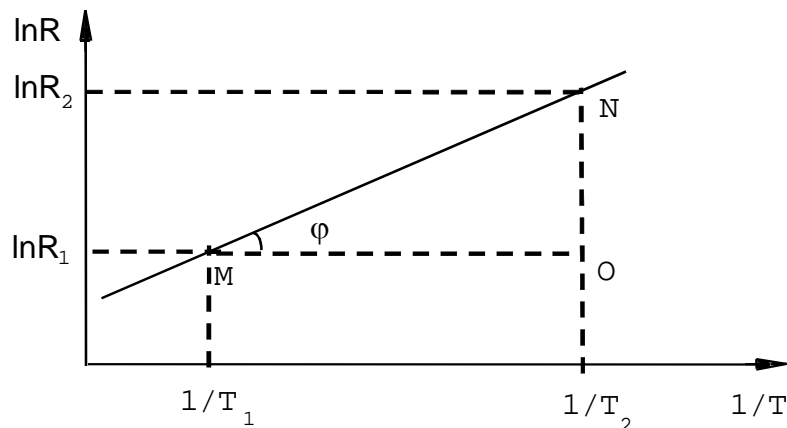
$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E_0}{2kT}}, \quad (6)$$

čia ΔE_0 – puslaidininkio aktyvacijos energija, T – absoliutinė temperatūra, k – Bolcmano konstanta, R_0 – konstanta (ji lygi minimaliai galimai puslaidininkio varžai). Sulogitnavus abi lygybės puses:

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta E_0}{2kT}. \quad (7)$$

Matyti, kad varžos natūrinis logaritmas yra tiesinė atvirkštinės temperatūros funkcija.

Vadinasi grafiškai pavaizdavę $\ln R = f\left(\frac{1}{T}\right)$, gauname tiesę (7 pav.).



7 pav. Priklausomybė $\ln R = f\left(\frac{1}{T}\right)$ puslaidininkiams.

Tiesės palinkimo į abscisės ašį kampo φ tangentas:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{ON}{OM} = \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} = \frac{\Delta E_0}{2k}. \quad (8)$$

Iš (8) gauname aktyvacijos energiją:

$$\Delta E_0 = 2kTg\varphi = 2k \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}. \quad (9)$$

Jei puslaidininkis elektroninis, jame dominuoja laidumas, sąlygojamas elektronais, sužadinamais iš donorinių priemaišinių lygmenų į laidumo juostą, arba skylinis, sąlygojamas skylėmis valentinėje juostoje, susidarantiomis sužadinant elektronus iš valentinės juostos į priemaišinius akceptorinius lygmenis. Šiuo atveju, esant žemesnėms temperatūroms, puslaidininkio varža priklauso nuo priemaišinių lygmenų aktyvacijos energijos ΔE_{pr} , nes $\Delta E_{pr} < \Delta E_0$ ir išreiškiama lygybe:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E_{pr}}{2kT}}, \quad (10)$$

o esant aukštesnėms temperatūroms varžos priklausomybė nuo temperatūros bus kaip ir savojo puslaidininkio (6). Sulogitavus (10) lygtį gauname analogišką varžos logaritmo priklausomybę nuo atvirkštinės temperatūros, tik šiuo atveju tiesės polinkio kampas φ_1 bus mažesnis. Iš jo galime rasti lygmens aktyvacijos energiją:

$$\Delta E_{pr} = 2kTg\varphi_1 = 2k \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}. \quad (11)$$

Darbo priemonės šiame darbe yra termorezistorius, termostatas (krosnelė), termometras, autotransformatorius, Vitstono tiltelis, srovės šaltinis.

Puslaidininkio varža matuojama ommetru arba Vitstono tilteliu. Išmatuojama pradinė varža ir temperatūra. Įjungiamas termostato (krosnelės), kuriame yra termorezistorius kaitinimas. Išmatuojama varžos priklausomybė nuo temperatūros, tam tikrais temperatūrų intervalais. Nubrėžiama priklausomybė $\ln R = f\left(\frac{1}{T}\right)$. Remiantis (9) ir (11) formulėmis apskaičiuojami ΔE_0 ir ΔE_{pr} (jei T nedidelis, tai tik ΔE_{pr}).

Rekomenduojamos temos ir klausimai diskusijoms:

1. Energinės juostos kietuosiuose kūnuose;
2. Kietųjų kūnų skirstymas į laidininkus, puslaidininkius, ir dielektrikus juostinės teorijos požiūriu;
3. Savasis, elektroninis ir skylinis puslaidininkio laidumai. Jų aiškinimas;

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų
proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

4. Aktyvacijos energija; jos prasmė ir nustatymo metodika.

Literatūra:

1. A. Bogdanovičius. Fizikos pagrindai inžinerijoje. II dalis: vadovėlis. Vilnius: Technika, 2010, 326 p.
2. B. Martinėnas. Fizika: vadovėlis. Vilnius: Technika, 2008, 384 p.
3. R. A. Bendorius. Elektromagnetizmas. Šiuolaikinės fizikos pradmenys: mokojoji knyga. Vilnius: Technika, 2009., 133 p.
4. A. Juodviršis, M. Mikalkevičius, S. Vengris. Puslaidininkų fizikos pagrindai. Vilnius: Mokslas. 1985, 352 p.
5. A. Tamašauskas, J. Vosylius, I. Požela. Fizika. 4 t. Vilnius: Mokslas. 1995, 176 p.