

8/9. Metalų ir puslaidininkių elektrinio laidumo priklausomybės nuo temperatūros tyrimas

Užduotis.

1. Ištirti metalų savitosios varžos priklausomybę nuo temperatūros.
2. Apskaičiuoti temperatūrinius varžos koeficientus.
3. Ištirti puslaidininkio elektrinio laidžio priklausomybę nuo temperatūros.
4. Apskaičiuoti krūvininkų terminės aktyvacijos energiją.

Pagrindiniai teoriniai klausimai.

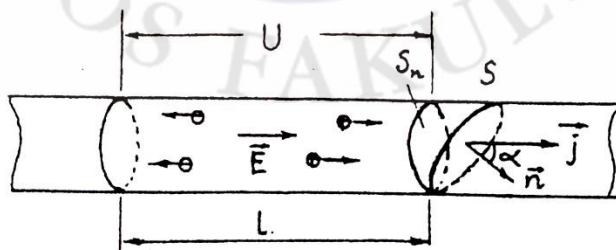
1. Metalų elektrinės savybės.
2. Klasikinis elektrinio laidumo modelis.
3. Metalų kvantinės elektrinio laidumo teorijos pagrindiniai bruožai.
4. Puslaidininkių būdingosios elektrinės savybės.
5. Savitasis puslaidininkių elektrinis laidumas.
6. Donorinės ir akceptorinės priemaišos bei priemaišiniai energijos lygmenys.
7. Krūvininkų tankio ir judrio priklausomybė nuo temperatūros.

Fizikiniai parametrai, charakterizuojantys krūvio pernašą

Elektros srovė – kryptingas elektros krūvių judėjimas. Medžiagoje krūvininkai dreifuoja veikiami elektrinio lauko ir dalyvauja chaotiniame šiluminiame judėjime. Krūvio pernašos spartą apibūdina fizikinis dydis, vadinamas elektros srovės stipriu. Jeigu per laiką Δt pro laidininko skerspjūvio plotą S_n pratekėjo krūvis Δq , tai srovės stipris

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (1)$$

Taigi, elektros srovės stipris parodo, koks elektros krūvis prateka pro laidininko skerspjūvio plotą per laiko vienetą. Elektros srovės kryptimi sutarta laikyti teigiamų krūvininkų judėjimo kryptį.



1 pav. Krūvininkų dreifo laidininke schema

Tarkime, kad krūvininkų vidutinis dreifo greitis v_d . Per laiką Δt visi krūvininkai nudreifuos kelią $l = v_d \Delta t$. Tokiu atveju pro skerspjūvio plotą S_n pratekės krūvis

$$\Delta q = q_e n l S_n. \quad (2)$$

čia q_e - krūvininko krūvis, n – krūvininkų tankis. Įrašę (2) į (1) gausime, kad

$$I = q_e n v_d S_n . \quad (3)$$

Jeigu laidininko įstrižo pjūvio plotas S , tai $S_n = S \cos \alpha$, o

$$I = q_e n v_d S \cos \alpha . \quad (4)$$

čia α - kampas tarp dreifo greičio ir ploto S normalės \vec{n} .

Fizikinis dydis, parodantis, koks srovės stipris atitinka laidininko skerspjūvio ploto vienetą, vadinamas srovės tankiu. Jo absoliučioji vertė

$$j = \frac{I}{S_n} . \quad (5)$$

Srovės tankis – vektorinis dydis, turintis dreifo greičio kryptį. Iš (5) ir (3) lygčių gausime, kad

$$\vec{j} = q_e n \vec{v}_d . \quad (6)$$

Išraišką (4) galima užrašyti skaliarinės sandaugos pavidalu:

$$I = (\vec{j} \vec{S}) . \quad (7)$$

čia $\vec{S} = S \cdot \vec{n}$. (\vec{n} – vienetinis vektorius, statmenas paviršiui S).

Dreifo greitis proporcingas elektrinio lauko stipriui \vec{E} , todėl užrašysime

$$\vec{v}_d = u \vec{E} . \quad (8)$$

Proporcingumo koeficientas u vadinamas krūvininkų judriu. Judrio vertė parodo, koks dreifo greitis atitinka vienetinį elektrinio lauko stiprį.

Galima priimti, kad, atsiradus elektriniam laukui, dreifo greitį v_d krūvininkas įgyja per vidutinį laiką τ . Tokiu atveju vidutinis pagreitis

$$a = \frac{v_d}{\tau} . \quad (9)$$

Krūvininką veikia jėga $\vec{F} = q_e \vec{E}$. Jeigu jo masė m , tai pagal antrąjį Niutono dėsnį

$$a = \frac{q_e E}{m} . \quad (10)$$

Iš (10), (9) ir (8) lygčių gausime, kad dreifo greitis

$$v_d = \frac{q_e}{m} \tau E . \quad (11)$$

o judris

$$u = \frac{q_e}{m} \tau . \quad (12)$$

Nustojus veikti elektriniam laukui, krūvininkai praranda greitį v_d per laiką τ , sąveikaudami su laidininko atomais. Šis laikas vadinamas relaksacijos arba vidutine laisvojo lėkio trukme.

Omo dėsnis

Omo dėsnis teigia, kad srovės stipris proporcingas potencialų skirtumui laidininko galuose (elektrinei įtampai):

$$I = GU . \quad (13)$$

Proporcingumo koeficientas G vadinamas elektriniu laidžiu. Dydis, atvirkščias elektriniam laidžiui vadinamas elektrine varža:

$$R = \frac{1}{G}. \quad (14)$$

Atsižvelgę į (14) užrašysime

$$I = \frac{U}{R}. \quad (15)$$

Elektrinės varžos SI vienetas vadinamas omu (Ω). Laidininko varža lygi vienam omui, jeigu esant vieno volto elektrinei įtampai juo teka vieno ampero stiprio srovė. Elektrinio laidžio SI vienetas vadinamas simensu (S). Laidininko varža tiesiai proporcinga laidininko ilgiui l ir atvirkščiai proporcinga jo skerspjūvio plotui:

$$R = \rho \frac{l}{S_n}. \quad (16)$$

Proporcingumo koeficientas ρ vadinamas savitąja elektrine varža. Įrašę (16) išraišką į (15) gausime

$$I = \sigma \frac{U}{l} S_n. \quad (17)$$

čia $\sigma = \frac{1}{\rho}$ – savitasis elektrinis laidis. Kadangi $\frac{U}{l} = E$, tai

$$I = \sigma E S_n. \quad (18)$$

o srovės tankis

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}. \quad (19)$$

Pastaroji lygtis išreiškia Omo dėsnį diferencialine forma: srovės tankis proporcingas elektrinio lauko stipriui. Panaudoję (19), (8) ir (6) lygtis gausime, kad savitasis elektrinis laidis

$$\sigma = q_e n u. \quad (20)$$

Taigi, laidininko savitasis elektrinis laidis tiesiai proporcingas krūvininko krūviui, krūvininkų tankiui ir judriui.

Darbo eiga

Matavimas

1. Įjunkite kompiuterį ir palaukite, kol jis visiškai pasikraus.
2. Įjunkite sąsajos maitinimą.
3. Paleiskite programą „ConductionT“.
4. Norėdami pradėti matavimus, programos lange paspauskite „Start“.
5. Įjunkite šildymo krosnelių maitinimus. Eksperimento metu stebėkite termometrų ir matavimo programos rodmenis bei užsirašykite keletą kontrolinių verčių. Matavimo programos lange brėžiamos temperatūrinės medžiagų elektrinio laidumo kreivės $G(T)$. Temperatūros T rodmenys fiksuojami $^{\circ}\text{C}$, o medžiagų elektrinio laidumo G rodmenys – mS.
6. Metalinius bandinius kaitinti neviršijant 140°C , o puslaidininkinį – neviršijant 180°C .
7. Sulaukę norimos temperatūros, krosnelių maitinimus išjunkite ir sustabdykite matavimus programos lange spausdami mygtuką „Stop“.

Matavimo duomenų saugojimo būdas

1. Programos lange pasirinkite laukelį „File; byla“ ir tuomet spauskite „Save as; saugoti“. Tuomet atsidarys langas puslaidininkio bandinio matavimo duomenų išsaugojimui. Jame įveskite duomenų bylos pavadinimą ir spauskite „Save“. Automatiškai atsidarys toks pat langas metalų bandinių matavimų duomenų išsaugojimui. Įrašykite jiems naują pavadinimą ir spauskite „Save“. Bylos bus išsaugotos .txt formatu tame pat kataloge, kuriame veikia matavimo programa. Viename failo stulpelyje bus atidėtos bandinio temperatūros vertės, o kitame bandinio elektrinis laidumas ties atitinkama temperatūra.

2. Išjunkite programą paspausdami „Close; uždaryti“.
3. Išjunkite sąsajos matinimą.
4. Sutvarkykite darbo vietą.

Duomenų apdorojimas

I dalis (metalai)

1. Apskaičiuokite ištirtų metalų savitąsias varžas ρ kiekvienoje temperatūroje ir grafiškai pavaizduokite jų temperatūrinę priklausomybę $\rho(T)$. Matuota priklausomybė $G(T)$ su $\rho(T)$ susijusi taip:

$$\rho = \frac{S}{Gl}. \quad (21)$$

čia S – bandinio skerspjūvio plotas, l – bandinio ilgis, G – bandinio elektrinis laidumas.

2. Nelabai dideliuose temperatūrų intervaluose metalų savitoji varža nuo temperatūros priklauso tiesiškai, tad gautąsias priklausomybes aproksimuokite tiesėmis.

3. Iš šių priklausomybių įvertinkite metalų savitosios varžos temperatūrinius koeficientus:

$$\alpha = \frac{d\rho}{\rho dT}. \quad (22)$$

čia $\frac{d\rho}{dT}$ - metalų savitosios varžos temperatūrinių priklausomybių $\rho(T)$ tiesinių aproksimacijų

krypties koeficientai, o ρ – metalų savitosios varžos pradinėje (kambario) temperatūroje.

4. Palyginkite ištirtųjų metalų elektronų judrius pradinėje temperatūroje, manydami, kad atomų ir elektronų koncentracijos (n_A ir n) yra vienodos.

Atomų koncentraciją n_A su masės tankiu ρ_m sieja ryšys:

$$n_A = \frac{\rho_m}{M} N_A. \quad (23)$$

čia M – medžiagos molinė masė, N_A – Avogadro skaičius.

Tokiu atveju, pagal (23) ir (20), savitasis elektrinis laidis

$$\sigma = \frac{\rho_m}{M} N_A q_e u. \quad (24)$$

o elektronų judris

$$u = \frac{\sigma M}{\rho_m N_A q_e}. \quad (25)$$

Kadangi $\sigma = \frac{1}{\rho}$, tai pasinaudoję (21) gauname, kad elektronų judris

$$u = \frac{GM}{S\rho_m N_A q_e}. \quad (26)$$

čia G – bandinio elektrinis laidumas, išmatuotas pradinėje temperatūroje.

5. Palyginkite ištirtųjų metalų elektronų dreifinius greičius pradinėje temperatūroje.

Jeigu įtampa laidininke lygi U , tai lauko stipris jame $E = \frac{U}{l}$. Judrį su dreifo greičiu v_d sieja ryšys (8),

todėl

$$v_d = \frac{GMU}{\rho_m N_A q_e S}. \quad (27)$$

6. Palyginkite ištirtųjų metalų elektronų relaksacijos (laisvojo lėkio) trukmes pradinėje temperatūroje.

Tam pravers (11) sąryšis, siejantis elektronų dreifo greitį su jų relaksacijos trukme. Tuomet elektronų relaksacijos trukmė:

$$\tau = \frac{v_d m_e l}{q_e U}. \quad (28)$$

Į (29) įsistatę (27) gauname, kad elektronų relaksacijos trukmė:

$$\tau = \frac{GMm_e}{S\rho_m N_A q_e^2}. \quad (29)$$

čia G – bandinio elektrinis laidumas, išmatuotas pradinėje temperatūroje.

7. Suformuluokite išvadas.

II dalis (puslaidininkis)

1. Išmatuotą puslaidininkio elektrinio laidžio priklausomybę nuo temperatūros $G(T)$ konvertuokite į jo savitojo elektrinio laidžio priklausomybę nuo temperatūros $\sigma(T)$ ir ją pavaizduokite grafiškai ordinačių ašyje atidedami $\lg \sigma$, o abscisių – $\frac{1}{T}$ reikšmes. Formulė konvertavimui:

$$\sigma = \frac{Gl}{S}. \quad (30)$$

Toks atvaizdavimo būdas pasirenkamas dėl to, kad puslaidininkių elektriniam laidžiui būdinga eksponentinė priklausomybė nuo temperatūros, kuri matematiškai gali būti išreikšta tokiu pavidalu:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{\alpha k T}}. \quad (31)$$

čia σ_0 ir α – konstantos, ΔE – terminė aktyvacijos energija, k – Bolcmano konstanta, T – absoliučioji temperatūra.

Išlogaritmavę (31) gauname tiesinę kintamojo $\frac{1}{T}$ funkciją:

$$\lg \sigma = \lg \sigma_0 - \frac{\Delta E}{\alpha k T} \lg e. \quad (32)$$

Šios funkcijos parametrai priklauso nuo temperatūros intervalo. Savitojo laidumo atveju $\alpha=2$, o priemaišinio – dažniausiai $\alpha=1$, tačiau gali kisti iki 2. Tokią laidžio priklausomybę nuo temperatūros

lemia krūvininkų koncentracijos kitimas. Judrio priklausomybė nuo temperatūros daug silpnesnė. Kambario ir aukštesnėse temperatūrose ji nusakoma $u \sim T^{-3/2}$ funkcija.

2. Terminę aktyvacijos energiją raskite aproksimavę gautąją priklausomybę tiese. Jos krypties koeficientas išreiškiamas iš (32) formulės:

$$A = -\frac{\Delta E}{\alpha k} \lg e. \quad (33)$$

Tuomet aktyvacijos energija:

$$\Delta E = -\frac{A\alpha k}{\lg e}. \quad (34)$$

Literatūra.

1. A. Medeišis „Mechanika, molekulinė fizika, elektra ir magnetizmas. Fizikos praktikumas.“, Vilnius, *Vilniaus universiteto leidykla*, 2000.
2. A. Matvejevas, „Elektra ir magnetizmas“, Vilnius, *Mokslas*, 1991.
3. V. Rinkevičius, „Elektra ir magnetizmas“, Vilnius, *Vilniaus universiteto leidykla*, 2001.