

VILNIAUS UNIVERSITETAS

FIZIKOS FAKULTETAS

Laboratorinis darbas Nr.6

PRAMUŠIMAI PN SANDŪROJE

Vilnius, 2015

TURINYS

| | |
|--|-----------|
| Darbo tikslas | 3 |
| Darbo uždutys | 3 |
| Kontroliniai klausimai | 3 |
| Literatūra | 3 |
| 1. Teorinė medžiaga..... | 4 |
| 1.1. Sandūros pramušimas..... | 4 |
| 1.2 Šiluminio pramušimo mechanizmas..... | 4 |
| 1. 3 Tunelinis pramušimas..... | 5 |
| 1. 4 Griūtinis pramušimas..... | 6 |
| 2. Darbo schema ir matavimų eiga..... | 10 |

Darbo tikslas

Susipažinti su pramušimo reiškinių mechanizmais ir jų tyrimo būdais.

Darbo užduotys

1. Detaliai išmatuoti tiriamųjų pn sandūrų (taip pat ir dviejų priešpriešiais sujungtų pn sandūrų) voltamperines charakteristikas atgaline kryptimi pramušimo srityje keliose temperatūrose intervale nuo 20 °C iki 100°C.
2. Nustatyti temperatūrinius pramušimo įtampų koeficientus ir pramušimo fizikinius mechanizmus.

Kontroliniai klausimai

1. Ką parodo dauginimo faktorius?
2. Nurodykite sąlygas, reikalingas tuneliniam pramušimui vykti.
3. Kokia yra šiluminio pramušimo sąlyga?
4. Paaiškinti pn sandūros griūtinio pramušimo energijos juostų schemą.
5. Kaip kinta pramušimo įtampa nuo temperatūros skirtingų pramušimų atvejais?

Literatūra

1. Я.А. Федотов Основы физики полупроводниковых приборов, М., Госэнергоиздат, 1963.
2. В.В. Пасынков и др. Полупроводниковые приборы. М., "Высшая школа", 1966.

1. Teorinė medžiaga

1.1. Sandūros pramušimas

Esant pakankamai stipriems laukams, prijungtiems atgaline kryptimi prie pn sandūros, diodas tampa laidus srovei ir atgaline kryptimi. Toks reiškinys vadinamas sandūros pramušimu. Fizikinės sandūros pramušimo priežastys gali būti: šiluminis efektas, tunelinis pramušimas ir griūtinis pramušimas.

1.2 Šiluminio pramušimo mechanizmas

Jį sąlygoja Džaulio - Lenco šiluma, išsiskirianti sandūroje, kai per ją teka srovė. Dėl to sandūros temperatūra padidėja, padidėja krūvininkų tankis ir savo ruožtu vėl padidėja srovė per sandūrą. Toks procesas gali peraugti į srovės didėjimo griūtį, t.y., sandūros pramušimą, jei tik iš srovės įgytas šilumos kiekis viršija šilumos kiekį, kurį sandūra atiduoda aplinkai.

Panagrinėkime sandūros šiluminį balansą. Terminas "balansas" reiškia, kad išsiskiriantis sandūroje šilumos kiekis yra lygus atiduotam aplinkai šilumos kiekiui. Sandūroje išsiskiriantis šilumos kiekis per laiko vienetą yra:

$$P_1 = V_a I_R,$$

o atiduodamas šilumos kiekis:

$$P_2 = \frac{T - T_a}{R_T};$$

čia T - pn sandūros temperatūra, T_a - aplinkos temperatūra, R_T - šiluminė varža tarp sandūros ir aplinkos. Iš diodo atgalinės srovės išraiškos žinome, kad atgalinės srovės I_R narys, labiausiai priklausantis nuo temperatūros, yra

$$n_i^2 \sim \exp\left(\frac{E_C - E_V}{kT}\right),$$

todėl šiluminio balanso lygtis yra šitokia:

$$V_a I_{R0} \exp\left(\frac{E_C - E_V}{kT}\right) = \frac{T - T_a}{R_T}. \quad (1)$$

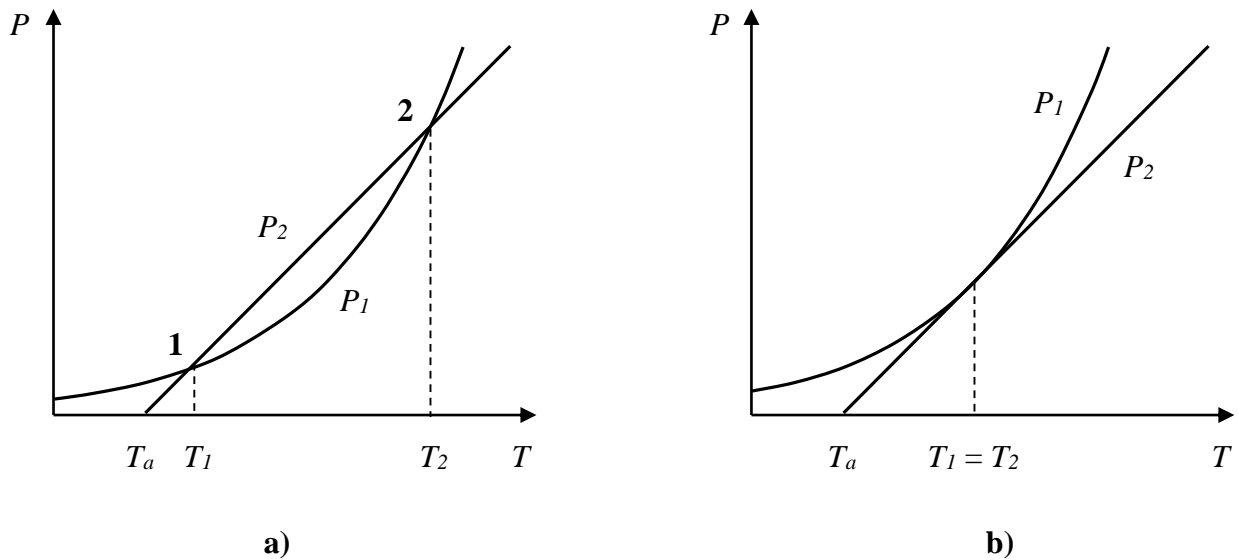
Išsprendę šią lygtį T atžvilgiu, gausime nusistovėjusią sandūros temperatūrą, esant bet kuriai įtampai. Grafinis (1) lygties sprendimas parodytas 1 pav. Sprendinį gavome nubrėžę (1) lygties kairiosios ir dešinėsios pusių temperatūrinės priklausomybes. Šių kreivių susikirtimo taškai ir yra lygties šaknys.

Pirmasis susikirtimo taškas ties T_I atitinka nuolatinę šiluminę pusiausvyrą. Tegul atsitiktinai sandūros temperatūra pasidarys mažesnė už T_I . Tada atiduotos aplinkai šilumos kiekis P_2 pasidaro mažesnis už įgytą šilumos kiekį P_1 (nes kreivė P_2 yra žemiau negu kreivė P_1) ir todėl sandūra įgyja

šilumos kiekį, reikalingą pasiekti temperatūrai T_1 . Jeigu sandūros temperatūra kiek pakyla virš T_1 , tai $P_1 > P_2$ ir sandūra atvėsta.

Antrasis susikirtimo taškas ties T_2 atitinka nenuolatinę šiluminę pusiausvyrą, nes net ir mažai padidėjus sandūros temperatūrai virš T_2 sandūra kaista neribotai, t.y. sandūra suyra.

Didinant sandūros įtampą, temperatūros T_1 ir T_2 artėja viena prie kitos, kol pagaliau susilygina



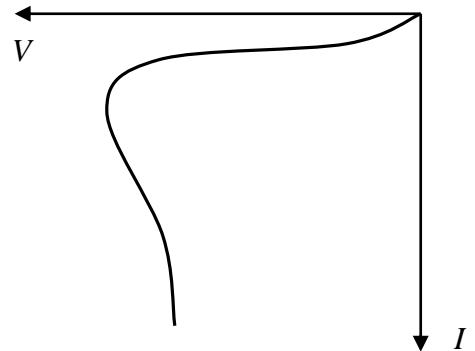
1 pav. Grafinis pn sandūros temperatūros nustatymas: a) sandūros įtampa mažesnė negu šiluminio pramušimo įtampa V_T ; b) sandūros įtampa lygi V_T .

(1b pav.). Šiuo atveju sandūra veikia nestabiliai. Įtampa, atitinkanti tokią situaciją, vadinama šiluminio pramušimo įtampa. Jos vertę galima rasti išsprendus (1) lygtį T ir V_a atžvilgiu ir užrašius kreivių P_1 ir P_2 lietimosi sąlygą:

$$\frac{\partial P_1}{\partial T} = \frac{\partial P_2}{\partial T}. \quad (2)$$

Bendras sprendinys gana grioždiškas, o diodo voltamperinė charakteristika atgaline kryptimi, esant šiluminiam pramušimui, pavaizduota 2 pav.

Šiluminis pramušimas gali diodą suardyti, todėl praktikoje vengtinas. Dioduose, kurių atgalinės srovės palyginti didelės (pvz., Ge), šiluminis pramušimas galimas jau kambario temperatūroje. Žemose temperatūrose ir dioduose su mažomis atgalinėmis srovėmis (pvz., Si) jis mažai tikėtinas, tuomet pasireiškia kiti sandūros pramušimo mechanizmai.



2 pav. Diodo voltamperinė charakteristika, esant šiluminiam pramušimui.

1.3 Tunelinis pramušimas

Tunelinis efektas yra kvantinės mechanikos reiškiny. Žinome, kad elektrono tikimybė pereiti tunelinio būdu per stačiakampį E_0 aukščio ir W pločio barjerą yra:

$$T_t = \left[1 + \frac{E_0 \operatorname{sh}^2(\beta W)}{4E(E_0 - E)} \right]^{-1}; \quad (3)$$

čia $\beta = \sqrt{\frac{2m(E_0 - E)}{\hbar^2}}$ ir E - elektrono energija.

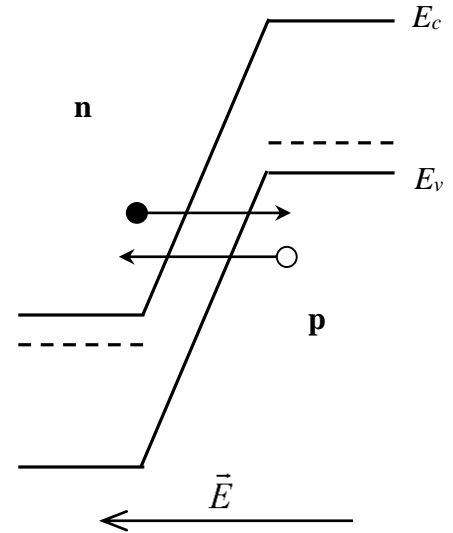
Jeigu $\beta W \gg 1$, tai tunelinio šuolio tikimybė:

$$T_t \approx \frac{16E(E_0 - E)}{E_0^2} \exp(-2\beta W). \quad (4)$$

Panašios išraiškos galioja ir pn sandūroje. Tunelinės srovės tankis yra:

$$I_t = \frac{\sqrt{2m^*} e^3 |\vec{E}| V_a}{E_0^2} \exp(-2\beta W); \quad (5)$$

čia $|\vec{E}|$ - elektrinio lauko stipris pn sandūroje. Kai laukas sandūroje pasidaro 10^6 V/cm eilės, Ge ir Si dioduose didelė srovės dalis yra sąlygota tunelinio efekto juosta - juosta (žr. 3 pav.). Norint pasiekti tokius stiprius laukus, reikia siaurinti erdvinio krūvio sritį, t.y. didinti priemaišų tankius abiejose sandūros pusėse. Specialiai nelegiruotuose dioduose labiau tikėtinas ir svarbus yra griūtinis pramušimas.



3 pav. Tunelinio pramušimo pn sandūroje energinė schema.

1. 4 Griūtinis pramušimas

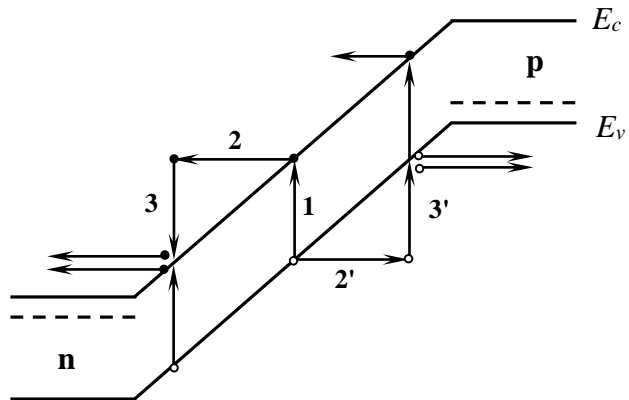
Šis pramušimo mechanizmas labai svarbus, nes griūtinio pramušimo įtampa yra viršutinė atgalinės įtampos riba daugeliui diodų ir ribinė visų tranzistorių kolektoriaus įtampa. Be to, smūginės jonizacijos mechanizmas gali būti panaudotas superaukšto dažnio virpesių generavimui griūtinuose lėkio dioduose.

Schematinis griūtinio pramušimo vaizdas parodytas 4 pav.

"1" procesas - tai šiluminė porų jonizacija. Jeigu laukas sandūroje nėra itin stiprus, tai ši generacija tiesiog ir nusako įprastinę atgalinę srovę. Jeigu laukas yra pakankamai stiprus, tai generuoti krūvininkai prieš išsklaidomi gali įgyti tiek kinetinės energijos, kad jos pakaktų jonizuoti kitoms krūvininkų poroms. "2" ir "2'" procesai atitinkamai reiškia elektrono ir skylės energijos padidėjimą sandūros lauke. Procesas "3" žymi elektrono smūgį - greitai judantis elektronas perduoda savo energiją elektronui, esančiam valentinėje juostoje ir tuo pačiu pastarąjį permeta į laidumo juostą. Procesas "3'" žymi tą patį, tik smūgiuoja skylė. Procesų "3" ir "3'" metu atsiranda dvi naujos krūvininkų poros. Savo ruožtu jos vėl gali jonizuoti krūvininkus, pastarieji tęsti šį procesą ir t.t. Todėl šis reiškinys griūtinis. Jeigu laukas pn sandūroje nėra pakankamai stiprus, tai krūvininkai laisvojo kelio atkarpoje nesukaupia pakankamai energijos ir nedidelėmis porcijomis atiduoda ją gardelei išsklaidymo metu. Todėl suprantama, kad griūtiniam procesui prasidėti reikalingas laukas, stipresnis už tam tikrą kritinį lauką E_c . Suprantama ir tai, kad prieš prasidedant tikrajam griūtiniam laisvų krūvininkų gausėjimui, jų tankis kažkiek padidėja ir esant silpnesniam už E_c sandūros laukui. Jeigu, nesant jokio pramušimo mechanizmo, atgalinė srovė yra I_{R0} , tai tikroji atgalinė srovė turėtų būti:

$$I_R = MI_{R0},$$

(6)



4 pav. pn sandūros griūtinio pramušimo energijos juostų schema.

čia koeficientas M vadinamas dauginimo faktoriumi. Sandūra yra pramušama, kai $M \rightarrow \infty$.

Apskaičiuokime M paprasčiausiu atveju, kai srovę per sandūrą lemia tik skylių injekcija. Jeigu injektuotų skylių tankis pn sandūros pradžioje yra p_0 , tai mažame sandūros intervale, nutolusiame atstumu x nuo pradžios, jų jau bus $(p_0 + p_1)$. Kadangi į sritelę dx gali atvykti ir elektronai, jonizuoti skylėmis atstume didesniame už x , tai visas krūvininkų tankis srityje dx bus $(p_0 + p_1 + n_2)$, čia n_2 - elektronų tankis.

Laikysime, kad krūvininkų tankio prieauglis srityje dx yra pavidalo $dp = \alpha_p p dx$ (čia α_p - skylių jonizacijos koeficientas, priklausantis nuo elektrinio lauko stiprumo) ir $dn = \alpha_n n dx$ (čia α_n - elektronų jonizacijos koeficientas).

Taigi, skylių tankio pokytis taške x yra lygus krūvininkų porų tankiui, generuotame sritelėje dx :

$$dp = \alpha_p (p_0 + p_1) dx + \alpha_n n_2 dx.$$

Kadangi elektronų tankis n_2 yra gautas, kai poras jonizuoja skylė, tai $n_2 = p_2$. Jeigu pažymėsime visą skylių tankį, pasiekiantį erdvinio krūvio srities galą (t.y., kai $x = W$) $p(W)$, tai galima užrašyti $p_2 = p(W) - (p_0 + p_1)$, ir todėl

$$\frac{\partial p}{\partial x} = (\alpha_p - \alpha_n)(p_0 + p_1) + \alpha_n p(W). \quad (7)$$

Pateiksime (7) lygties sprendinį, su kraštinėmis sąlygomis: 1) kai $x = 0$, tai $p_1 = 0$ (erdvinio krūvio srities pradžioje jonizacijos nėra) ir 2) kai $x = W$, tai $(p_1 + p_0) = p(W)$. Tuomet sprendinys toks:

$$M_p = \frac{p(W)}{p_0} = \frac{1}{1 - \int_0^W \alpha_p \exp \left[- \int_0^W (\alpha_p - \alpha_n) dx' \right] dx}. \quad (8)$$

Griūtinio pramušimo įtampa yra apibrėžiama kaip įtampa, kuriai esant $M_p \rightarrow \infty$. Kadangi M_p proporcingas krūvininkų tankių santykiui, tai jį galima apibrėžti kaip atgalinių diodo srovių, esant lauko efektui ir be jo, santykį.

Keletas pastabų apie jonizacijos koeficientų α_p ir α_n priklausomybę nuo elektrinio lauko stiprumo. Bet kuriame jonizacijos procese gali dalyvauti tik krūvininkai, kurių energija viršija minimalią energiją E_I , reikalingą porai sukurti. Kad įgytų tokią energiją elektriniame lauke $|\vec{E}|$, krūvininkas turi nueiti kelią d tokį, kad galiotų lygybė $E_I = ed|\vec{E}|$. Jeigu l yra vidutinis laisvojo lėkio nuotolis, tai iš statistikos aišku, kad taške $x = 0$ išsklaidytų ir toliau kelyje d dar neišsklaidytų krūvininkų skaičius yra proporcingas $\exp(-d/l)$. Laikydami, kad krūvininkas, įgijęs energiją E_I , tuoj pat dalyvauja smūginėje jonizacijoje, gauname, kad jonizuotų porų skaičius yra $n_j = n \exp(-d/l)$. Iš jonizacijos koeficientų apibrėžimo $n_j = n d \alpha_n$ arba $p_j = p d \alpha_p$ gauname:

$$\alpha_n = \frac{e}{E} |\vec{E}| \exp \left(- \frac{E_I}{el|\vec{E}|} \right). \quad (9)$$

Ši formulė kokybiškai nusako koeficientų α priklausomybę nuo elektrinio lauko stiprumo. Įrašę α vertes į (8), gausime M priklausomybę nuo elektrinio lauko. Tai gana sudėtinga išraiška, todėl praktikoje dažnai pasitenkinama apytikre formule:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_R}{V_B} \right)^n}, \quad (10)$$

kurioje $n = 3$ n tipo germaniui, $n = 5$ p-Ge ir $n = 3$ siliciui, V_B - sandūros pramušimo įtampa. V_B galima įvertinti, kai maksimalus laukas $|\vec{E}_m|$ sandūroje pasidaro lygus kritiniam laukui $|\vec{E}_c|$. Sandūroje su stačiu legiravimo profiliu šis suliginimas duoda:

$$|\vec{E}_m| = 2 \frac{V_R + V_d}{W} = 2V_R \left(\frac{2\epsilon_0 V_R}{eN} \right)^{-1/2}. \quad (11)$$

Čia atgalinė įtampa V_R , galiojant (11), yra pramušimo įtampa, kuri iš (11) yra lygi:

$$V_B = \frac{\epsilon_0 |\vec{E}_c|^2}{2eN}. \quad (12)$$

Matome, kad V_B yra atvirkščiai proporcinga bazės priemaišų koncentracijai N .

Sandūros pramušimo įtampai neviršijant $4E_g/e$, laikoma, kad tai tunelinis pramušimas; jeigu $V_B > 6E_g/e$ - tai griūtinis pramušimas. Tarpinės pramušimo įtampos parodo, kad veikia abu mechanizmai.

Kadangi draustinių energijų juostos plotis E_g ir Ge, ir Si, ir GaAs siaurėja keliant temperatūrą, tai V_B , sąlygota tunelinio pramušimo, mažėja. Tai išplaukia iš tunelinės srovės išraiškos (5), nes I_t auga, mažėjant E_g . Esant griūtiniam pramušimui, V_B auga, keliant temperatūrą, nes sustiprėjęs šiluminis sklaidymas mažina laisvojo lėkio nuotolį. Taigi, norint suteikti krūvininkams pakankamai energijos jonizacijai, reikia būtinai padidinti įtampą sandūroje. Temperatūriniai V_B tyrimai leidžia atskirti šiuos du mechanizmus.

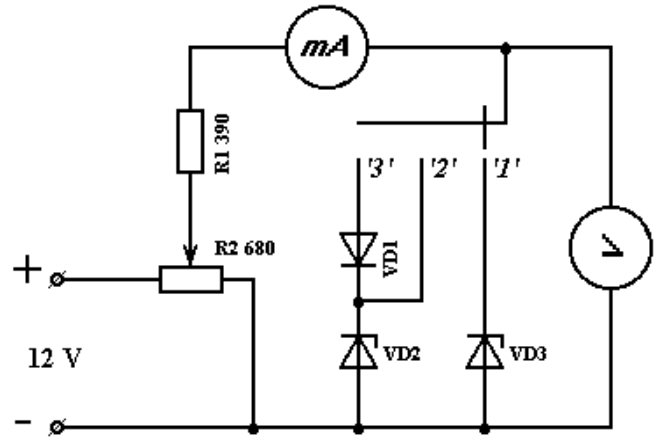
2. Darbo schema ir matavimų eiga

Laboratorinio darbo maketo schema parodyta 5 pav. Darbui atlikti reikalingas maitinimo šaltinis, trys multimetrai (įtampai, srovei ir temperatūrai matuoti), darbo maketas, kaitinimo elementas.

Darbe tiriami du stabilitronai ir stabilitronas su nuosekliai įjungtu tiesiogine kryptimi diodu. Matavimus visiems stabilitronų įjungimo varintams atlikti prie trijų skirtingų temperatūrų (neviršyti 100°C temperatūros). Patogiausia pradėti nuo kambario temperatūros. Detaliausi matavimai atliekami pramušimo srityje. Prasidėjus pramušimui, eksperimentinių taškų skaičius turi būti pakankamas, kad iš nubrėžtos charakteristikos būtų matyti pramušimo įtampa. Skirtingų temperatūrų to paties stabilitrono pramušimo charakteristikas reikia atvaizduoti viename grafike. Iš rezultatų apskaičiuojami temperatūriniai pramušimo įtampų koeficientai:

$$K = \frac{\Delta U_{pr}}{U_{pr1} \Delta T}, \quad (13)$$

U_{pr} – pramušimo įtampa. Be to nustatomi pramušimų mechanizmai. Aptariama tiesiogine kryptimi įjungto diodo įtaka įtampos stabilizavimui.



5 pav. Darbo maketo schema.