

VILNIAUS UNIVERSITETAS
Kietojo kūno elektronikos katedra
Vyksmų puslaidininkiniuose prietaisuose modeliavimas

Darbas Nr. 4a

pn diodo griūtinio pramušimo tyrimas

Parengė A. Poškus

2009-03-19

Turinys

1. Užduotys	2
2. Darbo teorija	4
2.1. pn sandūra, esant atgalinei įtampai	4
2.2. Griūtinis pramušimas	8
3. Metodika	11

1. Užduotys

Variantų Nr. 1 – 9 ir 18 – 25 užduotys¹:

1. Sumodeliuoti tolygiai legiruoto pn diodo voltamperinę charakteristiką, esant atgalinei įtampai (nuo nulinės įtampos iki griūtinio pramušimo įtampos). Skaičiavimus atlikti, esant trimis legiravimo laipsniams. **MicroTec** projektas "**2.12 (break down)**".
2. Atvaizduoti gautąsias voltamperines charakteristikas. Šiuos tris grafikus išsaugoti vėlesnei analizei programos „SibGraf 2D“ duomenų failų pavidalu.
3. Pagal gautąsias voltamperines charakteristikas nustatyti griūtinio pramušimo įtampą. Palyginti šias vertes su tom, kurios gaunamos teoriškai (pagal formulę (21)).
4. Pagal užduoties Nr. 3 rezultatus nustatyti, kurios diodo dalies (bazės ar emiterio) legiravimas turi didesnę įtaką diodo pramušimo įtampai, ir kuria kryptimi kinta pramušimo įtampa, keičiant tos dalies legiravimą.

Naudojamos trys donorų ir akceptorių koncentracijų poros:

- 1) $N_D = N_{D0}, N_A = N_{A0}$;
- 2) $N_D = 10N_{D0}, N_A = N_{A0}$;
- 3) $N_D = N_{D0}, N_A = 0.5N_{A0}$.

Pradiniai legiravimo laipsniai N_{D0} ir N_{A0} skirtingiems variantams pateikti žemiau. Visais atvejais emiteris yra n tipo sritis (t.y., $N_D \gg N_A$).

1 variantas. $N_{D0} = 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 9 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

2 variantas. $N_{D0} = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

3 variantas. $N_{D0} = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

4 variantas. $N_{D0} = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 2.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

5 variantas. $N_{D0} = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 3.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

6 variantas. $N_{D0} = 10^{17} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 1.5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

7 variantas. $N_{D0} = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

8 variantas. $N_{D0} = 7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 8 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

9 variantas. $N_{D0} = 9 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

18 variantas. $N_{D0} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

19 variantas. $N_{D0} = 6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

20 variantas. $N_{D0} = 4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

21 variantas. $N_{D0} = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

22 variantas. $N_{D0} = 6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

23 variantas. $N_{D0} = 7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 9 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

24 variantas. $N_{D0} = 8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

25 variantas. $N_{D0} = 1 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}, N_{A0} = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Kiti parametrai yra vienodi visiems variantams Nr. 1 – 9 ir 18 – 25.

¹ Variantai Nr. 10 – 17 ir Nr. 26 – 34 atitinka darbą Nr. 4b.

Kontroliniai klausimai

1. Atgalinės srovės fizikinis mechanizmas. Kodėl atgalinė srovė beveik nepriklauso nuo išorinės įtampos ir yra žymiai mažesnė už tiesioginę?
2. Kodėl šalutinių krūvininkų koncentracijos santykinis sumažėjimas prie nuskurdintojo sluoksnio kraštų atgalinės įtampos atveju yra žymiai mažesnis už jų koncentracijos santykinį padidėjimą, esant tokio paties didumo tiesioginei įtampai?
3. Kodėl, didėjant atgalinei įtampai, atgalinė srovė auga (t.y., nėra išsotinimo, kuri numato teorija)? Smūginės jonizacijos ir griūtinio pramušimo sąvokos.
4. Pramušimo įtampos sąvoka. Pramušimo įtampos priklausomybė nuo priemaišų koncentracijos ir nuo krūvininkų judrio. Kodėl pramušimo įtampą lemia bazės savybės, o ne emiterio? Kodėl, augant priemaišų koncentracijai bazėje N_B , pramušimo įtampa V_B mažėja lėčiau, negu $V_B \sim 1/N_B$ (pasinaudoti formule (22)).

Literatūra

1. **Mouthaan** T. Semiconductor Devices Explained Using Active Simulation. – Baffins Lane, Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd., 1999. – 326 p.
2. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х кн. – М.: Мир, 1984.

2. Darbo teorija

2.1. pn sandūra, esant atgalinei įtampai

pn diodo energijos diagrama, esant atgalinei įtampai, pavaizduota 1c pav. Šiuo atveju potencinio barjero aukštis yra didesnis už jo aukštį termodinaminėje pusiausvyroje. Todėl sumažėja elektronų, galinčių pereiti iš n srities į p sritį, ir skylių, galinčių pereiti iš p srities į n sritį, skaičius. Ši skaičių galima apskaičiuoti tuo pačiu būdu, kaip ir tiesioginės įtampos atveju, t.y., pagal darbo Nr. 3 formules (2.3.9a,b):

$$n_p(x_{dp}) = n_{p0} \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right), \quad (1a)$$

$$p_n(-x_{dn}) = p_{n0} \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right). \quad (1b)$$

Esant atgalinei įtampai, $V_a < 0$. Taigi, prie nuskurdintojo sluoksnio kraštų šalutinių krūvininkų koncentracija tampa mažesnė, negu termodinaminėje pusiausvyroje. Tai reiškia, kad neutraliosiose srityse prie nuskurdintojo sluoksnio kraštų egzistuoja krūvininkų koncentracijos gradientas, dėl kurio vyksta šalutinių krūvininkų difuzija link nuskurdintojo sluoksnio. Nuskurdintame sluoksnyje egzistuojantis elektrinis laukas greitina į jį patekusius šalutinius krūvininkus, t.y., ekstraguoja elektronus iš p srities į n sritį ir skyles iš n srities į p sritį.

Kadangi krūvininkų koncentracija prie nuskurdintojo sluoksnio krašto yra mažesnė už pusiausvirąją, tai krūvininkų generacijos sparta pranoksta krūvininkų rekombinacijos spartą. Ši išvada išplaukia iš darbo Nr. 3 formuliu (2.2.4a,b):

$$R_n - G_n = \frac{\Delta n}{\tau_n}, \quad (2a)$$

$$R_p - G_p = \frac{\Delta p}{\tau_p}. \quad (2b)$$

(atgalinės įtampos atveju perteklinių krūvininkų koncentracijos Δn ir Δp yra neigiamos). Būtent ši krūvininkų generacija palaiko pastovią krūvininkų koncentraciją prie nuskurdintojo sluoksnio kraštų, nors šalutiniai krūvininkai nuolat difunduoja į nuskurdintąjį sluoksnį. Matome kai kuriuos panašumus į tiesioginę srovę: abiem atvejais srovę lemia šalutinių krūvininkų difuzija, ir abiem atvejais srovės stipri lemia rekombinacijos ir generacijos spartų skirtumas. Tačiau tiesioginės įtampos atveju šis skirtumas yra teigiamas (vyrauja krūvininkų rekombinacija), o atgalinės įtampos atveju šis skirtumas yra neigiamas (vyrauja krūvininkų generacija). T.y., tiesioginės srovės stipri lemia injektuotų šalutinių krūvininkų išnykimo sparta, o atgalinės srovės stipri lemia ekstraguojamų šalutinių krūvininkų atsiradimo sparta prie nuskurdintojo sluoksnio kraštų. Dėl šių panašumų atgalinės srovės matematinis aprašymas yra toks pats, kaip tiesioginės srovės, ir galioja visos darbo Nr. 3 teorinėje dalyje išvestos formulės. Tačiau atgalinės įtampos atveju tose formulėse $V_a < 0$. Pvz., iš ilgojo diodo srovės tankio išraiškos

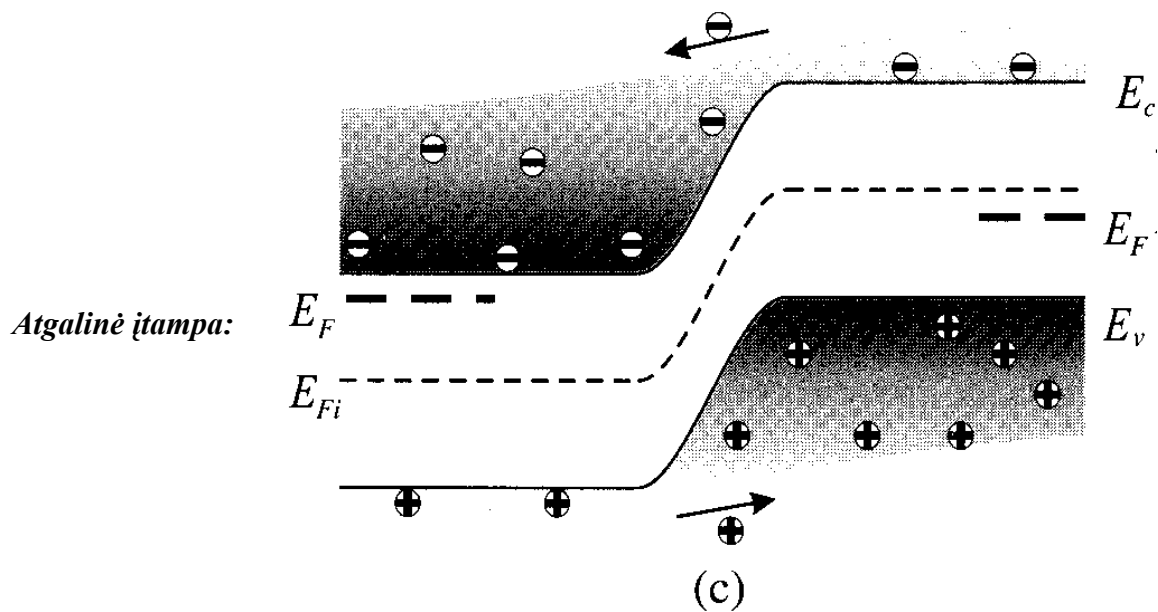
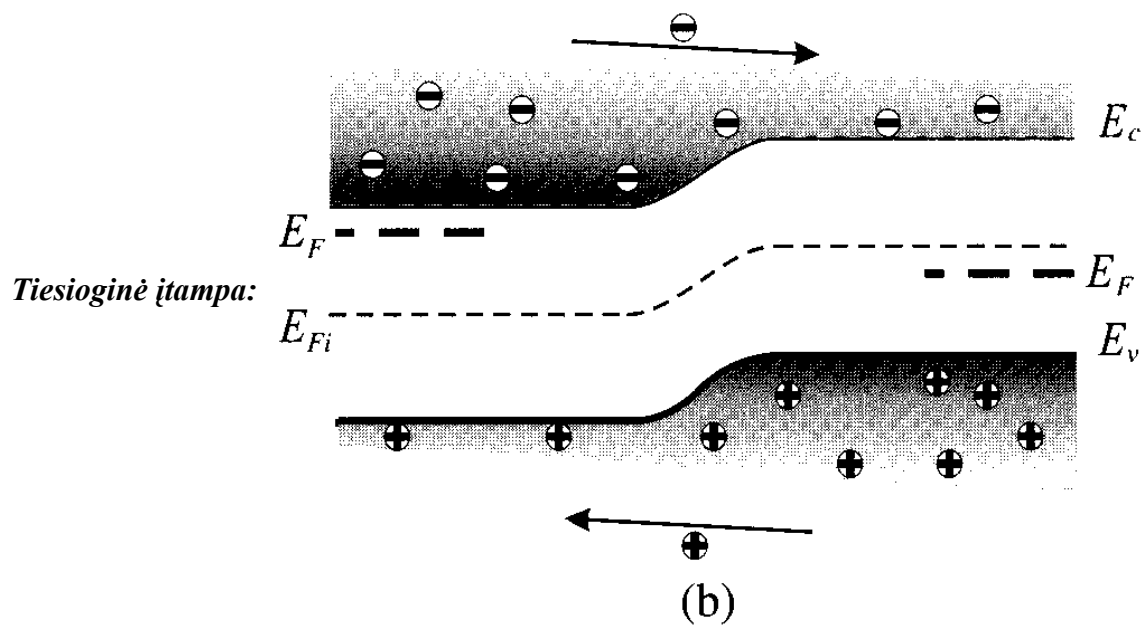
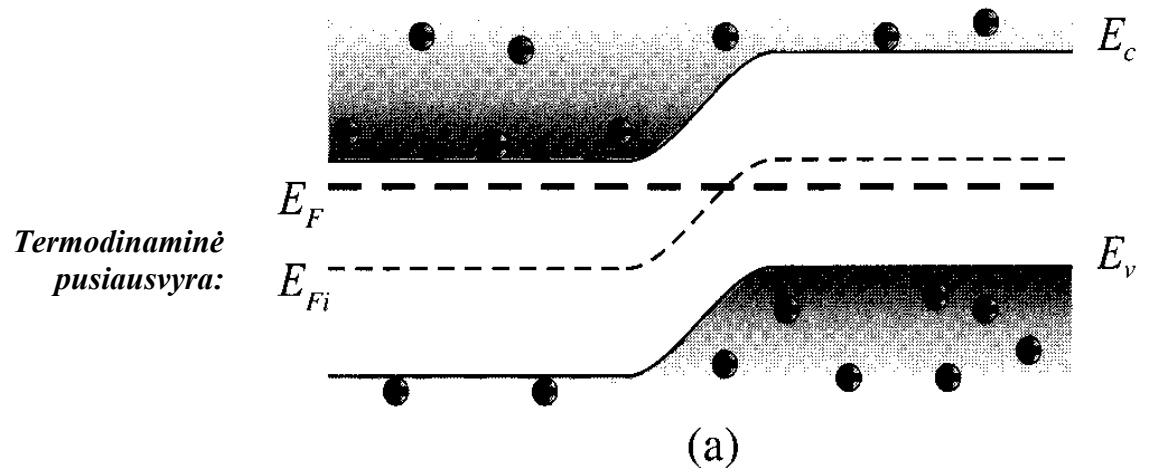
$$j = j_n(x_{dp}) + j_p(-x_{dn}) = e \left(\frac{n_{p0} D_n}{L_n} + \frac{p_{n0} D_p}{L_p} \right) \cdot \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] = en_i^2 \left(\frac{1}{N_A} \frac{D_n}{L_n} + \frac{1}{N_D} \frac{D_p}{L_p} \right) \cdot \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right]. \quad (3)$$

išplaukia, kad tuo atveju, kai atgalinė įtampa tenkina sąlygą $|V_a| \gg kT/e$, atgalinė srovė praktiškai nepriklauso nuo įtampos ir yra lygi

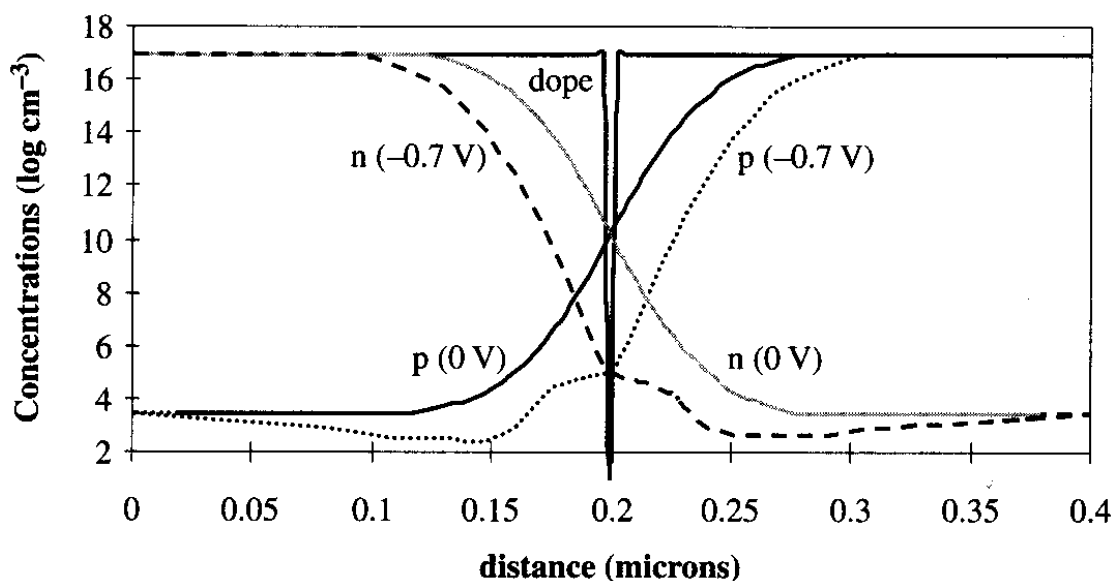
$$j = j_s = e \left(\frac{n_{p0} D_n}{L_n} + \frac{p_{n0} D_p}{L_p} \right) = en_i^2 \left(\frac{1}{N_A} \frac{D_n}{L_n} + \frac{1}{N_D} \frac{D_p}{L_p} \right). \quad (4)$$

Ši srovės vertė vadinama *soties srove*.

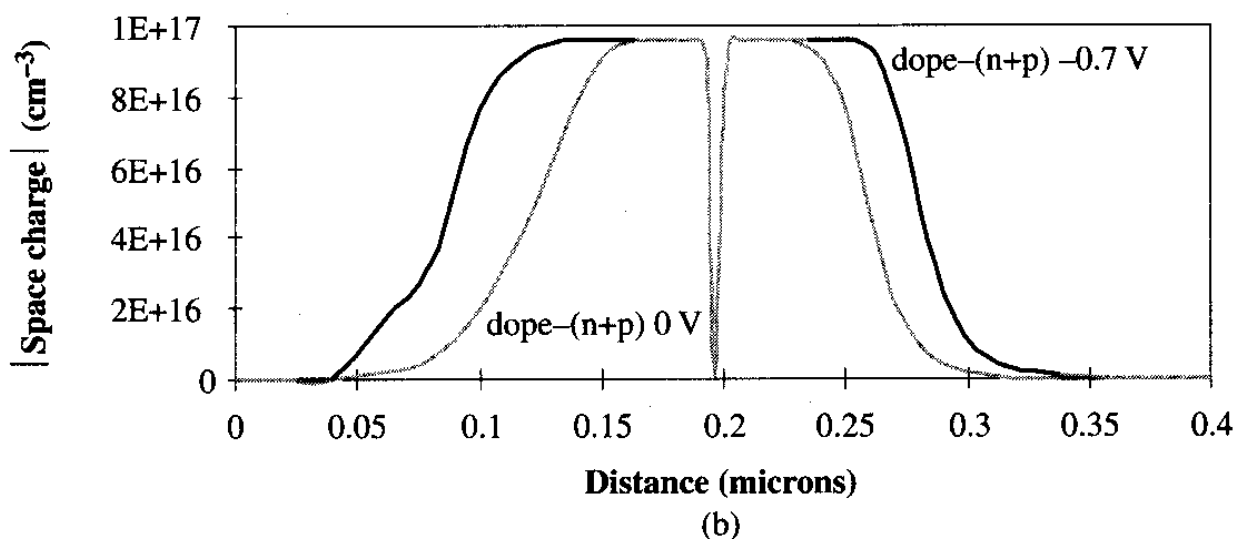
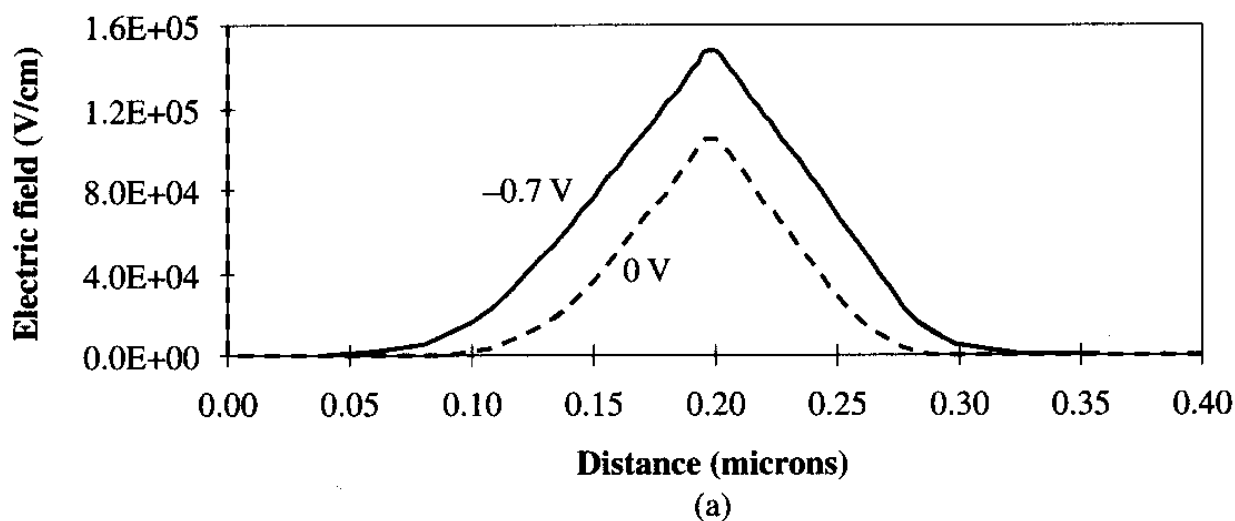
2 pav. pavaizduotos skaitmeninio modeliavimo būdu gautos krūvininkų koncentracijų priklausomybės nuo koordinatės pn diode, esant 0 V ir 0.7 V atgalinei įtampai. 3 pav. pavaizduotos elektrinio lauko stiprio (a) ir erdvinio krūvio tankio (b) priklausomybės nuo koordinatės. Matome, kad atgalinės įtampos atveju šalutinių krūvininkų koncentracijos prie nuskurdintojo sluoksnio



1 pav. pn diodo energijos juostų diagramos



2 pav. Krūvininkų koncentracijų pasiskirstymas diode, esant 0 V ir 0.7 V atgalinei įtampai



3 pav. Elektrinio lauko stiprio (a) ir erdvinio krūvio tankio (b) priklausomybės nuo koordinatės, esant 0 V ir 0.7 V atgalinei įtampai

kraštų tampa mažesnės už pusiausvirąsias vertes. Be to, akivaizdu, kad, esant atgalinei įtampai, nuskurdintojo sluoksnio storis ir didžiausias elektrinio lauko stipris padidėja. Šie rezultatai atitinka darbo Nr. 3 formules (2.6.1) ir (2.6.2), kuriose $V_a < 0$:

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon(N_D + N_A)}{eN_D N_A}(V_D - V_a)} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon(N_D + N_A)}{eN_D N_A}(V_D + |V_a|)}. \quad (5)$$

$$\mathcal{E}_{\max} = \frac{eN_D N_A}{\varepsilon_0\varepsilon(N_D + N_A)} w = \sqrt{\frac{2eN_D N_A}{\varepsilon_0\varepsilon(N_D + N_A)}(V_D - V_a)} = \sqrt{\frac{2eN_D N_A}{\varepsilon_0\varepsilon(N_D + N_A)}(V_D + |V_a|)}. \quad (6)$$

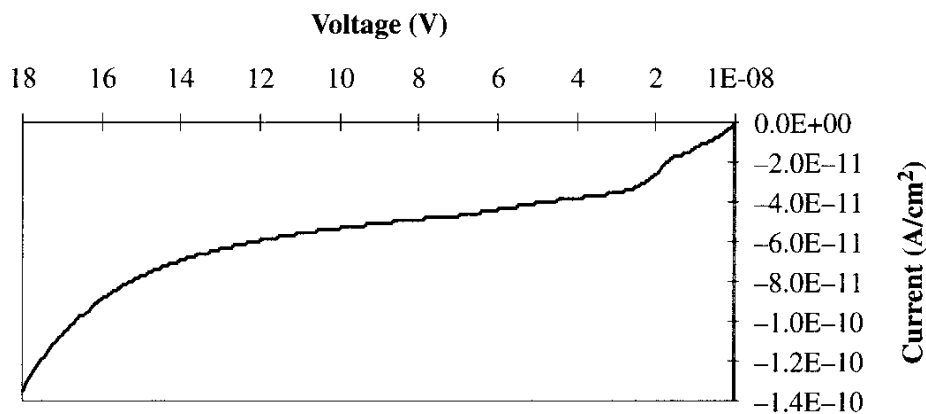
Perteklinių krūvininkų koncentracijos teorinę priklausomybę nuo koordinatės prie nuskurdintojo sluoksnio krašto nusako darbo Nr. 3 formulės (2.4.1a) ir (2.4.1b). Atgalinės įtampos atveju dydžiai Δn ir Δp yra neigiami. Kadangi elektronų koncentracija ant nuskurdintojo sluoksnio krašto p srityje $x = x_{dp}$ yra lygi $n_{p0} + \Delta n(x_{dp})$, tai aišku, kad $\Delta n(x_{dp})$ negali būti mažesnis už $-n_{p0}$. Atgalinės įtampos atveju šalutinių krūvininkų koncentracija prie nuskurdintojo sluoksnio kraštų dažniausiai būna žymiai mažesnė už pusiausvirąją vertę, todėl apytiksliai galima laikyti, kad $\Delta n(x_{dp}) \approx -n_{p0}$. T.y., elektronų koncentracija p srityje priklauso nuo koordinatės tokiu būdu:

$$n(x) = n_{p0} + \Delta n(x) \approx n_{p0} \left[1 - \exp\left(-\frac{x - x_{dp}}{L_n}\right) \right]. \quad (7)$$

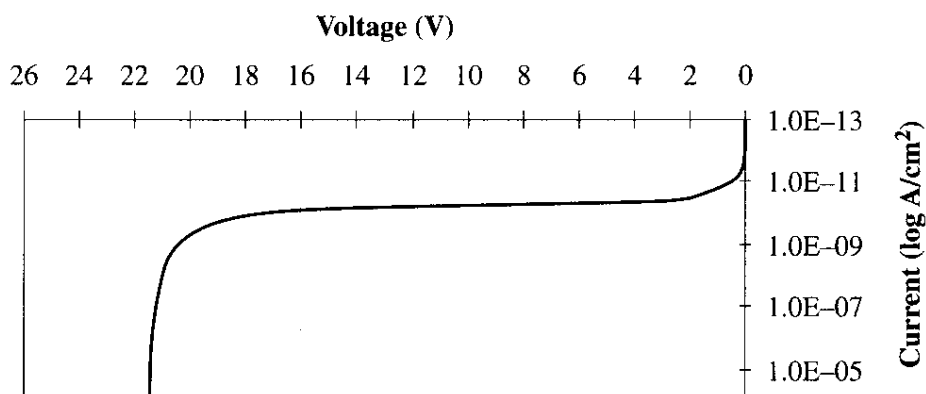
Analogiška formulė galioja ir skylių koncentracijai n tipo srityje. Taigi, tolstant nuo nuskurdintojo sluoksnio krašto, šalutinių krūvininkų koncentracija eksponentiškai auga, artėdama prie pusiausvirąsios vertės.

Esant kelių voltų eilės arba aukštesnei atgalinei įtampai, šalutinių krūvininkų koncentracija prie nuskurdintojo sluoksnio kraštų dažniausiai būna dviem arba trim eilėm mažesnė už pusiausvirąją vertę. Egzistuoja tam tikra ribinė mažiausia krūvininkų koncentracijos vertė, žemiau kurios ji negali nukristi. Taip yra todėl, kad krūvininkų kryptingo judėjimo greitis negali viršyti šiluminio judėjimo greičio. Kadangi srovės tankis yra proporcingas krūvininkų kryptingo judėjimo greičio ir krūvininkų koncentracijos sandaugai ($j_n = evn$), tai, norint palaikyti duotąją srovę, krūvininkų koncentracija negali būti mažesnė už tam tikrą ribinę vertę. Dėl šio krūvininkų koncentracijos apribojimo šalutinių krūvininkų koncentracijos santykinis sumažėjimas atgalinės įtampos atveju yra žymiai mažesnis už jos santykinį padidėjimą tiesioginės įtampos atveju (plg. 2 pav. ir darbo Nr.3 9 pav.: 0.7 V tiesioginės įtampos atveju šalutinių krūvininkų koncentracijos padidėja maždaug 10^{11} kartų, o 0.7 V atgalinės įtampos atveju jos sumažėja mažiau negu 100 kartų). Dėl to ir atstumas, kuriame atstatoma pusiausviroji krūvininkų koncentracija, atgalinės įtampos atveju yra žymiai mažesnis, negu tiesioginės įtampos atveju (pvz., darbo Nr.3 9 pav. šalutinių krūvininkų koncentracija lieka žymiai didesnė už pusiausvirąją iki pat kontaktų, o 2 pav. jau 0.05 μm atstumu nuo nuskurdintojo sluoksnio šalutinių krūvininkų koncentracija tampa tos pačios eilės, kaip pusiausviroji). Vadinasi, atgalinės įtampos atveju krūvininkų pasiskirstymo nuokrypis nuo pusiausvirojo pasiskirstymo pasireiškia žymiai siauresnėje srityje prie nuskurdintojo sluoksnio, negu tiesioginės įtampos atveju. Dėl tos pačios priežasties prie kontakto plokštumos (2 pav. atveju – taške $x = 0.2 \mu\text{m}$), kur lauko stipris ir dreifo greitis yra didžiausi, elektronų ir skylių koncentracijų priklausomybėse nuo koordinatės atsiranda perlanko taškas (žr. 2 pav.). Toje vietoje krūvininkų dreifo greitis tampa artimas šiluminio judėjimo greičiui, todėl pradeda pasireikšti minėtasis krūvininkų koncentracijos apribojimas iš apačios: šalutinių krūvininkų koncentracijos mažėjimas, tolstant nuo kontakto plokštumos, sulėtėja. Toliau tolstant nuo kontakto plokštumos (t.y., artėjant prie nuskurdintojo sluoksnio krašto), pradeda vis labiau pasireikšti pagrindinių krūvininkų indėlis į pilnutinę srovę, todėl apribojimas šalutinių krūvininkų koncentracijai dingsta ir tos koncentracijos mažėjimas vėl paspartėja.

Didelė dalis krūvininkų, kurie dalyvauja atgalinėje srovėje, generuojami ne neutraliose srityse, o nuskurdintame sluoksnyje. Diodo srovės tankio išraiška (3) gauta, laikant, kad nuskurdintame sluoksnyje nėra krūvininkų generacijos ir rekombinacijos. Nagrinėjant tiesioginę srovę, į krūvininkų generaciją ir rekombinaciją nuskurdintame sluoksnyje buvo galima neatsižvelgti dėl to, kad jos indėlis į tiesioginę srovę yra žymiai mažesnis už krūvininkų injekcijos indėlį. Tačiau



4 pav. pn diodo voltamperinė charakteristika, esant atgalinei įtampai



5 pav. Griūtinis pramušimas

atgalinė srovė yra labai maža, todėl generacija nuskurdintame sluoksnyje turi žymią įtaką atgalinės srovės didumui (į rekombinaciją galima neatsižvelgti, nes rekombinacijos stipriame elektriniame lauke tikimybė yra maža). Dėl krūvininkų generacijos nėra tikrojo atgalinės srovės išsotinimo, kurį numato formulė (4). Mat, didėjant atgalinei įtampai, mažėja krūvininkų koncentracija nuskurdintame sluoksnyje (žr. 2 pav.). Pagal formules (2a,b), tai reiškia, kad vis daugiau krūvininkų generuojama tūrio vienetu (perteklinių krūvininkų koncentracijos Δn ir Δp nuskurdintame sluoksnyje tampa vis labiau neigiamos). Elektrinis laukas, kuris egzistuoja nuskurdintame sluoksnyje, šiuos krūvininkus “nutempia” į atitinkamas neutralias sritis: elektronus – į n sritį, o skyles – į p sritį (būtent todėl, augant atgalinei įtampai, krūvininkų koncentracija mažėja, nors jų generacijos sparta auga). Atitinkamai, auga atgalinė srovė. Kita atgalinės srovės augimo priežastis yra nuskurdintojo sluoksnio (t.y., krūvininkų generacijos srities) storio didėjimas, augant atgalinei įtampai. Atgalinės srovės didėjimas, augant atgalinei įtampai, yra žymiai lėtesnis, negu tiesioginės srovės didėjimas, augant tiesioginei įtampai, todėl atgalinė srovė lieka žymiai mažesnė už tiesioginę srovę (žr. 4 pav.; plg. su darbo Nr.3 8 pav.).

2.2. Griūtinis pramušimas

Esant pakankamai aukštai atgalinei įtampai, pasireiškia naujas efektas, dėl kurio atgalinė srovė gali išaugti keliom eilėm. Šis efektas – tai *smūginė jonizacija*. Smūginės jonizacijos esmė yra ta, kad, esant pakankamai stipriam elektriniam laukui (Si atveju – maždaug $3 \cdot 10^5$ V/cm), elektronas gali įgyti kinetinę energiją, kuri pakankama naujos elektrono ir skylės poros sukūrimui. Ši kinetinė energija – tai draustinės energijos juostos plotis E_g (silicio atveju $E_g = 1.1$ eV). Tam, kad galėtų vykti smūginė jonizacija, reikalingos dvi sąlygos: 1) stiprus elektrinis laukas, 2) pakankamai didelis vidutinis laisvasis kelias. *Laisvasis kelias* – tai atstumas, kurį nueina krūvininkas tarp dviejų susidūrimų su kristalo gardele. Kuo didesnis laisvasis kelias, tuo ilgiau krūvininkas yra greitinamas elektrinio lauko ir tuo didesnę energiją įgyja tarp dviejų sklaidos įvykių. Vidutinis laisvasis kelias dažniausiai būna tarp 1 nm ir 100 nm, priklausomai nuo legiravimo laipsnio (krūvininkai susiduria su kristalo gardele kas $(10^{-14} - 10^{-12})$ s).

Smūginės jonizacijos metu elektronas praranda energiją E_g , bet lieka laidumo juostoje. Vadinasi, vietoj vieno elektrono dėl smūginės jonizacijos atsiranda du elektronai ir viena skylė. Atsiradę krūvininkai taip pat gali dalyvauti smūginėje jonizacijoje. Jeigu krūvininkų skaičiaus didėjimas nuskurdintame sluoksnyje dėl smūginės jonizacijos viršija jų skaičiaus mažėjimą dėl rekombinacijos ir išėjimo iš nuskurdintojo sluoksnio, prasideda griūtinis procesas, dėl kurio nuskurdintame sluoksnyje atsiranda daug perteklinių krūvininkų ir žymiai padidėja atgalinė srovė. Šis reiškinys vadinamas **griūtinio pramušimu**. Išaugus atgalinei srovei, tiek pat kartų padidėja ir krūvininkų susidūrimų dažnis su gardele, t.y., išauga energija, kurią per laiko vienetą krūvininkai perduoda kristalo gardelei. Tai reiškia, kad diodas pradeda kaisti. Dėl šio kaitimo diodas gali netgi išsilydyti.

5 pav. pateikta ta pati voltamperinė charakteristika, kaip ir 4 pav., tačiau naudojant logaritminį ordinačių ašis mastelį ir platesnį įtampų intervalą. Kaip matome, ties 20 V srovė staigiai išauga keliom eilėm dėl griūtinio pramušimo. Pirmieji griūties požymiai tampa pastebimi maždaug ties 12 V (žr. 4 pav.).

Griūtinis pramušimas prasideda tuomet, kai vidutinis vieno krūvininko sukurtų elektronų ir skylių porų skaičius tampa lygus 1. Krūvininkų porų skaičius, kurį sukuria elektronas arba skylė vienetiniame kelyje dėl smūginės jonizacijos, vadinamas **jonizacijos koeficientu**. Rasime jonizacijos koeficiento α išraišką elektrinio lauko stipriu. Žinome, kad smūginė jonizacija tampa įmanoma tuomet, kai elektrono kinetinė energija viršija draustinės juostos plotį E_g . Šią kinetinę energiją elektronas įgyja dėl elektriniame lauke jį veikiančios jėgos (šiluminio judėjimo energijos čia galime nepaisyti, nes ji yra žymiai mažesnė už E_g). Jeigu elektrinio lauko stipris lygus \mathcal{E} , tuomet to lauko atliktas darbas, kai elektronas nueina atstumą d priešinga laukui kryptimi, yra lygus

$$A = F \cdot d = e \mathcal{E} d; \quad (8)$$

čia $F = e \mathcal{E}$ yra jėga, kuria elektrinis laukas veikia elektroną, o e yra elementarusis krūvis. Smūginė jonizacija įvyksta tuomet, kai $A > E_g$. Vadinasi, kad galėtų įvykti smūginė jonizacija, atstumas, kurį nueina elektronas tarp dviejų susidūrimų, turi būti didesnis už

$$d_{\min} = \frac{E_g}{e \mathcal{E}}. \quad (9)$$

Tikimybė, kad tarp dviejų susidūrimų su gardele krūvininkas nueis didesnę už d_{\min} atstumą, yra lygi $\exp(-d_{\min}/l)$; čia l yra vidutinis laisvasis kelias. Vadinasi, jeigu pilnutinė elektronų koncentracija lygi n , tuomet galinčių jonizuoti gardelės atomus elektronų koncentracija lygi

$$n_j = n \exp\left(-\frac{d_{\min}}{l}\right) = n \exp\left(-\frac{E_g}{e \mathcal{E} l}\right). \quad (10)$$

Laikant, kad kiekvienas iš šių elektronų sukuria vieną krūvininkų porą, pilnutinė dėl smūginės jonizacijos sukurtų porų koncentracija taip pat lygi n_j . Turint omenyje jonizacijos koeficiento apibrėžimą (žr. aukščiau) ir atsižvelgiant į tai, kad kiekviena pora buvo sukurta, nuėjus elektronui atstumą d_{\min} , galima užrašyti

$$\alpha = \frac{n_j}{n d_{\min}}. \quad (11)$$

Įrašę d_{\min} ir n_j išraiškas (9) ir (10) į jonizacijos koeficiento išraišką (11), gauname

$$\alpha = \frac{e \mathcal{E}}{E_g} \exp\left(-\frac{E_g}{e \mathcal{E} l}\right). \quad (12)$$

Kadangi α nusako vieno elektrono sukurtų krūvininkų porų skaičių *kelio vienetė*, tai pilnutinis vieno elektrono sukurtų porų skaičius lygus reiškinio (12) integralui išilgai elektrono judėjimo trajektorijos. Griūtinis pramušimas prasideda tuomet, kai kiekvienas elektronas, pralėkdamas nuskurdintąjį sluoksnį, sukuria vieną krūvininkų porą. Vadinasi, griūtinio pramušimo sąlyga yra

$$\int_{-x_{dn}}^{x_{dp}} \frac{e |\mathcal{E}(x)|}{E_g} \exp\left(-\frac{E_g}{e |\mathcal{E}(x)| l}\right) dx = 1; \quad (13)$$

čia integravimo rėžiai nusako nuskurdintojo sluoksnio kraštus. Kadangi dydžių x_{dn} ir x_{dp} bei funkcijos $\mathcal{E}(x)$ pavidalo priklausomybė nuo išorinės įtampos yra žinoma (žr. formules (5), (6),

darbo Nr.2 (2.6.5) formulę ir darbo Nr.2 4b pav.), tai, apskaičiavus šį integralą, galima rasti griūtinio pramušimo įtampą. Tačiau šie skaičiavimai yra palyginti sudėtingi, todėl toliau naudosime paprastesnį modelį: laikysime, kad atstumas, kurį nueina elektronas tarp dviejų susidūrimų su gardele, yra fiksuotas ir lygus l . Tuomet elektrono įgytoji kinetinė energija (8) priklauso tik nuo elektrinio lauko stiprio ir yra lygi

$$A = e \mathcal{E} l. \quad (14)$$

Vadinasi, sąlyga $A > E_g$ virsta reikalavimu, kad didžiausias elektrinio lauko stipris nuskurdintame būtų didesnis už "krizinį" elektrinio lauko stiprį

$$\mathcal{E}_c = \frac{E_g}{el}. \quad (15)$$

Žinant didžiausią elektrinio lauko stiprį \mathcal{E}_{\max} , pagal formulę (6) galima apskaičiuoti ir išorinę įtampą V_a , kuri atitinka tą lauko stiprį. Pramušimo įtampa V_B ("breakdown voltage") gaunama, įrašius į V_a išraišką \mathcal{E}_c vietoj \mathcal{E}_{\max} :

$$V_B = -V_a = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon (N_D + N_A)}{2eN_D N_A} \mathcal{E}_c^2 - V_D. \quad (16)$$

Praktikoje pramušimo įtampa būna dešimčių arba šimtų voltų eilės, t.y., žymiai didesnė už kontaktinį potencialų skirtumą $V_D \approx 0.7$ V. Todėl, apytiksliai skaičiuojant, lygybės (16) dešiniojoje pusėje galima nepaisyti dėmens $-V_D$. Be to, dažniausiai $N_D \gg N_A$ arba $N_A \gg N_D$. Tuomet

$$V_B \approx \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2eN_B} \mathcal{E}_c^2; \quad (17)$$

čia N_B yra bazės legiravimo laipsnis (priemaišų koncentracija silpniau legiruotoje srityje). Įrašę \mathcal{E}_c išraišką (15) į (17), gauname

$$V_B \approx \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E_g^2}{2e^3 l^2 N_B}. \quad (18)$$

Laisvąjį kelią l , kuris įeina į formulę (18), patogiau išreikšti krūvininkų judriu μ , nes judris yra dažniau praktikoje naudojamas parametras, negu laisvasis kelias. Tuo tikslu pasinaudojame judrio išraišką $\mu = e\tau/m_{ef}$, čia τ yra vidutinis laikas tarp dviejų susidūrimų (nepainioti su vidutine gyvavimo trukme!), o m_{ef} yra krūvininko efektinė masė. Laiką τ galima susieti su laisvuju keliu l šitaip: $\tau = l/v_{\tilde{s}il}$, čia $v_{\tilde{s}il}$ yra vidutinis šiluminio judėjimo greitis (elektronams 300 K temperatūroje $v_{\tilde{s}il} \approx 10^7$ cm/s). Vadinasi,

$$\mu = \frac{el}{m_{ef} v_{\tilde{s}il}} \quad (19)$$

arba

$$l = \frac{\mu m_{ef} v_{\tilde{s}il}}{e}. \quad (20)$$

Įrašę (20) į (18), gauname galutinę apytikslę pramušimo įtampos išraišką:

$$V_B \approx \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E_g^2}{2e\mu^2 m_{ef}^2 v_{\tilde{s}il}^2 N_B}. \quad (21)$$

Pramušimas prasideda toje nuskurdintojo sluoksnio dalyje, kuri priklauso bazei, nes toje srityje didesnis laisvasis kelias (kitais žodžiais, krizinis elektrinis laukas (15) bazėje yra mažesnis, negu emiteryje). Todėl formulėje (21) μ yra krūvininkų judris bazėje (o ne emiteryje).

Pramušimo įtampos vertė, kuri apskaičiuota pagal formulę (21), visuomet yra didesnė už tikrąją, nes ši formulė gauta iš reikalavimo, kad mažiausias laisvasis kelias iki smūginės jonizacijos d_{min} , kurį nusako formulė (9), būtų lygus vidutiniam laisvajam keliui l . Tačiau dėl laisvųjų kelių statistinio pasiskirstymo atskirų elektronų laisvasis kelias gali viršyti d_{min} net ir tuo atveju, kai vidutinis laisvasis kelias l yra mažesnis už d_{min} . Todėl, jeigu elektrinis laukas nuskurdintame sluoksnyje yra pakankamai stiprus, integralas (13) gali prilygti 1 net ir tuo atveju, kai $d_{min} > l$, t.y., kai elektrinio lauko stipris kontakto plokštumoje yra mažesnis už tą, kurį numato formulė (15) (t.p. žr. (9)). Skaičiuojant pramušimo įtampą pagal formulę (21), santykinė paklaida gali viršyti 50%.

3. Metodika

1. Programos **MicroTec** lange „Select Project“ pasirenkamas projektas „2.12 (break down)“. Po to atidaromas langas „Project Settings“, kuriame užduodamos parametru vertės. Projekto parametrai sugrupuoti į direktyvas. Kiekviena direktyva atitinka giminųjų parametru grupę. Norint pakeisti parametro vertę, reikia du kartus spragtelėti ant jos. Norint įterpti direktyvą, reikia kairiuoju mygtuku spragtelėti ant projekto pavadinimo (jis nurodytas pirmojoje eilutėje), po to spragtelėti dešiniuoju mygtuku ir pasirinkti "Add Directive", o po to pasirinkti reikalingą direktyvą. Parametrai įterpiami analogiškai, tačiau spragtelėti reikia ne ant projekto pavadinimo, o ant parametru grupės (direktyvos) pavadinimo. Norint pašalinti direktyvą arba parametru, reikia spragtelėti dešiniuoju pelės mygtuku ant direktyvos arba parametro pavadinimo ir pasirinkti „Delete“. Kiekvieno projekto skaičiavimo rezultatai įrašomi į failą, kurio vardo plėtinys yra „3D“ arba „2D“ (atliekant kai kuriuos projektus, sukuriamas ir „3D“, ir „2D“ failas). Rezultatų failų vardai būna nurodyti lango „Project Settings“ pirmoje eilutėje, šalia projekto pavadinimo. Tie failai būna tame pačiame kataloge, kuriame įdiegta programa **MicroTec**.

Dėmesio! Kartais dėl netinkamų parametru verčių arba dėl modeliavimo programos klaidų rezultatų failai nėra sukuriami. Tada, jeigu su tuo kompiuteriu anksčiau jau buvo atliekamas tas projektas, programos **MicroTec** kataloge išliks nepakitę senieji rezultatų failai, kurie gali atitikti visiškai kitokias parametru vertes. Todėl, siekiant išvengti nesusipratimų, prieš pradėdant skaičiavimus patartina ištrinti senuosius rezultatų failus.

2. Parametru grupė „Basic/Mesh“ apibrėžia visos struktūros matmenis bei koordinatinį tinklą. Šioje parametru grupėje užduodami šie parametrai:

Pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Number of X-nodes	Koordinatinio tinklo mazgų skaičius X kryptimi (išilgai padėklo paviršiaus)	4
Number of Y-nodes	Koordinatinio tinklo mazgų skaičius Y kryptimi (gilyn į padėklą)	150
Domain X size (μm)	Struktūros matmenys X kryptimi (struktūros ilgis)	1
Domain Y size (μm)	Struktūros matmenys Y kryptimi (struktūros gylis)	20
Domain Z size (μm)	Struktūros matmenys Z kryptimi (struktūros plotis). Nuo šio parametro priklauso dydžiai, kurie proporcingi struktūros plotui. Pvz., srovės stipris proporcingas šio parametro vertei, tačiau srovės tankis nuo jo nepriklauso.	1
Remesh	Šis parametras valdo koordinatinio tinklo tankį X ir Y kryptimis. Galimos vertės yra 0, 1, 2, 3 arba 4. Kai šis parametras lygus 2, tuomet tinklo tankis abiem kryptim priklauso nuo krūvininkų koncentracijų išvestinių tom kryptim: kuo didesnė išvestinė, tuo mažesnis koordinatės kitimo intervalas.	2
First Y mesh step size (μm)	Pirmojo Y ašies diskretizavimo intervalo plotis. Šis parametras naudojamas tik tuomet, kai Remesh=0 (tuomet Y kitimo intervalas eksponentiškai auga, einant gilyn į padėklą).	0.01

3. Parametru grupė „Electrodes“ apibrėžia elektrodų padėtis ir matmenis. Šioje parametru grupėje turi būti dvi direktyvos „Ohmic electrode“. Viena iš šių direktyvų atitinka viršutinį elektrodą ($y = 0$), o kita – apatinį ($y = 2 \mu\text{m}$). Kiekvienoje direktyvoje užduodami šie parametrai:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Electrode location	Elektrodo padėtis. 1 atitinka viršutinį elektrodą, o 2 – apatinį.	1 arba 2
Electrode number	Elektrodo numeris (turi sutapti su „Electrode location“)	1 arba 2
Electrode left edge (μm)	Elektrodo kairiojo krašto X koordinatė	0
Electrode right edge (μm)	Elektrodo dešiniojo krašto X koordinatė	1

4. Parametru grupė „IV-data/IV-data“ apibrėžia voltamperinės charakteristikos taškus, t.y., įtampas, kurioms esant, reikia apskaičiuoti srovės stiprį. Šioje parametru grupėje užduodami šie parametrai:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Number of IV-points	Voltamperinės charakteristikos taškų skaičius	31
Initial voltage for contact #1	Pirmojo elektrodo pradinis potencialas (V). Pirmasis elektrodas yra prijungtas prie n tipo srities.	0

Initial voltage for contact #2	Antrojo elektrodo pradinis potencialas (V). Antrasis elektrodas yra prijungtas prie p tipo srities.	0
Ramped contact number	Elektrodo, kurio potencialas keičiamas, numeris. Šiuo atveju keičiamas pirmojo elektrodo potencialas.	1
Voltage step size (V)	Intervalas tarp įtampos verčių (įtampos keitimo žingsnis). Pradinė šio parametro vertė yra 3 V. Tuomet galutinė pirmojo elektrodo įtampa lygi $30 \cdot 3 \text{ V} = 90 \text{ V}$. Tačiau kai kuriuose variantuose pramušimo įtampa yra didesnė už 100 V arba mažesnė už 50 V, todėl gali tekti padidinti arba sumažinti šį parametą (žr. 7 punktą).	3

5. Kadangi šiame darbe tiriama tolygiai legiruotoji pn sandūra, kurios neįmanoma gauti difuzijos bei jonų implantacijos metodais, tai panaudojama programos **MicroTec** (tiksliau, jos komponentės **SemSim**) galimybė dirbti su vartotojo apibrėžtomis tolygaus legiravimo sritimis. Tolygaus legiravimo sričių padėtis, matmenis ir legiravimo laipsnius apibrėžia direktyvos „Analytical doping data“. Šiuo atveju reikalingos dvi tokios direktyvos: viena atitinka *n* tipo sritį, o kita – *p* tipo sritį. Kiekvienoje direktyvoje užduodami šie parametrai:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Left edge of the well (μm)	Srities kairiojo krašto <i>X</i> koordinatė	0
Right edge of the well (μm)	Srities dešiniojo krašto <i>X</i> koordinatė	1
Top edge of the well (μm)	Srities viršutinio krašto <i>Y</i> koordinatė (<i>n</i> tipo sričiai – 0, o <i>p</i> tipo sričiai – 10)	0 arba 10
Bottom edge of the well (μm)	Srities apatinio krašto <i>Y</i> koordinatė (<i>n</i> tipo sričiai – 10, o <i>p</i> tipo sričiai – 20)	10 arba 20
Doping concentration (cm ⁻³)	Priemaišinių atomų koncentracija. Šis parametras priklauso nuo varianto (žr. darbo užduotis). <i>n</i> tipo sričiai šis parametras turi būti lygus N_D , o <i>p</i> tipo sričiai – $-N_A$. Ženklas prieš priemaišų koncentracijos vertę nusako priemaišų tipą: plusas atitinka donorus, o minusas – akceptorius (t.y., šis ženklas nusako priemaišos jono elektrinio krūvio ženklą). Skaičiavimus reikės atlikti, naudojant tris N_D ir N_A verčių poras (žr. darbo užduotis).	N_D arba $-N_A$
<i>X</i> -characteristic length (μm)	Būdingasis atstumas, kuris nusako priemaišų koncentracijos mažėjimo spartą <i>X</i> kryptimi už srities ribų*	0.05
<i>Y</i> -characteristic length (μm)	Būdingasis atstumas, kuris nusako priemaišų koncentracijos mažėjimo spartą <i>Y</i> kryptimi už srities ribų. Darbo užduotis reikalauja, kad taške $y = 0.8 \mu\text{m}$ šuoliškai pasikeistų priemaišų koncentracijos. Todėl šis parametras turi būti kuo mažesnis. Vertė $10^{-6} \mu\text{m}$ yra pakankamai maža (užrašas „1e-06“ yra tapatus „ 10^{-6} “).	1e-06

* Laikoma, kad už srities ribų priemaišų koncentracijos mažėjimą *X* kryptimi nusako Gauso funkcija $N_0 \exp(-(x-x_l)^2/L_x^2)$ (kai $x < x_l$) arba $N_0 \exp(-(x-x_r)^2/L_x^2)$ (kai $x > x_r$), o *Y* kryptimi – Gauso funkcija $N_0 \exp(-(y-y_t)^2/L_y^2)$ (kai $y < y_t$) arba $N_0 \exp(-(y-y_b)^2/L_y^2)$ (kai $y > y_b$); čia x_l , x_r , y_t ir y_b yra srities kraštų koordinatės (pirmieji keturi šios grupės parametrai), N_0 yra priemaišų koncentracija srities viduje (penktasis parametras), o L_x ir L_y yra būdingieji atstumai (šeštasis ir septintasis parametrai).

6. Uždavus visų parametų vertes, nuspaudžiamas mygtukas „Run“.

7. Užsidarius DOS langui, nuspaudžiamas mygtukas „2D Output“. Tuomet atsidaro voltamperinės charakteristikos atvaizdavimo programa „SibGraf 2D“. Pasirenkamas meniu punktas „Plot/Add...“ (senesnėje versijoje – „Curve/Add...“) ir atsidariusiame lange pasirenkami kintamieji, kurie turi būti atidėti ant *X* ir *Y* ašių. Kintamųjų žymėjimai: **Vc** – katodo (viršutinio kontakto) potencialas, **Va** – anodo (apatinio kontakto) potencialas, **Ic** – katodo srovė, **Ia** – anodo srovė. Išorinė įtampa lygi $V_a - V_c = -V_c < 0$ (atgalinė įtampa). Susitarimas dėl srovių ženklų: srovė yra teigiama, jeigu ji nukreipta

iš kontakto į puslaidininkį, ir neigiama priešingu atveju. Todėl $I_a = -I_c$. Kadangi reikia atvaizduoti srovės priklausomybę nuo įtampos, tai X kintamasis turi būti V_c (t.y., šalia užrašo " V_c " reikia pažymėti laukelį " X "), o Y kintamasis turi būti I_c (t.y., šalia užrašo " I_c " reikia pažymėti laukelį " Y "). Nuspaudžiami mygtukai "Add" ir "Close". Gautojoje voltamperinėje charakteristikoje randamas srovės šuolis, kuris atitinka griūtinį pramušimą. Kadangi šis šuolis yra labai didelis ($>10^{10}$ kartų didesnis už soties srovę), tai taškai, kurie atitinka mažesnes atgalines įtampas, turėtų praktiškai priklausyti abscisių ašiai. Taškai, kurie atitinka didesnes atgalines įtampas, yra klaidingi, nes programa **MicroTec** "neveikia" griūtinio pramušimo režime. Todėl, jeigu griūtinio pramušimo įtampa yra tirtojo įtampų intervalo pradžioje, reikia sumažinti parametą "Voltage step size" (žr. 4 punktą) ir pakartoti skaičiavimus (kad dauguma apskaičiuotųjų taškų turėtų fizikinę prasmę). Jeigu griūtinio pramušimo įtampa yra arčiau tirtojo įtampų intervalo pabaigos, negu jo pradžios, tuomet galima pereiti prie sekančio punkto.

8. Voltamperinė charakteristika išsaugoma vėlesnei analizei, naudojant programos „SibGraf 2D“ meniu komandą „File/Save As“.

9. Programos **MicroTec** lange „Project Settings“ pakeičiami n ir p sričių legiravimo laipsniai (du parametrai "Doping concentration"), nuspaudžiamas mygtukas „Run“ ir pakartojami punktai 7 ir 8. Skaičiavimai turi būti atlikti, naudojant tris legiravimo laipsnių poras (žr. darbo užduotis ir 5 punktą). Sumažinus N_A , pramušimo įtampa išauga, todėl gali tekti padidinti parametą "Voltage step size" (kad pramušimo įtampa priklausytų tiriamajam įtampų intervalui).

10. Gautosios trys voltamperinės charakteristikos atspausdinamos (tai galima atlikti ne laboratorinių darbų metu). Ordinačių ašies mastelis turi būti logaritminis. Voltamperinės charakteristikos turėtų būti panašios į tą, kuri pavaizduota 5 pav. (išskyrus srovės ir įtampos augimo kryptis, kurios turėtų būti priešingos toms, kurios naudojamos 5 pav.).

11. Analizuojant gautąsias voltamperines charakteristikas, atliekamos užduotys Nr. 3 ir 4 (tai galima atlikti ne laboratorinių darbų metu). Atliekant šias užduotis, reikia naudoti programą „SibGraf 2D“, kuri įeina į programų paketo **MicroTec** sudėtį. Turint duomenų failus, kurie buvo gauti 7 ir 8 punktuose, šią analizę galima atlikti, ir naudojant demonstracinę **MicroTec** versiją (tačiau su demonstracine versija neįmanoma atlikti 6 – 8 punktuose minėtų skaičiavimų).

Elektronų judris, kuris įeina į formulę (21), turi būti apskaičiuotas, naudojant bipolinio judrio modelį:

$$\mu = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + \left(\frac{N}{N_r}\right)^\alpha}; \quad (22)$$

čia N yra priemaišų koncentracija bazėje. Elektronams silicyje

$$\mu_{\min} = 55.2 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s}), \mu_{\max} = 1430 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s}), N_r = 1.07 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, \alpha = 0.733.$$

Kiti parametrai, kurie įeina į formulę (21), yra šie:

silicio draustinės juostos plotis: $E_g = 1.08 \text{ eV}$,

silicio dielektrinė skvarba: $\epsilon = 11.8$,

elektronų efektinė masė silicyje: $m_{ef} = 0.259m$; čia m yra laisvojo elektrono masė,

elektronų vidutinis šiluminio judėjimo greitis silicyje: $v_{sil} = 1.036 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$.