

VILNIAUS UNIVERSITETAS
Kietojo kūno elektronikos katedra
Vyksmų puslaidininkiniuose prietaisuose modeliavimas

Darbas Nr. 5a

Dvipolio tranzistoriaus tyrimas

Parengė A. Poškus

2009-04-06

Turinys

1. Užduotys	2
2. Darbo teorija	4
2.1 Dvipolis tranzistorius kaip dviejų diodų sistema	4
2.2. Dvipolio tranzistoriaus veikos.....	8
2.3 Bazės ir kolektoriaus srovės realistiškame dvipoliame tranzistoriuje.....	10
2.3.1. Atgalinė įtampa kolektoriaus sandūroje, $V_{BE} = 0$	11
2.3.2. Tiesioginė įtampa emiterio sandūroje, $V_{CB} = 0$	12
2.3.3. Pagrindiniai reiškiniai, kurie lemia realistiško dvipolio tranzistoriaus charakteristikas	15
3. Metodika	17

1. Užduotys

Šį darbą atitinka tik nelyginius variantus (lyginius variantus atitinka darbas Nr. 5b).

Sumodeliuoti realistiško npn tranzistoriaus veikimą tiesioginėje aktyviojoje veikoje. Skaičiavimus atlikti, esant dviem bazės legiravimo laipsniams arba dviem kolektoriaus legiravimo laipsniams. **MicroTec** projektai "4.4 (base + epi variation)", "4.4 merge" ir "4.4 example".

1, 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29, 33 variantai:

Bazės legiravimo įtakos srovės stiprinimo koeficientui ir Kirko efektui tyrimas. $V_{CE} = 3 \text{ V}$. Esant pradinei ir 5 kartus didesnei bazės implantavimo dozėms, nubraižyti I_B ir I_C priklausomybes nuo V_{BE} (logaritminiame mastelyje). Pagal tas priklausomybes nustatyti, kuriuo atveju Kirko efektas yra ryškesnis. Abiem atvejais rasti didžiausią srovės stiprinimo koeficientą β . Vienai V_{BE} vertei nubraižyti krūvininkų koncentracijų profilius, kurie atitinka abi bazės implantavimo dozes. Pagal skaitmeninio modeliavimo rezultatus nustatyti, kuria kryptimi reikia pakeisti bazės legiravimo laipsnį, kad Kirko efektas susilpnėtų, ir kuria kryptimi reikia jį keisti, kad β padidėtų.

3, 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31 variantai:

Kolektoriaus legiravimo įtakos srovės stiprinimo koeficientui ir Erli efektui tyrimas. $V_{BE} = 0.6 \text{ V}$. Esant pradiniam ir 2 kartus didesniai kolektoriaus legiravimo laipsniams, nubraižyti I_B ir I_C priklausomybes nuo V_{CE} (logaritminiame mastelyje). Abiem atvejais rasti koeficiento β vertę, kai $V_{CB} = 3 \text{ V}$ (t.y., kai $V_{CE} = 3.6 \text{ V}$). Be to, abiem atvejais nubraižyti krūvininkų koncentracijų priklausomybes nuo koordinatės, kai $V_{CB} = 0 \text{ V}$ ($V_{CE} = 0.6 \text{ V}$) ir kai $V_{CB} = 3 \text{ V}$. Pagal skaitmeninio modeliavimo rezultatus nustatyti, kuria kryptimi reikia pakeisti kolektoriaus legiravimo laipsnį, kad Erli efektas susilpnėtų, ir kuria kryptimi reikia jį keisti, kad β padidėtų.

Pradinė bazės implantavimo dozė (Q_{B0}) ir pradinis kolektoriaus legiravimo laipsnis (N_{C0}) skirtingiems nelyginiams variantams yra pateikti žemiau.

1 variantas. $Q_{B0} = 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

17 variantas. $Q_{B0} = 6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

3 variantas. $Q_{B0} = 6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

19 variantas. $Q_{B0} = 7 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

5 variantas. $Q_{B0} = 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

21 variantas. $Q_{B0} = 9 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

7 variantas. $Q_{B0} = 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

23 variantas. $Q_{B0} = 7 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

9 variantas. $Q_{B0} = 5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

25 variantas. $Q_{B0} = 9 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

11 variantas. $Q_{B0} = 6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

27 variantas. $Q_{B0} = 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

13 variantas. $Q_{B0} = 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

29 variantas. $Q_{B0} = 5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

15 variantas. $Q_{B0} = 5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

31 variantas. $Q_{B0} = 6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 7 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

33 variantas. $Q_{B0} = 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N_{C0} = 9 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

Kontroliniai klausimai

1. Dvipolio tranzistoriaus sudarymas iš dviejų diodų: energijos juostų diagramos, elektros srovių dedamosios, srovės stiprinimo mechanizmas.
2. Krūvininkų koncentracijų priklausomybės nuo koordinatės npn tranzistoriuje. Pagrindiniai skirtumai, lyginant su krūvininkų koncentracijų priklausomybėmis nuo koordinatės pn diode.
3. Srovės stiprinimo koeficiento ir emiterio efektyvumo išraiškos.
4. Dvipolio tranzistoriaus tiesioginė aktyvioji veika ir soties veika. Perėjimo iš tiesioginės aktyviosios veikos į soties veiką sąlygos.
5. Dvipolio tranzistoriaus kolektoriaus srovės priklausomybės nuo kolektoriaus potencialo bendro emiterio schemeje, esant įvairioms bazės srovėms.
6. Realistiško dvipolio tranzistoriaus skerspjūvis.
7. Erli efektas. Bazės pradūros sąvoka.
8. Kirko efektas.
9. Kodėl kolektoriaus legiravimo laipsnis turi būti žymiai mažesnis už bazės legiravimo laipsnį, o kolektoriaus storis turi būti žymiai didesnis už bazės storį?
10. Kolektoriaus sandūros atgalinės srovės įtaka srovės stiprinimo koeficientui.
11. Srovės stiprinimo koeficiento skaičiavimas, esant netolygiam legiravimui.
12. Efektinio draustinės juostos pločio sumažėjimo priežastys ir jo įtaka srovės stiprinimo koeficientui.

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 Dvipolis tranzistorius kaip dviejų diodų sistema

Dvipolis tranzistorius buvo išrastas 1948 Bell'o laboratorijoje (JAV), siekiant sukurti puslaidininkinį prietaisą, kuris galėtų atlikti stiprintuvo funkcijas ir pakeistų tuo metu paplitusias elektronines lempas. Maždaug du dešimtmečius nuo jo išradimo dvipolis tranzistorius buvo pagrindiniu skaitmeninės elektronikos komponentu. Nors per pastaruosius dešimt metų dvipolį tranzistorių išstūmė MOS tranzistorius, tačiau dvipoliai tranzistoriai ir dabar yra naudojami tuomet, kai reikalingas ypač didelis greitaieigiškumas (pvz., emiterinio ryšio logikos elementuose bei mikrobanguose galios stiprintuvuose) arba kai dirbama su aukštos galios signalais.

Vienmatis dvipolis tranzistorius – tai trijų sluoksnių sistema, kurioje plonas p tipo sluoksnis yra tarp dviejų n tipo sluoksnių, arba atvirkščiai. Prie kiekvienos iš šių trijų sričių yra prijungtas elektrodas. Taigi, dvipolis tranzistorius turi tris elektrodus. Dvipočiame tranzistoriuje svarbus ir elektronų, ir skylių judėjimas. Iš čia kilo pavadinimas “dvipolis”.

Kadangi dvipolį tranzistorių sudaro dvi pn sandūros, jį galima sukonstruoti iš dviejų priešpriešiais sujungtų pn diodų. Priklausomai nuo n ir p sričių tarpusavio išsidėstymo, skiriami npn ir pnp tranzistoriai. Toliau bus kalbama tik apie npn tranzistorių (pnp tranzistoriaus veikimas yra analogiškas, tačiau elektronai ir skylės apsieičia vaidmenimis).

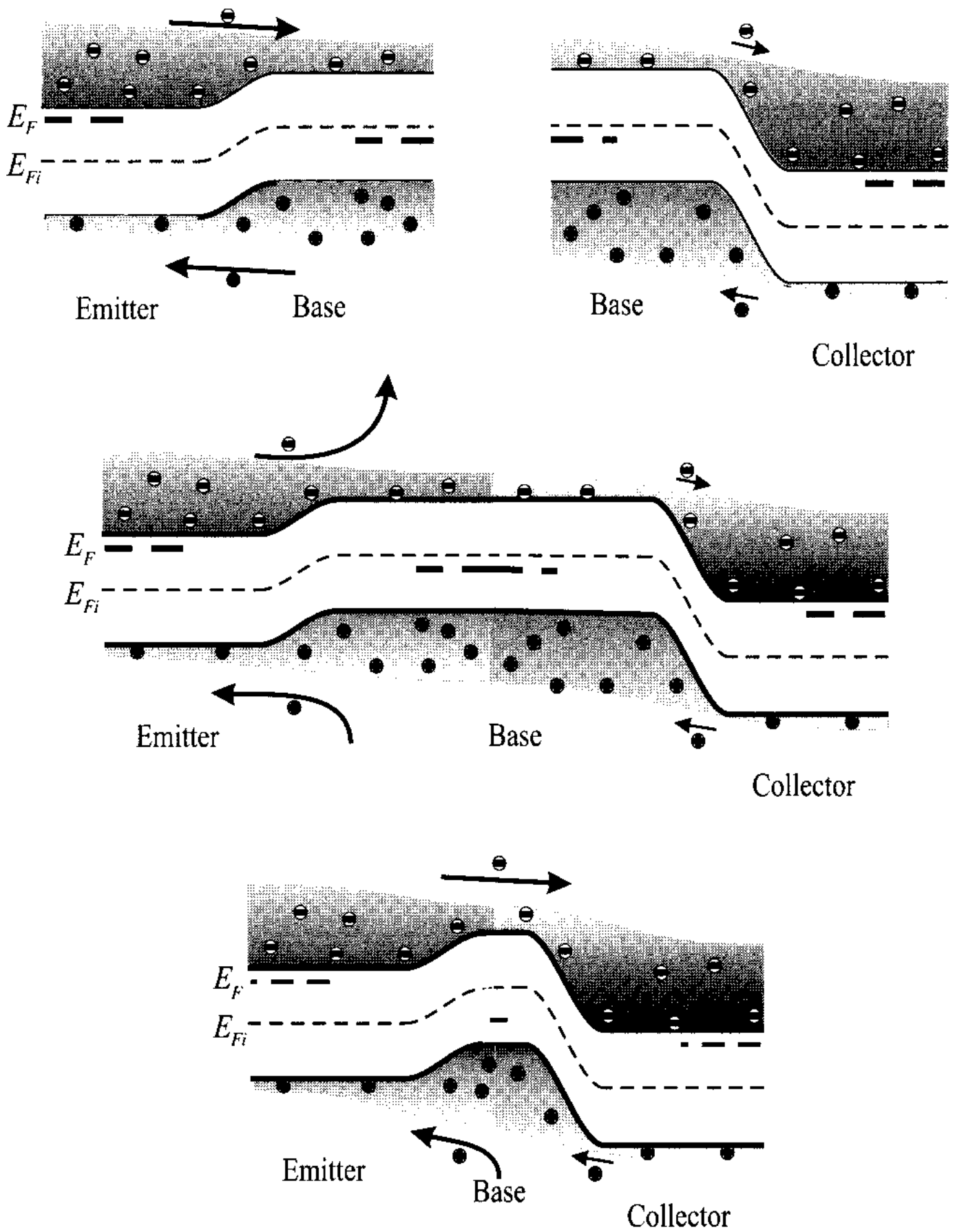
Kaip ir diodo atveju, dvipolio tranzistoriaus analizę pradėsime nuo jo energijos juostų diagramos (žr. 1 pav.). Kaip matome šioje diagramoje, npn tranzistoriaus n tipo sritys vadinamos **emiteriu** ir **kolektoriumi**, o vidurinė p sritis vadinama **baze**.

Normalioje veikoje, kuri vadinama **tiesiogine aktyviąja veika**, prie emiterio ir bazės sandūros yra prijungta tiesioginė įtampa, o prie kolektoriaus ir bazės sandūros yra prijungta atgalinė įtampa. Jeigu p sritys (bazės) storis būtų žymiai didesnis už elektronų difuzijos nuotolį (kaip 1 pav. vidurinėje diagramoje), tuomet visi į bazę injektuoti elektronai rekombinuotų joje. Tokiu atveju kolektorinė pn sandūra beveik neturėtų įtakos tranzistoriaus veikimui (nes ja tekėtų maža atgalinė srovė), ir tranzistorius elgtųsi kaip ilgas diodas, kuri sudaro tranzistoriaus emiterio ir bazės sritys. Tačiau tranzistoriuose bazės storis visuomet būna žymiai mažesnis už elektronų difuzijos nuotolį (žr. 1 pav. apatinę diagramą). Todėl beveik visi elektronai, kurie buvo injektuoti į bazę iš emiterio, nudifunduoja iki kolektoriaus elektrodo. Kolektoriaus sandūros nuskurdintame sluoksnyje egzistuojantis elektrinis laukas nutempia tuos elektronus į kolektorių. Kadangi elektronai, kurie buvo injektuoti į bazę, beveik nerekombinuoja joje ir nepasiekia bazės elektrodo, tai bazės elektrodo srovė beveik sutampa su skylių injekcijos srove emiterio ir bazės sandūroje, t.y., su skylių difuzijos srove ant nuskurdintojo sluoksnio krašto emiteryje. Dėl tos pačios priežasties kolektoriaus srovės elektroninė komponentė yra lygi elektronų injekcijos srovei emiterio ir bazės sandūroje, t.y., elektronų difuzinei srovei ant emiterinės sandūros nuskurdintojo sluoksnio krašto bazėje. Vadinasi, nors prie kolektorinės sandūros prijungta atgalinė įtampa, tačiau ja teka didelė srovė. Skylių ekstrakcijos iš kolektoriaus į bazę galima nepaisyti, nes šios ekstrakcijos indėlis į srovę yra palyginti mažas.

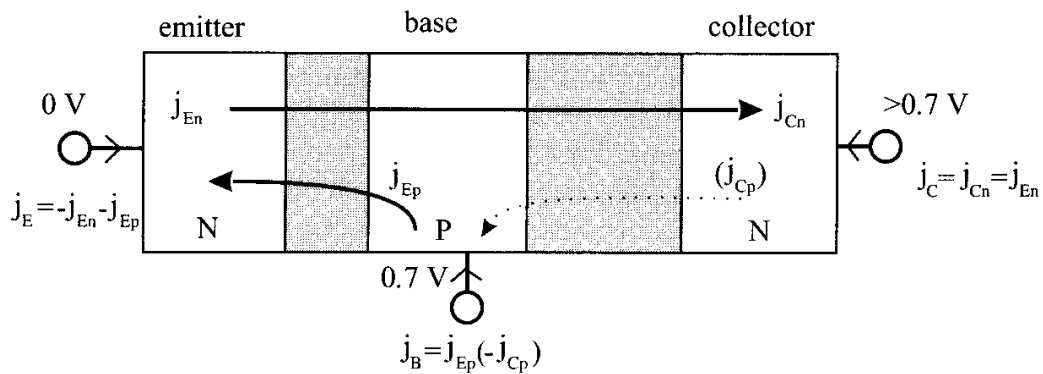
Taigi, tiesioginėje aktyviojoje veikoje tranzistoriaus srovė sudaryta iš dviejų pagrindinių dedamųjų, kurios parodytos 2 pav. Pirmoji dedamoji – tai elektronų injekcija iš emiterio į bazę (j_{En}). Beveik visi šie elektronai pasiekia kolektorių ($j_{Cn} \approx j_{En}$) ir sąlygoja kolektoriaus elektrodo srovę ($j_C \approx j_{Cn} \approx j_{En}$). Antroji dedamoji – tai skylių injekcija iš bazės į emiterį (j_{Ep}). Ši dedamoji sąlygoja bazės elektrodo srovę ($j_B \approx j_{Ep}$). Emiterio elektrodo srovė j_E yra lygi abiejų šių dedamųjų sumai (t.y., kolektoriaus ir bazės srovių sumai; 2 pav. srovė laikoma teigiama, jeigu ji nukreipta iš elektrodo į tranzistorių, ir neigiama priešingu atveju). Abi srovės dedamąsias nusako darbo Nr. 4 formulės (2.5.9a,b):

$$j_C = j_{En} = e \frac{n_i^2 D_B}{N_B w_B} \left[\exp\left(\frac{eV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right]; \quad (1)$$

$$j_B = j_{Ep} = e \frac{n_i^2 D_E}{N_E w_E} \left[\exp\left(\frac{eV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right]; \quad (2)$$



1 pav. npn tranzistoriaus sudarymas iš dviejų diodų

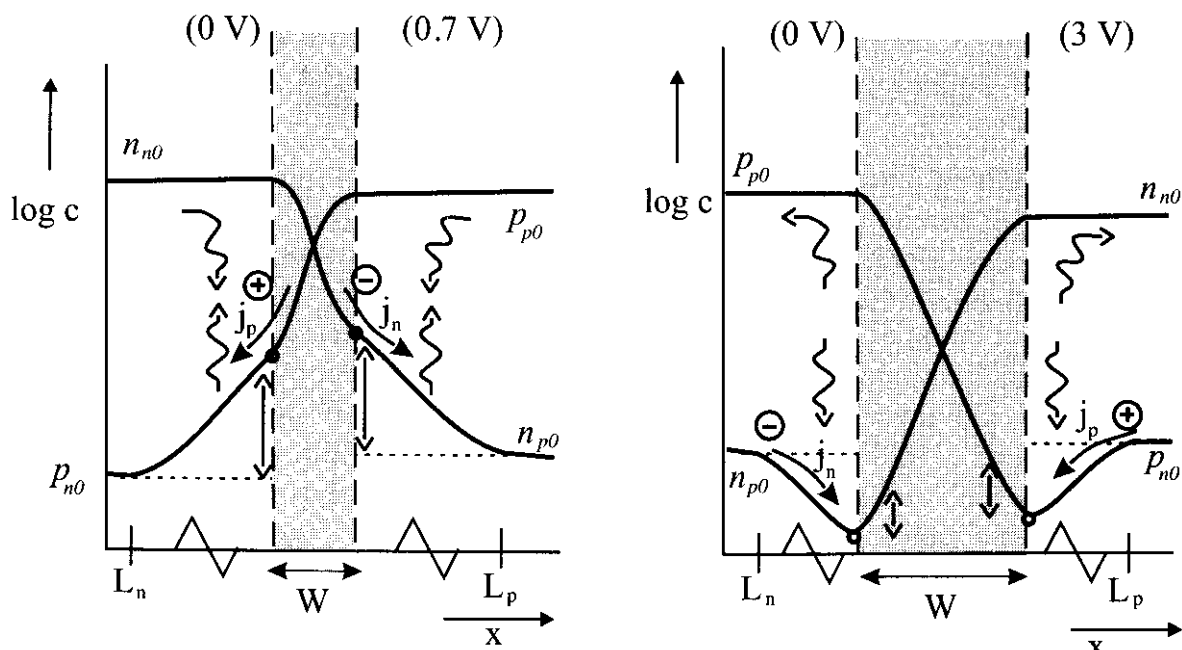


2 pav. Srovės npn tranzistoriuje tiesioginėje aktyviojoje veikoje

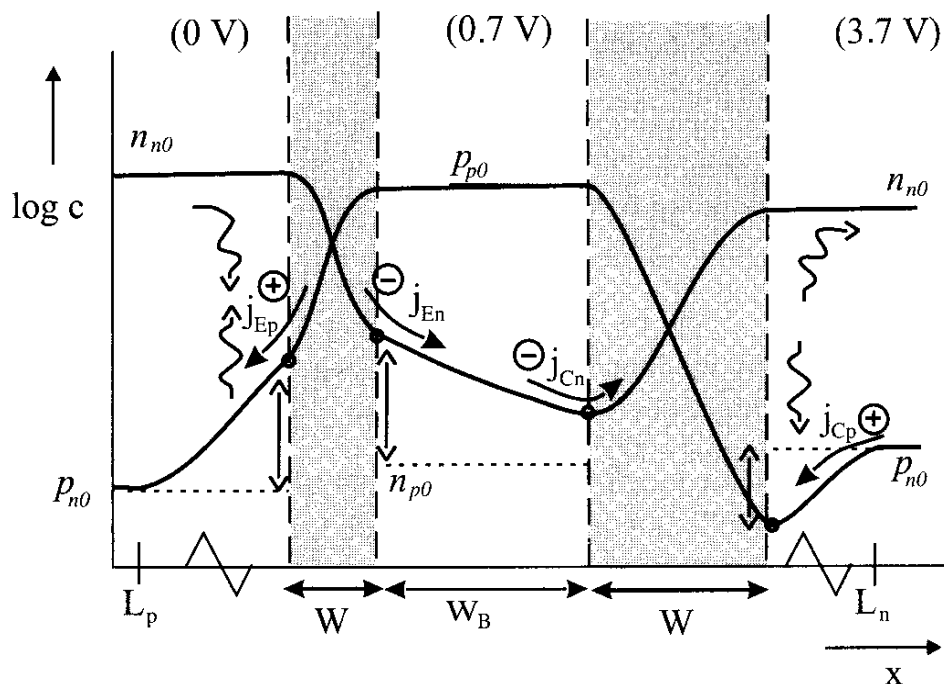
čia N_B yra akceptorių koncentracija bazėje, N_E yra donorų koncentracija emiteryje, V_{BE} yra bazės ir emitario elektrodų potencialų skirtumas, w_B yra bazės neutraliosios srities storis, w_E yra emitario neutraliosios srities storis, D_B yra šalutinių krūvininkų (elektronų) difuzijos koeficientas bazėje, o D_E yra šalutinių krūvininkų (skylių) difuzijos koeficientas emiteryje. Kaip matome šiose formulėse, ir elektronų, ir skylių injekcijos srovė yra proporcinga tam pačiam daugikliui $\exp(eV_{BE}/kT)-1$. Vadinasi, kolektoriaus elektrodo srovė yra proporcinga bazės elektrodo srovei. Be to, akivaizdu, kad tuo atveju, kai bazės legiravimo laipsnis (N_B) yra daug mažesnis už emitario legiravimo laipsnį (N_E), emitarinėje sandūroje elektronų injekcijos srovė yra daug didesnė už skylių injekcijos srovę. Taigi, *keičiant mažą bazės srovę, galima valdyti žymiai didesnę kolektoriaus srovę*. Tokiu būdu tranzistoriuje gaunamas srovės stiprinimas. *Kadangi kolektorinės sandūros, prie kurios prijungta atgalinė įtampa, varža yra daug didesnė už emitarinės sandūros varžą, tai kartu galima gauti ir įtampos bei galios stiprinimą*. Kolektoriaus ir bazės srovių santykis vadinamas **srovės stiprinimo koeficientu**.

Šalia aukščiau minėtųjų srovės komponentų, tikslesnėje analizėje reikia atsižvelgti į krūvininkų rekombinaciją emitarinės sandūros nuskurdintame sluoksnyje bei bazės tūryje (dėl šios rekombinacijos visuomet galioja nelygybė $j_{Cn} < j_{En}$), o taip pat į atgalinę skylių srovę kolektorinėje sandūroje (2 pav. pastaroji srovė parodyta taškine linija). Atgalinė skylių srovė kolektorinėje sandūroje gali vaidinti svarbų vaidmenį tuomet, kai šios sandūros nuskurdintajame sluoksnyje vyksta smūginė jonizacija (žr. darbo Nr. 4a teorinę dalį). Dėl smūginės jonizacijos atsiradę elektronai ekstraguojami į kolektorių, t.y., didina kolektoriaus srovę, o atsirandančios skylės ekstraguojamos į bazę ir nuteka į bazės elektrodą, t.y., mažina bazės srovę. Be to, kadangi smūginę jonizaciją sukelia elektronai, kurie ekstraguojami iš bazės į kolektorių, tai dėl smūginės jonizacijos atsiradusių krūvininkų skaičius yra proporcingas tų elektronų skaičiui, t.y., injekcijos srovei emitarinėje sandūroje. Taigi, smūginė jonizacija leidžia padidinti srovės stiprinimo koeficientą, išsaugant stiprinimo tiesiškumą. Tačiau smūginės jonizacijos panaudojimas stiprinimo koeficiento padidinimui nėra racionalus, nes šios jonizacijos intensyvumas stipriai priklauso nuo kolektoriaus įtampos. Net ir maži kolektoriaus įtampos svyravimai sukeltų didelius kolektoriaus bei bazės srovių pokyčius arba netgi kolektoriaus sandūros griūtinių pramušimą (žr. darbo Nr. 4a teorinę dalį). Todėl praktikoje dažniausiai siekiama, kad smūginės jonizacijos intensyvumas būtų kuo mažesnis.

3 pav. pavaizduotos krūvininkų koncentracijų priklausomybės nuo koordinatės emitario-bazės ir bazės-kolektoriaus pn sandūrose, laikant, kad šios sandūros yra atskirtos viena nuo kitos. Be to, laikoma, kad prie emitarinės sandūros prijungta tiesioginė įtampa (0.7 V), o prie kolektorinės sandūros prijungta atgalinė įtampa (3 V). Punktyrinės linijos vaizduoja nuskurdintojo sluoksnio kraštus. Šios priklausomybės atitinka anksčiau aptartą pn diodo atvejį: esant tiesioginei įtampai, šalutinių krūvininkų koncentracija prie nuskurdintojo sluoksnio kraštų padidėja (3 pav. kairioji pusė), o esant atgalinei įtampai, šalutinių krūvininkų koncentracija prie nuskurdintojo sluoksnio kraštų sumažėja (3 pav. dešinioji pusė). 3 pav. parodyti erdvinio krūvio ženklas bei krūvininkų rekombinacija ir generacija (vingiuotos rodyklės). Tiesioginės srovės atveju (t.y., emitarinėje sandūroje) vyrauja krūvininkų rekombinacija (vingiuotos rodyklės nukreiptos viena į kitą), o atgalinės srovės atveju (t.y., kolektorinėje sandūroje) vyrauja krūvininkų generacija (vingiuotos rodyklės nukreiptos į priešingas puses). Abiem atvejais perteklinių krūvininkų koncentracija,



3 pav. Krūvininkų koncentracijų kreivės atskirose emiterinėje ir kolektorinėje sandūrose



4 pav. Krūvininkų koncentracijų kreivės tranzistoriuje

tolstant nuo nuskurdintojo sluoksnio, artėja prie nulio dėsnio $\exp(-x/L_{sal})$; čia L_{sal} yra šalutinių krūvininkų difuzijos nuotolis.

4 pav. pavaizduotos krūvininkų koncentracijų priklausomybės nuo koordinatės, sujungus abu 3 pav. pavaizduotus diodus į viena npn tranzistorių, kurio bazės ilgis lygus kelioms dešimtosioms mikrono dalims. Kaip matome, bazėje egzistuoja didelis elektronų koncentracijos gradientas, dėl kurio elektronai greitai nudifunduoja iki kolektoriaus nuskurdintojo sluoksnio ir palieka bazę. Bazės storis yra žymiai mažesnis už šalutinių krūvininkų difuzijos nuotolį joje. Todėl per tą laiką, kol elektronas yra bazėje, jo rekombinacijos tikimybė yra maža. Palyginus 4 pav. ir 3 pav., akivaizdu, kad krūvininkų koncentracijų pasiskirstymas prie tranzistoriaus emiterio sandūros yra toks pats, kaip ir izoliuotoje emiterinėje sandūroje (3 pav. kairioji pusė). Krūvininkų koncentracijų gradientų kryptys prie tranzistoriaus kolektoriaus sandūros taip pat yra tokios pačios, kaip izoliuotoje kolektorinėje sandūroje (3 pav. dešinioji pusė). Tačiau, kaip matome 4 pav., elektronų koncentracija prie tranzistoriaus kolektoriaus sandūros nuskurdintojo sluoksnio krašto

bazėje yra daug didesnė už jų koncentraciją atskiroje sandūroje. Taip yra dėl to, kad “atgalinė” srovė, kuri teka pro kolektoriaus sandūrą, kai tranzistorius dirba tiesioginėje aktyviojoje veikoje, yra keliomis eilėmis didesnė už atgalinę srovę atskiroje pn sandūroje. Atitinkamai, mažiausioji elektronų koncentracija, kuri reikalinga palaikyti šiai srovei, tiek pat kartų padidėja, lyginant su atskira sandūra (šio krūvininkų koncentracijos apribojimo kilmė smulkiau aiškinama darbo Nr. 4a teorinėje dalyje).

Srovės stiprinimo koeficiento išraiška tiesioginėje aktyviojoje veikoje išplaukia iš formulių (1) ir (2):

$$\beta \equiv \frac{I_C}{I_B} = \frac{N_E D_B w_E}{N_B D_E w_B}. \quad (3)$$

Taigi, srovės stiprinimo koeficientą β galima reguliuoti, keičiant emiterio ir bazės legiravimo laipsnius bei jų storius (tačiau bazės storis turi likti žymiai mažesnis už elektronų difuzijos nuotolį bazėje).

Kitas naudingas tranzistoriaus parametras yra **emiterio efektyvumas**:

$$\alpha \equiv \frac{I_C}{I_E} = \frac{I_C}{I_C + I_B} = \frac{\beta}{\beta + 1}; \quad (4)$$

čia $I_E = I_C + I_B$ yra emiterio srovės absoliutinė vertė. Šis parametras nusako, kokia dalis injektuotų iš emiterio į bazę krūvininkų pasiekia kolektoriaus sandūrą ir ekstrahuojami į kolektorių.

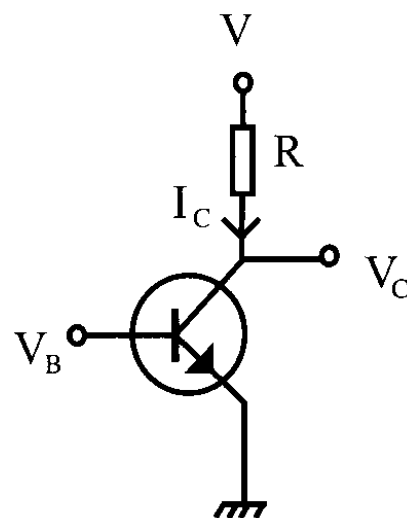
2.2. Dvipolio tranzistoriaus veikos

Kadangi dvipolis tranzistorius turi dvi sandūras ir prie kiekvienos iš jų gali būti prijungta tiesioginė arba atgalinė įtampa, tai egzistuoja keturios dvipolio tranzistoriaus veikos, priklausomai nuo to, prie kurios sandūros yra prijungta tiesioginė įtampa, o prie kurios – atgalinė. Praktikoje yra svarbiausios dvi veikos – **tiesioginė aktyvioji** (kai prie emiterinės sandūros yra prijungta tiesioginė įtampa, o prie kolektorinės sandūros – atgalinė) ir **soties** veika (kai prie abiejų sandūrų yra prijungta tiesioginė įtampa).

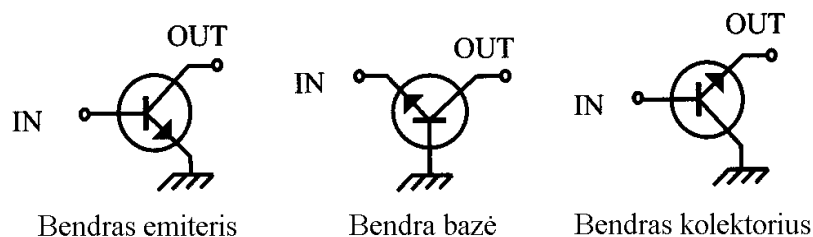
Tiesioginė aktyvioji veika yra dažniausiai naudojama tranzistoriaus veika (ji buvo aprašyta 2.1 poskyryje). Soties veika taip pat yra svarbi, nes tranzistorius gali pereiti iš tiesioginės aktyviosios veikos į soties veiką, jeigu kolektoriaus srovė yra pakankamai didelė. Pvz., tarkime, kad tranzistorius naudojamas kaip įtampos stiprintuvas (žr. 5 pav.). Tranzistoriaus žymėjime rodyklė yra iš emiterio pusės, o rodyklės kryptis nusako srovės kryptį emiterinėje sandūroje, kai prie jos yra prijungta tiesioginė įtampa (t.y., npn tranzistoriaus atveju rodyklė nukreipta nuo bazės link emiterio, o pnp tranzistoriaus atveju – nuo emiterio link bazės). 5 pav. pavaizduotas tranzistorius, kurio emiterio potencialas yra lygus nuliui (kitai sakant, emiteris įžemintas), o nuosekliai su kolektoriumi yra prijungti rezistorius R ir išorinis įtampos šaltinis, kurio įtampa lygi V (kitas šio šaltinio elektrodas yra įžemintas, t.y., prijungtas prie emiterio). Šiuo atveju įėjimo signalas yra bazės potencialas V_B , o išėjimo signalas – kolektoriaus potencialas V_C , kuris lygus

$$V_C = V - I_C R; \quad (5)$$

čia I_C yra kolektoriaus srovė. Didėjant bazės potencialui V_B , kolektoriaus srovė auga, todėl kolektoriaus potencialas mažėja (žr. (5) formulę). Kai I_C vertė yra pakankamai didelė, kolektoriaus potencialas gali tapti mažesnis už bazės potencialą ($V_C < V_B$). Tai reiškia, kad prie kolektoriaus sandūros prijungta tiesioginė įtampa $V_B - V_C$. Todėl pradeda pasireikšti elektronų injekcija iš kolektoriaus į bazę ir skylių injekcija iš bazės į kolektorių. Kolektorius visuomet būna žymiau silpniau legiruotas už bazę, todėl skylių indėlis į tiesioginę srovę kolektorinėje sandūroje yra žymiai didesnis už elektronų indėlį (žr. darbo Nr. 4 formules (24a,b)). Skylių injekcijos srovė kolektoriaus



5 pav. Tranzistorius kaip įtampos stiprintuvas



6 pav. Tranzistoriaus jungimo schemas

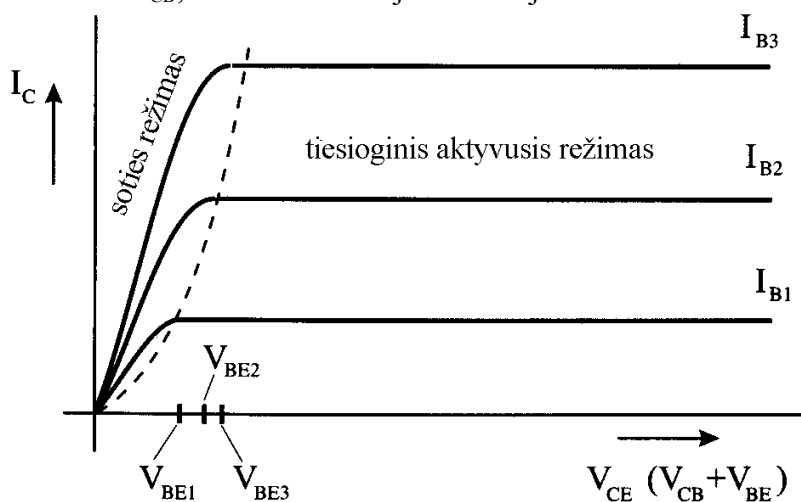
sandūroje kompensuoja elektronų ekstrakcijos srovę, todėl, toliau didinant bazės potencialą, kolektoriaus srovė beveik neauga. Vadinasi, kolektoriaus potencialas taip pat beveik nesikeičia (žr. (5)). Todėl tolimesnis bazės potencialo augimas pasireiškia tiesioginės įtampos ant abiejų sandūrų didėjimu. Atitinkamai, auga elektronų injekcija iš emiterio į bazę (beveik visi šie elektronai ekstraguojami į kolektorių) ir skylių injekcija iš bazės į kolektorių. Šie pertekliniai krūvininkai rekombinuoja kolektoriaus tūryje ir ant kolektoriaus elektrodo. Taigi, kai tranzistorius veikia soties veikoje, jo kolektoriuje yra sukauptas didelis perteklinių elektronų ir skylių skaičius, ir šis skaičius auga, didėjant tiesioginei įtampai emiterinėje sandūroje.

Dabar jau turime pakankamai informacijos, kad galėtume nubraižyti tranzistoriaus voltamperines charakteristikas. Skirtingai negu diodas, kuris pilnai apibūdinamas sąryšiu tarp jo srovės ir įtampos, tranzistorius apibūdinamas trimis srovės vertėmis (emiterio srovė I_E , bazės srovė I_B , kolektoriaus srovė I_C) ir trim įtampoms vertėm (bazės-emiterio įtampa V_{BE} , kolektoriaus-bazės įtampa V_{CB} ir kolektoriaus-emiterio įtampa V_{CE}). Minėtosios srovės ir įtampos susijusios šiais akivaizdžiais sąryšiais:

$$I_E = I_C + I_B, \quad (6)$$

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}. \quad (7)$$

Priklausomai nuo to, kurie iš šių šešių dydžių naudojami kaip įėjimo signalai, o kurie – kaip išėjimo signalai, skiriamos trys tranzistoriaus jungimo schemas: bendrojo emiterio, bendros bazės ir bendrojo kolektoriaus. Šias tris jungimo schemas iliustruoja 6 pav. Kiekvienos iš šių schemų pavadinimas nusako tranzistoriaus žemintąjį elektrodą, t.y., elektrodą, kurio potencialas laikomas lygiu nuliui. Kitų dviejų elektrodų potencialai atskaitomi atžvilgiu žemintojo elektrodo potencialo (t.y., žemintasis elektrodas yra “bendras” įėjimo ir išėjimo grandinėms: iš čia kilo šių schemų pavadinimai). Kiekvieną schemą atitinka savo charakteristikų rinkinys. Tačiau praktikoje naudingiausias yra kolektoriaus voltamperinės charakteristikos bendro emiterio schemoje – kolektoriaus srovės I_C priklausomybės nuo įtampos tarp kolektoriaus ir emiterio V_{CE} , esant įvairioms bazės srovės I_B vertėms. Šios charakteristikos pavaizduotos 7 pav. Kaip minėta, tiesioginėje aktyviojoje veikoje kolektoriaus srovė I_C yra proporcinga bazės srovei I_B . Kolektoriaus srovę šioje veikoje sąlygoja elektronai, kurie ekstraguojami iš bazės. Idealiu atveju šių elektronų skaičius nepriklauso nuo V_{CB} , nes kolektorinėje sandūroje šiems elektronams egzistuoja potencinė



7 pav. npn tranzistoriaus charakteristikos

“nuokalnė”, kuria jie “nurieda” į kolektorių (nuo V_{CB} priklauso tik šios “nuokalnės” statusas). Esant fiksuotai bazės srovei I_B , bazės-emiterio įtampa V_{BE} taip pat yra fiksuota (šie du dydžiai susiję (2) sąryšiu). Vadinasi, esant fiksuotai bazės srovei I_B , tiesioginėje aktyviojoje veikoje tranzistoriaus kolektoriaus srovė I_C nepriklauso nuo V_{CE} (žr. (7)). Šią veiką nusako horizontalių tiesių šeima (žr. 7 pav.). Šios veiką atitinka $V_{CB} < 0$, t.y., $V_{CE} < V_{BE}$ (žr. (7)). Vadinasi, kai V_{CE} tampa mažesnė už V_{BE} , prasideda skylių injekcija iš bazės į kolektorių, dėl kurios kolektoriaus srovė tampa mažesnė už jos vertę tiesioginėje aktyviojoje veikoje (žr. 7 pav.) ir tranzistorius įsisotina.

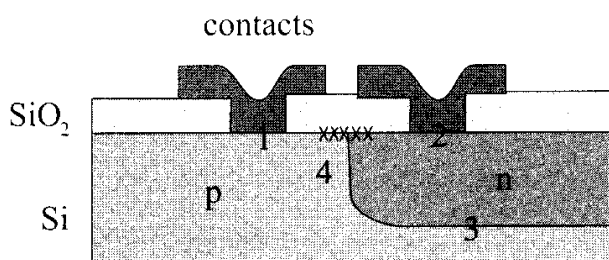
Aukščiau minėtasis koeficientas β – tai srovės stiprinimo koeficientas bendro emiterio schemeje, o emiterio efektyvumas α – tai srovės stiprinimo koeficientas bendros bazės schemeje.

Konstruojant tranzistorių, siekiama, kad srovės stiprinimo koeficientas β būtų kuo didesnis (t.y., kad emiterio efektyvumas α būtų kuo artimesnis vienetui) ir kad tiesioginėje aktyviojoje veikoje, esant fiksuotai bazės srovei, kolektoriaus srovė kuo silpniau priklausytų nuo kolektoriaus-emiterio įtampos V_{CE} .

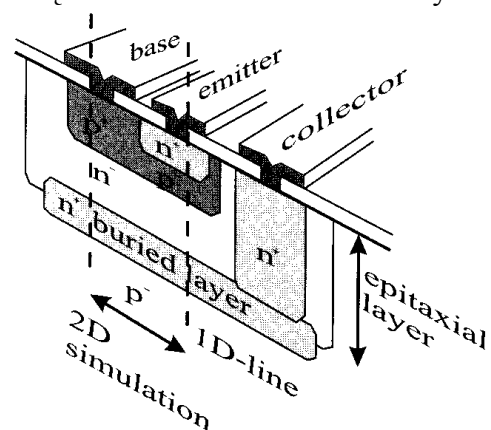
2.3 Bazės ir kolektoriaus srovės realistiškame dvipoliame tranzistoriuje

2.1 poskyryje tranzistorius buvo laikomas trijų tolygiai legiruotų sluoksnių sistema (žr. 4 pav.). Dabar aptarsime realistiškesnę puslaidininkinę struktūrą. Šios struktūros pagrindas – emiterio ir bazės diodas, kurio skerspjūvis pavaizduotas 8 pav. Jeigu laikysime, kad 8 pav. n tipo sritis yra tranzistoriaus emiteris, o p tipo sritis yra tranzistoriaus bazė, tuomet kolektoriaus sritis turėtų būti priglundusi prie šio diodo apatinio krašto. Tačiau integrinėse grandinėse visi elektrodai yra vienoje padėklo pusėje, kaip tai pavaizduota 9 pav. Tokia geometrija sudaro kai kurių keblumų, užtikrinant normalų tranzistoriaus veikimą. Elektronai, kurie buvo ekstraguoti iš bazės toli nuo kolektoriaus elektrodo, turi nueiti palyginti didelį atstumą, kol pasiekia kolektoriaus elektrodą. Kadangi kolektoriaus specifinis laidumas yra palyginti mažas, tai didelis atstumas reiškia didelę varžą. Ši varža elgiasi kaip papildoma kolektoriaus apkrovos varža (5 pav. ši varža pažymėta R). Siekiant sumažinti kolektoriaus varžą, kolektoriaus viduje sukuriama didesnio legiravimo n tipo sritis, kuri 9 pav. pažymėta n^+ (viršutinis indeksas “+” nurodo, kad šios srities legiravimas yra didesnis už pagrindinės kolektoriaus dalies legiravimą). Šios srities laidumas yra žymiai didesnis už kolektoriaus pagrindinės dalies laidumą, todėl ji elgiasi kaip kolektoriaus elektrodo tęsinys. Kaip matome 9 pav., didžioji n^+ srities dalis yra kolektoriaus apačioje. Todėl efektas beveik toks pats, lyg kolektoriaus elektrodas būtų prijungtas prie kolektoriaus srities apatinio krašto.

Paslėptąjį n^+ sluoksnį kolektoriuje galima suformuoti dviem būdais. Vienas būdas yra toks. Visų pirma ant monokristalinio padėklo paviršiaus jonų implantacijos būdu sukuriamas didelio laidumo n tipo sluoksnis. Paskui ant šio sluoksnio užauginamas mažesnio laidumo n tipo kristalinis sluoksnis. Kristalinio sluoksnio auginimas ant kitos medžiagos kristalo paviršiaus vadinamas **epitaksija**, o taip užauginti sluoksniai vadinami **epitaksiniais sluoksniais**. Aptariamuoju atveju epitaksinis sluoksnis atlieka kolektoriaus vaidmenį, o didelio laidumo sluoksnis, ant kurio jis buvo auginamas, atlieka paslėptojo n^+ tipo sluoksnio vaidmenį. Paskui bazės ir emiterio sritys sukuriamos



8 pav. Tranzistoriaus struktūros pagrindas – pn diodo struktūra



9 pav. Tipiško dvipolio tranzistoriaus skersniūvis

epitaksiniam sluoksnyje. Kitas paslėptojo n^+ sluoksniu formavimo būdas remiasi donorų jonų implantacija į silicio padėklą, naudojant dalelių greitintuvą. Kadangi reikalingas implantacijos gylis gali būti mikronų eilės, tai greitinančioji įtampa turi būti ypač aukšta (iki 500 kV).

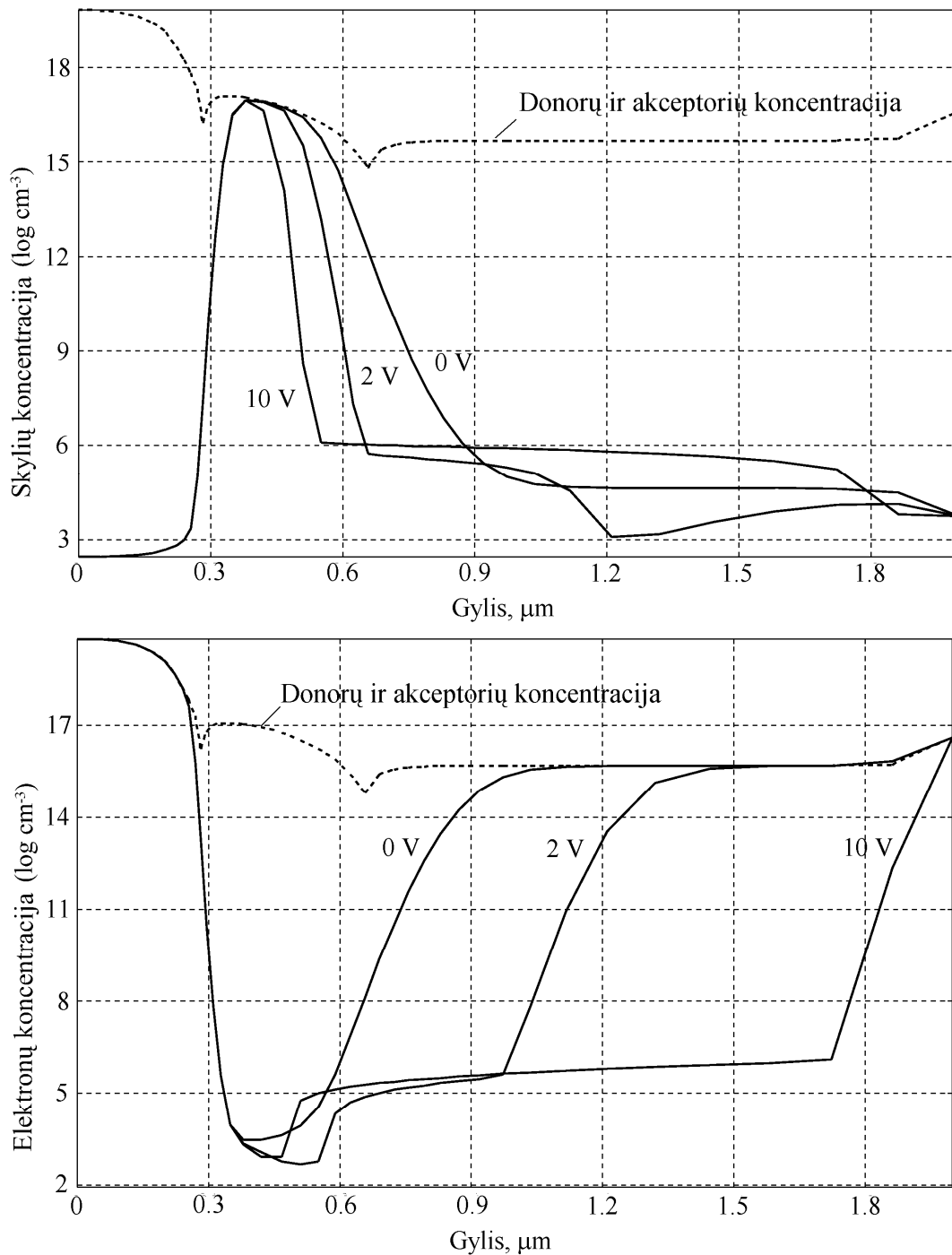
Realistišką dvipolį tranzistorių, kurio skerspjūvis pavaizduotas 9 pav., galima aproksimuoti dvimačiu modeliu, kuriame atsižvelgiama tik į skerspjūvio dalį, kuri yra tarp dviejų tiesių, einančių per emiterio ir bazės elektrodus (t.y., tarp dviejų vertikaliųjų punktyrinių linijų 9 pav.). Ši dvimatė sritis gaunama, papildžius 8 pav. pavaizduotą pn diodo skerspjūvį iš apačios n tipo epitaksiniu sluoksniu, po kuriuo yra n^+ sluoksnis. Laikysime, kad epitaksinio sluoksniu storis lygus $1.4 \mu\text{m}$.

Realistiško dvipolio tranzistoriaus savybes iliustruosime pjūviais išilgai tiesės, kuri eina per emiterio centrą ir yra statmena padėklo paviršiui (dešinioji punktyrinė linija 9 pav.).

2.3.1. Atgalinė įtampa kolektoriaus sandūroje, $V_{BE} = 0$

Iš pradžių laikysime, kad tarp bazės ir emiterio nėra prijungta įtampa. 10 pav. pavaizduotos priemaišų koncentracijų ir skylių (a) bei elektronų (b) koncentracijų dešimtainių logaritmų priklausomybės nuo koordinatės, esant 0 V, 2 V ir 10 V atgalinei įtampai tarp kolektoriaus ir bazės. Kaip matome, priemaišų koncentracija emiteryje, bazėje ir kolektoriuje priklauso nuo koordinatės, t.y., realiojo tranzistoriaus legiravimas nėra tolygus. Tai yra pagrindinis skirtumas, lyginant su idealiuoju tranzistoriumi, kuris pavaizduotas 4 pav. Donorų koncentracija epitaksiniam sluoksnyje šiame pavyzdyje lygi $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, t.y., maždaug 25 kartus mažesnė už didžiausią akceptorų koncentraciją bazėje. Todėl didžioji nuskurdintojo sluoksniu dalis tenka kolektoriui (žr. darbo Nr. 2 (2.6.9) formulę). Kolektorinės sandūros nuskurdintasis sluoksnis – tai sritis, kurioje skylių koncentracija yra daug mažesnė už akceptorų koncentraciją bazėje, o elektronų koncentracija yra daug mažesnė už donorų koncentraciją epitaksiniam sluoksnyje. Kaip matyti 10 pav., esant nulinei įtampai tarp bazės ir kolektoriaus, kolektorinės sandūros nuskurdintasis sluoksnis yra tarp $y = 0.4 \mu\text{m}$ ir $y = 1.0 \mu\text{m}$. Didėjant atgalinei įtampai, nuskurdintojo sluoksniu storis didėja, kaip ir turi būti pagal darbo Nr. 4 (2.6.3) formulę. Nuskurdintasis sluoksnis plečiasi į kolektoriaus pusę. Tačiau jo dalis, kuri tenka bazei, taip pat plėtojama. Todėl bazės neutraliosios dalies storis mažėja. Šis bazės storio mažėjimas, augant atgalinei įtampai kolektoriaus sandūroje, vadinamas **Erli efektu** (*Early effect*). Erli efektas sąlygoja nežymų kolektoriaus srovės augimą, didėjant atgalinei įtampai kolektorinėje sandūroje, kai prie emiterinės sandūros yra prijungta pastovi tiesioginė įtampa. T.y., tiesioginėje aktyviojoje veikoje kolektoriaus charakteristikos, kurios pavaizduotos 7 pav., nėra tiksliai horizontalios, o srovės stiprinimo koeficientas auga, didėjant kolektoriaus potencialui. Šis srovės didėjimas išplaukia iš formulės (1), o jo fizikinė priežastis – elektronų koncentracijos gradiento didėjimas (elektronų koncentracijos vertės bazės kraštuose beveik nepriklauso nuo kolektoriaus įtampos, todėl, mažėjant bazės storiui, elektronų koncentracijos išvestinė koordinatės atžvilgiu auga). Esant 10 V įtampai, nuskurdintasis sluoksnis pasiekia n^+ sritį. Donorų koncentracija n^+ srityje yra didesnė už akceptorų koncentraciją bazėje. Todėl, toliau didėjant įtampai, nuskurdintasis sluoksnis pradeda labiau plėstis į bazės pusę, t.y., Erli efektas sustiprėja. Esant pakankamai aukštai atgalinei įtampai kolektorinėje sandūroje, dėl Erli efekto emiterinės bei kolektorinės sandūrų nuskurdintieji sluoksniai susilieja ir tranzistorius nustoja veikti (kolektorius praktiškai užtrumpinamas su emiteriu). Tai yra vadinamoji **bazės pradūra**.

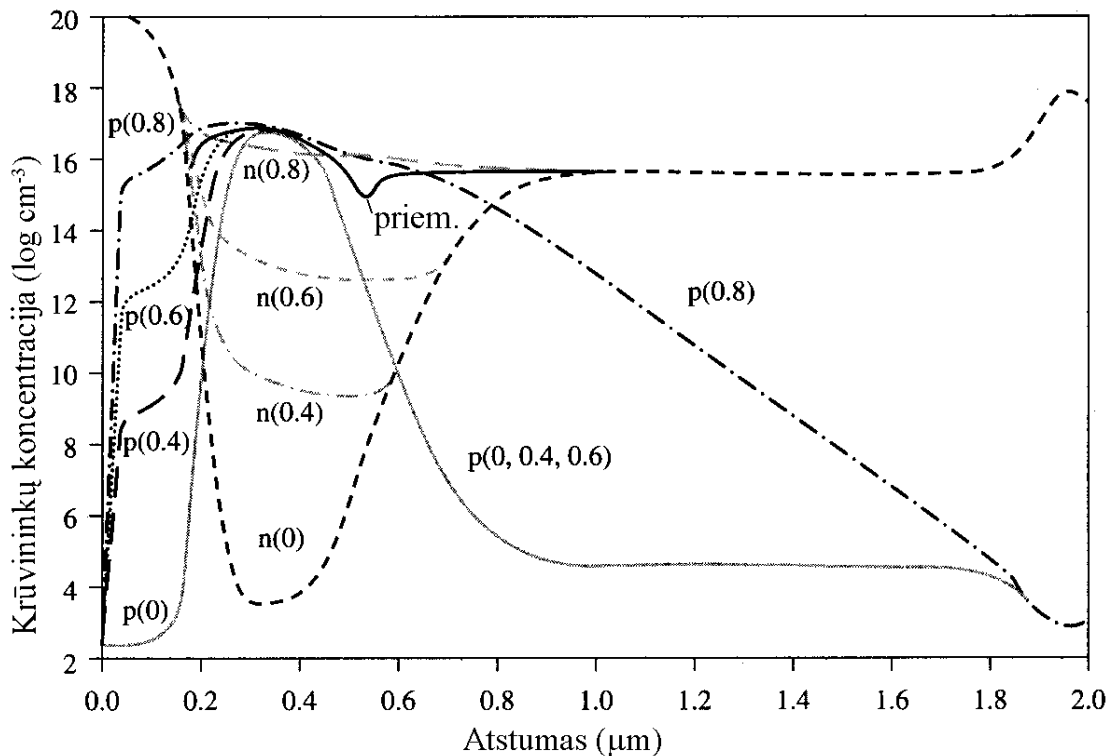
Erli efektas yra nepageidautinas reiškinys, nes jis sumažina tranzistoriaus elektrinių parametrų stabilumą. Siekiant sumažinti Erli efektą, kolektorius turi būti legiruotas daug silpniau, negu bazė. Kuo silpniau legiruotas kolektorius, tuo mažesnė kolektorinės sandūros nuskurdintojo sluoksniu dalis tenka bazei ir tuo didesnė jo dalis tenka kolektoriui. Todėl, kad nuskurdintojo sluoksniu kraštas kolektoriuje nepasiektų n^+ srities, kolektoriaus storis turi būti daug didesnis už bazės storį.



10 pav. Krūvininkų koncentracijų pasiskirstymai, kai $V_{BE} = 0$, esant skirtingoms V_{CB}

2.3.2. Tiesioginė įtampa emiterio sandūroje, $V_{CB} = 0$

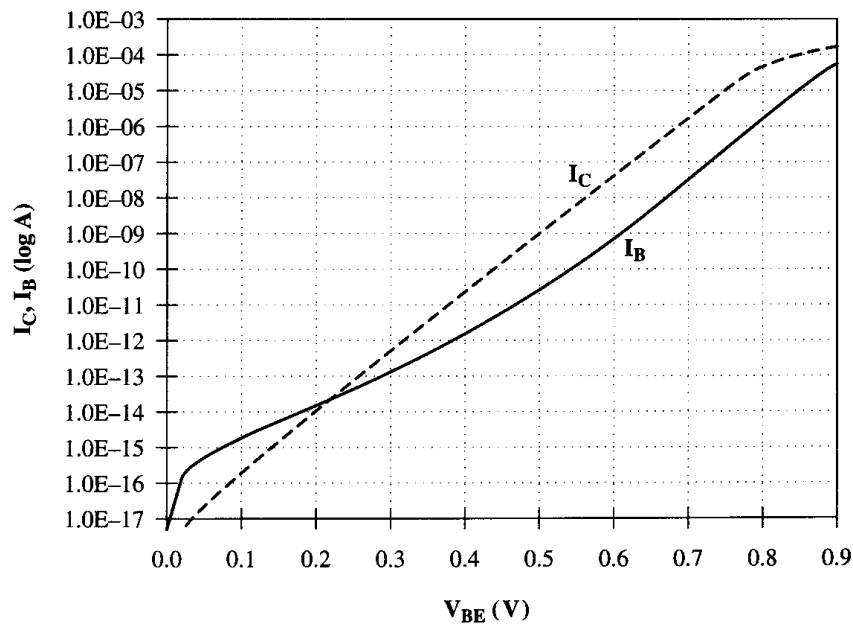
Dabar tarkime, kad tarp bazės ir emiterio yra prijungta tiesioginė įtampa. Kad būtų paprasčiau, laikysime, kad kolektoriaus-bazės įtampa lygi nuliui. Skylių ir elektronų koncentracijų pasiskirstymai, esant skirtingoms bazės-emiterio įtampoms (0 V, 0.4 V, 0.6 V ir 0.8 V), yra pavaizduoti 11 pav. Kaip matome, augant tiesioginei įtampai, šalutinių krūvininkų koncentracijos emiteryje ir bazėje auga, kaip ir trumpajame pn diode. Tačiau, skirtingai nuo pn diodo, šalutinių krūvininkų koncentracija bazės galutiniame taške nesumažėja iki pusiausvirosios vertės, o nusistovi ties daug didesne verte (11 pav. atveju, esant 0.4 V įtampai, ši vertė lygi maždaug 10^{10} cm^{-3}). Didinant tiesioginę įtampą tarp bazės ir emiterio, mažiausioji elektronų koncentracija bazėje auga ir galų gale viršija elektronų koncentraciją epitaksiniam sluoksnyje (kolektoriuje). 11 pav. atveju tai atsitinka, kai $V_{BE} > 0.8 \text{ V}$. Kaip matome, tuomet pradeda augti skylių koncentracija kolektoriuje. Taip yra todėl, kad elektronų koncentracija kolektoriaus nuskurdintame sluoksnyje jau nėra žymiai



11 pav. Krūvininkų koncentracijų priklausomybės nuo koordinatės, esant skirtingoms V_{BE} , kai $V_{CB} = 0$

mažesnė už pusiausvirąją elektronų koncentraciją kolektoriuje (t.y., už donorių koncentraciją kolektoriuje), o tai reiškia, kad nuskurdintasis sluoksnis praktiškai nustoja egzistuoti. Vadinasi, nustoja egzistuoti potencialis barjeras skylėms, kurios juda iš bazės į kolektorių. Todėl kolektoriaus sandūroje elektronai nėra atskiriami nuo juos neutralizuojančių skylių ir difunduoja į kolektorių taip, lyg jis būtų bazės dalis, o kolektoriaus vaidmenį pradeda atlikti paslėptasis n^+ sluoksnis (žr. 9 pav.). Taigi, kai mažiausia šalutinių krūvininkų koncentracija bazėje viršija kolektoriaus legiravimo laipsnį, efektinis bazės storis tampa lygus bazės ir kolektoriaus storių sumai. Šis efektyvio bazės storio padidėjimas, esant didelei tiesioginei įtampai emiterio sandūroje, yra vadinamas **Kirko efektu**. Kirko efektas sulėtina kolektoriaus srovės augimą, didėjant V_{BE} . Tai išplaukia iš (1) formulės (bazės storis w_B yra vardiklyje). Vadinasi, dėl Kirko efekto srovės stiprinimo koeficientas sumažėja (tai akivaizdu šio koeficiento išraiškoje (3)). Kirko efektą galima pašalinti, padidinus kolektoriaus legiravimo laipsnį. Tačiau tuomet sumažėja kolektorinės sandūros atsparumas griūtiniam pramušimui (žr. darbo Nr. 5a (18) formulę). Be to, padidėjus kolektoriaus legiravimo laipsniui, susiaurėja kolektorinės sandūros nuskurdintasis sluoksnis, todėl padidėja kolektorinės sandūros talpa ir sumažėja tranzistoriaus greitaiegiškumas.

Srovės stiprinimo koeficiento priklausomybę nuo V_{BE} lengviausia nustatyti pagal kolektoriaus ir bazės srovių logaritmų priklausomybes nuo V_{BE} , kai $V_{CB} = 0$ (žr. 12 pav.). Šių logaritmų skirtumas lygus stiprinimo koeficiento logaritmui. Kaip matome 12 pav., esant ypač mažoms tiesioginėms įtampoms emiterio sandūroje, kolektoriaus srovė I_C yra mažesnė už bazės srovę I_B , t.y., stiprinimo koeficientas yra mažesnis už vienetą. Taip yra dėl to, kad, esant mažai tiesioginei įtampai pn sandūroje, injektuojamų į jos nuskurdintąjį sluoksnį krūvininkų skaičius yra artimas rekombinuojančių nuskurdintame sluoksnyje krūvininkų skaičiui. T.y., dauguma injektuojamų iš emiterio į bazę elektronų rekombinuoja emiterinės sandūros nuskurdintame sluoksnyje ir todėl nepasiekia kolektoriaus. 12 pav. matome, kad, pradėdant nuo 0.5 V įtampos, I_C ir I_B priklausomybės nuo V_{BE} tampa lygiagrečios, t.y., srovės stiprinimo koeficientas nustoja priklausyti nuo V_{BE} ir yra lygus maždaug 70. Pradedant maždaug nuo 0.8 V, kolektoriaus srovės augimas sulėtėja dėl Kirko efekto, todėl stiprinimo koeficientas vėl pradeda mažėti. Matome, kad V_{BE} verčių intervale, kuriame stiprinimo koeficientas yra pastovus, kolektoriaus ir bazės srovės kinta maždaug 5 eilėmis. Toks kitimo intervalas tranzistoriui nėra didelis. Be to, $\beta = 70$ yra palyginti mažas srovės stiprinimo koeficientas. Taigi, tranzistorius, kuriam nubraižytos 12 pav. kreivės, nėra tobulas. Taip yra dėl palyginti mažos priemaišų koncentracijos bazėje ir kolektoriuje.



12 pav. Kolektoriaus ir bazės srovių priklausomybės nuo V_{BE} , kai $V_{CB} = 0$

Iš vienos pusės, mažas bazės legiravimo laipsnis sąlygoja palyginti platų emiterinės sandūros nuskurdintą sluoksnį, taigi, palyginti intensyvią rekombinaciją jame; iš kitos pusės, dėl kolektoriaus mažo legiravimo laipsnio Kirko efektas pasireiškia, esant žemesnėms įtampoms. Konstruojant tranzistorių, siekiama, kad koeficientas β būtų kuo didesnis, o jo priklausomybė nuo V_{BE} – kuo silpnesnė. Norint optimizuoti tranzistorių, reikia atitinkamai parinkti bazės ir kolektoriaus legiravimo laipsnius. Norint padidinti β , reikia mažinti bazės storį (žr. (3) formulę). Šis puslaidininkinės struktūros optimizavimas yra ilgas ir sudėtingas procesas.

Realistiško tranzistoriaus atveju srovės stiprinimo koeficiento išraiška (3) negalioja, nes ji gauta, remiantis trumpojo diodo srovių išraiškomis (1) ir (2) tolygiojo legiravimo atveju. Realiuose tranzistoriuose emiterio ir bazės legiravimo laipsniai N_E ir N_B nėra konstantos (pvz., žr. punktyrines linijas 10a,b pav.). Elektronų ir skylių difuzijos koeficientai D_B ir D_E taip pat nėra konstantos, nes jie priklauso nuo priemaišų koncentracijos. Tačiau formules (1) ir (2) galima nesunkiai apibendrinti bet kokiam donorų ir akceptorų pasiskirstymui. Tuo tikslu dydžius $N_E w_E / D_E$ ir $N_B w_B / D_B$ reikia pakeisti atitinkamai integralais $\int (N_E / D_E) dx$ ir $\int (N_B / D_B) dx$. Pirmasis integralas integruojamas emiterio storiu, o antrasis – bazės storiu. Vadinasi, reiškinį (3) reikia pakeisti integralų santykiu:

$$\beta \equiv \frac{I_C}{I_B} = \frac{\int (N_E / D_E) dx}{\int (N_B / D_B) dx} \quad (8a)$$

Kad būtų paprasčiau, laikysime, jog D_E ir D_B yra konstantos. Tuomet vietoj (8a) turime

$$\beta = \frac{D_B \int N_E dx}{D_E \int N_B dx} \quad (8b)$$

Priemaišų koncentracijų integralai, kurie įeina į formulę (8b) – tai implantuotų jonų dozės. Šios dozės naudojamos kaip pradiniai duomenys, modeliuojant puslaidininkinės struktūros gamybos procesą. Pvz., tranzistoriui, kurį iliustruoja 10 – 12 pav., emiterio donorų (arseno jonų) implantacijos dozė lygi 10^{15} cm^{-2} , o bazės akceptorų (boro jonų) implantacijos dozė lygi $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Pagal punktyrinę liniją 10a,b pav., didžiausioji donorų koncentracija emiteryje lygi maždaug $7 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, o didžiausioji akceptorų koncentracija bazėje lygi $1.2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Atitinkamas elektronų ir skylių difuzijos koeficientų santykis yra apytiksliai lygus 16. Vadinasi, $\beta = 16 \cdot 10^{15} / (5 \cdot 10^{12}) = 3200$. Ši vertė yra daug didesnė už skaitmeninio modeliavimo būdu gautą tiksliąją vertę $\beta = 70$ (žr. 12 pav.). Taip yra todėl, kad, skaičiuojant srovių (1) ir (2) santykį, buvo laikoma, kad daugiklis n_i^2 yra vienodas abiejose formulėse (todėl, padalinus vieną srovę iš kitos, šis daugiklis išsiprastino). Iš tikrųjų taip nėra, nes draustinės juostos plotis E_g šiek tiek priklauso nuo

priemaišų koncentracijos. Taigi, dydis n_i^2 taip pat priklauso nuo priemaišų koncentracijos, nes jis apibrėžiamas sąryšiu

$$n_i^2 = n_0 p_0 = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right); \quad (9)$$

čia n_0 ir p_0 yra elektronų ir skylių koncentracijos termodinaminėje pusiausvyroje, o N_c ir N_v yra laidumo ir valentinės juostų efektyviai būsenų tankiai. Draustinės juostos pločio E_g priklausomybė nuo priemaišų koncentracijos aiškinama tuo, kad priemaišiniai lygmenys puslaidininkio draustinėje juostoje yra išplitę į siauras juostas, kurių plotis auga, didėjant priemaišų koncentracijai (žr. 13 pav.). Kai priemaišų koncentracija viršija 10^{17} cm^{-3} , šios juostos persikloja su laidumo ir valentine juostomis, todėl efektas toks, lyg draustinės juostos plotis sumažėtų. Silicio draustinės juostos pločio sumažėjimą ΔE_g apytiksliai nusako ši empirinė formulė:

$$\Delta E_g = 0.009 \cdot \left\{ \ln\left(\frac{N}{10^{17}}\right) + \sqrt{\ln^2\left(\frac{N}{10^{17}}\right) + 0.5} \right\}; \quad (10)$$

čia N yra donorų arba akceptorų koncentracija silicyje (N išreikštas cm^{-3} , o ΔE_g išreikštas eV). Aišku, kad šis draustinės juostos susiaurėjimas yra didesnis emiteryje, negu bazėje, nes emiterio legiravimo laipsnis yra daug didesnis už bazės legiravimo laipsnį. Emiterio draustinės juostos susiaurėjimas sąlygoja bazės srovės padidėjimą, nes bazės srovė yra proporcinga emiterio elektronų ir skylių koncentracijų sandaugai n_i^2 (žr. formulę (2)), kuri eksponentiškai auga, mažėjant draustinės juostos pločiui (žr. formulę (9)). Todėl bazės srovė lygi

$$I_B = I_{B0} \exp\left(\frac{\Delta E_g}{kT}\right); \quad (11)$$

čia I_{B0} yra bazės srovė, kuri būtų gauta, neatsižvelgiant į draustinės juostos pločio sumažėjimą emiteryje. Atitinkamai, β išraišką (8b) reikia pakeisti tokiu būdu:

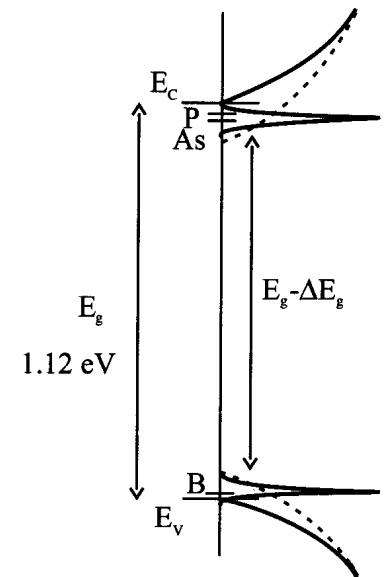
$$\beta \equiv \frac{I_C}{I_B} = \frac{D_B \int N_E dx}{D_E \int N_B dx} \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right). \quad (12)$$

Pvz., kai $N = 7 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $\Delta E_g = 0.12 \text{ eV}$, o $\exp(-\Delta E_g/kT) \approx 0.01$. Vadinas, šiuo atveju tranzistoriaus srovės stiprinimo koeficientas sumažėja dviem eilėmis, lyginant su tuo, kurį numato formulė (8b).

2.3.3. Pagrindiniai reiškiniai, kurie lemia realistiško dvipolio tranzistoriaus charakteristikas

Aukščiau aprašytasis vienmatis modelis leidžia įvertinti tik kai kurių tranzistoriaus parametrų (pvz., srovės stiprinimo koeficiento β) didumo eilę. Tranzistoriaus optimizavimą galima atlikti tik skaitmeninio modeliavimo būdu. Optimizuojant realistišką tranzistorių, reikia siekti kompromiso tarp įvairių tranzistoriaus parametrų, nes, pagerinus kurį nors vieną parametru, dažnai pablogėja kiti parametrai. Žemiau yra išvardinti pagrindiniai efektai ir jų įtaka pagrindiniams dvipolio tranzistoriaus parametrams.

1. Kirko efektas – kolektoriaus nuskurdintojo sluoksnio išnykimas dėl to, kad injektuotų į bazę elektronų koncentracija tampa didesnė už kolektoriaus priemaišų koncentraciją N_C . Kirko efektas yra nepageidautinas, nes žymiai padidina efektyvų bazės storį (kolektoriaus epitaksinis sluoksnis tampa bazės tęsiniu) ir todėl sumažina β . Vienas būdas sumažinti Kirko efektą – tai N_C didinimas. Tačiau tuomet mažėja kolektoriaus sandūros griūtinio pramušimo įtampa, auga kolektoriaus nuskurdintojo sluoksnio talpa ir mažėja tranzistoriaus greitaeigiškumas. Kitas būdas – elektronų injekcijos iš emiterio į bazę mažinimas (tuo tikslu reikia aukštinti potencialinį barjerą, kuris trukdo elektronų perėjimui iš emiterio į bazę, t.y., reikia didinti N_B). Tačiau tuomet normalioje tranzistoriaus veikoje mažėja I_C , t.y., mažėja β .



13 pav. Emiterio draustinės juostos pločio sumažėjimas

2. Erli efektas – bazės efektinio storio mažėjimas, augant V_{CB} (bazės efektinis storis – tai bazės "neutraliosios" srities plotis). Dėl šio efekto, augant V_{CB} , didėja kolektoriaus srovė. Erli efektas yra nepageidautinas, nes sumažina β stabilumą (idealiu atveju šis koeficientas neturėtų priklausyti nuo V_{CB}). Šį efektą galima susilpninti, padidinus bazės storį, tačiau tuomet β sumažėja. Kitas būdas: galima mažinti kolektoriaus legiravimo laipsnį. Tuomet susiaurėja nuskurdintoji bazės dalis, todėl bazės efektinis storis silpniau priklauso nuo V_{CB} . Tačiau taip yra tik tol, kol kolektoriaus nuskurdintasis sluoksnis nepasiekia paslėptojo sluoksnio (sumažinus N_C , taip atsitinka, esant mažesnei V_{CB}). Kadangi paslėptojo sluoksnio legiravimo laipsnis yra žymiai didesnis už N_C , tai, kai kolektoriaus nuskurdintoji sritis pasiekia paslėptąjį sluoksnį, bazės nuskurdintoji sritis pradeda žymiai sparčiau plėstis, augant V_{CB} , t.y., Erli efektas vėl sustiprėja.
3. Bazės pradūra – emiterio ir kolektoriaus nuskurdintųjų sluoksnių susijungimas, esant pakankamai didelei V_{CB} . Tuomet tranzistorius nustoja veikti. Norint išvengti bazės pradūros, reikia mažinti Erli efektą (žr. "2" punktą aukščiau).
4. Kolektoriaus atgalinė srovė. Esant ypač mažai tiesioginei įtampai tarp bazės ir emiterio, pagrindinę bazės srovės dalį sąlygoja skylių ekstrakcija iš kolektoriaus į bazę. Tuomet bazės srovė yra neigiama (t.y., bazės srovė išteka iš tranzistoriaus). Tokioje veikoje tranzistorius yra "uždarytas", t.y., elektronų injekcija iš emiterio į bazę praktiškai nevyksta. Kitas veiksnys, kuris gali padidinti kolektoriaus atgalinę srovę, – tai krūvininkų generacija kolektoriaus-bazės nuskurdintajame sluoksnyje (žr. "5d" ir "6" punktus žemiau).
5. Krūvininkų rekombinacija ir generacija:
 - a) injektuotų į emiterį skylių rekombinacija neutraliojoje emiterio dalyje (ši rekombinacija padidina I_B);
 - b) injektuotų į bazę elektronų rekombinacija neutraliojoje bazės srityje (ši rekombinacija sumažina I_C ir padidina I_B);
 - c) elektronų ir skylių rekombinacija nuskurdintajame sluoksnyje tarp bazės ir emiterio (ši rekombinacija sumažina I_C ir padidina I_B);
 - d) kadangi tarp kolektoriaus ir bazės prijungta atgalinė įtampa, tai nuskurdintajame sluoksnyje tarp bazės ir kolektoriaus vyrauja krūvininkų generacija. Generuotieji elektronai ekstrahuojami į kolektorių, todėl I_C išauga. Generuotosios skylės ekstrahuojamos į bazę ir nuteka į bazės elektrodą, todėl I_B sumažėja.
6. Kolektoriaus-bazės sandūros griūtinis pramušimas. Esant pakankamai aukštai atgalinei įtampai tarp kolektoriaus ir bazės, tampa įmanoma smūginė jonizacija kolektoriaus nuskurdintajame sluoksnyje. Todėl, augant V_{CB} , kolektoriaus srovė pradeda sparčiai augti, o bazės srovė – mažėti (žr. "5d" punktą aukščiau) ir galų gale įvyksta griūtinis pramušimas, dėl kurio I_C šuoliškai išauga keliom eilėm. Kolektoriaus pramušimo įtampa mažėja, augant kolektoriaus legiravimo laipsniui. Vadinasi, norint padidinti tranzistoriaus atsparumą griūtiniam pramušimui, reikia mažinti kolektoriaus legiravimo laipsnį.

3. Metodika

3.1. Bendros pastabos

Naudojant programų paketą **MicroTec**, bet kurios realistiškos puslaidininkinės struktūros modeliavimas visuomet atliekamas trim etapais:

- I. Priemaišų pasiskirstymo struktūros viduje modeliavimas. Tai atlieka programa **SiDif** ("two-dimensional SIMulator for DIffusion and oxidation" – dvimatis difuzijos ir oksidacijos simulatorius). Pvz., šis procesas buvo modeliuojamas darbe Nr. 1.
- II. Struktūros fragmentų apjungimas, paslinkimas, simetrizavimas arba pratęsimas iki visos struktūros kraštų. Tai atlieka programa **MergIC** ("program for MERGing fragments of IC elements" – integrinųjų grandinių fragmentų apjungimo programa).
- III. Gautosios struktūros elektrinių savybių modeliavimas. Tai atlieka programa **SemSim** ("two-dimensional steady-state SEMiconductor device SIMulator" – dvimatis stacionariosios būsenos puslaidininkinių prietaisų simulatorius).

Kiekvienas iš šių etapų atitinka vieną **MicroTec** projektą. Kuriant naują **MicroTec** projektą, visuomet reikia nurodyti, kurį iš aukščiau minėtųjų trijų etapų jis atitiks. Tai atliekama, pasirenkant programą (SiDif, MergIC arba SemSim) sąraše "Method". Nuo šio pasirinkimo priklausys parametrai, kuriuos galima užduoti lange "Project Settings", tipai.

Atliekant etapus II ir III, reikia užduoti parametrai, kuris nusako ankstesniojo etapo rezultatų failą (atliekant II etapą, šis parametras yra "Fragment/Input file", o atliekant III etapą, šis parametras yra "Numerical doping data"). Atliekant bet kurį etapą, rezultatų failo vardas sugeneruojamas automatiškai, ir vartotojas jo pakeisti negali. Šis vardas yra nurodytas parametrai sąrašo pirmojoje eilutėje, greta projekto pavadinimo.

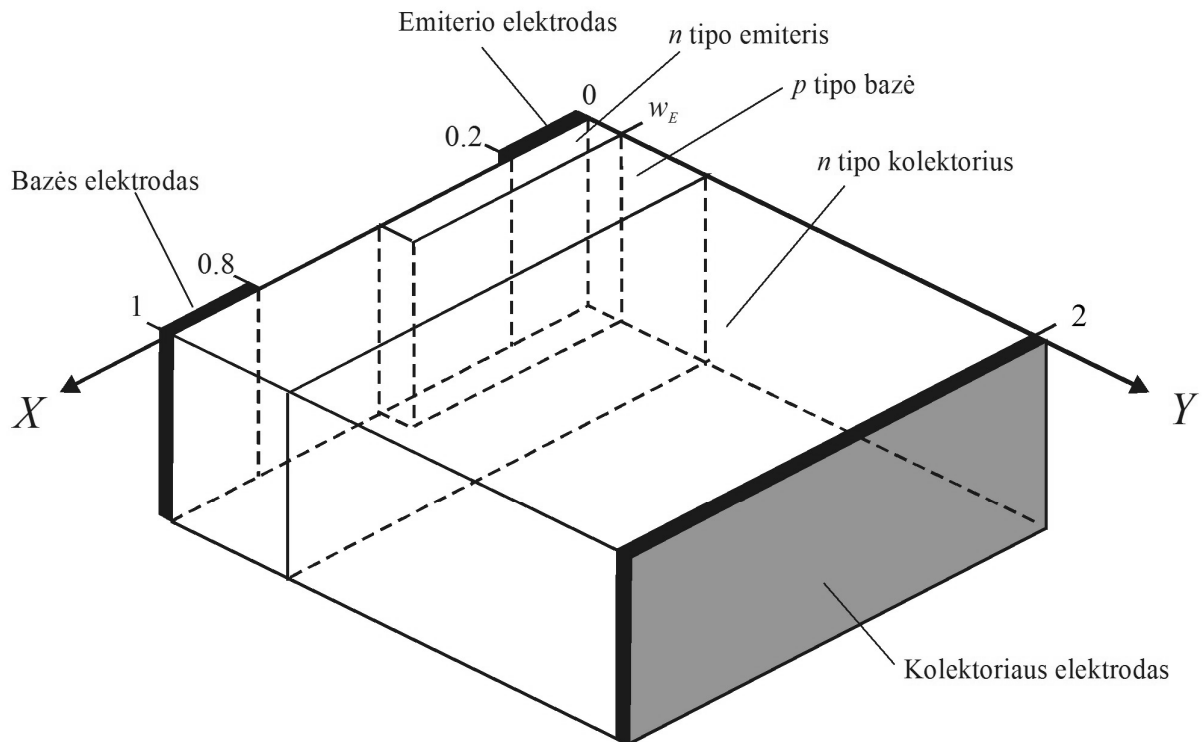
Programos **MicroTec** variantas, kuris instaliuotas VU FF kompiuterių klasėje (613 k.), jau turi projektus, kurie reikalingi dvipolio npn tranzistoriaus modeliavimui. Šių projektų pavadinimai yra:

- I. "**4.4 (base + epi variation)**" – jonų implantacijos ir difuzijos modeliavimas;
- II. "**4.4 merge**" – fragmento paslinkimas arba pratęsimas iki struktūros kraštų;
- III. "**4.4 example**" – dvipolio tranzistoriaus elektrinių savybių modeliavimas.

Šie trys projektai ir yra naudojami šiame darbe. Reikia pakeisti tik keturis projekto "**4.4 (base + epi variation)**" parametrus – fosforo koncentraciją epitaksiniam sluoksnyje (kolektoriuje), dvi boro implantacijos dozės (gaminant bazės sritį ir padidintos akceptorijų koncentracijos sritį prie bazės elektrodo) ir pirmojo atkaitinimo laiko žingsnį. Projekto "**4.4 merge**" parametrai keisti nereikia. Kadangi šiame darbe reikės atvaizduoti tranzistoriaus voltamperines charakteristikas ir krūvininkų koncentracijų priklausomybes nuo koordinatės, tai reikės keisti tik tuos projekto "**4.4 example**" parametrus, kurie priklauso parametrai grupei "IV-data".

nnp tranzistoriaus emiterio, bazės ir kolektoriaus tarpusavio išsidėstymas bei matmenys yra pavaizduoti 17 pav. Šiame paveiksle koordinatinių ašių orientacija yra tokia pati, kokia naudojama dvimačiuose profiliuose, kuriuos braižo programa **MicroTec**, nuspaudus mygtuką "3D Output". Tačiau projekto parametrai pavadinimuose laikoma, kad X ašis nukreipta iš kairės į dešinę. Pvz., "kairysis struktūros kraštas" atitinka plokštumą $x = 0$, t.y., 17 pav. jis yra dešinėje. "Viršutinis struktūros kraštas" atitinka plokštumą $y = 0$.

Toliau pateiktas smulkesnis šio darbo parametrai bei metodikos aprašymas.



17 pav. Emiterio, bazės ir kolektoriaus tarpusavio išsidėstymas bei elektrodų matmenys (μm).

3.2. Realistiško dvipolio tranzistoriaus modeliavimas, naudojant programų paketą MicroTec

1. Programos **MicroTec** lange „Select Project“ pasirenkamas projektas „4.4 (base + epi variation)“. Po to atidaromas langas „Project Settings“, kuriame užduodamos parametru vertės. Projekto parametrai sugrupuoti į direktyvas. Kiekviena direktyva atitinka giminingų 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, sukuriama 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 sukuriama. 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 „Domain and Mesh“ apibrėžia struktūros fragmento matmenis bei koordinatinį tinklą, kuris naudojamas, modeliuojant jonų implantaciją ir difuziją. Šioje parametru grupėje užduodami šie parametrai:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Number of nodes NX	Koordinatinio tinklo mazgų skaičius X kryptimi (išilgai padėklo paviršiaus)	20
Number of nodes NY	Koordinatinio tinklo mazgų skaičius Y kryptimi (gilyn į padėklą)	30
Domain size in X -direction (μm)	Struktūros matmenys X kryptimi	1
Domain size in Y -direction (μm)	Struktūros matmenys Y kryptimi	2

Mesh generation	Jeigu šis parametras lygus 1, tuomet intervalai tarp gretimų koordinatinių linijų yra vienodo pločio, o jeigu 0, tuomet linijų tankis auga, artėjant prie koordinatinių pradžios taško.	0
X-mesh exponent (μm)	Parametras, kuris nusako, kaip sparčiai koordinatinės linijos turi tankėti, artėjant prie kairiojo struktūros krašto ($x = 0$) išilgai X ašies (šis parametras naudojamas tik tuomet, kai "Mesh generation" lygus 0). Kuo didesnis šis parametras, tuo didesnis koordinatinių linijų tankis prie kairiojo struktūros krašto ir tuo jis mažesnis prie dešiniojo krašto.	0.01
Y-mesh exponent (μm)	Analogiškas parametras Y kryptimi	1.5

3. Parametrų grupė „Numerical solution“ apibrėžia kai kuriuos diferencialinių lygčių skaitmeninio sprendimo parametrus (pvz., parametrus, kurie lemia skaičiavimo rezultatų tikslumą). Šioje parametrų grupėje užduodami šie parametrai:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Batch mode switch	Jeigu 1, tuomet visi skaičiavimo proceso žingsniai atliekami be pauzių, o jeigu 0, tuomet po kiekvieno žingsnio programa sustabdoma ir laukiama, kol vartotojas nuspaus klavišą "Enter".	1
Background impurity conc (cm^{-3})	Priemaišų koncentracijos skaičiavimo paklaida (cm^{-3}). Ši vertė turi būti žymiai mažesnė už priemaišų koncentracijas didžiojoje struktūros dalyje. Šiame darbe priemaišų koncentracijos visuose struktūros taškuose yra didesnės už 10^{15}cm^{-3} , todėl paklaidos vertė 10^{12}cm^{-3} yra pakankamai maža.	$1\text{e}+12$

4. Parametrų grupė „Substrate“ apibrėžia silicio padėklo orientaciją ir pradinę priemaišų koncentraciją jame. Šioje parametrų grupėje užduodami šie parametrai:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Lattice Orientation	Padėklo kristalo gardelės orientacija (t.y., padėklo paviršiaus Milerio indeksai)	111
Initial Phosphorus conc (cm^{-3})	Pradinė fosforo atomų koncentracija padėkle (cm^{-3})	$1\text{e}+13$

Kitų direktyvų išdėstymo tvarka atspindi atskirų npn tranzistoriaus sričių formavimo tvarką:

- 1) Į padėklą implantuojamas plonas arseno sluoksnis, kuris atliks paslėptojo n^+ sluoksnio vaidmenį (9 pav. paslėptasis sluoksnis pažymėtas užrašu " n^+ buried layer").
- 2) Ant paslėptojo sluoksnio užauginamas epitaksinis n tipo sluoksnis, kuris atliks kolektoriaus vaidmenį (donorai yra fosforo jonai).
- 3) Į epitaksinį sluoksnį implantuojami boro jonai. Tokiu būdu sukuriama p tipo sritis, kuri atliks bazės vaidmenį.
- 4) Struktūra atkaitinama.
- 5) Prie struktūros dešiniojo krašto, kur bus bazės elektrodas, padidinama akceptorinių koncentracija, papildomai implantuojant boro jonus (padidinta akceptorinių koncentracija prie bazės elektrodo sukuria papildomą potencialinį barjerą injektuotiems į bazę elektronams, todėl tranzistoriaus darbo metu sumažėja elektronų nuotėkis pro bazės elektrodą).
- 6) Prie struktūros kairiojo krašto sudaroma n tipo sritis, kuri atliks emiterio vaidmenį. Tuo tikslu implantuojami arseno jonai.
- 7) Struktūra atkaitinama.

5. Pirmoji iš dviejų direktyvų „Arsenic implant“ apibrėžia arseno implantacijos langą, implantacijos dozę ir implantuojamų jonų energiją, formuojant paslėptąjį n^+ sluoksnį. Arsenas implantuojamas tolygiai visame paviršiuje, todėl jo implantacijos langas turi būti daug didesnis už struktūros matmenis X kryptimi.

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Arsenic implant mask (μm)	Jeigu šis parametras yra teigiamas, tuomet jis nusako lango, pro kurį implantuojamas arsenas, dešiniojo krašto x koordinatę, o to lango kairioji koordinatė sutampa su struktūros kairiuoju kraštu ($x = 0$). Jeigu šis parametras yra neigiamas, tuomet jis nusako implantacijos lango kairiojo krašto koordinatę su minuso ženklu, o to lango dešinioji koordinatė sutampa su struktūros dešiniuoju kraštu.	10
Arsenic implant dose (cm^{-2})	Arseno implantacijos dozė (cm^{-2}), t.y., implantuotų arseno atomų skaičius, kuris tenka paviršiaus ploto vienetui	$1e+13$
Arsenic implant energy (keV)	Implantuojamų arseno jonų energija (keV)	80

6. Parametrų grupė „Epitaxy“ apibrėžia epitaksinio sluoksnio (kolektoriaus) auginimo sąlygas.

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Thickness of epi-layer (μm)	Epitaksinio sluoksnio storis. Kadangi visos kitos sritys bus formuojamos, implantuojant jonus į epitaksinį sluoksnį, tai jo storis turi būti lygus struktūros matmenų Y kryptimi ir paslėptojo sluoksnio storio skirtumui. Vadinasi, laikant, kad paslėptojo sluoksnio storis lygus $0.1 \mu\text{m}$, epitaksinio sluoksnio storis lygus $2.0 \mu\text{m} - 0.1 \mu\text{m} = 1.9 \mu\text{m}$.	1.9
Epitaxial temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Epitaksijos temperatūra	1000
Epitaxial growth time (s)	Epitaksijos trukmė (reikalinga tam, kad būtų galima įvertinti priemaišų difuziją epitaksijos metu). Šiuo atveju ji turi būti maža, nes siekiama, kad epitaksijos metu nepasikeistų anksčiau implantuotų priemaišų pasiskirstymas.	60
Time step size (s)	Laiko žingsnis, modeliuojant priemaišų persiskirstymą epitaksijos metu.	50
Phosphorus conc (cm^{-3})	Fosforo jonų (donorų) koncentracija epitaksiniame sluoksnyje. Ši koncentracija priklauso nuo varianto numerio (žr. darbo užduotis).	N_C

7. Pirmoji iš dviejų direktyvų „Boron implant“ apibrėžia boro implantacijos langą, implantacijos dozę ir implantuojamų jonų energiją, gaminant npn tranzistoriaus bazę (p tipo sritį). Boras implantuojamas tolygiai visame paviršiuje. Parametrų vertės:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Boron implant mask (μm)	Lango, pro kurį implantuojamas boras, plotis.	10
Boron implant dose (cm^{-2})	Boro implantacijos dozė (cm^{-2}), t.y., implantuotų boro atomų skaičius, kuris tenka paviršiaus ploto vienetui. Ši dozė priklauso nuo varianto numerio (žr. darbo užduotis).	Q_B
Boron implant energy (keV)	Implantuojamų boro jonų energija (keV)	100

8. Pirmoji iš dviejų direktyvų „Annealing“ apibrėžia atkaitinimo sąlygas, formuojant bazės sritį. Šioje parametrų grupėje užduodami šie parametrai:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Temperature (degrees C)	Atkaitinimo temperatūra ($^{\circ}\text{C}$).	1000
Annealing time (s)	Atkaitinimo trukmė (s)	360
Time step	Difuzijos proceso modeliavimo laiko žingsnis (s)	20

9. Antroji iš dviejų direktyvų „Boron implant“ apibrėžia boro implantacijos langą, implantacijos dozę ir implantuojamų jonų energiją, gaminant padidintos akceptorijų koncentracijos sritį prie bazės elektrodo. Parametrų vertės:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Boron implant mask (μm)	Lango, pro kurį implantuojamas boras, kairiojo krašto x koordinatė su minuso ženklu (t.y., boro jonai implantuojami pro $0.4 \mu\text{m}$ pločio langą, kuris yra intervale $0.6 \mu\text{m} < x < 1.0 \mu\text{m}$).	-0.6

Boron implant dose (cm ⁻²)	Boro implantacijos dozė (cm ⁻²), t.y., implantuotų boro atomų skaičius, kuris tenka paviršiaus ploto vienetui.	1e+14
Boron implant energy (keV)	Implantuojamų boro jonų energija (keV)	20

10. Antroji iš dviejų direktyvų „Arsenic implant“ apibrėžia arseno implantacijos langą, implantacijos dozę ir implantuojamų jonų energiją, formuojant npn tranzistoriaus emiterį (n tipo sritį). Arsenas implantuojamas pro 0.35 μm pločio langą, kurio kairysis kraštas sutampa su struktūros kairiuoju kraštu. Parametrų vertės:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Arsenic implant mask (μm)	Lango, pro kurį implantuojamas arsenas, plotis.	0.35
Arsenic implant dose (cm ⁻²)	Arseno implantacijos dozė (cm ⁻²), t.y., implantuotų arseno atomų skaičius, kuris tenka paviršiaus ploto vienetui	1e+15
Arsenic implant energy (keV)	Implantuojamų arseno jonų energija (keV)	60

11. Antroji iš dviejų direktyvų „Annealing“ apibrėžia atkaitinimo sąlygas, formuojant emiterio sritį. Šioje parametrų grupėje užduodami šie parametrai:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Temperature (degrees C)	Atkaitinimo temperatūra (°C).	1000
Annealing time (s)	Atkaitinimo trukmė (s)	3600
Time step	Difuzijos proceso modeliavimo laiko žingsnis (s)	200

12. Uždavus visų parametrų vertes, nuspaudžiamas mygtukas „Run“. Užsidarius DOS langui, programos MicroTec instaliavimo kataloge atsiras rezultatų failas P0000086.3D, kuris bus panaudojamas sekančiame etape, kaip programos **MergIC** pradinių duomenų failas.

13. Programos **MicroTec** lange „Select Project“ pasirenkamas projektas „**4.4 merge**“. Po to atidaromas langas „Project Settings“, kuriame užduodamos parametrų vertės. Šie parametrai paaikškinti žemiau.

14. Parametrų grupė „Domain and Mesh“ apibrėžia visos struktūros matmenis bei koordinatinių tinklą. Parametrai:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Domain X-size (μm)	Struktūros matmenys X kryptimi	1
Domain Y-size (μm)	Struktūros matmenys Y kryptimi	2
Number of nodes NX	Koordinatinio tinklo mazgų skaičius X kryptimi (išilgai padėklo paviršiaus)	20
Number of nodes NY	Koordinatinio tinklo mazgų skaičius Y kryptimi (gilyn į padėklą)	80

15. Parametrų grupė „Fragment“ apibrėžia struktūros fragmento, kuris buvo pagamintas pirmame etape, patalpinimo į galutinę struktūrą taisyklę (galutinės struktūros matmenys gali skirtis nuo pradinio fragmento matmenų). Parametrai, kuriuos reikia užduoti šioje grupėje, yra šie:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Location (μm)	Fragmento kairiojo krašto X koordinatė galutinėje struktūroje (μm). Šiuo atveju fragmento kairysis kraštas sutampa su visos struktūros kairiuoju kraštu, t.y., šis parametras turi būti lygus 0.	0
Fragment symmetrization type	Fragmento simetrizavimo tipas. Jeigu šis parametras lygus 0, tuomet fragmentas nėra simetrizuojamas. Jeigu šis parametras lygus 1, tuomet fragmentas atspindimas atžvilgiu savo dešiniojo krašto, o po to gautasis atspindys apjungiamas su pradiniu fragmentu. Jeigu šis parametras lygus -1, tuomet fragmentas analogiškai simetrizuojamas atžvilgiu savo kairiojo krašto.	0

Fragment stretch (μm)	Tarpas tarp sujungiamų simetrinių fragmentų (μm). Priemaišų tankis šiame tarpe sutampa su priemaišų tankiu pradinio fragmento krašte, kurio atžvilgiu atliekamas simetrizavimas. Šis parametras naudojamas tik tuomet, kai "Fragment symmetrization type" nėra lygus nuliui. Taigi, šiame darbe šio parametro vertė gali būti bet kokia.	0.55
Flood or override	Jeigu šis parametras lygus 1, tuomet priemaišų tankiai fragmento kraštuose pratęsimi iki visos struktūros kraštų. Jeigu šis parametras lygus 0, tuomet priemaišų tankiai pakeičiami tik fragmento viduje, o ant jo ribų ir už jų lieka lygūs nuliui arba ankstesniųjų direktyvų "Fragment" užduotoms vertėms.	1
Input file	Programos SiDif rezultatų failas, kuris apibrėžia pradinį fragmentą. Šiuo atveju šis parametras turi būti lygus projekto " 4.4 (base + epi variation) " rezultatų failo vardui, t.y., P0000086.3D.	

16. Uždavus visų parametų vertes, nuspaudžiamas mygtukas „Run“. Užsidarius DOS langui, programos MicroTec instaliavimo kataloge atsiras rezultatų failas P0000087.3D, kuris bus panaudojamas sekančiame etape, kaip programos **SemSim** pradinių duomenų failas.

17. Programos **MicroTec** lange „Select Project“ pasirenkamas projektas „**4.4 example**“. Po to atidaromas langas „Project Settings“, kuriame užduodamos parametų vertės. Šie parametrai paaiškinti žemiau.

18. Parametų grupė "Numerical doping data" turi tik vieną parametą su tokiu pačiu pavadinimu. Šis parametras nusako programos MergIC rezultatų failą su priemaišų koncentracijomis galutinėje struktūroje. Šiuo atveju šis parametras turi būti lygus projekto "**4.4 merge**" rezultatų failo vardui, t.y., P0000087.3D.

19. Parametų grupė „Basic/Mesh“ apibrėžia visos struktūros matmenis bei koordinatinį tinklą. Šioje parametų grupėje užduodami šie parametrai:

Pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Number of X-nodes	Koordinatinio tinklo mazgų skaičius X kryptimi (išilgai padėklo paviršiaus)	20
Number of Y-nodes	Koordinatinio tinklo mazgų skaičius Y kryptimi (gilyn į padėklą)	30
Domain X size (μm)	Struktūros matmenys X kryptimi (struktūros ilgis)	1
Domain Y size (μm)	Struktūros matmenys Y kryptimi (struktūros gylis)	2
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	Šio parametro vertė nusako koordinatinio tinklo formavimo būdą (pvz., vertė 3 reiškia, kad koordinatinio tinklo linijų tankis X kryptimi turi būti perskaičiuotas taip, kad intervalai tarp linijų būtų mažiausi tose vietose, kur krūvininkų koncentracijos išvestinė x atžvilgiu yra didžiausia, o intervalai tarp linijų Y kryptimi turi eksponentiškai augti, einant gilyn į padėklą).	3

20. Parametų grupėje „Numerical solution parameters“ užduodami šie parametrai:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Batch mode	Jeigu šis parametras lygus 1, tuomet skaičiavimai atliekami be pauzių, o jeigu 0, tuomet tarp atskirų iteracijų (skaičiavimo proceso žingsnių) programa daro pauzę ir laukia, kol bus nuspauštas klavišas "Enter".	1

21. Parametrų grupėje „Physical models“ užduodami du parametrai:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Heavy doping effects	Jeigu šis parametras lygus 1, tuomet skaičiavimų metu atsižvelgiama į draustinės juostos pločio sumažėjimą, esant didelei priemaišų koncentracijai, o jeigu 0, tuomet laikoma, kad draustinės juostos plotis nepriklauso nuo priemaišų koncentracijos.	1
Impact ionization	Jeigu šis parametras lygus 1, tuomet skaičiavimų metu atsižvelgiama į smūginę jonizaciją, o jeigu 0, tuomet į smūginę jonizaciją neatsižvelgiama.	1

22. Parametrų grupė „Electrodes“ apibrėžia elektrodų padėtis ir matmenis. Kadangi tranzistorius turi tris ominių elektrodus, šioje parametrų grupėje turi būti trys direktyvos „Ohmic electrode“. Šių parametrų vertės turi atitikti 17 pav. Kiekvienoje direktyvoje „Ohmic electrode“ užduodami šie parametrai:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė		
		kolektoriui	emiteriui	bazei
Electrode number	Elektrodo numeris. Šie numeriai naudojami elektrodų identifikavimui kitose direktyvose (pvz., žr. 23 ir 26 punktus).	1	2	3
Electrode location	Elektrodo padėtis. Jeigu elektrodas yra viršutiniame krašte ($y = 0$), tuomet šis parametras lygus 1, o jeigu apatiniame, tuomet 2.	2	1	1
Electrode left edge (μm)	Elektrodo kairiojo krašto X koordinatė (žr. 17 pav.)	0	0	0.8
Electrode right edge (μm)	Elektrodo dešiniojo krašto X koordinatė (žr. 17 pav.)	1	0.2	1

Likusioji darbo dalis yra skirtinga įvairiems nelyginiams variantams.

I. 1, 5, 9, 13, 17, 21, 25, 29, 33 variantai

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


Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Ramped contact number	Elektrodo, kurio potencialas keičiamas, numeris.	3
Number of IV-points to compute	Voltamperinės charakteristikos taškų skaičius	1
Voltage step size (V)	Intervalas tarp įtampos verčių voltamperinėje charakteristikoje (V).	0.02
Initial voltage for contact #1	Pirmojo elektrodo (kolektoriaus) potencialas (V).	3
Initial voltage for contact #2	Antrojo elektrodo (emiterio) potencialas (V).	0
Initial voltage for contact #3	Trečiojo elektrodo (bazės) potencialas (V).	0

24. Uždavus visų parametrų vertes, nuspaudžiamas mygtukas „Run“. Užsidarius DOS langui, nuspaudžiamas mygtukas „3D Output“. Tuomet atsidaro dvimačių profilių atvaizdavimo programa „SibGraf 3D“.

25. Naudojant programos „SibGraf 3D“ meniu „Plot“ (senesnėje versijoje – „Surface“), paeiliui atvaizduojamos priemaišų jonų, elektronų ir skylių koncentracijų priklausomybės nuo x ir y , o po to atvaizduojami jų pjūviai Y kryptimi. Šie pjūviai išsaugomi failų pavidalu vėlesnei analizei. Paviršiai, kuriuos reikia atvaizduoti, yra šie:

- „Net doping concentration (cm⁻³)“ (senesnėje versijoje – „Doping concentration“) – donorų ir akceptorų koncentracijų skirtumas (cm⁻³);
 „Electron concentration (cm⁻³)“ – elektronų tankis (cm⁻³);
 „Hole concentration (cm⁻³)“ – skylių tankis (cm⁻³);

Pastaba: Programa „SibGraf 3D“, kuri įeina į MicroTec 4, turi meniu komandą „Plot/Select“, kuri pateikia didesnę dvimačių profilių pasirinkimą. Jeigu minėto profilio nėra meniu „Plot“, tada tą profilį reikia pasirinkti iš sąrašo, kuris atsidaro pasirinkus „Plot/Select“. Programa „SibGraf 3D“, kuri įeina į MicroTec 3, neturi komandos „Select“ (t. y. visi dvimačiai profiliai, kurie gali būti pavaizduoti, yra išvardyti meniu „Surface“).

Atvaizdavirus kiekvieną iš šių paviršių, reikia spragtelėti mygtuką „ZY“ . Tuomet atsidaro vienmačių pjūvių atvaizdavimo programa "SibGraf 2D", kurioje atvaizduotas pasirinkto paviršiaus pjūvis Y kryptimi. Šį pjūvį reikia įrašyti į diską, naudojant programos „SibGraf 2D“ meniu komandą „File/Save As“ (vėliau šį failą bus galima atidaryti, naudojant programos „SibGraf 2D“ meniu komandą „File/Open“).

26. Parametrų grupėje „IV-data/IV-data“ užduodami šie parametrai:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Ramped contact number	Elektrodo, kurio potencialas keičiamas, numeris. Šiuo atveju keičiamas bazės potencialas (emiterio ir kolektoriaus potencialai yra pastovūs), todėl reikia nurodyti bazės elektrodo numerį (žr. 22 punktą).	3
Number of IV-points to compute	Voltamperinės charakteristikos taškų skaičius	51
Voltage step size (V)	Intervalas tarp įtampos verčių voltamperinėje charakteristikoje (V). Galutinė įtampa lygi $(51 - 1) \cdot 0.02 \text{ V} = 1.00 \text{ V}$.	0.02
Initial voltage for contact #1	Pirmojo elektrodo (kolektoriaus) potencialas (V).	3
Initial voltage for contact #2	Antrojo elektrodo (emiterio) potencialas (V).	0
Initial voltage for contact #3	Trečiojo elektrodo (bazės) pradinis potencialas (V).	0

27. Uždavus visų parametrų vertes, nuspaužiamas mygtukas „Run“.

28. Užsidarius DOS langui, nuspaužiamas 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 žymenys: **Vc** – kolektoriaus elektrodo potencialas, **Ve** – emiterio elektrodo potencialas, **Vb** – bazės elektrodo potencialas, **Ic** – kolektoriaus srovė, **Ie** – emiterio srovė, **Ib** – bazės srovė (srovė yra teigiama, jeigu ji nukreipta į struktūros vidų, ir neigiama priešingu atveju). Darbo užduotis reikalauja viename grafike atvaizduoti kolektoriaus ir bazės srovių priklausomybes nuo bazės-emiterio įtampos. Kadangi emiterio elektrodo potencialas lygus 0, tai bazės-emiterio įtampa lygi bazės potencialui. Todėl šalia žymens "Vb" pažymimas laukelis "X". Po to šalia žymens "Ib" pažymimas laukelis "Y" ir nuspaužiamas mygtukas "Add". Po to šalia žymens "Ic" pažymimas laukelis "Y" ir vėl nuspaužiamas mygtukas "Add". Nuspaužiamas mygtukas "Close". Grafikas išsaugomas vėlesnei analizei, naudojant programos „SibGraf 2D“ meniu komandą „File/Save As“.

29. Projekto "4.4 (base + epi variation)" parametrų sąrašė 5 partus padidinama implantavimo dozė pirmojoje direktyvoje "Boron implant" (žr. 7 punktą), nuspaužiamas mygtukas „Run“, po to pasirenkamas projektas „4.4 merge“, nuspaužiamas mygtukas „Run“, o po to pasirenkamas projektas „4.4 example“ ir pakartojami punktai 23 ÷ 28.

30. Pagal keturias gautąsias kreives (dvi funkcijos $I_B(V_{BE})$ ir dvi funkcijos $I_C(V_{BE})$) nustatoma, kuriuo atveju Kirko efektas yra ryškiausias, o kuriuo – mažiausiai ryškus. Kirko efektas pasireiškia

tuo, kad kolektorius ir bazės srovių santykis I_C/I_B pradeda sparčiai mažėti, kai emiterio sandūros įtampa V_{BE} viršija tam tikrą vertę. Pvz., 12 pav. atveju Kirko efektas pradeda pasireikšti maždaug nuo $(0.80 \div 0.85)$ V (nes ties ta įtampa I_C augimas akivaizdžiai sulėtėja).

31. Tam atvejui, kai Kirko efektas yra mažiausiai ryškus, pagal priklausomybes $I_B(V_{BE})$ ir $I_C(V_{BE})$ pasirenkama įtampos V_{BE} vertė, kuri yra "pereinamojoje" srityje, t.y., tarp srities, kurioje Kirko efektas beveik nepasireiškia (toje srityje I_C yra apytiksliai proporcinga I_B), ir srities, kurioje Kirko efektas yra akivaizdus. T.y., įtampą reikia pasirinkti kreivės $I_C(V_{BE})$ perlinkio srityje. Pvz., 12 pav. tą įtampą galima pasirinkti lygia $(0.82 \div 0.84)$ V (šis pasirinkimas yra šiek tiek subjektyvus, tačiau čia tikslumas nėra reikalingas).

32. Esant tai pačiai įtampai, kuri gauta 31 punkte, nubraižomos elektronų ir skylių koncentracijų priklausomybės nuo koordinatės. Tuo tikslu atliekamas 23 punktą su vienu pakeitimu: parametras "Initial voltage for contact #3" turi būti lygus pasirinktajai įtampos vertei. Po to pakartojami 24 ir 25 punktai.

33. Nubraižomos elektronų ir skylių koncentracijų priklausomybės nuo koordinatės, esant ankstesniajai bazės implantavimo dozei ir tai pačiai įtampai, kuri gauta 31 punkte. Tuo tikslu projekto "**4.4 (base + epi variation)**" parametru sąrašė atstatoma ankstesnioji implantavimo dozė pirmojoje direktyvoje "Boron implant" (žr. 7 punktą), nuspaudžiamas mygtukas „Run“, po to pasirenkamas projektas „**4.4 merge**“, nuspaudžiamas mygtukas „Run“, o po to pasirenkamas projektas „**4.4 example**“, nuspaudžiamas mygtukas "Run" ir pakartojamas 25 punktas.

34. Keturios srovės priklausomybės nuo įtampos atspausdinamos viename grafike (tai galima atlikti ne laboratorinių darbų metu). Ordinačių ašies mastelis turi būti logaritminis. Abiem bazės implantavimo dozėms randamas didžiausias srovės stiprinimo koeficientas $\beta = I_C / I_B$.

35. Atspausdinamas grafikas su penkiais koncentracijų pjūviais, kurie atitinka pradinę bazės implantavimo dozę:

- priemaišų koncentracijos priklausomybė nuo gylio,
- elektronų ir skylių koncentracijų priklausomybės nuo gylio, kai $V_{BE} = 0$,
- elektronų ir skylių koncentracijų priklausomybės nuo gylio, kai V_{BE} lygi 31 punkte gautajai vertei.

36. Atspausdinamas analogiškas grafikas, atitinkantis 5 kartus didesnę bazės implantavimo dozę.

37. Naudojantis gautosiomis β vertėmis bei bendruoju voltamperinių charakteristikų pavidalu, nustatoma, kuria kryptimi reikėtų keisti bazės legiravimo laipsnį, siekiant sumažinti Kirko efektą, ir kuria kryptimi reikia jį keisti, siekiant padidinti β . Šios išvados pagrindžiamos, remiantis gautosiomis koncentracijų priklausomybėmis nuo koordinatės bei teorinėmis žiniomis apie veiksnius, kurie lemia Kirko efektą ir β vertę.

II. 3, 7, 11, 15, 19, 23, 27, 31 variantai

23. 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
Ramped contact number	Elektrodo, kurio potencialas keičiamas, numeris.	1
Number of IV-points to compute	Voltamperinės charakteristikos taškų skaičius	1
Voltage step size (V)	Intervalas tarp įtampos verčių voltamperinėje charakteristikoje (V)	1
Initial voltage for contact #1	Pirmojo elektrodo (kolektorius) potencialas (V).	0.6
Initial voltage for contact #2	Antrojo elektrodo (emiterio) potencialas (V).	0
Initial voltage for contact #3	Trečiojo elektrodo (bazės) potencialas (V).	0.6

24. Uždavus visų parametrų vertes, reikia spragtelėti mygtukus „Save Settings“ ir „Run“.

25. Užsidarius DOS langui, nuspaudžiamas mygtukas „3D Output“. Tuomet atsidaro dvimačių profilių atvaizdavimo programa „SibGraf 3D“. Naudojant programos „SibGraf 3D“ meniu „Plot“ (senesnėje versijoje – „Surface“), paeiliui atvaizduojamos priemaišų jonų, elektronų ir skylių koncentracijų priklausomybės nuo x ir y , o po to atvaizduojami jų pjūviai Y kryptimi. Šie pjūviai išsaugomi failų pavidalu vėlesnei analizei. Paviršiai, kuriuos reikia atvaizduoti, yra šie:

- „Net doping concentration (cm-3)“ (senesnėje versijoje – „Doping concentration“) – donorų ir akceptorų koncentracijų skirtumas (cm^{-3});
- „Electron concentration (cm-3)“ – elektronų tankis (cm^{-3});
- „Hole concentration (cm-3)“ – skylių tankis (cm^{-3});

Pastaba: Programa „SibGraf 3D“, kuri įeina į MicroTec 4, turi meniu komandą „Plot/Select“, kuri pateikia didesnę dvimačių profilių pasirinkimą. Jeigu minėto profilio nėra meniu „Plot“, tada tą profilį reikia pasirinkti iš sąrašo, kuris atsidaro pasirinkus „Plot/Select“. Programa „SibGraf 3D“, kuri įeina į MicroTec 3, neturi komandos „Select“ (t. y. visi dvimačiai profiliai, kurie gali būti pavaizduoti, yra išvardyti meniu „Surface“).

Atvaizdavirus kiekvieną iš šių paviršių, reikia spragtelėti mygtuką „ZY“ . Tuomet atsidaro vienmačių pjūvių atvaizdavimo programa "SibGraf 2D", kurioje atvaizduotas pasirinktojo paviršiaus pjūvis Y kryptimi. Šį pjūvį reikia įrašyti į diską, naudojant programos „SibGraf 2D“ meniu komandą „File/Save As“ (vėliau šį failą bus galima atidaryti, naudojant programos „SibGraf 2D“ meniu komandą „File/Open“).

26. Nubraižomos elektronų ir skylių koncentracijų priklausomybės nuo koordinatės, kai $V_{CB} = 3 \text{ V}$ (t. y., kai $V_{CE} = 3.6 \text{ V}$). Tuo tikslu pakartojamas 23 punktą su vieninteliu pakeitimu: parametras "Initial voltage for contact #1" turi būti lygus 3.6. Po to pakartojami 24 ir 25 punktai.

27. Parametrų grupėje „IV-data/IV-data“ užduodami šie parametrai:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Ramped contact number	Elektrodo, kurio potencialas keičiamas, numeris. Šiuo atveju keičiamas kolektoriaus potencialas (emiterio ir bazės potencialai yra pastovūs), todėl reikia nurodyti kolektoriaus elektrodo numerį (žr. 22 punktą).	1
Number of IV-points to compute	Voltamperinės charakteristikos taškų skaičius	21
Voltage step size (V)	Intervalas tarp įtampos verčių voltamperinėje charakteristikoje (V). Galutinė įtampa lygi $0.6 + (21 - 1) \cdot 1 \text{ V} = 20.6 \text{ V}$.	1
Initial voltage for contact #1	Pirmojo elektrodo (kolektoriaus) pradinis potencialas (V).	0.6
Initial voltage for contact #2	Antrojo elektrodo (emiterio) potencialas (V).	0
Initial voltage for contact #3	Trečiojo elektrodo (bazės) potencialas (V).	0.6

28. Uždavus visų parametrų vertes, reikia spragtelėti mygtukus „Save Settings“ ir „Run“.

29. 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 žymenys: V_c – kolektoriaus elektrodo potencialas, V_e – emiterio elektrodo potencialas, V_b – bazės elektrodo potencialas, I_c – kolektoriaus srovė, I_e – emiterio srovė, I_b – bazės srovė (srovė yra teigiama, jeigu ji nukreipta į struktūros vidų, ir neigiama priešingu atveju). Darbo užduotis reikalauja viename grafike atvaizduoti kolektoriaus ir bazės srovių priklausomybes nuo kolektoriaus-emiterio įtampos. Kadangi emiterio elektrodo potencialas lygus 0, tai kolektoriaus-emiterio įtampa lygi kolektoriaus potencialui. Todėl šalia žymens "Vc" pažymimas laukelis "X". Po to šalia žymens "Ib" pažymimas laukelis "Y" ir nuspaudžiamas mygtukas "Add". Po to šalia žymens "Ic" pažymimas laukelis "Y" ir vėl nuspaudžiamas mygtukas

"Add". Nuspaudžiamas mygtukas "Close". Grafikas išsaugomas vėlesnei analizei, naudojant programos „SibGraf 2D“ meniu komandą „File/Save As“.

30. Projekto "4.4 (base + epi variation)" parametrų sąrašė du kartus padidinama fosforo jonų koncentracija epitaksiniame sluoksnyje (žr. 6 punktą), nuspaudžiamas mygtukas „Run“, po to pasirenkamas projektas „4.4 merge“, nuspaudžiamas mygtukas „Run“, o po to pasirenkamas projektas „4.4 example“ ir pakartojami punktai 23 ÷ 29.

31. Abiem kolektoriaus legiravimo laipsniams randamas srovės stiprinimo koeficientas $\beta = I_C / I_B$, kai $V_{CB} = 3 \text{ V}$ (t.y., kai $V_{CE} = 3.6 \text{ V}$). [Bazės srovės priklausomybės nuo V_{CE} reikalingos tik koeficiento β skaičiavimui; šių priklausomybių spausdinti nereikės.].

32. Dvi kolektoriaus srovės priklausomybės nuo įtampos V_{CE} atspausdinamos viename grafike (tai galima atlikti ne laboratorinių darbų metu). Ordinačių ašies mastelis turi būti tiesinis.

33. Atspausdinamas grafikas su penkiais koncentracijų pjūviais, kurie atitinka pradinį kolektoriaus legiravimo laipsnį:

- a) priemaišų koncentracijos priklausomybė nuo gylio,
- b) elektronų ir skylių koncentracijų priklausomybės nuo gylio, kai $V_{CB} = 0$ ($V_{CE} = 0.6 \text{ V}$),
- c) elektronų ir skylių koncentracijų priklausomybės nuo gylio, kai $V_{CB} = 3 \text{ V}$ ($V_{CE} = 3.6 \text{ V}$).

34. Atspausdinamas analogiškas grafikas, atitinkantis 2 kartus didesnę kolektoriaus legiravimo laipsnį.

35. Naudojantis gautosiomis β vertėmis bei bendroju voltamperinių charakteristikų pavidalu, nustatoma, kuria kryptimi reikėtų keisti kolektoriaus legiravimo laipsnį, siekiant sumažinti Erli efektą, ir kuria kryptimi reikia jį keisti, siekiant padidinti β . Šios išvados pagrindžiamos, remiantis gautosiomis koncentracijų priklausomybėmis nuo koordinatės bei teorinėmis žiniomis apie veiksnius, kurie lemia Erli efektą ir β vertę.