

VILNIAUS UNIVERSITETAS
Kietojo kūno elektronikos katedra
Vyksmų puslaidininkiniuose prietaisuose modeliavimas

Darbas Nr. 5b

Metalo-oksido-silicio lauko tranzistoriaus tyrimas

Parengė A. Poškus

2009-04-06

Turinys

| | |
|--|-----------|
| 1. Užduotys | 2 |
| 2. Darbo teorija | 4 |
| 2.1 Įvadas | 4 |
| 2.2 MOS tranzistoriaus veikimo principas ir energijos juostų diagramos | 5 |
| 2.3 MOS tranzistoriaus veikos | 9 |
| 2.4 MOS tranzistoriaus teorinis modelis | 12 |
| 3. Metodika | 16 |

1. Užduotys

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

1. Sumodeliuoti įvairias nMOS tranzistoriaus veikas. **MicroTec** projektas "**5.1 (L=1 μm)**".
2. Pagal elektronų koncentracijos priklausomybes nuo koordinatės Y , esant skirtingoms užtūros įtampoms, rasti slenkstinę įtampą V_{T0} . Viename grafike atvaizduoti elektronų koncentracijos priklausomybes nuo koordinatės Y , esant trimis užtūros įtampoms.
3. Atvaizduoti santakos srovės priklausomybę nuo užtūros įtampos, esant 0.1V santakos įtampai. Pratęsus tiesinio augimo sritį iki susikirtimo su abscisių ašimi, rasti įtampą, kuriai esant, prasideda srovės augimas. Patikrinti, ar ši įtampa sutampa su slenkstine įtampa, kuri gauta pagal elektronų koncentracijos priklausomybes nuo koordinatės.
4. Atvaizduoti santakos srovės priklausomybę nuo santakos įtampos, kai užtūros įtampa yra 2 voltais didesnė už slenkstinę. Tame pačiame grafike atvaizduoti teorinę priklausomybę.
5. Apskaičiuoti slenkstinę įtampą pagal teorinę formulę (13), palyginti šią vertę su ta, kuri gauta pagal skaitmeninio modeliavimo rezultatus (užduotis Nr. 2).

Užtūros oksido storiai ir padėklo legiravimo laipsniai skirtingiems lyginiams variantams pateikti žemiau.

- | | |
|--|--|
| 2. $d = 0.05 \mu\text{m}$, $N_A = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. | 18. $d = 0.03 \mu\text{m}$, $N_A = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. |
| 4. $d = 0.05 \mu\text{m}$, $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. | 20. $d = 0.03 \mu\text{m}$, $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. |
| 6. $d = 0.05 \mu\text{m}$, $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. | 22. $d = 0.03 \mu\text{m}$, $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. |
| 8. $d = 0.10 \mu\text{m}$, $N_A = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. | 24. $d = 0.07 \mu\text{m}$, $N_A = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. |
| 10. $d = 0.10 \mu\text{m}$, $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. | 26. $d = 0.07 \mu\text{m}$, $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. |
| 12. $d = 0.10 \mu\text{m}$, $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. | 28. $d = 0.07 \mu\text{m}$, $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. |
| 14. $d = 0.15 \mu\text{m}$, $N_A = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. | 30. $d = 0.12 \mu\text{m}$, $N_A = 2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. |
| 16. $d = 0.15 \mu\text{m}$, $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. | 32. $d = 0.12 \mu\text{m}$, $N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. |
| | 34. $d = 0.12 \mu\text{m}$, $N_A = 7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. |

Kiti parametrai yra vienodi visiems lyginiams variantams.

Kontroliniai klausimai

1. Koku būdu MOS tranzistoriuje valdomas laidžiojo kanalo laidumas?
2. Krūvio, kuris egzistuoja MOS tranzistoriuje, ir potencialų skirtumo tarp užtūros ir padėklo dedamosios.
3. MOS tranzistoriaus veikos; jų aiškinimas energijos juostų diagramomis.
4. Užtūros slenkstinės įtampos ir santakos soties įtampos sąvokos. Kokia yra santakos srovės įsisotinimo, didėjant santakos įtampai, fizikinė priežastis?
5. Santakos srovės priklausomybė nuo užtūros ir santakos įtampų tiesinėje veikoje ir soties veikoje (išvedimas).

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

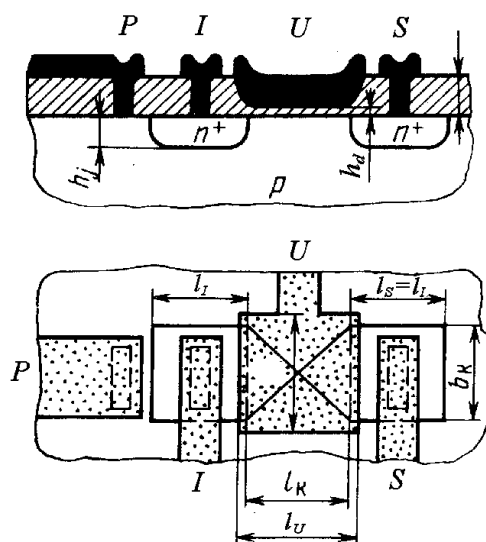
2.1 Įvadas

Lauko tranzistorius – tai puslaidininkinis prietaisas, kuriame srovė valdoma elektriniu lauku, kuris keičia pagrindinių krūvininkų srautą laidžiame kanale. Lauko tranzistoriai klasifikuojami pagal tai, koku būdu sukuriamas laidus kanalas. Šiuo metu labiausiai paplitę vadinamieji **metalo-oksido-silicio (MOS) lauko tranzistoriai**, kuriuose laidus kanalas sukuriamas silicio ir SiO_2 riboje, o kanalo laidumas valdomas, keičiant krūvininkų koncentraciją kanale. Anglų literatūroje santrumpa “MOS” dažniausiai iššifruojama šiek tiek kitaip: “metal-oxide-semiconductor” – “metalo-oksidas-puslaidininkis”. Be to, naudojamas ir bendresnis terminas “metalo-dielektriko-puslaidininkio (MDP) tranzistorius”.

Mikroelektronikoje vyrauja MOS įtaisai. Pvz., kompiuterio atminties integrinės grandinės ir mikroprocesoriai yra sudaryti beveik vien iš MOS tranzistorių. Viena tokio MOS tranzistorių paplitimo priežasčių yra ta, kad MOS tranzistorių lengviau pagaminti, negu dvipolį tranzistorių. MOS tranzistorius turi tik dvi legiruotas sritis (ištaką ir santaką), kurios yra padėklo paviršiuje, o srovė teka išilgai padėklo paviršiaus (žr. 1 pav.). Tuo tarpu dvipolis tranzistorius turi tris legiruotas sritis (emiterį, bazę ir kolektorių), o krūvininkų srauto didžioji dalis teka statmena padėklo paviršiui kryptimi (žr. darbo Nr.5a 9 pav.). Siekiant užtikrinti tokį krūvininkų judėjimą, dvipoliame tranzistoriuje naudojamas paslėptasis didelio laidumo sluoksnis (darbo Nr.5a 9 pav. – n^+ sritis), kuris komplikuoja tranzistoriaus gamybos procesą. Tačiau MOS tranzistoriai buvo pradėti masiškai gaminti dešimtmečiu vėliau, negu dvipoliai tranzistoriai. Taip yra dėl to, kad, gaminant MOS tranzistorių, ant silicio padėklo paviršiaus reikia suformuoti ploną (<100 nm) silicio dioksido sluoksnį, kuris turi būti labai grynas ir pastovaus storio. Tokių sluoksnių gamybos technologija buvo sukurta 1960 – 1970 m.

MOS tranzistorius yra įtampa valdomas prietaisas. Valdymo elektrodu tekanti srovė praktiškai lygi nuliui, nes valdymo elektrodas atskirtas nuo silicio nelaidžiu oksido sluoksniu. Tuo tarpu dvipolis tranzistorius yra srove valdomas prietaisas: bazės srovė valdo kolektoriaus srovę. Kitas skirtumas tarp dvipolio tranzistoriaus ir MOS tranzistoriaus yra tas, kad dvipoliame tranzistoriuje srovė priklauso nuo įtampos eksponentiškai (žr. darbo Nr.5a (1) ir (2) formules), o MOS tranzistoriuje, kaip vėliau pamatysime, srovė priklauso nuo įtampos tiesiškai arba kvadratiškai.

MOS tranzistoriuje vykstančius procesus lengviau suprasti, negu dvipolio tranzistoriaus veikimą. MOS tranzistorius yra vienpolis prietaisas: srovę sukuria tik vienos rūšies krūvininkai. Tačiau MOS tranzistoriaus matematinis aprašymas yra sudėtingesnis, negu dvipolio tranzistoriaus. Mat, dvipolį tranzistorių galima aprašyti, naudojant vienmatį modelį, kuriame lauko ir srovės kryptys yra statmenos padėklo paviršiui (t.y., lygiagrečios punktyrinėms linijoms darbo Nr.5a 9 pav.). MOS tranzistoriui vienmačio modelio pritaikyti neįmanoma, nes užtūros sukuriama elektrinio lauko kryptis yra statmena padėklo paviršiui, o srovės kryptis yra lygiagreti padėklo paviršiui. Taigi, net paprasčiausias MOS tranzistoriaus modelis turi būti dvimatis.



1 pav. MOS tranzistoriaus konstrukcija. Elektrodų žymėjimai: P – padėklo elektrodas, I – ištaka, U – užtūra, S – santaka.

2.2 MOS tranzistoriaus veikimo principas ir energijos juostų diagramos

1 pav. pavaizduotas supaprastintas MOS tranzistoriaus skerspjūvis. MOS tranzistorius turi keturis elektrodus. Srovė, kuri teka tarp ištakos ir santakos, yra valdoma, keičiant kitų dviejų elektrodų (užtūra ir padėklas) potencialą atžvilgiu ištakos ir santakos. Užtūros ir padėklo elektrodais srovė neteka.

2 pav. pavaizduotas realistiško integruotojo MOS tranzistoriaus skerspjūvis (angliški terminai "source" ir "drain" reiškia atitinkamai ištaką ir santaką). Ankstyvuosiuose MOS tranzistoriuose užtūra buvo gaminama iš aliuminio. Tačiau aliuminio atomai iš lėto difunduoja į oksido sluoksnį ir keičia jo savybes. Todėl pastaruoju metu užtūros elektrodas gaminamas iš stipriai legiruoto polikristalinio silicio. Taigi, terminas "MOS" yra netikslus.

MOS tranzistorius yra simetriškas: santaka gali atlikti ištakos vaidmenį, ir atvirkščiai. Santaka susitarta vadinti tašką, kuriame matuojama išėjimo srovė. Ištaka ir padėklas dažniausiai būna įžeminti, t.y., atlieka bendrojo elektrodo vaidmenį. Valdymo įtampa prijungiama prie užtūros.

Priklausomai nuo to, kurios rūšies krūvininkai dalyvauja srovėje, skiriami nMOS tranzistoriai (krūvį perneša elektronai) ir pMOS tranzistoriai (krūvį perneša skylės). Toliau bus aptariamas tik nMOS tranzistorius; pMOS tranzistoriaus analizė yra analogiška (pasikeičia tik legiravimo tipas, valdymo įtampos ženklas ir srovės kryptis).

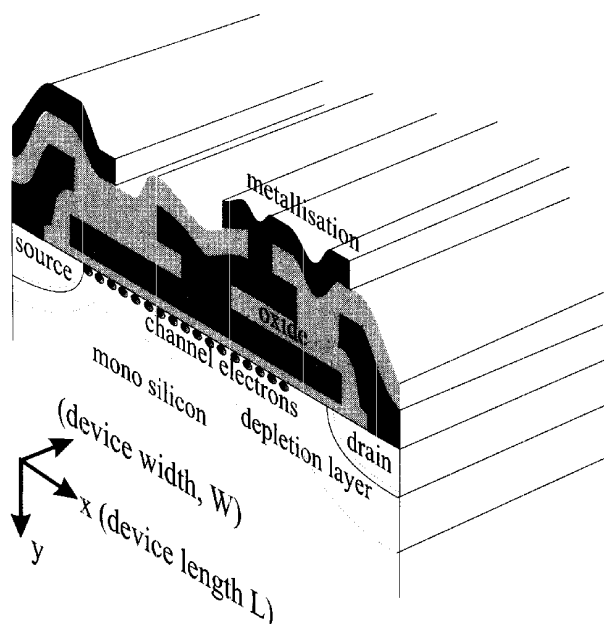
nMOS tranzistoriaus veikimo principas yra toks. Teigiama įtampa tarp užtūros ir padėklo sukuria p tipo padėklo tūryje elektrinį lauką, kuris stumia skylės nuo užtūros gilyn į padėklą. Todėl prie paviršiaus susiformuoja nuskurdintasis sluoksnis. Jeigu užtūros teigiamasis potencialas yra pakankamai didelis, prie paviršiaus susikaupia elektronai ir susiformuoja n tipo kanalas tarp ištakos ir santakos. Kuo aukštesnis užtūros potencialas, tuo daugiau elektronų yra kanale, tuo didesnis kanalo laidumas.

3 pav. ir 4 pav. pavaizduoti krūviai ir potencialai MOS tranzistoriuje (angliški terminai "gate" ir "bulk" reiškia atitinkamai užtūrą ir padėklo tūrį). Kaip matome 3 pav., silicyje sukauptas krūvis Q_s sudarytas iš dviejų dalių: laidaus n tipo kanalo krūvio Q_n ir nuskurdintojo sluoksnio krūvio Q_{dep} (nuskurdintasis sluoksnis pavaizduotas pilka spalva):

$$Q_s = Q_n + Q_{dep} \quad (1)$$

Abu krūviai Q_n ir Q_{dep} yra neigiami (kanale – elektronai, o nuskurdintame sluoksnyje – neigiami akceptorijų jonai). Užtūros elektrode sukauptas tokio paties didumo, tačiau priešingo ženklo krūvis. Taigi, užtūra, oksidas ir silicis sudaro plokščiąjį kondensatorių. Jeigu egzistuoja laidus kanalas, tuomet šio kondensatoriaus diferencialinė talpa sutampa su oksido sluoksnio talpa (tai įrodyta 2.3 poskyryje), t.y., užtūros įtampos V_{GB} ("gate-bulk") pokytis ΔV_{GB} sąlygoja kanalo krūvio pokytį

$$\Delta Q_n = C_{ox} \Delta V_{GB}; \quad (2)$$



2 pav. Integruotojo MDP tranzistoriaus skerspjūvis

čia C_{ox} yra oksido sluoksnio talpa, kurią galima išreikšti pagal plokščiojo kondensatoriaus formulę:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox} S}{d}; \quad (3)$$

čia ϵ_{ox} yra oksido dielektrinė skvarba, S yra užtūros elektrodo plotas, o d yra oksido sluoksnio storis. Vadinasi, kuo mažesnis d , tuo jautresnis kanalo krūvis (ir laidumas) užtūros įtampai.

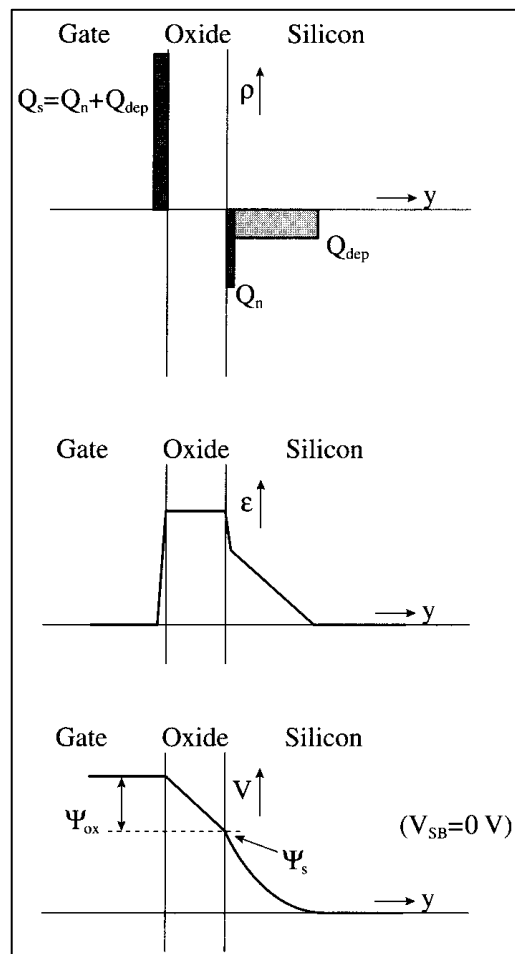
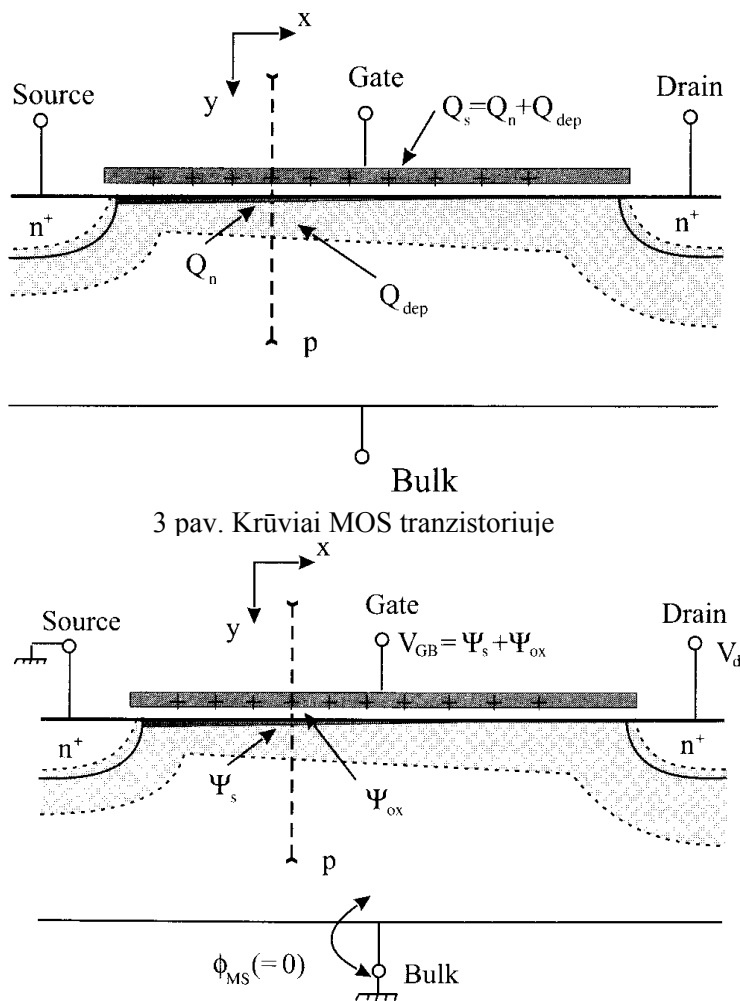
Uztūros įtampą V_{GB} taip pat galima išskaidyti į dvi dedamąsias (žr. 4 pav.): potencialo pokytis silicyje Ψ_s ir potencialo pokytis okside $\Psi_{ox} = |Q_s| / C_{ox}$:

$$V_{GB} = \Psi_s + \Psi_{ox} = \Psi_s + \frac{|Q_s|}{C_{ox}} \quad (4)$$

Erdvinio krūvio tankio, elektrinio lauko stiprio ir potencialo kitimą statmena padėklo paviršiui kryptimi y (išilgai punktyrinės linijos 3 pav.) galima analizuoti, remiantis Puasono lygtimi

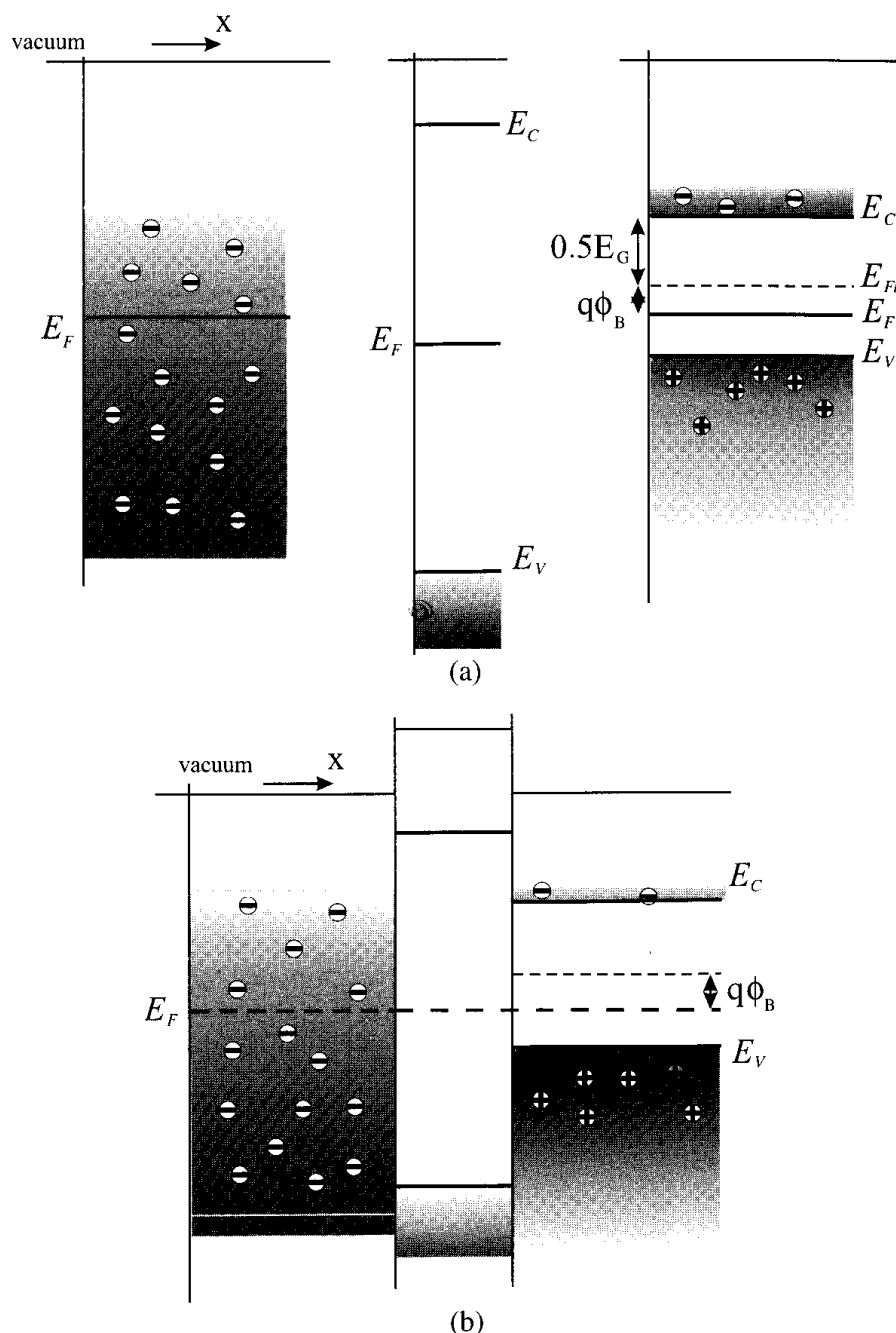
$$\frac{d^2 \phi}{dy^2} = -\frac{\rho(y)}{\epsilon_0 \epsilon}; \quad (5)$$

čia ϕ yra potencialas, ρ yra erdvinio krūvio tankis, $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-14}$ F/cm yra elektrinė konstanta, o ϵ yra medžiagos dielektrinė skvarba. Kaip ir pn sandūros atveju, galime nubraižyti tris grafikus: erdvinio krūvio pasiskirstymas, kurį suintegravus y atžvilgiu, gaunamas elektrinio lauko pasiskirstymas, kurį suintegravus, gaunamas potencialo pasiskirstymas. Šie trys grafikai pavaizduoti 5 pav. Čia pasinaudota nuskurdinimo artiniu, kuris remiasi prielaida, kad nuskurdintajame sluoksnyje nėra laisvųjų krūvininkų, t.y., erdvinį krūvį sukuria tik neigiami akceptorių jonai. Tuomet nuskurdintame sluoksnyje erdvinio krūvio pasiskirstymas yra stačiakampio pavidalo (pilkoji sritis 5a pav.), elektrinis laukas kinta tiesiškai (5b pav.), o potencialas – paraboliskai (5c pav.). Oksido tūryje erdvinio krūvio nėra (žr. 5a pav.), todėl elektrinis laukas jame yra pastovus (žr. 5b pav.), o potencialas kinta tiesiškai (žr. 5c pav.).



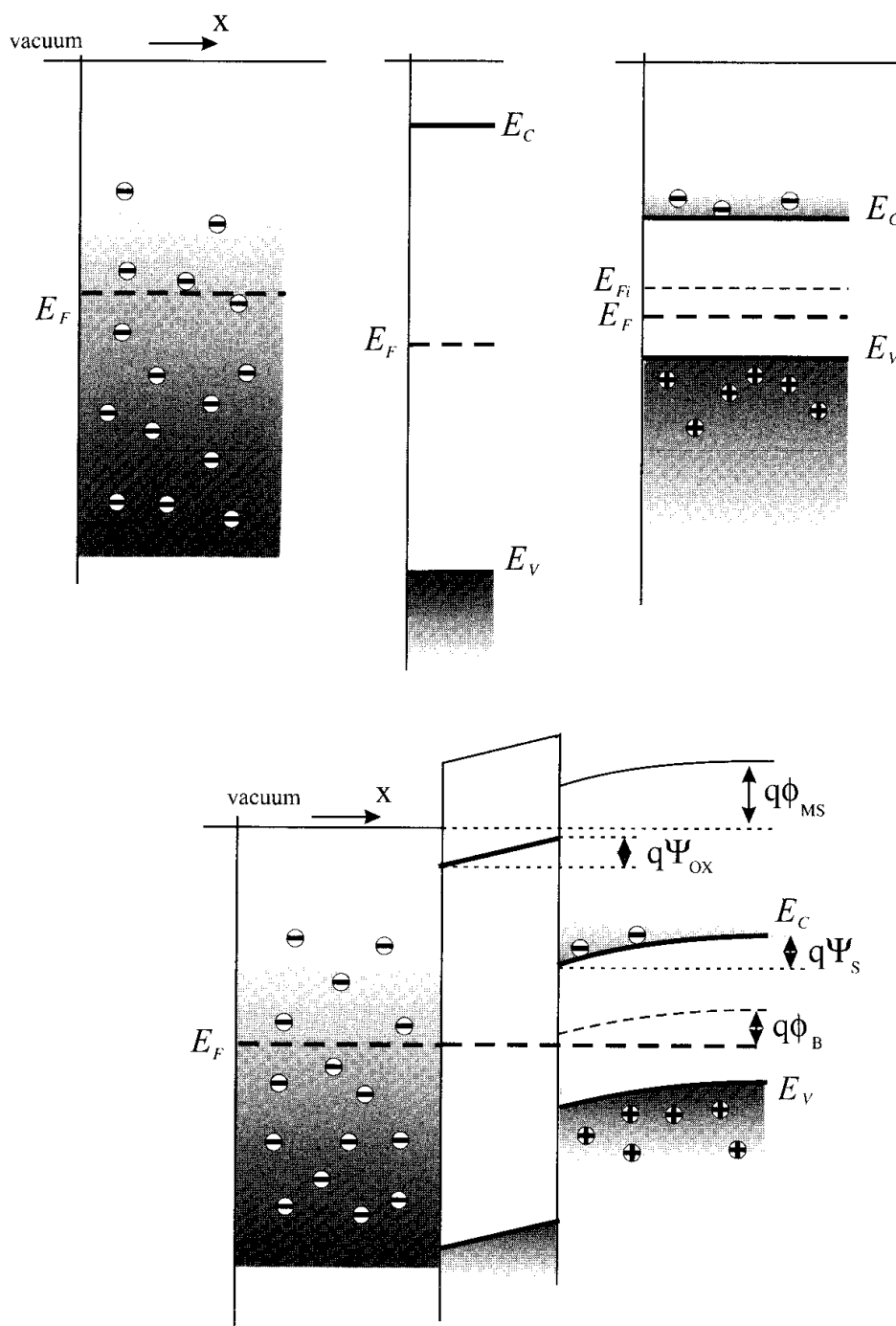
MOS tranzistoriaus analizei reikia sudaryti jo energijos juostų diagramą. Šios diagramos sudarymo procedūra yra tokia pati, kaip ir pn diodo bei dvipolio tranzistoriaus atveju. Pradedame nuo izoliuotų medžiagų. Kadangi izoliuotų užtūros, oksido ir padėklo krūviai lygūs nuliui, tai jų vakuomo lygmenys sutampa ir yra lygūs nuliui (žr. 6a pav.). Šioje diagramoje laikoma, kad užtūra yra metalinė, todėl Fermio lygmuo užtūroje yra aukščiau laidumo juostos krašto (tai būdinga visiems metalams). Fermio lygmenys skirtingose medžiagose bendruoju atveju skiriasi. Tačiau paprastumo dėlei tarkime, kad užtūros ir padėklo Fermio energijos sutampa. Tuomet, sujungus užtūrą, oksidą ir padėklą į vieną sistemą, nevyks krūvio persiskirstymas tarp užtūros ir padėklo, todėl nebus juostų užlinkimo (žr. 6b pav.). Toks atvejis vadinamas *tiesiųjų juostų* atveju.

Realiuose MOS tranzistoriuose užtūra gaminama ne iš metalo, o iš polikristalinio silicio. Silicio vakuomo lygmens ir Fermio lygmens skirtumas termodinaminėje pusiausvyroje priklauso nuo legiravimo laipsnio. Kadangi padėklo medžiaga taip pat yra silicis, tai aišku, kad tiesiųjų juostų artėjimas gali tikti tik tuomet, kai užtūra legiruota to paties tipo priemaisomis, kaip padėklas, ir kai užtūros legiravimo laipsnis artimas padėklo legiravimo laipsniui.



6 pav. nMOS tranzistoriaus energijos juostų diagrama tiesiųjų juostų atveju

7 pav. atitinka tą atvejį, kai Fermio lygmuo izoliuotuose užtūroje ir padėkle skiriasi. Šiuo atveju užtūros Fermio lygmuo yra aukščiau padėklo Fermio lygmens. Kitais žodžiais, vidutinis elektrono išlaisvinimo darbas užtūroje yra mažesnis už vidutinį elektrono išlaisvinimo darbą padėkle (ši darbą nusako vakuomo lygmens ir Fermio lygmens skirtumas). Vadinasi, sudarius kontaktą, elektronų koncentracija prie pat kontakto užtūroje sumažės, o padėkle padidės. Todėl tarp metalo ir silicio susidarys kontaktinis potencialų skirtumas ϕ_{MS} , kuris, kaip ir pn sandūros atveju, yra lygus išlaisvinimo darbų skirtumui, padalintam iš $-e$. Energijos juostų diagramoje kontaktinį potencialų skirtumą atspindi vakuomo lygmenų skirtumas (žr. 7b pav.). Kadangi silicio priepaviršinėje srityje padaugėja elektronų, tai laidumo juostos kraštas priartėja prie Fermio lygmens (žr. 7b pav.). Šio juostų užlinkimo didumas yra lygus elementariojo krūvio e ir potencialo pokyčio padėkle Ψ_s sandaugai (žr. 7b pav.). Likusioji išlaisvinimo darbų skirtumo dalis ($e\Psi_{ox}$) tenka oksido sluoksniui.



7 pav. nMOS tranzistoriaus energijos juostų diagrama, kai metalo ir silicio išlaisvinimo darbai skiriasi

2.3 MOS tranzistoriaus veikos

Idealiuotu MOS tranzistoriumi vadinamas MOS tranzistorius, kuris tenkina šias tris sąlygas:

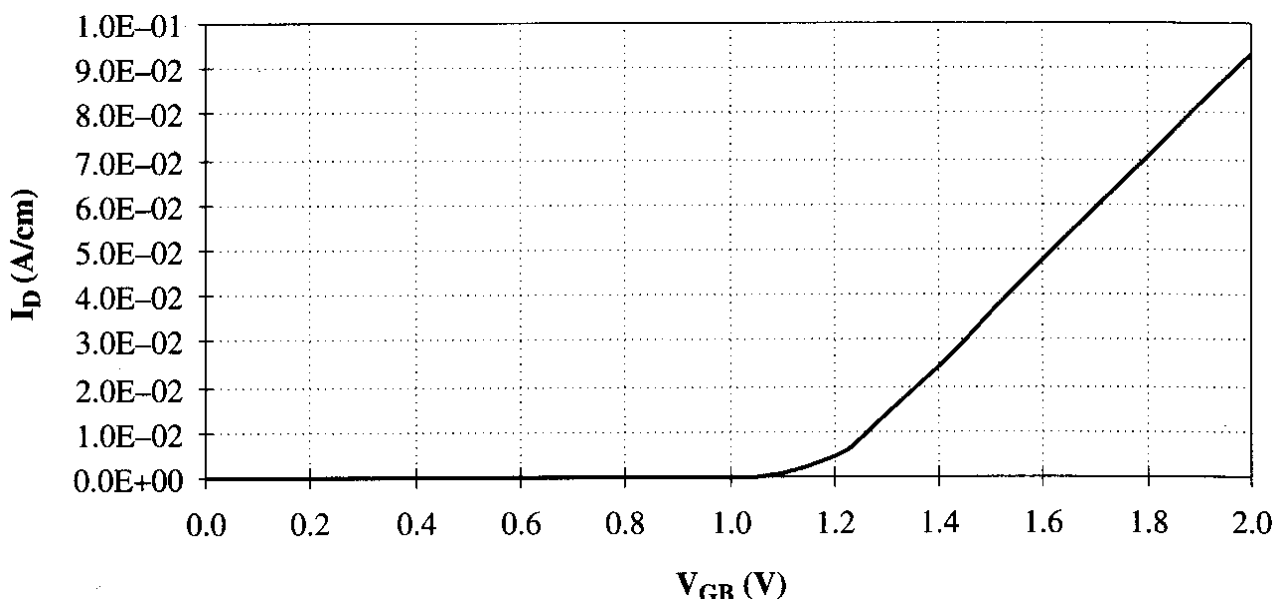
- 1) užtūros ir padėklo išlaisvinimo darbai sutampa (tiesiųjų juostų atvejis);
- 2) oksido sluoksnyje nėra krūvių;
- 3) oksido sluoksnio varža yra begalinė.

Aptardami idealųjį nMOS tranzistorių, laikysime, kad padėklas legiruotas tolygiai (boro jonų koncentracija lygi $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), atstumas tarp ištakos ir santakos lygus $L \approx 1 \text{ } \mu\text{m}$, oksido storis lygus $t_{ox} = 50 \text{ nm}$. Be to, laikysime, kad ištaka ir padėklas yra įžeminti, o santakos potencialas lygus 0.1 V . Dėl šio potencialų skirtumo tarp santakos ir ištakos MOS tranzistoriumi pradeda tekėti srovė, kai susiformuoja laidus kanalas.

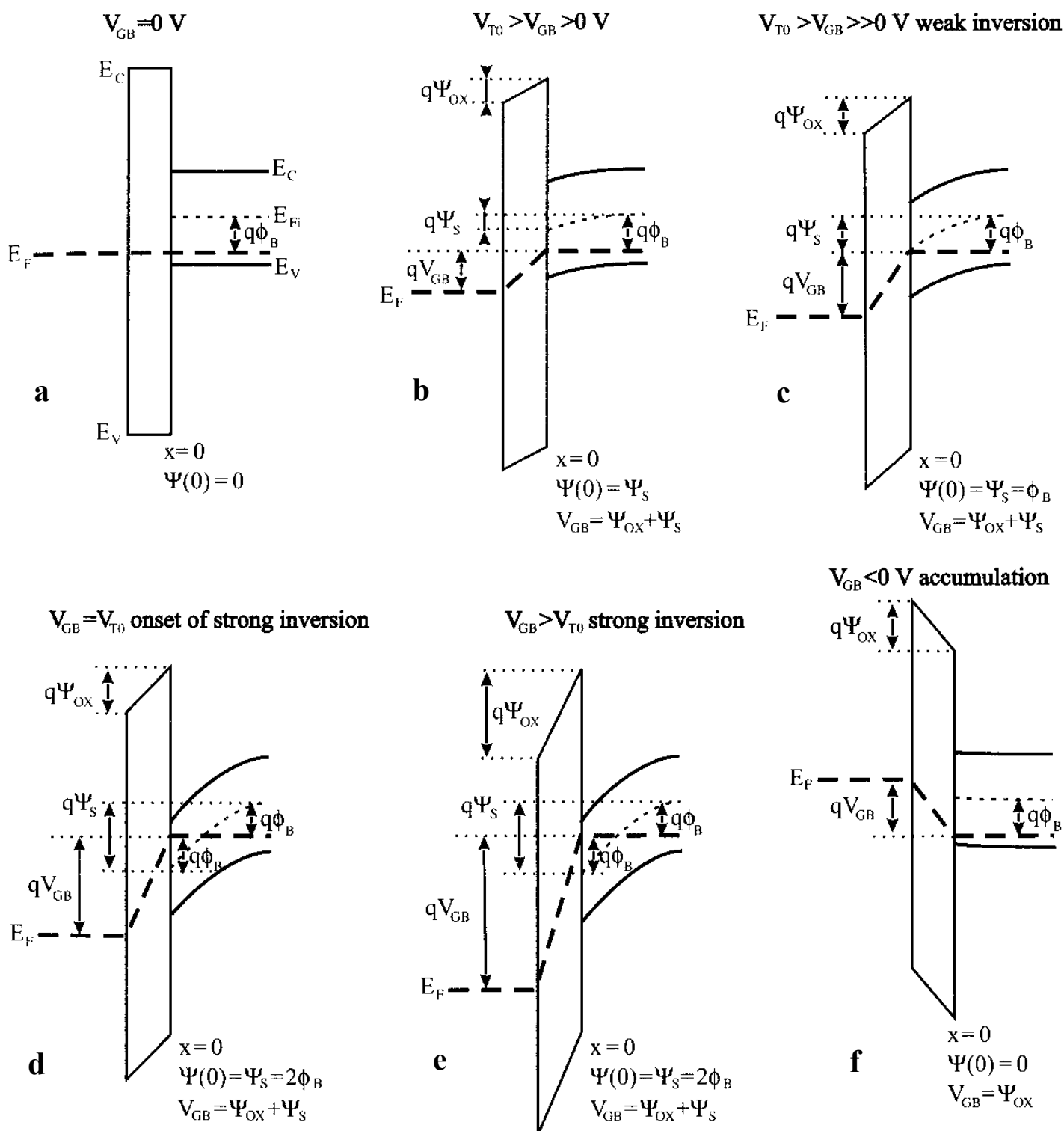
Santakos srovės priklausomybė nuo užtūros įtampos yra pavaizduota 8 pav. Matome, kad esant mažai užtūros įtampai ($V_{GB} < 1.2 \text{ V}$), santakos srovė lygi nuliui. Vadinasi, šioje veikoje MOS tranzistoriuje neegzistuoja laidus kanalas. Kai $V_{GB} > 1.3 \text{ V}$, susiformuoja laidus kanalas, todėl pro santaką ir ištaką pradeda tekėti srovė. Šioje veikoje nuskurdintojo sluoksnio krūvis Q_{dep} nustoja priklausyti nuo V_{GB} , todėl silicyje sukaupto krūvio Q_s priklausomybę nuo V_{GB} lemia laidaus kanalo krūvio Q_n priklausomybė nuo V_{GB} (žr. formulę (1)). 8 pav. matome, kad santakos srovės priklausomybė nuo užtūros įtampos yra tiesinė. Taip yra todėl, kad srovės tankis proporcingas elektronų koncentracijai kanale, t.y., krūviui Q_n , o šis krūvis priklauso nuo V_{GB} pagal plokščiojo kondensatoriaus formulę (2), t.y., tiesiškai. Užtūros įtampa, kuri atitinka laidaus kanalo susiformavimą MOS tranzistoriuje, yra vadinama MOS tranzistoriaus *slenkstine įtampa*. Slenkstinę įtampą žymėsime V_{T0} (nuo angliško žodžio “threshold” – “slenkstis”). Indeksas “0” žymėjime V_{T0} nurodo, kad ši slenkstinė įtampa atitinka tiesiųjų juostų atvejį. Bendruoju atveju naudojamas žymėjimas V_T . Slenkstinė įtampa V_T priklauso nuo kontaktinio potencialų skirtumo (t.y., nuo pradinio energijos juostų užlinkimo, kai $V_{GB} = 0$).

Skirtingas MOS tranzistoriaus veikas lengviau suprasti, naudojant supaprastintas energijos juostų diagramas, kurios pavaizduotos 9 pav. Šiose diagramose vakuume lygmuo nėra pavaizduotas, užtūroje pavaizduotas tik Fermio lygmuo, okside parodyti tik laidumo ir valentinės juostų kraštai, o padėkle parodyti juostų kraštai ir Fermio lygmuo. Draustinės juostos vidurio ir Fermio lygmens skirtumą padėklo tūryje žymėsime $e\phi_B$. Kai $V_{GB} = 0$, juostų užlinkimo nėra (9a pav.), t.y., potencialo pokytis padėklo tūryje lygus nuliui:

$$\Psi_s = 0 \quad (\text{tiesios juostos}). \quad (6a)$$



8 pav. nMOS tranzistoriaus santakos srovės priklausomybė nuo užtūros įtampos



9 pav. nMOS tranzistoriaus energijos juostos diagramos, esant įvairioms užtūros įtampoms. a – tiesios juostos, b – nuskurdinimas, c – silpnos inversijos pradžia, d – stiprios inversijos pradžia, e – stipri inversija, f – akumuliacija.

Kai užtūros įtampa V_{GB} yra nenulinė, padėklo Fermio lygmuo pasilenka atžvilgiu užtūros Fermio lygmens atstumu eV_{GB} (9b–f pav.) – taip pat, kaip pn sandūroje. Tačiau, skirtingai negu pn sandūroje, tarp užtūros ir padėklo neteka elektros srovė. Todėl Fermio lygmuo lieka horizontalus ir neskyla į elektronų ir skylių Fermio kvazilygmenis. Jeigu įtampa V_{GB} yra teigiama, tačiau nepakankamai aukšta, kad susidarytų laidus kanalas, tuomet tos įtampos poveikis pasireiškia tuo, kad nuskurdinama silicio sritis, kuri yra po užtūra. Skylės nustumiamos gilyn į padėklą, o elektronai pritraukiami. Lygiai taip pat, kaip pn sandūroje, susiformuoja nuskurdintasis sluoksniu. Todėl ši MOS tranzistoriaus veikia vadinama **nuskurdinimo veika**. Kadangi nuskurdintame sluoksnyje skylių koncentracija yra mažesnė, negu toli nuo padėklo paviršiaus, tai atstumas tarp Fermio

lygmens ir valentinės juostos išauga (žr. darbo Nr.2 (2.1.2a,b) formules). Kadangi Fermio lygmuo lieka horizontalus, tai šis skirtumo $F - E_v$ padidėjimas reiškia, kad silicio energijos juostos prie padėklo paviršiaus užlinksta į apačią (9b pav.). Nuskurdinimo veikoje potencialo pokytis silicio tūryje yra mažesnis už ϕ_B :

$$0 < \Psi_s < \phi_B \quad (\text{nuskurdinimas}). \quad (6b)$$

Toliau didinant įtampą V_{GB} , juostų užlinkimas didėja, ir, esant tam tikrai V_{GB} vertei, Fermio lygmuo prie paviršiaus atsiduria draustinės energijos juostos viduryje, t.y., potencialo pokytis silicio tūryje tampa lygus ϕ_B (9c pav.). Kai $\Psi_s > \phi_B$, Fermio lygmuo atsiduria arčiau laidumo juostos, negu valentinės juostos. Tai reiškia, kad elektronų koncentracija prie padėklo paviršiaus tampa didesnė už skylių koncentraciją, t.y., padėklo sritis prie paviršiaus pakeičia laidumo tipą. Tokia MOS tranzistoriaus būseną, kurioje laidumo tipas prie padėklo paviršiaus skiriasi nuo laidumo tipo padėklo tūryje, vadinama **inversija**. Kol Fermio lygmuo yra arti laidumo juostos vidurio, padėklo paviršinės srities laidumas yra žymiai mažesnis už likusios padėklo dalies laidumą, todėl srovė dar neteka. Ši veika vadinama **silpna inversija**. Silpnos inversijos sąlygomis atstumas tarp Fermio lygmens ir laidumo juostos prie silicio paviršiaus yra didesnis, negu atstumas tarp Fermio lygmens ir valentinės juostos silicio tūryje, t.y., potencialo pokytis silicio tūryje yra mažesnis už $2\phi_B$:

$$\phi_B < \Psi_s < 2\phi_B \quad (\text{silpna inversija}). \quad (6c)$$

Toliau didėjant įtampai V_{GB} , Fermio lygmuo priartėja prie laidumo juostos krašto tokiu pačiu atstumu, kuriuo jis nutolęs nuo valentinės juostos krašto padėklo tūryje. T.y., $\Psi_s = 2\phi_B$, taigi, Fermio lygmuo vėl atsiduria $e\phi_B$ atstumu nuo draustinės juostos vidurio, tačiau priešingoje draustinės juostos pusėje (9d pav.). Tai reiškia, kad elektronų koncentracija padėklo paviršiuje tampa tos pačios eilės, kaip skylių koncentracija padėklo tūryje. Dar labiau padidėjus įtampai V_{GB} , elektronų koncentracija prie padėklo paviršiaus tampa didesnė už skylių koncentraciją padėklo tūryje. Tokia nMOS tranzistoriaus veika vadinama **stipria inversija**:

$$\Psi_s > 2\phi_B \quad (\text{stipri inversija}). \quad (6d)$$

Stiprios inversijos veikoje padėklo laidumas prie paviršiaus yra didelis, todėl tarp ištakos ir santakos susiformuoja laidus kanalas ir juo pradeda tekėti srovė. Taigi, aukščiau minėtoji *slenkstinė įtampa* V_T atitinka stiprios inversijos pradžią. Stiprios inversijos veikoje juostų užlinkimas prie padėklo paviršiaus nustoja priklausyti nuo užtūros įtampos V_{GB} . Toliau augant V_{GB} , keičiasi tik įtampos kritimas oksido sluoksnyje (plg. 9d pav. ir 9e pav.). Taip yra todėl, kad vidutinė elektronų koncentracija kanale *tiesiškai* priklauso nuo V_{GB} (pagal (2) formulę), tačiau laidumo juostos krašto ir Fermio lygmens skirtumas *logaritmiškai* priklauso nuo elektronų koncentracijos (žr. darbo Nr.2 (2.1.2a,b) formules), taigi ir nuo V_{GB} . Ši logaritminė priklausomybė yra žymiai silpnesnė už tiesinę, todėl stiprios inversijos sąlygomis juostų užlinkimas praktiškai nepriklauso nuo V_{GB} .

Jeigu prie nMOS tranzistoriaus užtūros prijungta neigiama įtampa ($V_{GB} < 0$), tuomet prie silicio paviršiaus padaugėja pagrindinių krūvininkų – skylių. Tokia MOS tranzistoriaus veika, kurioje prie padėklo paviršiaus padidėja pagrindinių krūvininkų koncentracija, vadinama **akumuliacija**. Akumuliacijos veikoje beveik visa įtampa V_{GB} krinta oksido sluoksnyje, nes padėklo priepaviršinės srities varža yra labai maža. Dėl tos pačios priežasties akumuliacijos veikoje beveik nėra juostų užlinkimo (žr. 9f pav.). Aišku, kad akumuliacijos veikoje srovė neteka, nes didelio laidumo p sritis yra tarp n tipo ištakos ir santakos, t.y., turime dvi priešpriešiais sujungtas pn sandūras.

Praktikoje MOS tranzistoriaus padėklo legiravimas niekada nebūna tolygus, o energijos juostos jau būna užlinkusios, esant nulinei užtūros įtampai, t.y., MOS tranzistorius nėra idealus. Kaip parodyta 7 pav., juostų užlinkimą sukelia kontaktinis potencialų skirtumas tarp užtūros medžiagos (metalo arba polikristalinio silicio) ir padėklo medžiagos (monokristalinio silicio). Šį kontaktinį potencialų skirtumą žymėsime ϕ_{MS} . Esant kontaktiniam potencialų skirtumui, slenkstinę įtampą V_T galima išreikšti tokiu būdu:

$$V_T = V_{T0} - \phi_{MS}; \quad (7)$$

čia V_{T0} yra idealiojo MOS tranzistoriaus slenkstinė įtampa. Vadinasi, jeigu $\phi_{MS} > 0$ (kaip 7 pav.), tuomet slenkstinė įtampa sumažėja.

Idealiojo MOS tranzistoriaus slenkstinę įtampą V_{T0} galima rasti šitaip. Nuskurdinimo ir silpnos inversijos veikoje laisvųjų krūvininkų koncentracija prie padėklo paviršiaus yra žymiai mažesnė už jonizuotų akceptorų koncentraciją, todėl galima laikyti, kad visą erdvinį krūvį sukuria jonizuoti akceptoriai:

$$Q_s \approx Q_{dep} \quad (\text{nuskurdinimas ir silpna inversija}). \quad (8)$$

Vadinasi, erdvinio krūvio tankis ρ yra priešingas padėklo akceptorų koncentracijos N_A elementariojo krūvio e sandaugai:

$$\rho = -eN_A. \quad (9)$$

Įrašę (9) į Puasono lygtį (5) ir dukart suintegravę nuo padėklo paviršiaus $y = 0$ iki nuskurdintojo sluoksnio krašto $y = w$, randame potencialo pokytį silicio tūryje:

$$\Psi_s = \frac{eN_A w^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon}. \quad (10)$$

Kaip minėta aukščiau, slenkstinė įtampa atitinka $\Psi_s = 2\phi_B$. Įrašę tai į (10) ir išreiškę w , randame didžiausią nuskurdintojo sluoksnio storį (jis pasiekiamas, kai $V_{GB} = V_{T0}$):

$$w_{\max} = 2\sqrt{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon \phi_B}{eN_A}}. \quad (11)$$

Akivaizdu, kad nuskurdintajame sluoksnyje sukauptasis krūvis (tenkantis padėklo paviršiaus ploto vienetui) yra lygus $Q_{dep} = -eN_A w_{\max}$. Pagal (8), tai kartu yra ir pilnutinis padėklo krūvis Q_s . Taigi,

$$Q_s \approx -eN_A w_{\max} = -2\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon \phi_B eN_A}. \quad (12)$$

Įrašę šią krūvio Q_s išraišką į V_{GB} išraišką (4) ir atsižvelgę į tai, kad $\Psi_s = 2\phi_B$, randame slenkstinę įtampą:

$$V_{T0} = 2\phi_B + \frac{2\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon \phi_B eN_A}}{C_{ox}}. \quad (13)$$

čia C_{ox} yra oksido sluoksnio talpa (F/cm^2).

2.4 MOS tranzistoriaus teorinis modelis

MOS tranzistorių laikysime plokščiuoju kondensatoriumi, kurio vienas elektrodas yra užtūra, o kito elektrodo vaidmenį atlieka laidusis kanalas kartu su nuskurdintuoju sluoksniu. Pakitus užtūros įtampai V_{GB} , užtūros elektrodo krūvio pokytis yra priešingas prie silicio paviršiaus sukaupto krūvio pokyčiui. Šiuos krūvio pokyčius galima susieti su V_{GB} pagal plokščiojo kondensatoriaus formulę (2). Čia kalbama apie krūvio pokyčius, o ne apie pilnuosius krūvius, nes pilnieji krūviai priklauso nuo kontaktinio potencialų skirtumo ir gali skirtis nuo nulio, kai $V_{GB} = 0$ (žr. 2.3 poskyrį). Kaip minėta aukščiau, silicyje sukauptasis krūvis Q_s sudarytas iš laidaus kanalo krūvio Q_n ir nuskurdintojo sluoksnio krūvio Q_{dep} (žr. formulę (1)). Kol neegzistuoja laidusis kanalas ($V_{GB} < V_T$), krūvis Q_n praktiškai lygus nuliui, o Q_{dep} tiesiškai priklauso nuo V_{GB} . Kai egzistuoja laidusis kanalas ($V_{GB} > V_T$), Q_{dep} nustoja priklausyti nuo V_{GB} , o Q_n tiesiškai priklauso nuo V_{GB} . Vadinasi, kanalo krūvį Q_n lemia tik ta įtampos V_{GB} dalis, kuri yra virš slenkstinės įtampos V_T . Taigi, kanalo krūvio absoliutinė vertė lygi

$$Q_n = C_{ox}(V_{GB} - V_T). \quad (14)$$

Reikia turėti omenyje, kad šioje formulėje C_{ox} reiškia talpą, kuri tenka užtūros ploto vienetui (F/cm^2). Atitinkamai, Q_n taip pat reiškia krūvį, tenkantį ploto vienetui (C/cm^2). T.y., Q_n yra elektronų krūvio tankio integralas išilgai ašies Y (t.y., statmena padėklo paviršiui kryptimi). Srovės stipris – tai krūvis, kuris tenka ilgio vienetui srovės kryptimi (t.y., X kryptimi), padaugintas iš krūvininkų dreifinio greičio. Norint rasti krūvį, kuris tenka X ašies ilgio vienetui, Q_n reikia padauginti iš užtūros elektrodo pločio W (Z kryptimi; žr. 2 pav.). Vadinasi, santakos srovė lygi

$$I_D = WQ_n \mu_n E_{DS}; \quad (15)$$

čia μ_n yra elektronų judris, o E_{DS} yra elektrinio lauko stipris kanale. Šis elektrinio lauko stipris yra lygus

$$E_{DS} = \frac{V_{DS}}{L}; \quad (16)$$

čia L yra MOS tranzistoriaus ilgis, o V_{DS} yra įtampa tarp santakos ir ištakos. Įrašę (14) ir (16) į (15), randame santakos srovę:

$$I_D = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} (V_{GB} - V_T) V_{DS} = \beta (V_{GB} - V_T) V_{DS}; \quad (17)$$

čia β yra pastovusis daugiklis:

$$\beta = \frac{W \mu_n C_{ox}}{L}. \quad (18)$$

Formulė (17) gauta, laikant, kad įtampa tarp užtūros ir kanalo lygi įtampai tarp užtūros ir padėklo elektrodo, t.y., V_{GB} . Kitais žodžiais, laikoma, kad kanalo potencialas lygus padėklo elektrodo potencialui, t.y., nuliui. Tačiau, tekant srovei kanalu, jame atsiranda įtampos kritimas, todėl teisingiau būtų laikyti, kad kanalo potencialas tiesiškai kinta nuo 0 prie ištakos iki V_{DS} prie santakos. Todėl vidutinis kanalo potencialas lygus $V_{DS}/2$. Atitinkamai, vidutinė įtampa tarp užtūros ir kanalo lygi ne V_{GB} , o $V_{GB} - (V_{DS}/2)$. Atlikę šį pakeitimą formulėje (14), randame

$$Q_n = C_{ox} \left(V_{GB} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right), \quad (19)$$

o vietoj (17) gauname

$$I_D = \beta \left(V_{GB} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS}. \quad (20)$$

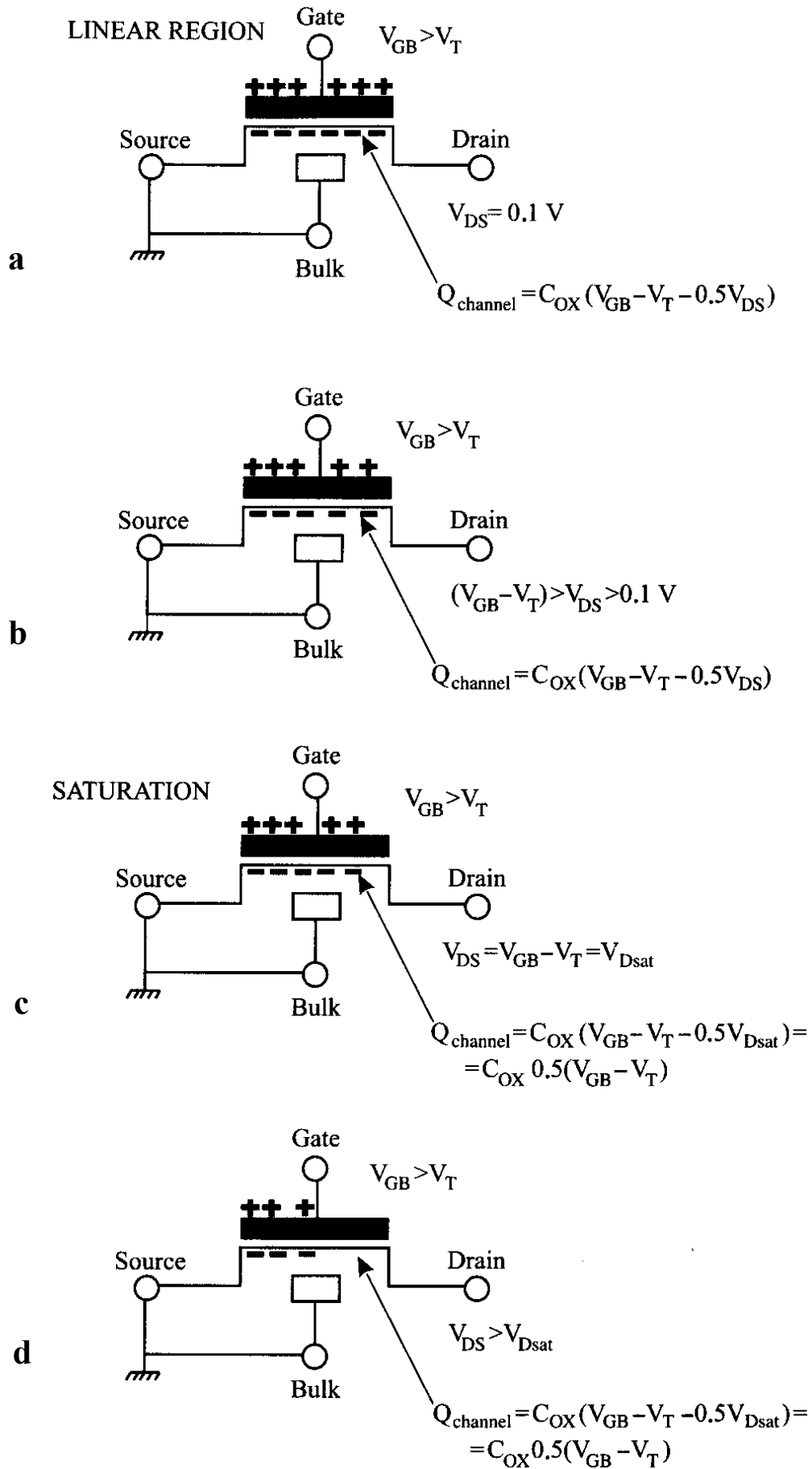
Lygybės (19) ir (20) galioja tik tol, kol $V_{DS} < V_{GB} - V_T$. Vadinasi, esant mažai ištakos įtampai, ištakos srovė tiesiškai priklauso nuo V_{GB} ir beveik tiesiškai priklauso nuo V_{DS} . Todėl MOS tranzistoriaus veika, kurioje tenkinama nelygybė $V_{DS} < V_{GB} - V_T$, yra vadinama **tiesine veika**.

Santakos srovės I_D priklausomybė nuo V_{GB} ir V_{DS} žymiai pasikeičia, kai V_{DS} viršija $V_{GB} - V_T$. Šio pokyčio fizikines priežastis iliustruoja 10 pav. 10a pav. atitinka labai mažą įtampą V_{DS} , kai galioja (20). 10b pav. atitinka šiek tiek didesnę V_{DS} , tačiau dar galioja sąlyga $V_{DS} < V_{GB} - V_T$. Didinant V_{DS} , auga kanalo dalies, kuri yra arti santakos, potencialas. Jeigu užtūros potencialas (V_{GB}) nekinta, tuomet, padidėjus kanalo potencialui, sumažėja užtūros ir kanalo potencialų skirtumas, t.y., susilpnėja elektrinis laukas, kuris stumia skyles gilyn į padėklą ir traukia elektronus link užtūros. Todėl, kai $V_{DS} > 0$, elektronų koncentracija kanale mažėja, judant nuo ištakos link santakos (žr. 10b pav.). 10c pav. atveju įtampa V_{DS} yra lygi $V_{GB} - V_T$. Šiuo atveju užtūros ir kanalo potencialų skirtumas prie pat santakos yra lygus $V_{GB} - (V_{GB} - V_T) = V_T$. Tai yra stiprios inversijos sąlyga. Dar šiek tiek padidinus V_{DS} , prie santakos nustoja galioti stiprios inversijos sąlyga, t.y., laidus kanalas nustoja egzistuoti. Vadinasi, prie pat santakos elektronų judėjimą pradeda lemti elektrinis laukas, kuris egzistuoja santakos-kanalo nuskurdintame sluoksnyje. Šis laukas ekstrahuoja elektronus iš kanalo į santaką. Toliau didinant V_{DS} , srovė I_D beveik nesikeičia. Todėl MOS tranzistoriaus veika, kurioje tenkinama nelygybė $V_{DS} > V_{GB} - V_T$, yra vadinama **soties veika** (angl. *saturation*).

Taigi, MOS tranzistoriaus santakos srovės I_D priklausomybė nuo santakos įtampos V_{DS} , esant pastoviai užtūros įtampai V_{GB} , yra panaši į dvipolio tranzistoriaus kolektoriaus srovės priklausomybę nuo kolektoriaus įtampos, esant pastoviai bazės įtampai (žr. darbo Nr.5a 7 pav.). Tačiau dvipolio tranzistoriaus kolektoriaus charakteristikų pradinė (kylančioji) sritis buvo vadinama soties sritimi, o horizontalioji sritis – tiesiogine aktyviaja sritimi. MOS tranzistoriaus atveju kylančioji sritis vadinama tiesine sritimi, o horizontalioji sritis – soties sritimi.

Santakos įtampa, kuriai esant, MOS tranzistorius pereina į soties veiką, vadinama **soties įtampa**:

$$V_{Dsat} = V_{GB} - V_T. \quad (21)$$



10 pav. nMOS tranzistoriaus tiesinė veika (a, b) ir soties veika (c, d).

MOS tranzistoriaus santakos srovės priklausomybę nuo užtūros įtampos soties veikoje galima rasti, įrašius (21) į (20) vietoj V_{DS} :

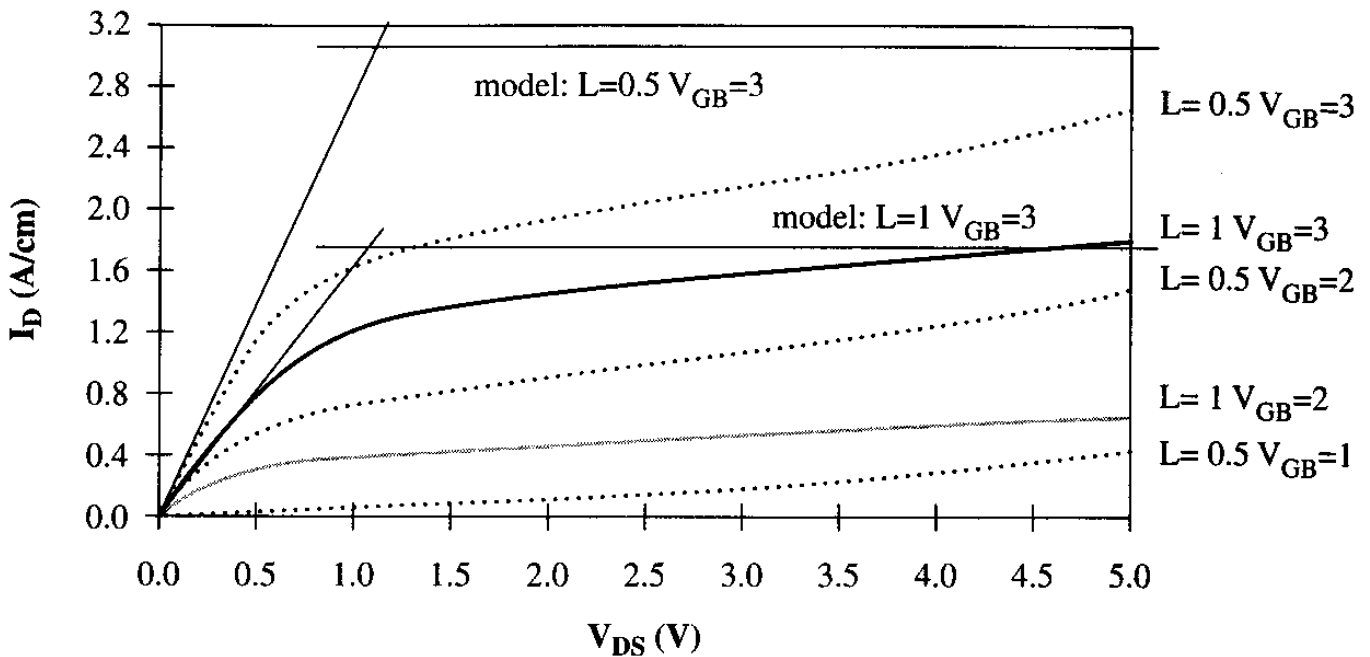
$$I_D = \frac{\beta}{2}(V_{GB} - V_T)^2. \quad (22)$$

Soties veikoje, didėjant santakos įtampai V_{DS} , auga atgalinė įtampa santakos-kanalo nuskurdintame sluoksnyje, todėl šio nuskurdintojo sluoksnio storis auga, mažindamas kanalo ilgį (žr. 10d pav.). Todėl koeficientas $\beta = W\mu_n C_{ox} / L$ ir santakos srovė I_D taip pat iš lėto auga. Ilgiems MOS tranzistoriams ($L > 1 \mu\text{m}$) šis srovės augimas yra lėtas, todėl galima laikyti, kad soties veikoje I_D nepriklauso nuo V_{DS} .

Lygybės (20), (21) ir (22) nusako patį paprasčiausią MOS tranzistoriaus teorinį modelį. Pilnasis šio modelio lygčių rinkinys atrodo šitaip:

$$\begin{aligned} I_D &= 0, & V_{GB} < V_T; \\ I_D &= \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left(V_{GB} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS}, & V_{GB} > V_T \text{ ir } V_{DS} < V_{GB} - V_T; \\ I_D &= \frac{1}{2} \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} (V_{GB} - V_T)^2, & V_{GB} > V_T \text{ ir } V_{DS} > V_{GB} - V_T. \end{aligned} \quad (23)$$

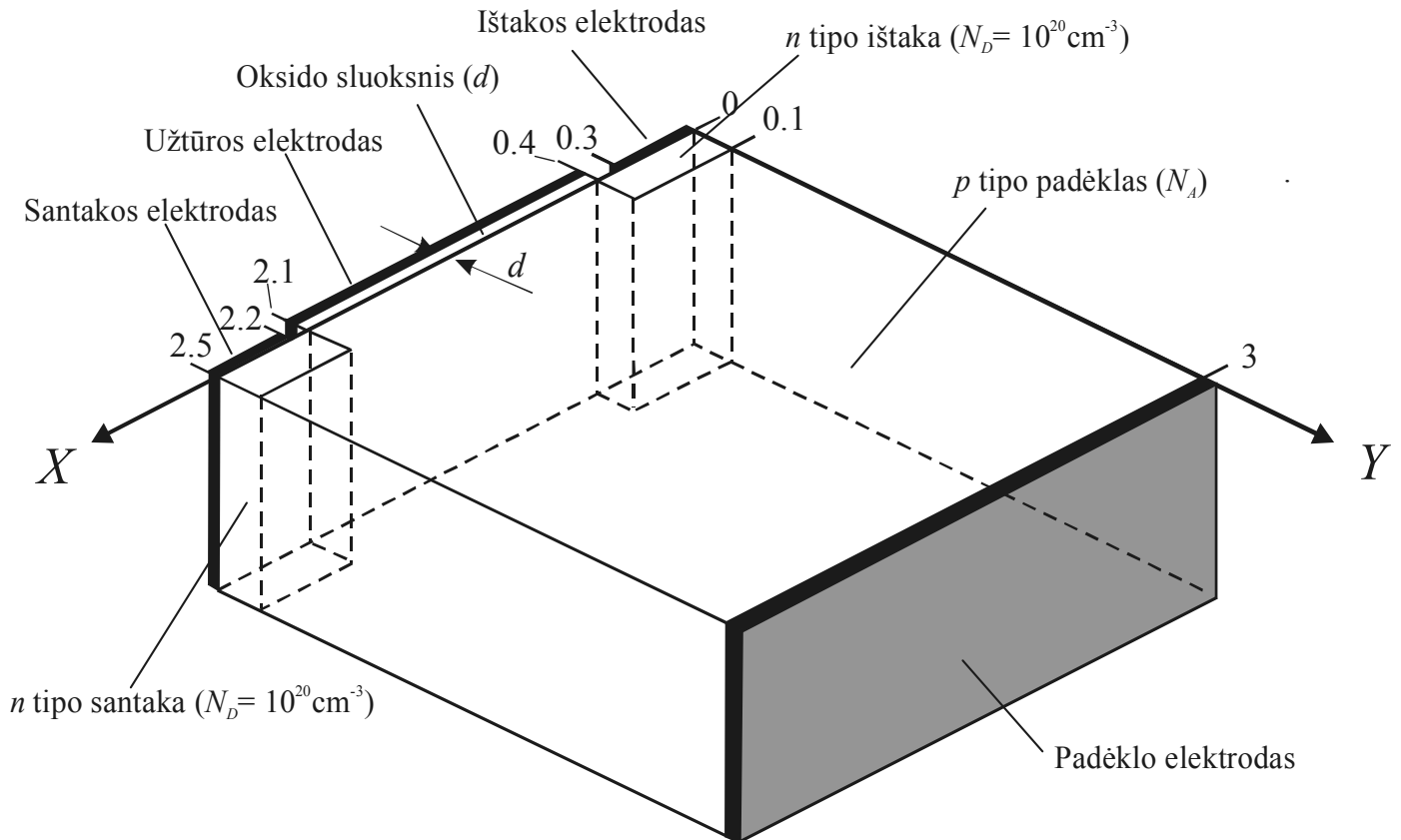
Taigi, MOS tranzistoriaus voltamperinės charakteristikos turi tiesinę sritį (ji yra tiesinė ir V_{GB} , ir V_{DS} atžvilgiu) ir kvadratinę sritį ($V_{GB} - V_T$ atžvilgiu). Nors šis modelis yra labai paprastas, tačiau jis yra pakankamai tikslus daugeliui praktinių atvejų ir yra realizuotas elektrinių grandinių modeliavimo programose (pvz., SPICE). 11 pav. palygintos MOS tranzistoriaus charakteristikos, kurios gautos pagal lygtis (23), kai $V_{GB} = 3 \text{ V}$, ir skaitmeninio modeliavimo būdu gautos charakteristikos, esant dviem tranzistoriaus ilgiams ($L = 0.5 \mu\text{m}$ ir $L = 1 \mu\text{m}$). Taškinės linijos vaizduoja skaitmeninio modeliavimo rezultatus, kurie atitinka $L = 0.5 \mu\text{m}$, o ištisinės kreivės – skaitmeninio modeliavimo rezultatus, kurie atitinka $L = 1 \mu\text{m}$. Tiesės vaizduoja rezultatus, kurie gauti pagal lygtis (23). Kaip matome, lygtys (23) teisingai numato bendrąjį MOS tranzistoriaus charakteristikų pavidalą, tačiau pagal jas apskaičiuotoji santakos srovė kartais būna 2 – 3 kartus didesnė už teisingąją vertę.



11 pav. MOS tranzistoriaus voltamperinės charakteristikos

3. Metodika

Šiame darbe modeliuojamas nMOS tranzistoriaus, kurio ištakos, užtūros ir santakos tarpusavio išsidėstymas bei matmenys yra pavaizduoti 12 pav. Šiame paveiksle koordinatinių ašių orientacija yra tokia pati, kokia naudojama dvimačiuose profiliuose, kuriuos braižo programa **MicroTec**, nuspaudus mygtuką "3D Output". Tačiau projekto parametrų pavadinimuose laikoma, kad X ašis nukreipta iš kairės į dešinę. Pvz., "kairysis struktūros kraštas" atitinka plokštumą $x = 0$, t.y., 12 pav. jis yra dešinėje. "Viršutinis struktūros kraštas" atitinka plokštumą $y = 0$.



12 pav. Ištakos, užtūros ir santakos tarpusavio išsidėstymas bei matmenys

Toliau pateiktas projekto parametrų aprašymas.

1. Programos **MicroTec** lange „Select Project“ pasirenkamas projektas „**5.1 (L = 1 mu)**“. Po to atidaromas langas „Project Settings“, kuriame užduodamos parametrų vertės. Projekto parametrai sugrupuoti į direktyvas. Kiekviena direktyva atitinka giminingų parametrų 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 parametrų grupės (direktyvos) pavadinimo. Norint pašalinti direktyvą arba parametą, 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“ failai). 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 parametrų 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 parametrų vertes. Todėl, siekiant išvengti nesusipratimų, prieš pradėdant skaičiavimus patartina ištrinti senuosius rezultatų failus.

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

| Pavadinimas | Parametro prasmė | Vertė |
|-----------------------------------|---|-------|
| Number of X -nodes | Koordinatinio tinklo mazgų skaičius X kryptimi (išilgai padėklo paviršiaus) | 40 |
| Number of Y -nodes | Koordinatinio tinklo mazgų skaičius Y kryptimi (gilyn į padėklą) | 15 |
| Domain X size (μm) | Struktūros matmenys X kryptimi (struktūros ilgis) | 2.5 |
| Domain Y size (μm) | Struktūros matmenys Y kryptimi (struktūros gylis) | 3 |
| Domain Z size (μm) | Struktūros matmenys Z kryptimi (struktūros plotis W). Nuo šio parametro priklauso dydžiai, kurie proporcingi struktūros plotui. Pvz., srovės stipris proporcingas šio parametro vertei, tačiau srovės tankis nuo jo nepriklauso. | 1 |
| Remesh | Parametras, kuris nusako koordinatinio tinklo sudarymo taisyklę | 3 |

3. Parametrų grupė „Electrodes“ apibrėžia elektrodų padėtis ir matmenis. Kadangi tranzistorius turi tris ominių elektrodus ir vieną užtūros elektrodą, šioje parametrų grupėje turi būti trys direktyvos „Ohmic electrode“ ir viena direktyva "Gate electrode". Šių parametrų vertės turi atitikti 12 pav. Kiekvienoje iš trijų direktyvų „Ohmic electrode“ užduodami šie parametrai:

| Parametro pavadinimas | Parametro prasmė | Vertė | | |
|--|---|----------|---------|----------|
| | | padėklui | ištakai | santakai |
| Electrode number | Elektrodo numeris. Šie numeriai naudojami elektrodų identifikavimui kitose direktyvose (žr. 4 punktą). | 1 | 2 | 4 |
| 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. 12 pav.) | 0 | 0 | 2.2 |
| Electrode right edge (μm) | Elektrodo dešiniojo krašto X koordinatė (žr. 12 pav.) | 2.5 | 0.3 | 2.5 |

Direktyvoje "Gate electrode" užduodami šie parametrai:

| Parametro pavadinimas | Parametro prasmė | Vertė |
|---------------------------------|---|----------------|
| Electrode number | Elektrodo numeris. Šie numeriai naudojami elektrodų identifikavimui kitose direktyvose (žr. 4 punktą). | 3 |
| Electrode location | Elektrodo padėtis. Jeigu elektrodas yra viršutiniame krašte ($y = 0$), tuomet šis parametras lygus 1, o jeigu apatiniame, tuomet 2. | 1 |
| Electrode left edge | Elektrodo kairiojo krašto X koordinatė (μm) (žr. 12 pav.) | 0.4 |
| Electrode right edge | Elektrodo dešiniojo krašto X koordinatė (μm) (žr. 12 pav.) | 2.1 |
| Gate oxide thickness | Uztūros oksido sluoksnio storis (μm). Šio parametro vertė priklauso nuo varianto (žr. darbo užduotis). | d |
| Location of interface charge | Parametras, kuris nusako pastovaus paviršinio krūvio padėčių riboje tarp Si ir SiO ₂ (μm). Šiuo atveju laikoma, kad paviršinis krūvis lygus 0, todėl šio parametro vertė gali būti bet kokia. | 0.01 |
| Width of interface charge | Parametras, kuris nusako pastovaus paviršinio krūvio pasiskirstymo plotį (μm). Šiuo atveju laikoma, kad paviršinis krūvis lygus 0, todėl šio parametro vertė gali būti bet kokia. | 0.01 |
| Interface charge density | Paviršinio krūvio, kuris egzistuoja riboje tarp Si ir SiO ₂ , tankis (cm^{-2}). Šiuo atveju laikoma, kad paviršinio krūvio nėra, todėl šis parametras lygus 0. | 0 |
| Peak interface charge density | Paviršinio krūvio, kuris egzistuoja riboje tarp Si ir SiO ₂ , didžiausias tankis (cm^{-2}). Šiuo atveju laikoma, kad paviršinio krūvio nėra, todėl šis parametras lygus 0. | 0 |
| Electron recombination velocity | Elektronų paviršinės rekombinacijos sparta riboje tarp Si ir SiO ₂ (cm/s). Šiuo atveju laikoma, kad paviršinės rekombinacijos nėra, todėl šis parametras turi būti kuo mažesnis. Vertė 10^{-15} cm/s yra pakankamai maža. | $1\text{e-}15$ |

| | | |
|-----------------------------|--|-------|
| Hole recombination velocity | Skylių paviršinės rekombinacijos sparta riboje tarp Si ir SiO ₂ (cm/s). Šiuo atveju laikoma, kad paviršinės rekombinacijos nėra, todėl šis parametras turi būti kuo mažesnis. Vertė 10 ⁻¹⁵ cm/s yra pakankamai maža. | 1e-15 |
| Metal work function | Elektrono išlaisvinimo darbas užtūros elektrodo metale (eV). Šis parametras turi būti toks, kad, esant nulinei užtūros įtampai, energijos juostos būtų tiesios. Atitinkama vertė yra maždaug 5.1 eV (jos keisti nereikia). | 5.1 |

4. Parametrų grupė „IV-data/IV-data“ apibrėžia voltamperinės charakteristikos taškus, t.y., įtampas, kurioms esant, reikia apskaičiuoti srovės stiprį. Žemiau pateiktosios šių parametrų vertės atitinka pirmąją darbo dalį, t.y., užduotį Nr. 2 (atliekant užduotis Nr. 3 ir Nr. 4, šiuos parametrus reikės pakeisti):

| Parametro pavadinimas | Parametro prasmė | Vertė |
|--------------------------------|--|-------|
| Number of IV-points to compute | Voltamperinės charakteristikos taškų skaičius. Atliekant darbo užduotį Nr. 2, visų elektrodų potencialai yra fiksuoti, todėl šis parametras turi būti lygus 1. | 1 |
| Initial voltage for contact #1 | Pirmojo elektrodo (padėklo) potencialas (V). | 0 |
| Initial voltage for contact #2 | Antrojo elektrodo (ištakos) potencialas (V). | 0 |
| Initial voltage for contact #3 | Trečiojo elektrodo (užtūros) pradinis potencialas (V). | 0.5 |
| Initial voltage for contact #4 | Ketvirtojo elektrodo (santakos) potencialas (V). | 0 |

Kadangi pirmojoje darbo dalyje visų elektrodų potencialai yra fiksuoti, tai kitų šios grupės parametrų vertės gali būti bet kokios.


5. Šiame darbe struktūros legiravimas užduodamas analiziniu pavidalu. Tuo tikslu naudojamos direktyvos „Analytical doping data“. Pradiniame šio projekto variante naudojama direktyva "Numerical doping data". Šią direktyvą reikia ištrinti, o vietoj jos reikia įterpti tris direktyvas "Analytical doping data" (po vieną direktyvą ištakai, santakai ir padėklui). Kiekvienoje direktyvoje užduodami šie parametrai:

| Parametro pavadinimas | Parametro prasmė | Vertė | | |
|--|---|-------|-------|--------|
| | | išt. | sant. | pad. |
| Left edge of the well (μm) | Srities kairiojo krašto X koordinatė | 0 | 2.1 | 0 |
| Right edge of the well (μm) | Srities dešiniojo krašto X koordinatė (žr. 12 pav.) | 0.4 | 2.5 | 2.5 |
| Top edge of the well (μm) | Srities viršutinio krašto Y koordinatė (žr. 12 pav.) | 0 | 0 | 0 |
| Bottom edge of the well (μm) | Srities apatinio krašto Y koordinatė (žr. 12 pav.) | 0.1 | 0.1 | 3 |
| Doping concentration (cm ⁻³) | Priemaišinių atomų koncentracija. Padėklo legiravimo laipsnis N_A priklauso nuo varianto (žr. darbo užduotis). | 1e+20 | 1e+20 | $-N_A$ |
| X -characteristic length (μm) | Būdingasis atstumas, kuris nusako priemaišų koncentracijos mažėjimo spartą X kryptimi už srities ribų*. Padėklui šis parametras gali būti bet koks, nes jo plotis sutampa su struktūros pločiu. | 0.1 | 0.1 | 0.05 |
| Y -characteristic length (μm) | Būdingasis atstumas, kuris nusako priemaišų koncentracijos mažėjimo spartą Y kryptimi už srities ribų. Padėklui šis parametras gali būti bet koks, nes jo gylis sutampa su struktūros gyliu. | 0.1 | 0.1 | 0.07 |

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

7. Naudojant programos „SibGraf 3D“ meniu komandą „Plot / Electron concentration“ (senesnėje versijoje – „Surface / Electron concentration“), atvaizduojama elektronų koncentracijos priklausomybė nuo x ir y . Paskui reikia atvaizduoti šio dvimačio profilio pjūvį Y kryptimi pusiaukelėje tarp ištakos ir santakos. Pjūvio plokštumą nurodo žalia linija. Iš pradžių ji visuomet sutampa su kairiuoju struktūros tašku ($x = 0$). Norint pakeisti pjūvio plokštumos padėtį, reikia naudoti klavišus „→“ ir „←“. Pjūvio x koordinatė parodoma „SibGraf 3D“ lango apačioje. Ši koordinatė turi priklausyti intervalui $1.0 < x < 1.5$. Uždavus reikalingą pjūvio plokštumos padėtį, reikia spragtelėti mygtuką „ZY“ . Tuomet atsidaro vienmačių pjūvių atvaizdavimo programa "SibGraf 2D", kurioje atvaizduota elektronų koncentracijos priklausomybė nuo y .

8. Darbo užduotis Nr. 2 reikalauja rasti slenkstinę įtampą, t.y., užtūros potencialą, kuriam esant, elektronų koncentracija taške $y = 0$ yra apytiksliai lygi akceptorinių koncentracijai. Jeigu elektronų koncentracija taške $y = 0$ yra mažesnė už akceptorinių koncentraciją, tuomet užtūros potencialą reikia padidinti 0.5 V (žr. 4 punktą) ir pakartoti punktus 6 ir 7. Šiuos du punktus reikia kartoti tol, kol elektronų koncentracija taške $y = 0$ netampa didesnė už akceptorinių koncentraciją. Po to slenkstinę įtampą reikia patikslinti. Tuo tikslu užtūros potencialą reikia mažinti kas 0.1 V (kartojant punktus 6 ir 7), kol elektronų koncentracija taške $y = 0$ netampa mažesnė už akceptorinių koncentraciją. Ši užtūros potencialo vertė ir yra slenkstinė įtampa V_{T0} (nustatyta 0.1 V tikslumu). „SibGraf 3D“ langą nebūtina uždarinėti prieš kiekvieną naują skaičiavimą, – tuomet nereikės kiekvieną kartą iš naujo užduoti pjūvio plokštumos padėtį. Tačiau dvimatis profilis automatiškai neatsinaujina, todėl po kiekvieno skaičiavimo reikia atlikti meniu komandą "Plot/Electron concentration" (senesnėje versijoje – "Surface/Electron concentration").

9. Elektronų koncentracijos priklausomybę nuo y , esant slenkstinei įtampai ($V_{GB} = V_{T0}$), 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“). Taip pat reikia atvaizduoti ir įrašyti į diską elektronų koncentracijos priklausomybes nuo koordinatės y , esant 1 V mažesnei ir 1 V didesnei užtūros įtampai (t.y., kai $V_{GB} = V_{T0} - 1$ V ir kai $V_{GB} = V_{T0} + 1$ V).

10. Darbo užduotis Nr. 3 reikalauja atvaizduoti santakos srovės priklausomybę nuo užtūros įtampos, esant 0.1 V santakos įtampai. Tuo tikslu reikia modifikuoti parametrus, kurie sudaro direktyvą "IV-data/IV-data":

| Parametro pavadinimas | Parametro prasmė | Vertė |
|--------------------------------|--|-------|
| Ramped contact number | Elektrodo, kurio potencialas keičiamas, numeris. Atliekant darbo užduotį Nr. 3, keičiamas užtūros potencialas, todėl šis parametras lygus 3. | 3 |
| Number of IV-points to compute | Voltamperinės charakteristikos taškų skaičius NV . Šis skaičius turėtų būti tarp 10 ir 30. | 21 |
| Voltage step size (V) | Intervalas tarp įtampos verčių voltamperinėje charakteristikoje ΔV_{GB} (V). Šis parametras turėtų būti toks, kad didžiausia įtampa būtų 2 – 3 kartus didesnė už slenkstinę įtampą, kuri nustatyta 8 punkte. Didžiausia įtampa lygi $(NV - 1) \Delta V_{GB}$. | 0.3 |
| Initial voltage for contact #1 | Pirmojo elektrodo (padėklo) potencialas (V). | 0 |
| Initial voltage for contact #2 | Antrojo elektrodo (ištakos) potencialas (V). | 0 |
| Initial voltage for contact #3 | Trečiojo elektrodo (užtūros) pradinis potencialas (V). | 0 |
| Initial voltage for contact #4 | Ketvirtojo elektrodo (santakos) potencialas (V). | 0.1 |

11. Uždavus parametrų vertes, nuspaudžiamas mygtukas „Run“. 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: V_b – padėklo elektrodo potencialas, V_s – ištakos potencialas, V_g – užtūros potencialas, V_d – santakos potencialas, I_b – padėklo srovė, I_s – ištakos srovė, I_g – užtūros srovė, I_d – santakos srovė (srovė yra teigiama, jeigu ji nukreipta į struktūros vidų, ir neigiama priešingu atveju). Šalia žymėjimo "Vg" pažymimas laukelis "X", o šalia žymėjimo "Id" pažymimas laukelis "Y". Nuspaudžiami mygtukai "Add" ir "Close".

12. Grafikas išsaugomas vėlesnei analizei, naudojant programos „SibGraf 2D“ meniu komandą „File/Save As“.

13. Darbo užduotis Nr. 4 reikalauja atvaizduoti santakos srovės priklausomybę nuo santakos įtampos, esant užtūros įtampai, kuri yra 2 V didesnė už slenkstinę įtampą. Tuo tikslu reikia vėl pakeisti parametrus, kurie sudaro direktyvą "IV-data/IV-data":

| Parametro pavadinimas | Parametro prasmė | Vertė |
|--------------------------------|---|---------------|
| Ramped contact number | Elektrodo, kurio potencialas keičiamas, numeris. Atliekant darbo užduotį Nr. 4, keičiamas santakos potencialas, todėl šis parametras lygus 4. | 4 |
| Number of IV-points to compute | Voltamperinės charakteristikos taškų skaičius | 21 |
| Voltage step size (V) | Intervalas tarp įtampos verčių voltamperinėje charakteristikoje | 0.25 |
| Initial voltage for contact #1 | Pirmojo elektrodo (padėklo) potencialas (V). | 0 |
| Initial voltage for contact #2 | Antrojo elektrodo (ištakos) potencialas (V). | 0 |
| Initial voltage for contact #3 | Trečiojo elektrodo (užtūros) potencialas (V). | $V_{T0} + 2V$ |
| Initial voltage for contact #4 | Ketvirtojo elektrodo (santakos) pradinis potencialas (V). | 0 |

14. Uždavus parametrų vertes, nuspaudžiamas mygtukas „Run“. 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 šalia žymėjimo "Vd" pažymimas laukelis "X", o šalia žymėjimo "Id" pažymimas laukelis "Y". Nuspaudžiami mygtukai "Add" ir "Close".

15. Grafikas išsaugomas vėlesnei analizei, naudojant programos „SibGraf 2D“ meniu komandą „File/Save As“.

16. Gautieji trys grafikai (elektronų koncentracijos priklausomybės nuo koordinatės viename grafike ir dvi voltamperinės charakteristikos) atspausdinami (tai galima atlikti ne laboratorinių darbų metu). Elektronų koncentracijos grafiko ordinačių ašies mastelis turi būti logaritminis, o absčių ašies ribas reikia pakeisti taip, kad aiškiai matytųsi kiekvienos kreivės greito mažėjimo sritis (arti padėklo paviršiaus $y = 0$).

17. Atliekama užduoties Nr. 3 antroji dalis. Tuo tikslu tiesinio augimo sritis santakos srovės priklausomybėje nuo užtūros įtampos pratęsiama iki susikirtimo su absčių ašimi. Susikirtimo taškas nusako slenkstinę įtampą (ši vertė turėtų būti artima tai, kuri gauta pagal elektronų koncentracijos priklausomybę nuo koordinatės).

18. Atliekama užduoties Nr. 4 antroji dalis. Tuo tikslu tame pačiame grafike, kuriame pavaizduota santakos srovės priklausomybė nuo santakos įtampos, nubraižoma teorinė kreivė (formulės (23)). Šiose formulėse vietoj V_T reikia naudoti slenkstinę įtampą, kuri gauta, atliekant užduotį Nr. 2. Parametrai W , L , μ_n ir C_{ox} yra aprašyti žemiau:

W yra struktūros plotis Z kryptimi (modeliavimo metu jis buvo užduotas parametru grupėje "Basic/Mesh"). Šiuo atveju $W = 1 \mu\text{m}$ (žr. 2 punktą).

L yra kanalo ilgis (t.y., atstumas tarp ištakos ir santakos). Kadangi struktūros ilgis X kryptimi lygus $2.5 \mu\text{m}$, o ištakos ir santakos ilgiai yra $0.4 \mu\text{m}$, tai $L = 2.5 - 2 \cdot 0.4 \mu\text{m} = 1.7 \mu\text{m}$ (žr. 12 pav.).

μ_n yra elektronų judris. μ_n turi būti apskaičiuotas, naudojant bipolinio judrio artinį:

$$\mu = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + \left(\frac{N_A}{N_r}\right)^\alpha}; \quad (24)$$

čia $\mu_{\min} = 55.2 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, $\mu_{\max} = 1430 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, $N_r = 1.07 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $\alpha = 0.733$, o N_A yra akceptorų koncentracija silicije (t.y., padėklo legiravimo laipsnis).

C_{ox} yra ploto vienetui tenkanti oksido sluoksnio talpa (F/cm^2). C_{ox} turi būti apskaičiuota pagal plokščiojo kondensatoriaus formulę

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}{d}; \quad (25)$$

čia ϵ_{ox} yra SiO_2 dielektrinė skvarba ($\epsilon_{ox} = 3.9$), d yra oksido storis, o $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-14} \text{ F}/\text{cm}$.

19. Pagal teorinę formulę (13) apskaičiuojama slenkstinė įtampa ir palyginama su vertėm, kurios gautos pagal elektronų koncentracijos priklausomybes nuo koordinatės (užduotis Nr. 2) ir pagal santakos srovės priklausomybę nuo užtūros įtampos (užduotis Nr. 3). Formulėje (13) ϵ yra silicio dielektrinė skvarba ($\epsilon = 11.8$), o C_{ox} turi tą pačią prasmę, kaip 18 punkte (žr. formulę (25)). Dydis ϕ_B , kuris įeina į formulę (13), – tai atstumas tarp Fermio lygmens ir draustinės juostos vidurio padėklo tūryje (žr. 9 pav.). Šį dydį reikia apskaičiuoti pagal žinomą sąryšį tarp krūvininkų koncentracijos ir Fermio energijos (žr. darbo Nr. 2 (2.1.2a,b) formules):

$$N_A = p = N_v \exp\left(\frac{E_v - F}{kT}\right) \equiv N_v \exp\left(\frac{e\phi_B - (E_g / 2)}{kT}\right);$$

čia N_v yra efektinis būsenų tankis valentinėje juostoje, E_v yra valentinės juostos kraštas, E_g yra draustinių energijų juostos plotis, F yra Fermio energija, T yra temperatūra, k yra Bolcmano konstanta, o e yra elementarusis krūvis. Išreiškę ϕ_B , gauname

$$\phi_B = \frac{E_g}{2e} - \frac{kT}{e} \ln \frac{N_v}{N_A}. \quad (26)$$

Silicio draustinės juostos plotis lygus $E_g = 1.08 \text{ eV}$, t.y., $E_g/(2e) = 0.54 \text{ V}$. Šiame darbe naudojama standartinė temperatūros vertė $T = 300 \text{ K}$, t.y., $kT/e = 0.02548 \text{ V}$. Silicio valentinės juostos efektinis būsenų tankis lygus $N_v = 1.04 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.