

VILNIAUS UNIVERSITETAS
Kietojo kūno elektronikos katedra
Vyksmų puslaidininkiniuose prietaisuose modeliavimas

Darbas Nr. 4b

Fotodiode tyrimas

Parengė A. Poškus

2009-04-06

Turinys

1. Užduotys	2
2. Darbo teorija	4
2.1. Įvadas	4
2.2. Fotodiodai.....	6
2.3. Saulės elementai	10
3. Metodika	12
4. Eksponentinės funkcijos aproksimavimas Gauso funkcija	17

1. Užduotys

Variantų Nr. 10 – 17 ir 26 – 34 užduotys¹:

1. Sumodeliuoti p-i-n fotodiodo voltamperinę charakteristiką ir jo savybių priklausomybę nuo „i“ srities storio.
2. Viename grafike pavaizduoti elektrinio lauko stiprio priklausomybes nuo gylio, esant įvairiems „i“ srities storiams. Šį grafiką išsaugoti vėlesnei analizei programos „SibGraf 2D“ duomenų failo pavidalu.
3. Viename grafike pavaizduoti krūvininkų koncentracijų priklausomybes nuo gylio, esant 10 μm storio „i“ sričiai ir trumpam jungimui. Šį grafiką išsaugoti vėlesnei analizei programos „SibGraf 2D“ duomenų failo pavidalu.
4. Apskaičiuoti voltamperinę charakteristiką, kai „i“ srities storis yra 10 μm. Šią kreivę išsaugoti vėlesnei analizei programos „SibGraf 2D“ duomenų failo pavidalu.
5. Lentelės pavidalu užsirašyti trumpojo jungimo srovės priklausomybę nuo „i“ srities storio. Vėliau ją pavaizduoti grafiškai.
6. Pagal gautąją voltamperinę charakteristiką nustatyti atviros grandinės įtampą, kai „i“ srities storis yra 10 μm.
7. Paaiškinti pastebėtus dėsniumus.

Visuose variantuose naudojama tokia „i“ srities storio (w) verčių seka:

$w = 3 \mu\text{m}, 5 \mu\text{m}, 10 \mu\text{m}, 15 \mu\text{m}, 20 \mu\text{m}, 25 \mu\text{m}, 30 \mu\text{m}, 35 \mu\text{m}, 40 \mu\text{m}, 45 \mu\text{m}.$

n ir p sričių legiravimo laipsniai N_D ir N_A bei vidutinis šviesos išsiskverbimo gylis L skirtingiems variantams pateikti žemiau.

<u>10 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, L = 5 \mu\text{m}$	<u>26 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, L = 7 \mu\text{m}$
<u>11 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, L = 10 \mu\text{m}$	<u>27 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, L = 12 \mu\text{m}$
<u>12 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, L = 15 \mu\text{m}$	<u>28 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, L = 17 \mu\text{m}$
<u>13 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, L = 20 \mu\text{m}$	<u>29 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, L = 22 \mu\text{m}$
<u>14 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, L = 25 \mu\text{m}$	<u>30 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, L = 27 \mu\text{m}$
<u>15 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, L = 30 \mu\text{m}$	<u>31 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, L = 32 \mu\text{m}.$
<u>16 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, L = 35 \mu\text{m}$	<u>32 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, L = 37 \mu\text{m}$
<u>17 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, L = 40 \mu\text{m}$	<u>33 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, L = 42 \mu\text{m}$
	<u>34 variantas.</u> $N_D = 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}, N_A = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}, L = 47 \mu\text{m}$

Kiti parametrai yra vienodi visiems variantams Nr. 10 – 17 ir 26 – 34.

¹ Variantai Nr. 1 – 9 ir 18 – 25 atitinka darbą Nr. 4a.

Kontroliniai klausimai

1. Kas yra fotoniniai įtaisai? Kas yra spinduliuojamoji rekombinacija? Draustinės juostos pločio vaidmuo.
2. Kas yra fotogeneracija? Kas yra fotodetektoriai ir saulės elementai? Kodėl jie gaminami pn diodo pagrindu, o ne iš vienalyčio puslaidininkio?
3. Kaip šviesos intensyvumas priklauso nuo gylio? Silpimo koeficiento ir vidutinio įsiskverbimo gylio sąvokos.
4. Paprasčiausio fotodiodo sandara. Kodėl, apšvietus fotodiodą, atviros grandinės veikoje tarp fotodiodo elektrodų atsiranda tiesioginė įtampa? Koks yra fotodiodo voltamperinės charakteristikos bendrasis pavidalas?
5. p-i-n fotodiodo sandara. Kodėl p-i-n fotodiodas yra pranašesnis už paprasčiausią pn fotodiodą?
6. Saulės elemento sąvoka. Saulės elemento energinio našumo sąvoka. Kvantinio našumo sąvoka. Veiksniai, kurie riboja saulės elementų energinį našumą.
7. Kokią įtaką turi ominiai energijos nuostoliai saulės elemento voltamperinei charakteristikai? Kaip pagal saulės elemento voltamperinę charakteristiką nustatyti didžiausią galią, kurią gali generuoti tas saulės elementas?

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

Fotoniniais įtaisais vadinami puslaidininkiniai įtaisai, kuriuose taikoma puslaidininkių sąveika su šviesa (fotonais). Fotoninių įtaisų vaidmuo elektroninėse sistemose tampa vis svarbesnis. Tokių įtaisų pavyzdžiai yra šviesos diodai (angl. „light-emitting diodes“ arba LED), puslaidininkiniai lazeriai, kurie naudojami CD grotuvuose diskų skaitymui ir rašymui, fotodetektoriai, saulės elementai, skaidulinės optikos telekomunikacijų sistemose naudojami lazeriai.

Daugumos fotoninių įtaisų veikimo pagrindas yra vyksmai, kurie vyksta pn diode. Tekant tiesioginei srovei pn diodu, išsiskiria energija (galia). Ši energija išsiskiria dėl dviejų fizikinių vyksmų:

1) diodo medžiagos įkaitimas dėl energijos, kurią medžiagos atomams perduoda elektrinio lauko pagreitinti krūvininkai (šis vyksmas vyrauja diodo nuskurdintajame sluoksnyje, nes neutraliosiose srityse elektrinis laukas yra palyginti silpnas);

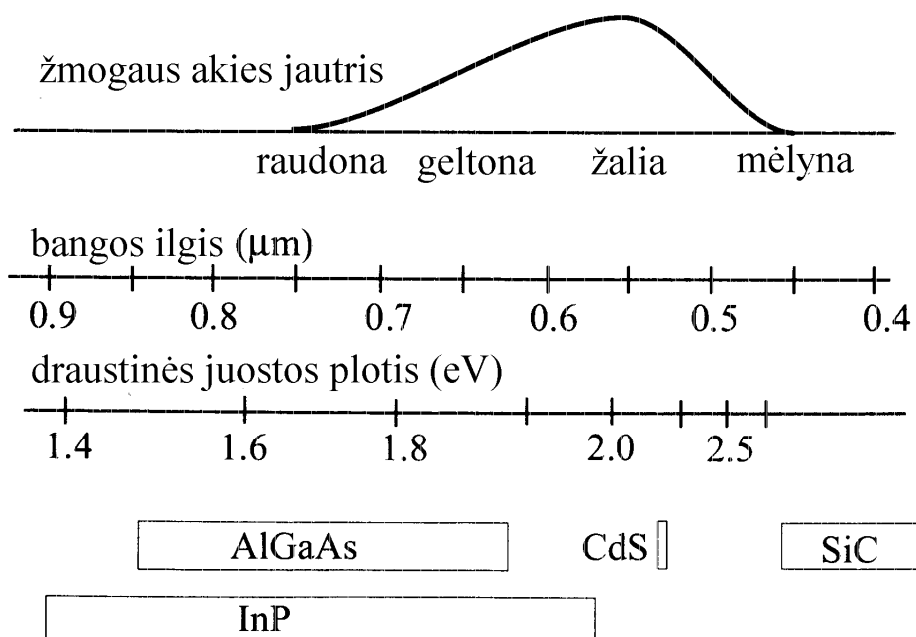
2) energija, kuri išsiskiria dėl elektronų ir skylių rekombinacijos (šis vyksmas vyrauja ten, kur yra didžiausia perteklinių krūvininkų koncentracija, t. y. neutraliosiose srityse).

Smulkiau aptarsime pastarąjį vyksmą. Rekombinacija – tai yra laisvo elektrono perėjimas į vakansiją, esančią kovalentiniame ryšyje tarp atomų. Energijos juostų teorijos požiūriu rekombinacija yra elektrono šuolis iš laidumo juostos į valentinę juostą. Iš energijos tvermės dėsnio išplaukia, kad šio šuolio metu išsiskiria energija, kuri yra lygi elektrono pradinės ir galutinės energijų skirtumui, t. y. apytiksliai lygi draustinės juostos pločiui (tiksliau, yra šiek tiek didesnė už pastarąjį). Fotoniniams įrenginiams pastarasis energijos išsiskyrimo būdas yra svarbesnis už pirmąjį (medžiagos įkaitimą dėl pagreintų krūvininkų kinetinės energijos perdavimą medžiagos atomams), nes minėtoji energija dažnai išsiskiria elektromagnetinių bangų kvanto – fotono – pavidalu. Tokia rekombinacija vadinama **spinduliuojamąja rekombinacija** (yra galima ir nespinduliuojamoji rekombinacija, kurios metu išsiskyrusi energija nėra išspinduliuojama šviesos pavidalu, o virsta medžiagos atomų šiluminio judėjimo energija, t. y. įkaitina medžiagą). Spinduliuojamosios rekombinacijos pagrindu veikia **šviesos diodai** – puslaidininkiniai įtaisai, kurie spinduliuoja regimąją šviesą, prijungus prie jų įtampą. Išspinduliuoto fotono energija E_f yra lygi Planko konstantos h ir spinduliuotės dažnio ν sandaugai:

$$E_f = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda; \quad (2.1.1)$$

čia c yra šviesos greitis, o λ yra šviesos bangos ilgis. Kaip minėta, daugumos išspinduliuotų fotonų energija yra artima draustinės juostos pločiui E_g . Vadinasi, E_g vertė lemia spinduliuojamos šviesos dažnį (spalvą). Regimosios šviesos bangos ilgių apytikslis intervalas yra nuo 0,75 μm (raudona šviesa) iki 0,4 μm (violetinė šviesa). Kaip matome 1 pav., atitinkamas fotono energijų intervalas yra nuo 1,7 eV iki 2,8 eV (kaip matome iš (2.1.1) formulės, didėjant fotono energijai, šviesos bangos ilgis mažėja). Kadangi silicio draustinės juostos plotis yra 1,1 eV, tai silicis spinduliuoja infraraudonojo diapazono spinduliuotę, kuri yra neregima plika akimi, nes jos bangos ilgis yra maždaug pusantro karto didesnis už didžiausią bangos ilgį, į kurią reaguoja žmogaus akis. Tačiau egzistuoja puslaidininkiniai, kurių draustinės juostos plotis yra didesnis negu silicio ir atitinka regimosios šviesos fotonų energiją. Keli tokie puslaidininkiniai ir jų draustinių juostų pločiai yra nurodyti 1 pav. apačioje. Kai kurių iš tų puslaidininkių draustinės juostos plotį galima reguliuoti, keičiant skirtingų elementų, kurie įeina į puslaidininkio sudėtį, atomų kiekių santykį. Tokių puslaidininkių pavyzdžiai yra AlGaAs, InP ir SiC (žr. 1 pav.).

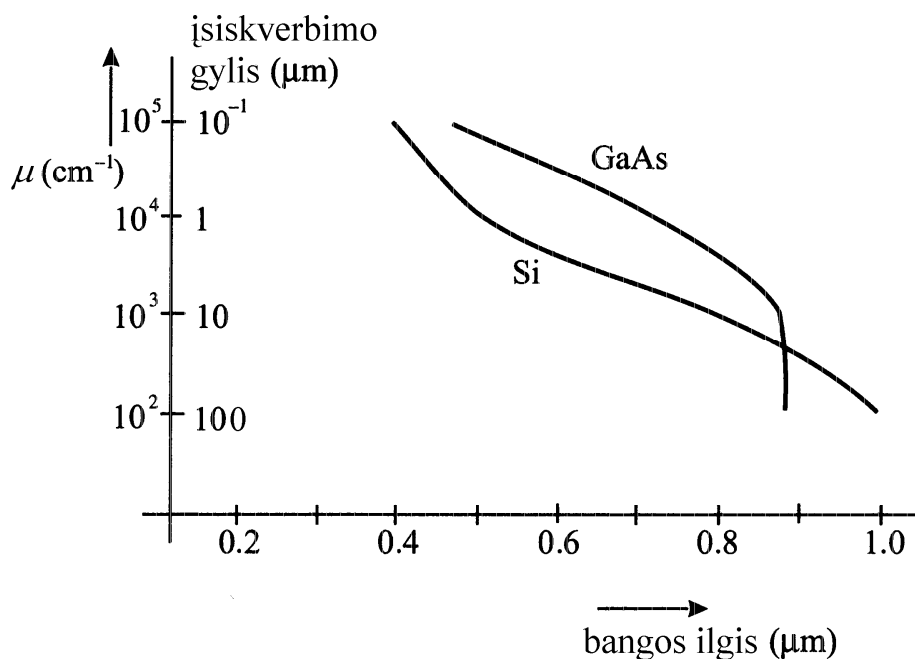
Gali vykti ir vyksmas, kuris yra atvirkščias spinduliuojamajai rekombinacijai: apšvietus puslaidininkį šviesa, šviesos kvantai (fotonai) gali būti sugeriami, atsirandant elektronų ir skylių poroms (tai yra vadinamoji krūvininkų **fotogeneracija**). Jeigu tie pertekliniai elektronai ir skylės yra atskiriami vienas nuo kito, tada fotogeneracija gali pasireikšti elektros srovės padidėjimu (elektros srovės padidėjimą dėl apšvietimo vadinsime **fotosrove**). Kad fotosrovė būtų kuo didesnė, svarbu



1 pav. Žmogaus akies jautrio priklausomybė nuo šviesos bangos ilgio ir atitinkami draustinės juostos pločiai

padidinti vidutinį atstumą, kurį nueina fotogeneruoti krūvininkai iki jų rekombinacijos. Čia turimas omenyje elektronų ir skylių judėjimas *priešingomis kryptimis*, nes jeigu fotogeneruoti krūvininkai iki rekombinacijos judėtų viena kryptimi, tada jų sukuriamos srovės kompensuotų viena kitą. Vadinasi, pvz., jeigu būtų naudojamas vienalytis puslaidininkio sluoksnis, kurio vienas paviršius yra apšviečiamas, tada didžioji dalis fotogeneruotų krūvininkų būtų prarasta, nes visi krūvininkai (ir elektronai, ir skylės) difunduotų jų koncentracijos mažėjimo kryptimi (gilyn į puslaidininkio tūrį). Vadinasi, nors egzistuočių nuolatinis difuzinis krūvininkų srautas, tačiau pilnutinė elektros srovė būtų lygi nuliui, nes elektronai ir skylės judėtų viena kryptimi. Norint juos priversti judėti priešingomis kryptimis, reikia prijungti išorinę įtampą, kuri sukurtų elektrinį lauką. Pvz., jeigu minėtame pavyzdyje prie apšviestojo paviršiaus būtų prijungtas teigiamas įtampos šaltinio polius, tada fotogeneruotieji elektronai dreifuotų link to paviršiaus ir rekombinuotų ant omino kontakto, kuris prijungtas prie to paviršiaus. Toks pats elektronų kiekis būtų ištrauktas iš priešingo kontakto, kad būtų palaikomas elektrinis neutralumas. Tačiau tokio įtaiso fotosrovė būtų labai maža. Taip yra todėl, kad didžioji dalis fotogeneruotų krūvininkų rekombinuotų ir neturėtų įtakos srovei. Daug didesnę fotosrovę galima gauti naudojant pn diodą vietoj vienalyčio puslaidininkio (žr. 3a pav.). pn diodo privalumas yra tas, kad jame yra stipraus vidinio elektrinio lauko sritis – nuskurdintasis sluoksnis. Tas vidinis laukas atskiria fotogeneruotus elektronus ir skyles vieną nuo kito ir tokiu būdu sumažina jų nuostolius dėl rekombinacijos. Šiuo principu veikia daugelis fotodetektorių ir saulės elementų – įrenginių, kurie generuoja elektros srovę apšvietus. Fotodetektoriai skiriasi nuo saulės elementų tik savo paskirtimi: **fotodetektorius** yra skirtas šviesos intensyvumo ir šviesos spektro *matavimui*, t. y. jo elektros srovė turi kaip galima tiksliau atspindėti krintančios šviesos savybes, o **saulės elementas** yra skirtas elektros energijos generavimui, t. y. vienintelis reikalavimas yra tas, kad generuojamos elektros srovės galia (srovės stiprio ir įtampos sandauga) būtų kuo didesnė. Atitinkamai, skiriasi ir įtaiso parametrai, kuriuos siekiama optimizuoti: pvz., fotodetektoriaus atveju svarbūs parametrai yra jo greitaiegiškumas ir jo signalo proporcingumas fotonų energijai, o saulės elemento atveju svarbiausias parametras yra laisvųjų krūvininkų kūrimo ir jų atskyrimo efektyvumas. Toliau bus aptariami tik fotodetektoriai ir saulės elementai.

Fotonai gali būti sugeriami ir neatsirandant elektronų ir skylių poroms. Fotodetektorius ir saulės elementus naudinga gaminti iš puslaidininkių, kurių draustinės energijos plotis yra tik nežymiai (keliomis šimtosiomis elektronvolto) mažesnis negu krintančiosios šviesos fotono energija, nes tada yra didžiausia tikimybė, kad fotonas sukurs elektrono ir skylės porą. Sukurtų elektrono ir skylės porų skaičiaus ir kritusių fotonų skaičiaus santykis vadinamas **kvantiniu našumu**. Taigi, gaminant fotodetektorius ir saulės elementus, silicio draustinės juostos pločio



2 pav. Regimosios šviesos silpimo koeficiento ir vidutinio įsiskverbimo gylio priklausomybė nuo bangos ilgio siliciui ir galio arsenidui

mažumas yra svarbus silicio trūkumas. Yra puslaidininkių, kurių kvantinis našumas yra kelis kartus didesnis, negu silicio. Tačiau tie puslaidininkiai yra daug brangesni už silicį, todėl silicis iki šiol lieka viena iš pagrindinių medžiagų gaminant fotodetektorius ir saulės elementus.

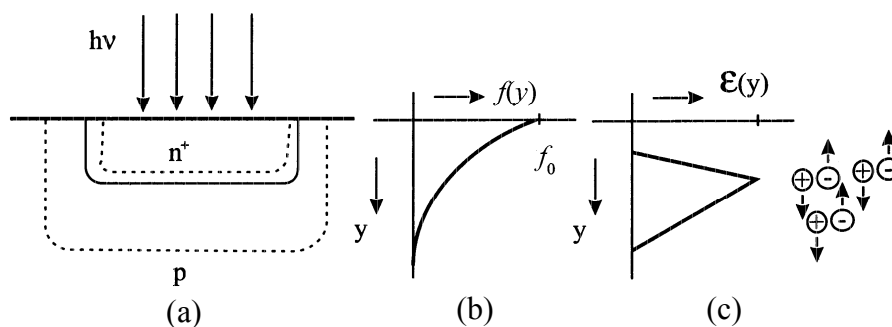
Modeliuojant fotogeneraciją ir fotosrovę, reikia atsižvelgti į tai, kad fotogeneracijos sparta nėra vienoda visame diodo tūryje. Taip yra dėl to, kad krintančios šviesos intensyvumas eksponentiškai mažėja, tolstant nuo apšviesto paviršiaus:

$$f(y) = f_0 e^{-\mu y}; \quad (2.1.2)$$

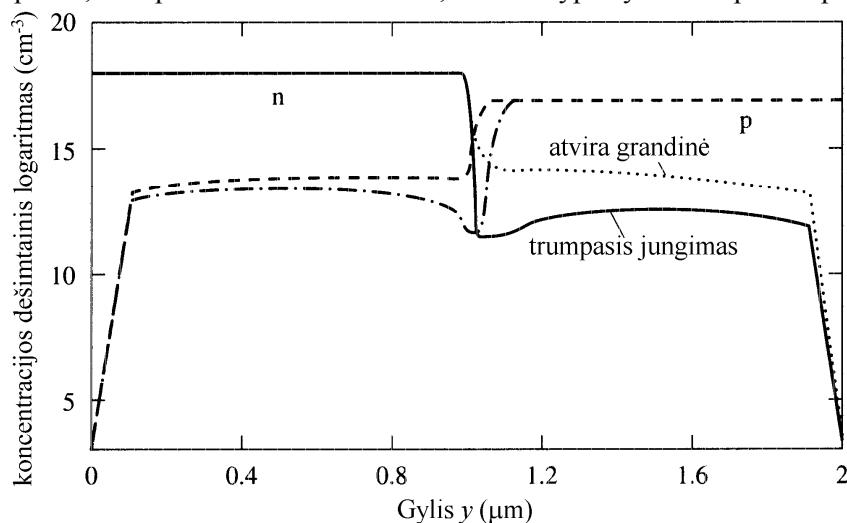
Čia f yra spinduliuotės intensyvumas (spinduliuotės energijos kiekis, kuris praeina pro vienetinio ploto paviršių per laiko vienetą, matuojamas W/cm^2), μ yra **silpimo koeficientas** (matuojamas cm^{-1}), f_0 yra pradinis intensyvumas (t. y. intensyvumas prie pat apšviesto paviršiaus). Dydis, kuris yra atvirkštinis silpimo koeficientui (t. y. $1/\mu$) turi **vidutinio įsiskverbimo gylio** prasmę. Tai yra gylis, kuriame spinduliuotės intensyvumas yra e kartų mažesnis, negu prie apšviesto paviršiaus. Silpimo koeficientas priklauso nuo spinduliuotę sugeriančios medžiagos ir nuo spinduliuotės bangos ilgio. Si ir GaAs silpimo koeficiento priklausomybė nuo regimosios šviesos bangos ilgio parodyta 2 pav. Matome, kad, didėjant bangos ilgiui, silpimo koeficientas mažėja, o įsiskverbimo gylis didėja. Taip pat matome, kad GaAs silpimo koeficientas yra didesnis negu Si. Taip yra todėl, kad GaAs tankis yra didesnis negu Si tankis.

2.2. Fotodiodai

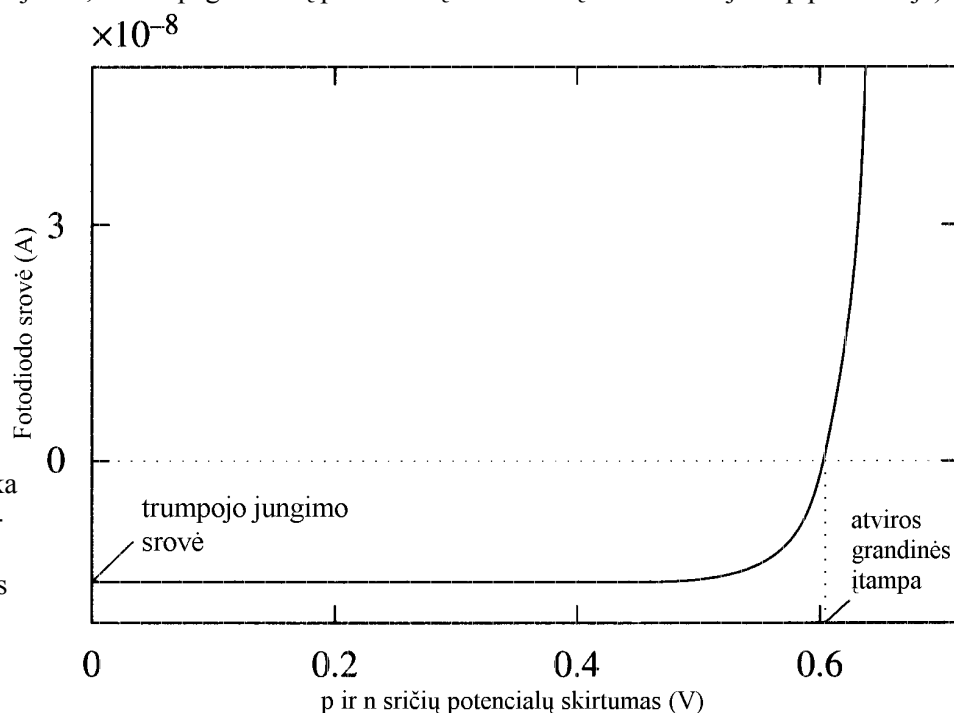
Dabar aptarsime fotosrovės atsiradimo mechanizmą fotodetektoriuje, kurį sudaro viena pn sandūra. Toks fotodetektorius vadinamas **fotodiodu**. 3a pav. parodyta pn sandūra, kurios apšviestasis paviršius yra iš n puslaidininkio pusės (šiuo atveju elektrodas, kuris jungiamas prie n srities, turėtų būti skaidrus arba tinklo formos). Punktyrinės linijos žymi nuskurdintojo sluoksnio kraštus. n puslaidininkio legiravimo laipsnis yra daug didesnis negu p puslaidininkio (t. y. n puslaidininkis yra emiteris, o p puslaidininkis yra bazė). Todėl didžioji nuskurdintojo sluoksnio dalis yra p puslaidininkyje. Kaip parodyta 3b pav., krintančios šviesos intensyvumas eksponentiškai mažėja didėjant gyliui y (pagal (2.1.2) formulę). Jeigu atstumas tarp nuskurdintojo sluoksnio ir apšviestojo paviršiaus nėra daug didesnis už vidutinį įsiskverbimo gyli $1/\mu$, tada pakankamai didelė elektronų ir skylių porų dalis generuojama nuskurdintajame sluoksnyje ir tame sluoksnyje egzistuojantis elektrinis laukas juos atskiria vieną nuo kito. Taigi, generuoti elektronai pereina į n sritį, o generuotos skylės pereina į p sritį. Išsiaiškinsime, kokią įtaką šis nuolatinis krūvininkų



3 pav. pn sandūra, kuri apšviesta pakankamai didelės fotonų energijos šviesa, kurios intensyvumas yra $f(y)$. Elektronai ir skylės, kurie fotogeneruojami nuskurdintajame sluoksnyje (jo kraštus žymi punktyrinės linijos), yra atskiriami vienas nuo kito dėl tame sluoksnyje egzistuojančio vidinio elektrinio lauko. Jeigu tarp p ir n sričių nėra elektrinio kontakto, tada dėl šio krūvininkų atskyrimo atsiranda tiesioginė įtampa, o jeigu diodas yra užtrumpintas, tada pradeda tekėti fotosrovė, kurios kryptis yra tokia pati kaip atgalinės srovės



4 pav. Elektronų ir skylių koncentracijų priklausomybės nuo atstumo iki apšviesto paviršiaus trumpajame fotodiode esant apšvietimui (šviesos intensyvumas eksponentiškai mažėja didėjant atstumui). Dėl fotogeneracijos atsiranda pertekliniai krūvininkai, kurie esant atvirai išorinei grandinei sąlygoja tiesioginę įtampą. Jeigu diodas yra užtrumpintas, tada atsiranda fotosrovė, kurios kryptis yra tokia pati kaip atgalinės srovės. Tada, kaip ir esant atgalinei įtampai, perteklinių krūvininkų koncentracija neutraliosiose srityse mažėja artėjant prie nuskurdintojo sluoksnio (kadangi naudojamas logaritminis mastelis, tai grafike yra matomas tik *šalutinių* perteklinių krūvininkų koncentracijos mažėjimas, tačiau pagrindinių perteklinių krūvininkų koncentracija taip pat mažėja)



5 pav. Fotodiode, kuris atitinka 4 pav., voltamperinė charakteristika. Fotosrovės kryptis yra tokia pati kaip atgalinės srovės kryptis

srautas iš nuskurdintojo sluoksnio į neutraliąsias sritis turi krūvininkų koncentracijoms. Čia reikia skirti du atvejus: atviros grandinės atvejis (kai tarp n ir p sričių nėra elektrinio kontakto) ir trumpojo jungimo atvejis (kai n ir p sritys sujungtos laidininku). Jeigu tarp n ir p sričių nėra kontakto, tada elektronai, kurie ekstraguojami į n sritį, mažina tos srities potencialą, o skylės, kurios ekstraguojamos į p sritį, didina tos srities potencialą. Turint omenyje, kad n srities potencialas yra teigiamas, o p srities neigiamas, toks potencialų pokytis sumažina potencialų skirtumą tarp n ir p sričių. Taigi, efektas toks pats, lyg būtų prijungta tiesioginė išorinė įtampa. Ją žymėsime ΔU . Dėl šios „efektinės“ tiesioginės įtampos sumažėja potencinio barjero aukštis (jis tampa lygus $e(V_D - \Delta U)$, kur V_D yra kontaktinis potencialų skirtumas), sumažėja nuskurdintojo sluoksnio storis ir padidėja krūvininkų injekcija. Po tam tikro laiko ši papildoma injekcijos elektros srovė tiksliai kompensuoja papildomą ekstrakcijos srovę, kurią sąlygoja minėtoji krūvininkų fotogeneracija, ir nusistovi dinaminė pusiausvyra. Tokia diodo būseną yra daugeliu atžvilgiu panaši į termodinaminės pusiausvyros būseną: vienintelis skirtumas yra tas, kad kartu su šilumine krūvininkų generacija vyksta ir jų fotogeneracija. Tačiau, kaip ir termodinaminėje pusiausvyroje, pilnutinis elektros srovės tankis visuose sistemos taškuose yra lygus nuliui. Dabar tarkime, kad tarp n ir p sričių yra elektrinis kontaktas. Vadinasi, šiuo atveju išorinė įtampa yra lygi nuliui. Tada iš nuskurdintojo sluoksnio ekstraguoti krūvininkai jau nemažina potencialų skirtumo ir nuskurdintojo sluoksnio storio, o sąlygoja elektros srovę išorinėje grandinėje. Jos kryptis yra tokia pati, kaip atgalinės srovės. Todėl neutraliosiose srityse, prie nuskurdintojo sluoksnio kraštų, šalutinių krūvininkų koncentracijos priklausomybė nuo koordinatės tampa tokio paties pobūdžio, kaip esant atgalinei įtampai, t. y., šalutinių krūvininkų koncentracija mažėja artėjant prie nuskurdintojo krašto (žr. ištisinę liniją 4 pav. grafiko dešiniojoje pusėje ir brūkšninę-taškinę liniją to paties grafiko kairiojoje pusėje). Vadinasi, kaip ir atgalinės įtampos atveju, abipus nuskurdintojo sluoksnio neutraliosiose n ir p srityse egzistuoja kelių difuzijos nuotolių storio sluoksniai, kuriuose vyksta šalutinių krūvininkų difuzija nuskurdintojo sluoksnio link (4 pav. atveju kairėje yra n sritis, todėl joje vyksta skylių difuzija į dešinę, o dešinėje yra p sritis, todėl joje vyksta elektronų difuzija į kairę). Kai šalutiniai krūvininkai pasiekia nuskurdintąjį sluoksnį, jie yra ekstraguojami į kitą sandūros pusę. Taigi, yra surenkami ne tik tie krūvininkai, kurie buvo fotogeneruoti nuskurdintame sluoksnyje, bet ir dalis krūvininkų, kurie buvo fotogeneruoti minėtuose neutraliųjų sričių kraštuose.

Kai kuriems praktiniams taikymams reikia žinoti įtampą, kuri atsiranda tarp pn diodo kontaktų jį apšvietus. Tačiau programa **MicroTec** reikalauja, kad visų modeliuojamos struktūros kontaktų potencialai būtų iš anksto užduoti vartotojo. Todėl kyla klausimas, kaip nustatyti tuos potencialus nutrauktos išorinės grandinės sąlygomis. Tam galima pasinaudoti tuo, kad nutraukus grandinę elektros srovė yra lygi nuliui. Vadinasi, tiesioginę įtampą, kuri atsiranda apšvietus pn diodą, tarp kurio elektrodų nėra elektrinio kontakto, galima nustatyti tokiu būdu: reikia rasti tokią išorinę įtampą, kuriai esant elektros srovė yra lygi nuliui. pn diodo voltamperinė charakteristika esant apšvietimui yra parodyta 5 pav. Kaip matome, pagrindiniai skirtumai lyginant su voltamperine charakteristika, kuri gaunama, kai nėra apšvietimo (žr. 3 laboratorinio darbo 8 pav.), yra šie:

- 1) diodo srovė yra lygi nuliui ne tada, kai išorinė įtampa yra lygi nuliui, o tada, kai prie diodo yra prijungta tam tikra tiesioginė įtampa (ta įtampa yra lygi įtampai, kuri atsirastų tarp diodo elektrodų jį apšvietus, jeigu jis būtų naudojamas kaip įtampos šaltinis, t. y. kai išorinė grandinė nutraukta arba kai jos varža yra daug didesnė už diodo vidinę varžą);
- 2) diodo atgalinė srovė yra daug didesnė, negu tada, kai nėra apšvietimo (taip yra todėl, kad tą srovę sąlygoja ne vien termiškai generuoti krūvininkai, bet ir fotogeneruoti krūvininkai).

Iš aukščiau pateikto fotodiodo aprašymo išplaukia, kad egzistuoja prieštaringi reikalavimai, kuriuos turi tenkinti fotodiodai: iš vienos pusės, reikalingas kuo stipresnis vidinis elektrinis laukas (kad būtų kuo efektyvesnis fotogeneruotų elektronų ir skylių atskyrimas), o iš kitos pusės, reikalingas kuo didesnis nuskurdintojo sluoksnio storis (kad būtų kuo didesnė erdvės sritis, kur egzistuoja vidinis elektrinis laukas) ir kuo didesni difuzijos nuotoliai neutraliosiose srityse (kad būtų surinkta kuo daugiau krūvininkų, kurie buvo fotogeneruoti neutraliosiose srityse). Šie reikalavimai yra prieštaringi todėl, kad, norint padidinti elektrinį lauką, reikia *didinti* pn diodo bazės legiravimą (žr. 2 darbo (2.6.13) formulę), o norint padidinti nuskurdintojo sluoksnio storį, reikia

mažinti bazės legiravimą (žr. 2 darbo (2.6.12) formulę). Norint padidinti difuzijos nuotolį bazėje, taip pat reikia mažinti bazės legiravimą, nes tada didėja šalutinių krūvininkų vidutinė gyvavimo trukmė, kuri įeina į difuzijos nuotolio išraišką (žr. 3 darbo (2.2.11) formulę).

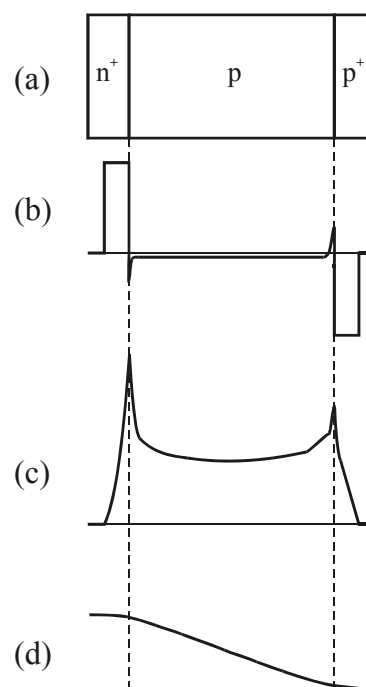
Šis prieštaravimas praktikoje išsprendžiamas šitaip.

Tarp stipriai legiruotų n ir p sričių įterpiamas labai silpnai legiruoto (praktiškai gryno) puslaidininkio sluoksnis. Kadangi puslaidininkių fizikoje toks puslaidininkis žymimas raide „i“ (nuo angliško žodžio „intrinsic“ – „vidinis“, „grynas“), tai tokia sandūra vadinama p-i-n sandūra. 6 pav. iliustruoja p-i-n sandūros savybes (šiam pavyzdyje vietoj gryno puslaidininkio yra silpnai legiruotas p puslaidininkis). Tokios sandūros pranašumas, lyginant su įprastine pn sandūra, išplaukia iš to, kad priemaišinių jonų ir laisvųjų krūvininkų skaičius p-i-n sandūros „i“ srityje yra pernelyg mažas, kad galėtų pilnai ekranuoti (kompensuoti) elektrinį lauką, kurį sukuria teigiamų donorų jonų sluoksnis n^+ srityje ir neigiamų akceptorų jonų sluoksnis p^+ srityje. Todėl „i“ srityje egzistuoja elektrinis laukas, kuris yra tuo stipresnis, kuo mažiau krūvininkų toje srityje ir kuo didesnis n^+ ir p^+ sričių legiravimo laipsnis. Vadinasi, naudojant tokią sandūrą, tampa įmanoma nepriklausomai keisti nuskurdintojo sluoksnio storį ir elektrinio lauko stiprį jame: norint padidinti nuskurdintojo sluoksnio storį, reikia didinti „i“ srities storį (nes nuskurdintasis sluoksnis – tai „i“ sritis), o norint padidinti elektrinio lauko stiprį, reikia didinti stipriai legiruotų n ir p sričių legiravimo laipsnius. Čia reikia

pastebėti, kad šis nepriklausomumas yra tik dalinis: didėjant „i“ srities storiui, didėja pilnutinis krūvininkų skaičius joje, todėl didėja jų ekranuojantis poveikis. Taigi, didėjant „i“ srities storiui, elektrinio lauko stipris joje silpnėja, tačiau šis silpnėjimas yra palyginti lėtas.

Elektrinio lauko dalinis ekranavimas dėl laisvųjų krūvininkų, kurie yra „i“ srityje, pasireiškia aštriomis smailėmis 6b ir 6c pav. Šiame pavyzdyje „i“ sluoksnio kairiajame krašte padaugėja laisvųjų elektronų, o dešiniajame krašte padaugėja skylių. Kadangi laisvųjų krūvininkų koncentracija eksponentiškai priklauso nuo potencialo, tai prie tų kraštų laisvųjų krūvininkų koncentracija taip pat eksponentiškai didėja, artėjant link iki artimiausiojo „i“ srities krašto (būtent dėl šios eksponentinės priklausomybės atsiranda aštrios ir siauros smailės). Kaip matome 6c pav., dėl šio ekranavimo reiškinio elektrinio lauko stipris „i“ srityje sumažėja, tačiau vis tiek lieka palyginti didelis.

Stipriai legiruotoji sritis prie apšviestojo paviršiaus yra reikalinga ne tik stipriam vidiniam elektros laukui gauti; ji yra reikalinga stipraus elektrinio lauko srities atskyrimui nuo fotodiodo omino kontakto (elektrodo), kuris yra ant apšviestojo paviršiaus. Stipraus elektrinio lauko sritis neturi pernelyg priartėti prie to elektrodo, nes prie elektrodų vyksta intensyvi krūvininkų rekombinacija, dėl kurios perteklinių krūvininkų koncentracija prie pat elektrodo visada yra artima nuliui (tai akivaizdu 4 pav.: prie elektrodų, kurie atitinka abscisų ašies galus, šalutinių krūvininkų koncentracija visada yra tokia pati kaip termodinaminėje pusiausvyroje, t. y. maždaug 10^3 cm^{-3} , o tai reiškia, kad ten perteklinių krūvininkų koncentracija yra artima nuliui). Todėl arti elektrodo vyksta perteklinių krūvininkų difuzija į to elektrodo pusę. Ši difuzinė srovė gali netgi pranokti dreifinę srovę, kuri verčia vienos rūšies krūvininkus judėti į priešingą pusę (tolyn nuo elektrodo). Kad perteklinių šalutinių krūvininkų difuzinė srovė prie pat elektrodų turėtų būti daug didesnė už difuzinę srovę likusioje fotodiodo dalyje, taip pat aišku iš 4 pav.: prie elektrodų perteklinių krūvininkų koncentracijos gradientas yra daug didesnis, negu kitur (tas gradientas pasireiškia labai greitu krūvininkų koncentracijos sumažėjimu iki vertės, kuri atitinka termodinaminę pusiausvyrą). Vadinasi, omino kontakto artumas sumažina krūvininkų atskyrimo efektyvumą. Dėl šios priežasties nuskurdintasis sluoksnis neturi būti pernelyg arti apšviestojo paviršiaus. Kadangi prie kito elektrodo



6 pav. p-i-n sandūros schema (a) ir savybės: (b) erdvinio krūvio tankis; (c) elektrinio lauko stipris; (d) potencialas

fotogeneracijos sparta yra daug mažesnė (dėl šviesos intensyvumo eksponentinio mažėjimo didėjant gyliui), tai ten šis reikalavimas nėra toks svarbus, kaip prie apšviestojo elektrodo (krūvininkų, kurie generuojami prie neapšviestojo elektrodo, yra palyginti nedaug, todėl ir jų nuostoliai dėl difuzijos link to elektrodo ir dėl rekombinacijos ant jo paviršiaus neturi didelės įtakos pilnutinei fotosrovei).

Kadangi fotogeneracijos sparta eksponentiškai mažėja didėjant atstumui iki apšviesto paviršiaus (žr. (2.1.2) formulę), tai nėra prasmės naudoti sandūras su labai plačiais nuskurdintaisiais sluoksniais: stipraus elektrinio lauko srities gylis neturi tapti daug didesnis už vidutinį šviesos įsiskverbimo gylį $1/\mu$, nes laisvieji krūvininkai fotogeneruojami tik kelių vidutinių įsiskverbimo gylių atstumu nuo apšviestojo paviršiaus. Dėl tos pačios priežasties stipriai legiruotoji sritis, kuri skiria nuskurdintąjį sluoksnį nuo artimiausio omino kontakto, turi būti kaip galima siauresnė, nes didžioji toje srityje fotogeneruotų krūvininkų dalis rekombinuoja ir neturi įtakos fotosrovei. Taigi, čia vėl turime prieštarigus reikalavimus: kaip minėta, tos srities storis neturi tapti toks mažas, kad pasireikštų krūvininkų porų, kurios buvo fotogeneruotos nuskurdintame sluoksnyje, rekombinacija ant apšviestojo omino kontakto.

2.3. Saulės elementai

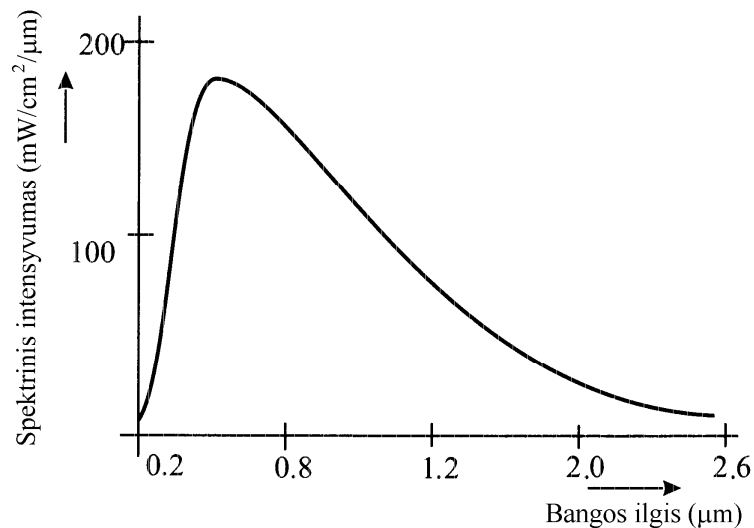
Saulės elementą galima apibrėžti kaip fotodiodą, kuris optimizuotas saulės šviesos spektrui, t. y. kurio parametrai parinkti taip, kad būtų kuo didesnė jo generuojamos fotosrovės galia, kai jis apšviečiamas saulės šviesa. Kitas svarbus saulės elemento parametras yra jo gamybos pigumas: tai yra būtina sąlyga, kad saulės elementus būtų galima taikyti elektros energijos gamybai pramoniniu mastu. Dėl pastarosios priežasties silicis iki šiol lieka pagrindinė saulės elementų medžiaga. Tačiau saulės elementai, kurie pagaminti iš monokristalinių silicio sluoksnių (iš kurių gaminamos ir integrinės grandinės), vis tiek yra pernelyg brangūs masinei gamybai, todėl vietoj jų dažnai naudojami pigesni amorfinio bei polikristalinio silicio saulės elementai, nors jų energinis našumas yra mažesnis, negu monokristalinio silicio.

Vidutinis saulės šviesos intensyvumas (t. y. energijos kiekis, kuris pereina pro vienetinio ploto paviršių per laiko vienetą) yra šiek tiek mažesnis už $0,1 \text{ W/cm}^2$, kai saulė yra zenite. To dydžio laikinis vidurkis dienos metu (kintant saulės padėčiai danguje) yra maždaug 2 kartus mažesnis (t. y. $0,05 \text{ W/cm}^2$). Tai yra palyginti mažas energijos kiekis. Be to, egzistuoja keli veiksniai, kurie neleidžia visą krintančią saulės šviesos energiją paversti elektros energija, t. y. mažina **energinį našumą** – pagamintos energijos ir sugertos energijos santykį (energinis našumas yra tiesiog proporcingas anksčiau minėtam kvantiniam našumui, tačiau nėra lygus pastarajam):

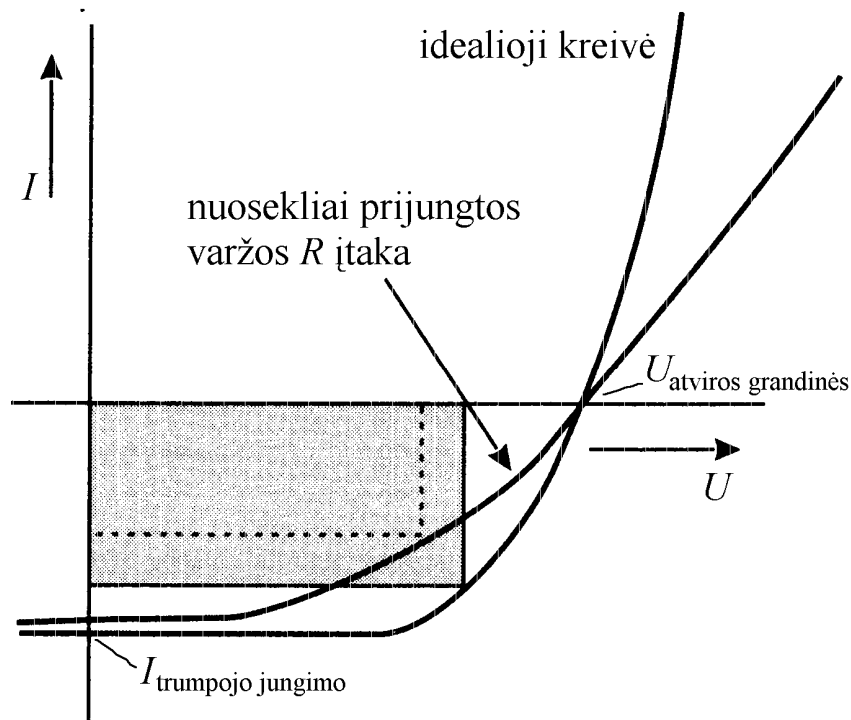
- 1) kaip minėta 2.1 poskyryje, silicio kvantinis našumas yra palyginti mažas (nes jo draustinės juostos plotis yra 2 – 3 kartus mažesnis už regimosios šviesos fotonų energijas);
- 2) silicio paviršius atspindi dalį į jį krintančios šviesos;
- 3) trumpabangės (mėlynos ir violetinės) regimosios šviesos sugertis yra labai stipri, t. y. įsiskverbimo gylis yra labai mažas (žr. 2 pav.), todėl tie fotonai nepasiekia nuskurdintojo sluoksnio ir nesukuria fotosrovės.

Dėl šių priežasčių saulės elementų, kurie pagaminti monokristalinių silicio sluoksnių pagrindu, didžiausias energinis našumas (naudojant antirefleksinę dangą) yra 25 %. Masiškai gaminamų saulės elementų energinis našumas yra nuo 10 % iki 20 %. Vienas 10 cm dydžio kvadratinis saulės elementas, kurio energinis našumas yra 15 %, giedros dienos metu generuotų vidutiniškai tik $0,7 \text{ W}$ elektros energijos. Todėl kol kas saulės energija naudojama palyginti mažais mastais.

Gaminant saulės elementus, svarbu žinoti ir vadinamąjį **spektrinį intensyvumą** – intensyvumą, kuris atitinka vienetinį bangos ilgių intervalą. T. y. spektrinį intensyvumą yra lygus intensyvumui, kuris atitinka nykstamai mažą bangos ilgių intervalą nuo λ iki $\lambda + d\lambda$, ir to intervalo pločio $d\lambda$ santykiui. Saulės šviesos spektrinis intensyvumas priklauso nuo bangos ilgio λ . Šios priklausomybės integralas λ atžvilgiu yra lygus anksčiau apibrėžtam intensyvumui. Ši priklausomybė, kai saulės spinduliai krinta vertikaliai, yra parodyta 7 pav.



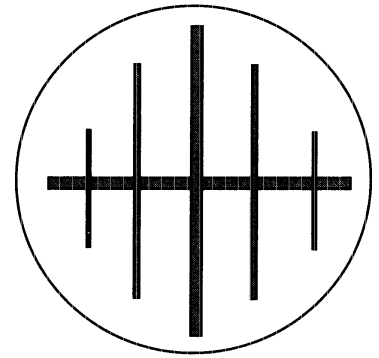
7 pav. Saulės šviesos spektrinio intensyvumo prie Žemės paviršiaus priklausomybė nuo bangos ilgio, kai saulės spinduliai krinta vertikaliai (šios priklausomybės integralas bangos ilgio atžvilgiu yra lygus lygumui, kuris šiomis sąlygomis yra maždaug 100 mW/cm^2)



8 pav. Saulės elemento, pagaminto pn diodo pagrindu, voltamperinė charakteristika esant apšvietimui. Didžiausią galią, kurią gali generuoti saulės elementas, nusako didžiausias plotas stačiakampio, kuris telpa ketvirtajame kvadrante virš voltamperinės charakteristikos (tas stačiakampis yra patamsintas). Esant nuosekliai prijungtai nuostolių varžai R , didžiausia galia sumažėja (punktūrinis stačiakampis)

Didžiausia saulės elemento elektros srovės galia – tai didžiausia jo srovės I ir įtampos tarp jo elektrodų U sandaugos vertė. Žinant saulės elemento voltamperinę charakteristiką $I(U)$, galima nustatyti ir tos charakteristikos tašką, kuris atitinka didžiausią sandaugą IU . 8 pav. parodytos dvi voltamperinės charakteristikos: viena atitinka idealųjį atvejį, kai yra nepaisoma vadinamųjų ominių energijos nuostolių (taip vadinami energijos nuostoliai dėl krūvininkų kryptingo judėjimo energijos virtimo šiluma), o kita atitinka labiau realistišką atvejį, kai nuosekliai su pn sandūra yra prijungtas rezistorius, kurio varža R (pastarąjį atvejį atitinka nuožulnesnė kreivė). Tas rezistorius atspindi ominusius energijos nuostolius (tų nuostolių galia yra I^2R). Į varžą R įeina ir paties pn diodo tūrinė varža, ir išorinės grandinės varža. Kaip matome, dėl ominių energijos nuostolių elektros srovės modulio, kuris atitinka duotąją įtampą U , yra mažesnis už tą, kuri atitinka idealųjį atvejį. Kitaip sakant, įtampa, kuri atsiranda, esant duotai atgalinei srovei I (t. y. fotosrovei), yra mažesnė už tą, kuri atitinka idealųjį atvejį (šis įtampos sumažėjimas yra lygus IR). Dėl to sumažėja ir didžiausia

galia (8 pav. idealioju atveju ją atitinka didesnis patamsintas stačiakampis, o atsižvelgus į ominių nuostolius – punktyrinis stačiakampis). 9 pav. parodyta saulės elemento elektrinio kontakto forma (jis dažniausiai gaminamas iš aliuminio). Aišku, kad toje vietoje, kur aliuminis dengia silicį, nėra generuojama fotosrovė. Vadinasi, elektriniai kontaktai sumažina efektyvų saulės elemento plotą ir tuo pačiu – fotosrovę. Todėl tų kontaktų plotas turėtų būti kaip galima mažesnis. Tačiau, mažėjant elektrodų plotai, didėja minėtoji nuosekliai prijungta varža R , kuri taip pat sumažina saulės elemento galią. Nustatyta, kad optimali elektrodų forma yra tokia, kaip parodyta 9 pav., t. y. centrinė juosta, prie kurios jungiasi šoninės juostos.



9 pav. Saulės elemento viršutinio elektrodo formos pavyzdys

3. Metodika

1. Programos **MicroTec** lange „Select Project“ pasirenkamas projektas „3.2 (long pin photo diode)“. Paskui atidaromas langas „Project Settings“, kuriame užduodamos parametru vertės. Projekto parametrai yra 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 yra nurodytas pirmojoje eilutėje), paskui spragtelėti dešiniuoju mygtuku ir pasirinkti "Add Directive", o paskui 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“ 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 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 „Basic/Mesh“ apibrėžia visos struktūros matmenis bei koordinatinį tinklą. Šioje parametru grupėje užduodami šie parametrai:

Pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Number of X-nodes	Koordinatinio tinklo mazgų skaičius X kryptimi (išilgai padėklo paviršiaus)	4
Number of Y-nodes	Koordinatinio tinklo mazgų skaičius Y kryptimi (gilyn į padėklą)	150
Domain X size (μm)	Struktūros matmenys X kryptimi (struktūros ilgis)	1
Domain Y size (μm)	Struktūros matmenys Y kryptimi (struktūros gylis)	60
Domain Z size (μm)	Struktūros matmenys Z kryptimi (struktūros plotis). Nuo šio parametro priklauso dydžiai, kurie proporcingi struktūros plotui. Pvz., srovės stipris proporcingas šio parametro vertei, tačiau srovės tankis nuo jo nepriklauso.	1
Remesh	Šis parametras nusako koordinatinio tinklo tankio X ir Y kryptimis skaičiavimo taisyklę. Galimos vertės yra 0, 1, 2, 3 arba 4. Kai šis parametras lygus 2, tada tinklo tankis abiem kryptimis priklauso nuo krūvininkų koncentracijų išvestinių tomis kryptimis: kuo didesnė išvestinė, tuo mažesnis koordinatės kitimo intervalas.	2
First Y mesh step size (μm)	Pirmojo Y ašies diskretizavimo intervalo plotis. Šis parametras naudojamas tik tada, kai Remesh=0 (tada Y koordinacinio tinklo intervalas eksponentiškai auga, einant gilyn į padėklą).	0.1

3. Parametru grupė „Electrodes“ apibrėžia elektrodų padėtis ir matmenis. Šioje parametru grupėje turi būti dvi direktyvos „Ohmic electrode“. Viena iš šių direktyvų atitinka viršutinį elektrodą ($y = 0$), o kita – apatinį ($y = 200 \mu\text{m}$). Kiekvienoje direktyvoje užduodami šie parametrai:

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

4. 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
Number of IV-points	Voltamperinės charakteristikos taškų skaičius	1
Initial voltage for contact #1	Pirmojo elektrodo pradinis potencialas (V). Pirmasis elektrodas yra prijungtas prie n tipo srities.	0
Initial voltage for contact #2	Antrojo elektrodo pradinis potencialas (V). Antrasis elektrodas yra prijungtas prie p tipo srities.	0
Ramped contact number	Elektrodo, kurio potencialas keičiamas, numeris. Šiuo atveju keičiamas antrojo elektrodo potencialas.	2
Voltage step size (V)	Intervalas tarp įtampos verčių (įtampos keitimo žingsnis).	0.02

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

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė		
		n sritis	i sritis	p sritis
Left edge of the well (μm)	Srities kairiojo krašto X koordinatė	0	0	0
Right edge of the well (μm)	Srities dešiniojo krašto X koordinatė	1	1	1
Top edge of the well (μm)	Srities viršutinio krašto Y koordinatė. w yra „i“ srities plotis, kurį darbo metu reikia keisti (žr. 11 punktą). Šioje lentelėje užrašas „ $5 + w$ “ reiškia skaičių, kuris gaunamas pridėjus prie 5 einamąją w vertę (pvz., jeigu $w = 10 \mu\text{m}$, tada vietoj „ $5 + w$ “ reikia įvesti „15“).	0	5	$5 + w$
Bottom edge of the well (μm)	Srities apatinio krašto Y koordinatė.	5	$5 + w$	60
Doping concentration (cm^{-3})	Priemaišinių atomų koncentracija. n tipo sričiai šis parametras turi būti lygus N_D , o p tipo sričiai – $-N_A$. Šių koncentracijų vertės priklauso nuo varianto (žr. darbo užduotis). Ženklas prieš priemaišų koncentracijos vertę nusako priemaišų tipą: plusas atitinka donorus, o minusas – akceptorius (t.y., šis ženklas nusako priemaišos jono elektrinio krūvio ženklą).	N_D	$1e10$	$-N_A$
X -characteristic length (μm)	Būdingasis atstumas, kuris nusako priemaišų koncentracijos mažėjimo spartą X kryptimi už srities ribų*	0.05	0.05	0.05
Y -characteristic length (μm)	Būdingasis atstumas, kuris nusako priemaišų koncentracijos mažėjimo spartą Y kryptimi už srities ribų*. Darbo užduotis reikalauja, kad taškuose $y = 5 \mu\text{m}$ ir $y = 5 \mu\text{m} + w$ šuoliškai pasikeistų priemaišų koncentracijos. Todėl šis parametras turi būti kuo mažesnis. Vertė $10^{-6} \mu\text{m}$ yra pakankamai maža (užrašas „1e-06“ yra tapatus „ 10^{-6} “).	1e-06	1e-06	1e-06

* Laikoma, kad už srities ribų priemaišų koncentracijos mažėjimą X kryptimi nusako Gauso funkcija $N_0 \exp(-(x-x_l)^2/L_x^2)$ (kai $x < x_l$) arba $N_0 \exp(-(x-x_r)^2/L_x^2)$ (kai $x > x_r$), o Y kryptimi – Gauso funkcija $N_0 \exp(-(y-y_l)^2/L_y^2)$ (kai $y < y_l$) arba $N_0 \exp(-(y-y_b)^2/L_y^2)$ (kai $y > y_b$); čia x_l , x_r , y_l 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. Parametrų grupė „External Generation Sources“ (senesnėje versijoje – „Photogeneration“) apibrėžia fotogeneracijos srities padėtį. Šioje parametrų grupėje turi būti vienintelė direktyva „Generation well“ (senesnėje versijoje – „Photogeneration“). Šioje direktyvoje užduodami šie parametrai:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Photogeneration rate (cm-3)	Didžiausia fotogeneracijos sparta ($\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$). <i>Jeigu naudojama MicroTec 4</i> , tada šis parametras turi būti lygus fotogeneracijos spartai prie apšviesto paviršiaus, t. y. 10^{23} . <i>Jeigu naudojama MicroTec 3</i> , tada šis parametras turi būti lygus didžiausiam skaičiui, kuriuo gali operuoti programa, t. y. 10^{33} (taip yra dėl kai kurių MicroTec 3 apribojimų, kurie paaiškinti šio aprašo 4 skyriuje).	$1e23$ arba $1e33$
Left edge of domain (μm)	Fotogeneracijos srities kairiojo krašto X koordinatė	0
Right edge of domain (μm)	Fotogeneracijos srities dešiniojo krašto X koordinatė	1
Top edge of domain (μm)	Fotogeneracijos srities viršutinio krašto Y koordinatė. <i>Jeigu naudojama MicroTec 4</i> , tada šis parametras turi būti lygus 0. <i>Jeigu naudojama MicroTec 3</i> , tada šis parametras turi būti paimtas iš lentelės, kuri pateikta šio aprašo pabaigoje. Reikia surasti tos lentelės eilutę, kurios pirmajame langelyje yra atitinkamo varianto L vertė, ir vietoj jos įvesti atitinkamą y_0 vertę (ji yra neigiama).	0 arba y_0
Bottom edge of domain (μm)	Fotogeneracijos srities apatinio krašto Y koordinatė. Ši koordinatė turi būti lygi viršutinio krašto koordinatėi, nes priešingu atveju atsirastų sritis, kurioje generacijos sparta yra pastovi, o tai neatitiktų naudojamo fizikinio modelio, pagal kurį fotogeneracijos sparta turi eksponentiškai mažėti didėjant y vertei visame įtaiso gylyje (t. p. žr. pastabą po šios lentelės).	0 arba y_0
X -characteristic length (μm)	Būdingasis atstumas, kuris nusako fotogeneracijos spartos mažėjimo spartą X kryptimi už srities ribų**.	0.001
Y -characteristic length (μm)	Būdingasis atstumas, kuris nusako fotogeneracijos spartos mažėjimo spartą Y kryptimi už fotogeneracijos srities ribų**. <i>Jeigu naudojama MicroTec 4</i> , tada šis parametras turi būti lygus vidutiniam šviesos išsiskverbimo gyliui L , kuris priklauso nuo varianto (žr. darbo užduotis). <i>Jeigu naudojama MicroTec 3</i> , tada šis parametras turi būti paimtas iš lentelės, kuri pateikta šio aprašo pabaigoje. Reikia surasti tos lentelės eilutę, kurios pirmajame langelyje yra atitinkamo varianto vidutinis šviesos išsiskverbimo gylis L , ir vietoj jo įvesti atitinkamą L' vertę.	L arba L'

** Laikoma, kad už fotogeneracijos srities ribų fotogeneracijos spartos mažėjimą X kryptimi nusako Gauso funkcija $G_0 \exp(-(x-x_l)^2/L_x^2)$ (kai $x < x_l$) arba $G_0 \exp(-(x-x_r)^2/L_x^2)$ (kai $x > x_r$), o Y kryptimi – eksponentinė funkcija $G_0 \exp(-(y_l - y)/L_y)$ (kai $y < y_l$) arba $G_0 \exp(-(y - y_b)/L_y)$ (kai $y > y_b$); čia G_0 yra fotogeneracijos sparta srities viduje (pirmasis šios grupės parametras), x_l , x_r , y_l ir y_b yra srities kraštų koordinatės (antrasis – penktasis parametrai), o L_x ir L_y yra būdingieji atstumai (šeštasis ir septintasis parametrai).

Jeigu naudojama senoji MicroTec versija (**MicroTec 3**), tada pereinama prie 7 punkto. Jeigu naudojama naujausia MicroTec versija (**MicroTec 4**), tada šioje direktyvoje reikia užduoti dar tris parametrus:

Parametro pavadinimas	Parametro prasmė	Vertė
Well type	Fotogeneracijos srities tipas. Šis parametras nusako fotogeneracijos spartos mažėjimo dėsnį už fotogeneracijos srities ribų. Kad mažėjimas būtų eksponentinis, šis parametras turi būti lygus 3.	3
Exponent for X-direction	Eksponentinės funkcijos, kuri nusako fotogeneracijos spartos mažėjimą už srities ribų X kryptimi, argumento laipsnio rodiklis. Šis parametras turi būti lygus 2 (tada mažėjimas X kryptimi yra Gauso funkcijos pavidalo).	2
Exponent for Y-direction	Eksponentinės funkcijos, kuri nusako fotogeneracijos spartos mažėjimą už srities ribų Y kryptimi, argumento laipsnio rodiklis. Šis parametras turi būti lygus 1 (jeigu jis būtų lygus 2, tada mažėjimas Y kryptimi būtų Gauso funkcijos pavidalo).	1


7. Uždavus visų parametrų vertes, nuspaudžiamas mygtukas „Run“.

8. 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 randama diodo trumpojo jungimo srovės vertė (ta vertė žymima „Ia“). Ši vertė užsirašoma darbo sąsiuvinyje kartu su atitinkama „i“ srities storio verte. Paskui reikia spragtelėti mygtuką „Close“ ir uždaryti voltamperinės charakteristikos atvaizdavimo programą „SibGraf 2D“.

9. Nuspaudžiamas mygtukas „3D Output“. Tuomet atsidaro dvimačių profilių vizualizavimo programa „SibGraf 3D“.

10. Naudojant programos „SibGraf 3D“ meniu „Plot“ (senesnėje versijoje – „Surface“), atvaizduojama elektrinio lauko stiprio Y komponentės priklausomybė nuo x ir y , o po to atvaizduojami jos pjūvis Y kryptimi. Šis pjūvis išsaugomas failo pavidalu vėlesnei analizei. Paviršius, kurį reikia atvaizduoti, yra „Y-Electric field (V/cm)“.

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“).


Atvaizdavus šį paviršių, reikia spragtelėti mygtuką „ZY“ . Tuomet atsidaro vienmačių pjūvių atvaizdavimo programa "SibGraf 2D", kurioje atvaizduotas pasirinktojo paviršiaus pjūvis Y kryptimi. Šį grafiką 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“).

11. Programos **MicroTec** lange „Project Settings“ pakeičiamas „i“ srities storis w (žr. 5 punktą) ir pakartojami 7 – 10 punktai. Tokiu būdu išbandomos visos storio w vertės (žr. darbo užduotis).

12. Užduodama „i“ srities storio vertė $w = 10 \mu\text{m}$ (žr. 5 punktą), nuspaudžiamas mygtukas „Run“ ir, užsidarius DOS langui, nuspaudžiamas mygtukas „3D Output“. Tuomet atsidaro dvimačių profilių vizualizavimo programa „SibGraf 3D“. Naudojant programos „SibGraf 3D“ meniu „Plot“ (senesnėje versijoje – „Surface“), atvaizduojamos krūvininkų 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:

„Electron concentration (cm⁻³)“ – elektronų koncentracija (cm⁻³);

„Hole concentration (cm⁻³)“ – skylių koncentracija (cm⁻³);

Atvaizdavus kiekvieną iš šių paviršių, reikia spragtelėti mygtuką „ZY“ . Tuomet atsidaro vienmačių pjūvių atvaizdavimo programa "SibGraf 2D", kurioje atvaizduotas pasirinktojo

paviršiaus pjūvis Y kryptimi. Šią grafiką 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“).

13. Programos **MicroTec** lange „Project Settings“ užduodama fotogeneracijos sparta $1 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ (žr. 6 punktą), t. y. fotogeneracija praktiškai pašalinama, ir nuspaudžiamas mygtukas „Run“. Paskui, užsidarius DOS langui, nuspaudžiamas mygtukas „3D Output“ ir pakartojamas 12 punktus.

14. Programos **MicroTec** lange „Project Settings“ atstatoma pradinė fotogeneracijos sparta ($10^{23} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ arba $10^{33} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$; žr. 6 punktą) ir apskaičiuojama fotodiodo voltamperinė charakteristika (žr. 15 ir 16 punktus).

15. Užduodamas voltamperinės charakteristikos taškų skaičius 41 (žr. 4 punktą). Nuspaudžiamas mygtukas „Run“. Užsidarius DOS langui, nuspaudžiamas mygtukas „2D Output“. Tuomet atsidaro voltamperinės charakteristikos atvaizdavimo programa „SibGraf 2D“. Pasirenkamas meniu punktas "Curve/Add..." ir atsidariusiame lange pasirenkami kintamieji, kurie turi būti atidėti ant X ir Y ašių. Kintamųjų žymėjimai: V_c – katodo (viršutinio kontakto) potencialas, V_a – anodo (apatinio kontakto) potencialas, I_c – katodo srovė, I_a – anodo srovė. Išorinė įtampa lygi $V_a - V_c = V_a > 0$ (tiesioginė įtampa). Susitarimas dėl srovių ženklų: srovė yra teigiama, jeigu ji įteka į puslaidininkį iš išorinės grandinės, ir neigiama priešingu atveju. Todėl $I_c = -I_a$. Esant tiesioginei srovei, I_a yra teigiama, o esant atgalinei srovei, I_a yra neigiama. Kadangi reikia atvaizduoti srovės priklausomybę nuo įtampos, tai X kintamasis turi būti V_a (t.y., šalia užrašo "Va" reikia pažymėti laukelį "X"), o Y kintamasis turi būti I_a (t.y., šalia užrašo "Ia" reikia pažymėti laukelį "Y"). Nuspaudžiami mygtukai "Add" ir "Close".

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

17. Gautieji grafikai atspausdinami (tai galima atlikti ne laboratorinių darbų metu). Visos elektrinio lauko stiprio priklausomybės nuo koordinatės (10 kreivių) turi būti pavaizduotos viename grafike, naudojant logaritminį ordinačių ašies mastelį. Kitame grafike turi būti pavaizduotos visos keturios koncentracijų priklausomybės nuo koordinatės (naudojant logaritminį ordinačių ašies mastelį). Trečiajame grafike turi būti voltamperinė charakteristika. Ketvirtajame grafike turi būti trumpojo jungimo srovės priklausomybė nuo „i“ srities storio. Visuose grafikuose turėtų būti koordinatinių linijų (meniu komanda „View/Grid“).

18. Analizuojant gautuosius grafikus, atliekamos užduotys Nr. 6 ir 7 (tai galima atlikti ne laboratorinių darbų metu). Atliekant šias užduotis, reikia naudoti programą „SibGraf 2D“, kuri įeina į programų paketo **MicroTec** sudėtį. Turint .mtp failus, šią analizę galima atlikti, ir naudojant demonstracinę **MicroTec** versiją (tačiau su demonstracine versija neįmanoma atlikti visų minėtų skaičiavimų).

4. Ekspontinės funkcijos aproksimavimas Gauso funkcija

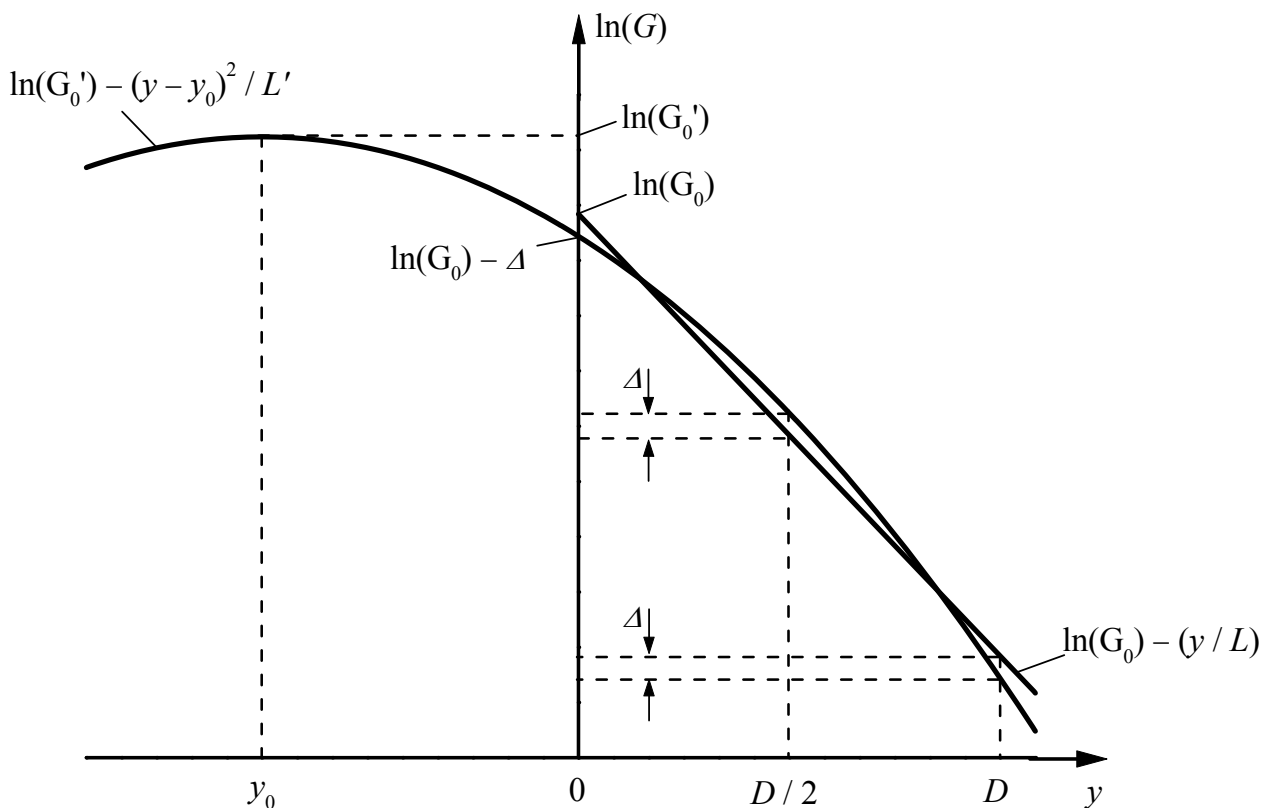
MicroTec 3 negali modeliuoti eksponentinio fotogeneracijos spartos mažėjimo, kuri atitinka lygtis

$$G(y) = G_0 \exp(-y/L); \quad (4.1)$$

čia $G(y)$ yra fotogeneracijos sparta gylyje y , G_0 yra didžiausia fotogeneracijos sparta, o L vidutinis šviesos išsiskverbimo gylys. Tokią priklausomybę gali modeliuoti tik naujesnė **MicroTec** versija (**MicroTec 4**). **MicroTec 3** gali modeliuoti tik Gauso funkcijos pavidalo priklausomybę:

$$G'(y) = G'_0 \exp(-(y - y_0)^2 / (L')^2); \quad (4.2)$$

čia y_0 yra taško, kuriame fotogeneracijos sparta yra didžiausia, gylys. Fizikinę prasmę turi tik (4.1) pavidalo priklausomybė, nes fotogeneracijos sparta yra tiesiog proporcinga šviesos intensyvumui, kuris eksponentiškai mažėja didėjant gyliui y (žr. (2.1.2) formulę). Todėl atliekant šį laboratorinį darbą su senesniąja **MicroTec** versija, tenka (4.1) funkciją aproksimuoti (4.2) funkcija. Išsiaiškinsime, kaip reikėtų parinkti Gauso funkcijos (4.2) parametrus G'_0 , y_0 ir L' , kad ji kuo geriau aproksimuotų eksponentinę funkciją (4.1) duotajame gylio intervale (nuo 0 iki D). Visų pirma reikia apibrėžti aproksimavimo „gerumo“ kriterijų. 10 pav. yra pavaizduoti (4.1) ir (4.2) funkcijų natūralieji logaritmai. (4.1) funkcijos logaritmas yra tiesė, o (4.2) funkcijos logaritmas yra parabolė. Šios parabolės didžiausia vertė yra lygi $\ln G'_0$. Ši didžiausia vertė pasiekama bandinio išorėje, taške $y = y_0$. Ši koordinatės y vertė yra neigiama ($y_0 < 0$), nes teigiamos y vertės atitinka sluoksnio vidų. Tos parabolės parametrus parinksime taip, kad ji kirstų aproksimuojamą tiesę dviejuose taškuose taip, kaip parodyta 10 pav., ir kad parabolės nuokrypiai nuo tos tiesės taškuose $y = 0$, $D/2$ ir D būtų lygūs atitinkamai $-\Delta$, $+\Delta$ ir $-\Delta$. Kai $\Delta \ll 1$, dydžio Δ prasmė yra parabolės didžiausias nuokrypis nuo aproksimuojamos tiesės. Tai reiškia, kad Δ nusako didžiausią santykinę aproksimacijos paklaidą intervale nuo 0 iki D (santykinė paklaida – tai reiškinio $G'/G - 1$ vertė). Aproksimavimas yra tuo geresnis, kuo mažesnis Δ . Nuokrypius Δ galima sumažinti iki kiek norima mažų verčių didinant G'_0 ir $|y_0|$. Tačiau **MicroTec** negali operuoti skaičiais, kurie didesni už 10^{33} . Todėl



10 pav. Tiesės atkarpos aproksimavimas parabole (arba eksponentinės funkcijos aproksimavimas Gauso funkcija). Aproksimavimo sritis yra $0 < y < D$

optimaliąją parabolę apibrėšime, remdamiesi sąlyga $G_0' = 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Iš (4.1) ir (4.2) formulių ir iš minėtųjų reikalavimų, kuriuos turi tenkinti funkcija $G'(y)$, išplaukia tokios dydžių y_0 , Δ ir L' išraiškos:

$$y_0 = -L \ln \left(\frac{G_0'}{G_0} \right) - \sqrt{L^2 \ln^2 \left(\frac{G_0'}{G_0} \right) + \frac{D^2}{8} + DL \ln \left(\frac{G_0'}{G_0} \right)}; \quad (4.3)$$

$$\Delta = \frac{\ln(G_0' / G_0)}{8(y_0^2 / D^2) - 1}; \quad (4.4)$$

$$L' = \frac{D}{\sqrt{8\Delta}}. \quad (4.5)$$

Kaip minėta, šiame darbe $G_0 = 10^{23} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, o $G_0' = 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Vidutinio šviesos įsiskverbimo gylio L vertės, kurios atitinka skirtingus variantus, yra pateiktos darbo užduotyse. Vienintelis kitas dydis, kurį reikia iš anksto žinoti taikant (4.3) – (4.5) formules, yra aproksimavimo srities plotis D . Kadangi fotogeneracija vyksta tik fotodiodo tūryje, tai D vertę natūralu pasirinkti lygia fotodiodo storiui (šiam darbe fotodiodo storis yra $60 \mu\text{m}$). Tačiau, kai L yra daug mažesnis už D , tada santykinė paklaida Δ gali tapti pernelyg didelė. Todėl, kai $L < 15 \mu\text{m}$, dydį D apibrėšime šitaip: $D = 4L$. Tada gylyje D fotogeneracijos sparta yra tik $G_0 \exp(-4) = 0,018 G_0$, todėl didesniuose už D gyliuose net ir didelės santykinės paklaidos neturi žymios įtakos modeliavimo rezultatams. Kai $L \geq 15 \mu\text{m}$, tada $D = 60 \mu\text{m}$. Naudojantis šia taisykle, taikant (4.3) – (4.5) formules, gaunamos y_0 , Δ ir L' vertės, kurios pateiktos šioje lentelėje (y_0 ir L' vertės yra paryškintos, nes tik jas reikia įvesti į modeliavimo programą):

Parametrų y_0 , Δ ir L' vertės, kurios atitinka $G_0 = 10^{23} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $G_0' = 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ir duotąsias L ir D vertes

$L, \mu\text{m}$	$D, \mu\text{m}$	$y_0, \mu\text{m}$	Δ	$L', \mu\text{m}$
5	20	-240,06	1,9995%	50,01
7	28	-336,08	1,9995%	70,01
10	40	-480,12	1,9995%	100,01
12	48	-576,14	1,9995%	120,01
15	60	-720,18	1,9995%	150,02
17	60	-812,34	1,5712%	169,23
20	60	-950,58	1,1473%	198,05
22	60	-1042,72	0,9534%	217,25
25	60	-1180,92	0,7432%	246,06
27	60	-1273,05	0,6395%	265,26
30	60	-1411,24	0,5204%	294,07
32	60	-1503,36	0,4586%	313,27
35	60	-1641,54	0,3846%	342,06
37	60	-1733,66	0,3448%	361,26
40	60	-1871,83	0,2958%	390,06
42	60	-1963,95	0,2687%	409,26
45	60	-2102,12	0,2345%	438,05
47	60	-2194,23	0,2152%	457,25