

Elektrotechnický ústav, Slovenská akadémia vied
Bratislava

Ing. Jozef Osvald, CSc.

**TRANSPORT NOSIČOV NÁBOJA CEZ ROZHRANIE
KOV-POLOVODIČ**

Autoreferát dizertačnej práce na získanie hodnosti doktora technických vied

Vedný odbor: 26-35-9
Elektrotechnológia a materiály

Bratislava, marec 2006

Dizertačná práca bola vypracovaná na Elektrotechnickom ústave SAV

Uchádzač: Ing. Jozef Osvald, CSc.
Elektrotechnický ústav SAV
Dúbravská cesta 9
841 01 Bratislava

Oponenti: Prof. RNDr. Viktor Bezák, DrSc., FMFI UK, Bratislava
Prof. Ing. Daniel Donoval, DrSc., FEI STU, Bratislava
Doc. Ing. Peter Kordoš, DrSc., EIÚ SAV, Bratislava
Ing. Fedor Šrobár, DrSc., ÚRE ČAV, Praha

Stanovisko k dizertačnej práci vypracoval Elektrotechnický ústav SAV v Bratislava

Autorefererát bol rozoslaný dňa ____ 11. 7. 2006 _____

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa ____ 13. 9. 2006 ____ o __ 11.00 ____ hod. pred komisiou pre obhajoby doktorských dizertácií vo vednom odbore 26-35-9 "Elektrotechnológia a materiály" v zasadačke Elektrotechnického ústavu SAV v Bratislave, Dúbravská cesta 9.

S dizertáciou je možné sa oboznámiť v knižnici Elektrotechnického ústavu SAV.

Predseda komisie pre obhajoby doktorských
dizertačných prác v odbore 26-35-9

Doc. Ing. Peter Kordoš, DrSc.
Elektrotechnický ústav SAV

Obsah

1. Úvod	2
2. Súčasný stav problematiky	3
3. Ciele dizertačnej práce	5
4. Metódy spracovania dizertačnej práce	7
5. Výsledky dizertačnej práce	8
5.1. Štatistické rozdelenia výšok bariér	8
5.2. Extrakcia parametrov bariéry z I - V meraní	9
5.3. Zdanlivá výška bariéry	11
5.4. Driftovo-difúzne priblíženie	11
5.5. Štruktúry s δ -dotovanými vrstvami	15
5.6. Ohmický alebo Schottkyho kontakt?	16
5.7. Teplotná závislosť I - V charakteristík	17
5.8. Priesečníkové chovanie I - V kriviek	17
5.9. Vplyv laterálneho rozptylu prúdu na extrahované parametre	19
6. Závery pre realizáciu v spoločenskej praxi a pre ďalší rozvoj vedy ..	22
7. Literatúra	24
8. Štúdie uchádzača tvoriace predmet dizertačnej práce	25
9. Ďalšie štúdie uchádzača majúce väzbu na dizertačnú prácu	26
9.1. Publikované štúdie	26
9.2. Príspevky v zborníkoch z konferencií	27
9.3. Kapitoly v monografiách	29
10. Citačný ohlas prác uchádzača	30
Summary	38
Zusammenfassung	39

1. Úvod

Rozhranie kovu s polovodičom je jedným z najzaujímavejších a najdlhšie študovaných objektov v polovodičovej elektronike. Je výzvou pre fyzikov a elektrotechnikov už niekoľko desaťročí. Napriek úsiliu vedcov trvajúcemu už viac ako pol storočia nie je fyzikálna podstata tejto štruktúry podnes úplne rozriešená. Po mnohých prácach prvú zdanlivo spoľahlivú teóriu vypracovali Schottky a Mott [1,2]. Rozhodujúcimi fyzikálnymi veličinami, ktoré použili na popísanie elektrických vlastností rozhrania kovu a polovodiča boli výstupná práca elektrónu z kovu a elektrónová afinita polovodiča. Rozdiel medzi týmito dvoma veličinami určoval výšku potenciálovej bariéry, ktorá sa utvorí medzi kovom a polovodičom po ich uvedení do kontaktu. Klasická schéma postupného približovania kovu a polovodiča za súčasnej výmeny elektrónov a tým vyrovnávania Fermiho potenciálov medzi nimi je dnes dostatočne známa. Po vytvorení kontaktu medzi týmito materiálmi a ustálení termodynamickkej rovnováhy dochádza k úplnému vyrovnaniu Fermiho hladín – elektrochemických potenciálov. Dôsledkom tohto procesu je však vytvorenie elektrického poľa v polovodiči v blízkosti rozhrania s kovom. Vo veľkej väčšine prípadov kombinácií kovu a polovodiča dochádza pri približovaní k prechodu voľných nosičov z polovodiča do kovu a výsledkom tohto procesu je ochudobnenie povrchu polovodiča o majoritné nosiče náboja. Vytvorí sa tak oblasť priestorového náboja. Ak má polovodič n -typ vodivosti, energetické pásy sa zahnú smerom nahor, v prípade p -typu vodivosti dôjde k zahnutiu smerom nadol. Opačný prípad, keď je povrch polovodiča obohatený o majoritné nosiče a na povrchu vznikne akumulovaná vrstva, je v experimentálnej praxi pomerne zriedkavý.

V praxi sa však takisto pozoruje podstatne menšia závislosť výšky bariéry od rozdielu medzi výstupnou prácou z kovu a elektrónovou afinitou polovodiča, než predpovedá Schottkyho-Mottova teória. V roku 1947 prišiel Bardeen [3] s hypotézou, že dôležitú úlohu môžu pri tvorbe potenciálovej bariéry hrať tzv. povrchové stavy. Povrchové stavy tvorené nesaturovanými atómovými väzbami smerujúcimi do vákuu sú energeticky situované do zakázaného pásu a priestorovo sú lokalizované na povrchu. Z hľadiska energie sú rozložené spojitě v zakázanom páse. Ak atómová konfigurácia na povrchu vytvorí v priebehu hustoty povrchových stavov na určitej hladine pík, môže byť v tejto polohe rezervoárom povrchových stavov Fermiho hladina zachytená – v tom prípade hovoríme o tzv. záchyť alebo pinovaní Fermiho hladiny. Na tejto hladine je možný záchyť alebo emisia dostatočného počtu elektrónov tak, že objem polovodiča bude odtienený od zmien elektrického potenciálu na povrchu polovodiča. Pohyb Fermiho hladiny na povrchu je potom prakticky nemožný a výška výslednej bariéry je určená energetickým rozdielom medzi úrovňou pinovania Fermiho hladiny a okrajmi energetických pásov.

Spočiatku boli kontakty kov–polovodič študované hlavne elektrickými metódami. Dvomi najčastejšie používanými metódami, ktoré hrajú veľmi dôležitú úlohu aj dnes sú I - V a C - V metódy. Unikátnou vlastnosťou kontaktu kov–polovodič je nesymetrická – usmerňujúca I - V charakteristika, ktorá je dôsledkom rozdielnej bariéry, ktorú “vidia” elektróny pohybujúce sa z polovodiča do kovu a opačne.

Ďalšou zaujímavou vlastnosťou kontaktov kov–polovodič – Schottkyho diód – je ich schopnosť sledovať vysokofrekvenčný signál do podstatne vyšších frekvencií ako klasické diódy s p - n prechodom. Je to dôsledok faktu, že Schottkyho diódy sú súčiastky, v ktorých sú rozhodujúcimi z hľadiska transportu nosičov náboja majoritné nosiče. Prúd pretekajúci Schottkyho diódou je prakticky výhradne tvorený majoritnými nosičmi náboja. Časť celkového prúdu, ktorá je vedená minoritnými nosičmi, je za normálnych okolností o niekoľko rádov menšia ako prúd majoritných nosičov a je úplne zanedbateľná. Dôsledkom je nezávislosť frekvenčnej odozvy Schottkyho diód od veľkej doby života minoritných nosičov, ktorá znemožňuje p - n diódam sledovať vysokofrekvenčné signály.

2. Súčasný stav problematiky

Máme v podstate dve základné teórie popisujúce transport nosičov cez rozhranie kovu a polovodiča. Prvou je termoemísna teória [4]. Táto teória predpokladá, že nosiče náboja sú tepelne aktivované do energií vyšších ako je výška bariéry a vo vonkajšom poli prejdú rozhraním. Počet elektrónov na určitej energetickej hladine exponenciálne klesá s rastúcou energiou. Počet častíc, ktoré prejdú rozhraním je ovplyvnený aj schopnosťou polovodiča emitovať nosiče a to je popísané Richardsonovou konštantou. Výraz, ktorý popisuje transport prúdu v závislosti od napätia v Schottkyho dióde je

$$I = SA^{**}T^2 \exp\left(-\frac{q\phi}{kT}\right)\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right], \quad (1)$$

kde S je plocha diódy, A^{**} je modifikovaná Richardsonova konštanta a ϕ je výška bariéry. Táto teória popisuje celkom dobre transport nosičov v kontaktoch s vysokou pohyblivosťou nosičov náboja, ku ktorým patrí väčšina bežných polovodičov.

Druhá teória je vhodnejšia pre polovodiče s oblasťou priestorového náboja širšou ako je stredná voľná dráha nosičov v polovodiči. V týchto polovodičoch je elektrón prechádzajúci oblasťou priestorového náboja v nej rozptylovaný zrážkami s ionizovanými prímiesami a jeho pohyb je popísaný driftovo-difúznymi rovnicami. Simultánne riešenie driftovo-difúzných rovníc pre elektróny a diery s Poissonovou rovnicou pre rozloženie náboja umožňuje získať koncentrácie elektrónov a dier v polovodiči zároveň s priebehom elektrického potenciálu v polovodiči. Kvázipotenciály pre elektróny a diery sú tiež súčasťou riešenia.

Väčšinu javov spojených s transportom náboja cez rozhranie polovodiča s kovom je možné objasniť za predpokladu, že vytvorená potenciálová bariéra je homogénna. V posledných dvoch desaťročiach a hlavne v deväťdesiatych rokoch sa však pomerne intenzívne študovali možnosti vzniku a dôsledky nehomogenít vo výške potenciálovej bariéry na rozhraní. Štúdium možnej existencie nehomogenity potenciálovej bariéry bolo motivované viacerými nezrovnalosťami medzi teóriou a experimentálnymi výsledkami. Väčšina diskrepancií sa zistila medzi elektrickými prejavmi diód a ich teoretickým predpovedaním. Pozorovali sa ako pri I - V , tak aj pri C - V meraniach. Jedným z hlavných problémov, k riešeniu ktorého prispela koncepcia nehomogénnych Schottkyho diód, je rozdiel medzi výškou bariéry vypočítanou z I - V a C - V meraní. Ukázalo sa, že povôd viacerých anomálií môže byť spôsobený nekonštantnou výškou bariéry po ploche Schottkyho bariéry.

Ďalším problémom, ktorý sa zvykne spájať s nehomogenitou bariéry, je teplotná závislosť parametrov bariéry. Experimentálne pozorovaný pokles výšky Schottkyho bariéry a nárast koeficientu ideálnosti s klesajúcou teplotou nie je totiž v súlade s termoemísnou teóriou homogénnych diód. Na druhej strane však, potenciálna možnosť existencie nehomogenity bariéry sa občas používa trochu nekriticky na vysvetlenie prípadných anomálnych výsledkov bez dostatočného experimentálneho preukázanie jej skutočnej existencie. Vo svojich prácach sme ukázali, že nehomogenita bariéry nemusí byť jediným zdrojom experimentálne sledovanej teplotnej závislosti výšky bariéry. Dôvody takejto teplotnej závislosti je možno potrebné hľadať v zmene transportného módu nosičov náboja pri nižších teplotách alebo postupnej zmeny váhy jednotlivých módov.

Pravdepodobne prvou prácou, ktorá sa seriózne zaoberala nehomogénnymi bariérami je práca Ohdomariho a Tu [5]. Autori pripravili štruktúry pozostávajúce z paralelných PtSi a NiSi kontaktov s daným pomerom plôch kontaktov a merali Schottkyho bariéru pomocou $I-V$ a $C-V$ metódy. Zistili veľmi dobrú zhodu medzi nameranými a vypočítanými výsledkami. Skupina okolo Freeoufa [6,7] študovala "rozmerový jav" v nehomogénnych diódach počítačovou simuláciou. Študovali kontakty ktoré pozostávali so zmiešaných hradlových materiálov s daným pomerom plôch, avšak s rozličnou celkovou plochou. Výsledkom bolo konštatovanie, že dôsledkom započítania rozmerového javu je rozdielnosť faktorov ideálnosti v závislosti od celkovej plochy kontaktu a takisto rozdiel medzi výškou bariéry odvodenou z $I-V$ a $C-V$ meraní.

V literatúre sa veľmi často pracuje s analýzou nehomogénnych bariér vypracovanou Tungom [8-10]. Tung popísal priebeh elektrického potenciálu v blízkosti rozhrania kov– polovodič pomocou lineárnej kombinácie potenciálu prislúchajúceho homogénnej dióde a potenciálu dipólu dvojvrstvy s meniacim sa dipólovým momentom jednotkovej plochy diódy umiestneným na rozhraní kovu a polovodiča. Použil dve geometrické usporiadania. Prvým je prípad kruhovej nehomogenity s polomerom R_0 , ktorý je malý v porovnaní s rozmerom oblasti priestorového náboja W . V prípade druhého geometrického usporiadania sa pracuje tenkým pásikom so šírkou L_0 .

Autor analytickej teórie tvrdí, že pomocou tejto metódy je možné vysvetliť niekoľko doteraz neobjasnených javov spojených s transportom náboja v Schottkyho diódach, ako napr. koeficient ideálnosti $n > 1$, tzv. "mäkké" záverné charakteristiky mnohých kontaktov alebo závislosť výšky Schottkyho bariéry od zvolenej meracej techniky. Výška Schottkyho bariéry je totižto v podstate vždy vyššia pri $C-V$ metóde než pri $I-V$ metóde alebo fotoelektrickej metóde. $C-V$ metóda poskytuje výsledok, ktorý je priemerom výšky bariéry cez celú plochu diódy, kdežto exponenciálna závislosť prúdu diódy od napätia spôsobuje, že nižšie bariéry majú pri vyjadrení zdanlivej bariéry diódy väčšiu váhu a výsledná bariéra takto vyhodnotená z $I-V$ merania je nižšia.

Obecne sa dá predpokladať, že jednotlivé malé diódy spoločne vytvárajúce nehomogénnu diódu majú výšky bariér rozdelené štatisticky. To vedie k predpokladu štatistického rozdelenia bariér v štruktúre. Otázkou samozrejme je, aké štatistické rozdelenie najlepšie vystihuje rôznosť výšky bariér jednotlivých malých diód tvoriacich nehomogénnu diódu. V literatúre bolo na vysvetlenie $I-V$ kriviek alebo dát

získaných metódou balistickej elektrónovej emisnej spektroskopie (BEEM) [11-13] použitých viacero typov štatistického rozdelenia výšok bariér nehomogénnych diód, pomocou ktorých možno teoreticky predpovedať a modelovať chovanie štruktúr.

Tu si dovoľíme poznamenať, že výška bariéry zrejme nie je primárnou veličinou, ktorá sa náhodne mení pozdĺž rozhrania kovu a polovodiča. Domnievame sa, že výška bariéry alebo skôr len jej zmeny sú iba odvodeným efektom, ktorého primárnym zdrojom sú zmeny v kryštalografickej konfigurácii atómov kovu a polovodiča na rozhraní, fluktuácie hrúbky a dielektrickej konštanty medzivrstvy, ktorá v podstate vždy sprevádza reálne štruktúry, laterálne zmeny výstupnej práce z kovu, atď. Napriek tomuto faktu je najčastejšie používaným rozdelením pri úvahách a štúdiách Gaussovo rozdelenie. Z pohľadu štatistického rozdelenia nie je dôležité, aká je príčina nehomogenity výšky bariéry a či navzájom susediace bariéry vytvárajú zaškrtenie potenciálu a sedlový bod v potenciálovom priebehu. Výsledná výška bariéry je dôsledkom mikroskopickej štruktúry na rozhraní a jej priestorového rozloženia v rovine rozhrania a toto rozdelenie v sebe obsahuje aj efekty ako sú sedlový bod potenciálu alebo lokálne zaškrtenie nižších bariér.

Pre prípad Gaussovského rozdelenia zistili Song a kol. [14] a Werner a Güttler [15], že výsledná zdanlivá výška výška bariéry sa v tomto prípade dá spočítať dokonca analyticky presne a výsledkom je vzťah

$$\varphi_{ap} = \varphi_m - \frac{q\sigma^2}{2k_B T}, \quad (2)$$

kde φ_m je stredná výška bariéry a σ stredná kvadratická odchýlka rozdelenia. My sme neskôr ukázali, že striktná aplikácia tohoto postupu môže viesť za určitých okolností k nefyzikálnym výsledkom.

Gaussovské štatistické rozdelenie však nie je jediným rozdelením použitým pri kvantifikácii vplyvu nehomogenít na zdanlivú výšku bariéry. Boli použité aj iné druhy rozdelení, napr. lognormálne rozdelenie, ktoré použil pri interpretácii experimentálnych výsledkov získaných na PtSi/*n*-Si diódach metódou BEEM Horváth [16]. BEEM je jednou z experimentálnych metód, ktorá nám umožňuje zobrazit jednotlivé časti diódy s meniacou sa výškou bariéry. Metóda pracuje s nanometrovým rozlíšením [17]. Takisto bolo publikované použitie Gaussovského rozdelenia na popis jadra rozdelenia a dvojitého Gaussovského rozdelenia na popísanie jeho vysokobariérového a nízkobariérového okraja. Napriek tomu, však, v prevažnej väčšine experimentálnych i numerických prác sa predpokladá rozdelenie podľa Gaussa.

3. Ciele dizertačnej práce

Pri experimentálnej a teoretickej práci v oblasti vlastností rozhrania kovu a polovodiča a transportu nosičov náboja cez toto rozhranie sme počas rokov prišli k záveru, že štúdie sa v prevažnej miere obmedzujú na technologické aspekty prípravy kontaktov z rôznych kovov na rôznych polovodičoch. Autori sa veľakrát nesnažia hlbšie pochopiť a popísať fyzikálnu podstatu jednotlivých aspektov celého komplexu problémov rozhrania kovu a polovodiča. Mnohokrát zostáva povrchnou aj interpretácia nameraných elektrických vlastností takýchto kontaktov. Štandardnou metódou, veľakrát iba z geometrického narysovania dotyčnice k semilogaritmickejmu

zobrazení $I-V$ krivky, sa viac alebo menej presne určí výška bariéry kontaktu a prípadne koeficient ideálnosti a podľa jeho hodnoty sa konštatuje, či dominujúcou formou transportu nosičov je termoemisia alebo nie. V záveroch štúdií sa preto veľmi často objavujú rôzne „špekulácie“ oddôvodňujúce také alebo onaké správanie sa experimentálnych štruktúr.

Pri zložitejších štruktúrach obsahujúcich napr. nehomogenity vo výške bariéry takáto jednoduchá analýza však už nie je možná. Pokiaľ nie sme schopní štruktúru analyzovať, nemôžeme samozrejme ani správne interpretovať experimentálne výsledky.

Naša práca bola preto v podstate od samého počiatku motivovaná snahou exaktnejšie na základe prijatých fyzikálnych modelov analyzovať možné procesy transportu cez Schottkyho rozhranie. K tomuto účelu sa ukázali ako najvhodnejšie numerické matematické metódy. Rozvoj počítačov v posledných rokoch robí túto úlohu čoraz jednoduchšou. Simulácia a modelovanie sú dnes neodmysliteľnou súčasťou vedeckého bádania. V niektorých vedných odboroch sú možno aj jedinou použiteľnou metódou. Uplatňujú sa všade tam, kde overenie hypotézy alebo teórie je v praxi nemožné alebo aspoň neprímerane drahé.

Pri zložitých fyzikálnych problémoch je analytické riešenie možné iba v zriedkavých prípadoch. Aj to je väčšinou možné až po prijatí určitého alebo viacerých priblížení, ktoré daný problém z matematického hľadiska zjednodušujú a redukujú. Pomocou simulácie a modelovania možno väčšinou riešiť problém bez zjednodušujúcich aproximácií, daňou za to však je malá obecnosť výsledného riešenia – riešenie je platné iba za daných podmienok a na získanie riešenia za iných počiatočných a okrajových podmienok je potrebné celý výpočet zopakovať pre nové podmienky.

Toto všeobecné vymedzenie cieľov dizertačnej práce je možné rozložiť do jednotlivých čiastkových cieľov, ktoré sa podarilo v priebehu rokov splniť a publikovať. Pre úplnosť ich vymenujme:

- a) Preštudovať model konštantného rozdelenia výšky bariér a zistiť vzťahy pre zdanlivú výšku bariéry takéhoto rozdelenia.
- b) Vytvoriť model a algoritmus výpočtu parametrov bariéry Schottkyho kontaktu s uvážením vplyvu sériového odporu kontaktu, ktorý je v štruktúre vždy prítomný, na $I-V$ charakteristiku kontaktu. Vypracovať numerickú metódu na extrakciu parametrov Schottkyho diódy z jej $I-V$ charakteristiky. Parametrami štruktúry, ktoré ju popisujú sú výška bariéry ϕ , koeficient ideálnosti n a sériový odpor štruktúry R . Ďalej vypracovať numerickú metódu na extrakciu parametrov nehomogénnej Schottkyho diódy pre prípad neinteragujúcich diód. Je to prípad, v ktorom môžeme výslednú nehomogénnu diódu považovať za súbor malých homogénnych diód, z ktorých každá má svoj sériový odpor a tieto diódy sú radené paralelne.
- c) Preskúmať či a aký vplyv má nehomogenita Schottkyho diódy na jej kapacitné vlastnosti a či sa táto nehomogenita nemôže prejavovať v určitom napäťovom rozsahu ako záporná kapacita. Nehomogénnu diódu modelovať v dvoch usporiadaniach. V prvom prípade zvoliť priestorové usporiadanie nehomogenít tak, aby partikulárne diódy susediace v Gaussovom rozdelení podľa výšky bariéry susedili aj priestorovo. V druhom prípade nech je priestorové usporiadanie bariér rozložené náhodne. Preskúmať aj $I-V$ charakteristiky takýchto diódových štruktúr. Štúdia

- zároveň preverí Tungovu hypotézu o vplyve zaškrtenia potenciálu na povrchu a vplyvu sedlového bodu potenciálu na výsledné zdanlivé parametre štruktúry.
- d) Zistiť vplyv koncentrácie dotujúcej prímеси v polovodiči na zdanlivé parametre na inak rovnako nehomogénne diódy – s rovnakým Gaussovským rozložením bariér.
 - e) Modelovať vplyv pripovrchovej δ -dotovanej vrstvy polovodiča na parametre Schottkyho kontaktu. Zistiť vplyv akceptorového a aj donorového typu prímеси. Teoreticky preštudovať kontakty “Shannonovho” typu s hrubšou pripovrchovou vrstvou opačne dotovanou (counter doped) než objem polovodiča. Preskúmať vplyv minoritných nosičov náboja na transportné vlastnosti takýchto kontaktov.
 - f) Self-konzistentným riešením Poissonovej a Schrödingerovej rovnice popísať energetické rozloženie dvojdimenzionálneho elektrónového plynu v δ -dotovanej vrstve polovodiča umiestnenej v blízkosti povrchu polovodiča. Zistiť vplyv vonkajšieho elektrického poľa na obsadenie energetických hladín v subpásoch.
 - g) Preskúmať možnosti a presnosť kapacitno-napäťovej metódy pri určovaní koncentrácie dopantu v δ -dotovaných vrstvách polovodiča.
 - h) Preveriť platnosť vzťahu odvodeného Songom a kol. [14] pre výšku zdanlivej bariéry v nehomogénnej štruktúre s Gaussovským rozložením nehomogenít.
 - i) Preštudovať prúdovo-napäťové charakteristiky Schottkyho diód s nízkou bariérou a slabou dotovaným polovodičom. Diskutovať ohmickosť, prípadne usmerňujúci charakter takýchto prvkov.
 - j) Modelovať teplotné závislosti I - V - T prúdovo-napäťových charakteristík Schottkyho kontaktov Shannonovho typu. Preskúmať teplotnú závislosť prúdovo-napäťových charakteristík aj na experimentálnych vzorkách.
 - k) Experimentálne preštudovať I - V - T charakteristiky NiAu/ n -GaN Schottkyho diód s Ga- a N-polaritou povrchu. Pokúsiť sa o interpretáciu nameraných závislostí. Diskutovať veľké záverné prúdy bežne pozorované na GaN diódach.
 - l) Vyšetriť možnosť pretínania sa I - V charakteristík meraných pri rôznych teplotách v prípade homogénnych a aj nehomogénnych diód.

4. Metódy spracovania dizertačnej práce

Ciele dizertačnej sme naplňali pomocou teoretických a experimentálnych metód s tým, že ťažisko sme položili na teoretické skúmanie. Keďže sme sa zaoberali hlavne elektrickými prejavmi kontaktov kov–polovodič, v experimentálnej časti hrali rozhodujúcu úlohu merania prúdovo-napäťových I - V a kapacitno-napäťových C - V závislostí.

Participovali sme aj na sérii prác, ktoré boli venované skúmaniu formovania rozhrania kov–polovodič na čerstvo vytvorených povrchoch polovodiča v podmienkach ultravákua. Formovanie kontaktu a pohyb Fermiho hladiny v zakázanom páse polovodiča pri tvorení kontaktu sa v týchto prácach študoval metódou XPS (fotoelektrónová spektroskopia pomocou mäkkého röntgenového žiarenia) so žiarením generovaným pomocou synchrotrónového prstenca. Tieto štúdie sme však nepojali do predmetu dizertačnej práce.

Metodicky nám bolo najbližšie využitie numerickej matematiky na simuláciu a modelovanie elektrického transportu v študovaných štruktúrach a energetického spektra elektrónových hladín v prípade kvantových štruktúr. Metóda sa ukázala ako

veľmi účinná pri predpovedaní elektrických vlastností Schottkyho diód a aj pri vysvetľovaní nameraných experimentálnych závislostí. Tento postup je užitočný v situáciach, keď kolegovia zaoberajúci sa technológiou prípravy polovodičových štruktúr a ich meraním boli odkázaní iba na hypotézy, prípadne špekulácie pri interpretácii výsledkov. Ako sme už spomenuli, simulácie a modelovanie sa stávajú pri zložitosti súčasných problémov riešených exaktnými a technickými vedami nielen akceptovanou zložkou vedeckého bádania, no v niektorých oblastiach priam rozhodujúcou. V súvislosti so simuláciou a modelovaním sa v poslednom období mnohokrát tieto výpočty označujú ako „numerické experimenty“. Ak ešte pred dvadsiatimi rokmi to bolo skôr v polohe teórie, dnes sa v podstate nevyžaduje pri publikovaní potvrdenie reálnym experimentom. Tým samozrejme nechceme povedať, že výsledky v konečnom dôsledku nie je potrebné takto verifikovať. Na určitej piebežnej úrovni sa to však nepožaduje.

Z použitých numerických metód spomenieme nelineárne trojrozmerné fitovanie metódou najmenších štvorcov, ktorú sme použili na vytvorenie programov pre extrakciu troch parametrov - výšky bariéry, koeficientu ideálnosti a sériového odporu v prípade homogénnych diód a strednej výšky bariéry, strednej kvadratickej odchýlky rozdelenia a sériového odporu v prípade nehomogénnych diód.

Pri súčasnom riešení driftovo difúzných rovníc a Poissonovej rovnice sme použili metódu vyvinutú Mayergoyzom a Kormanom a Mayergoyzom. Ide o tzv. metódu s iteráciou pevného bodu (fixed point iteration). Metóda nevyžaduje veľkú operačnú pamäť počítača, je však náročná na strojový čas.

Pri vyšetrení energetického spektra elektrónov v δ -dotovaných kvantových štruktúrach sme numericky riešili self-konzistentným spôsobom Schrödingerovu a Poissonovu rovnicu. Výsledkom riešenia bol priebeh potenciálovej jamy, v ktorej sú dvojdimenzionálne elektróny udržiavané, ich elektrónové hladiny, zastúpenie elektrónov na jednotlivých hladinách a samozrejme následne celková koncentrácia elektrónov v potenciálovej jame.

5. Výsledky dizertačnej práce

5.1. Štatistické rozdelenia výšok bariér

V práci [P1] sme použili na popísanie štatistického rozdelenia bariér konštantné (homogénne) rozdelenie. Predpokladali sme, že v určitom intervale výšok bariér sú čiastkové bariéry početne rovnomerne zastúpené – zodpovedajúce plochy diód jednotlivých čiastkových bariér sú rovnaké. Pre výslednú zdanlivú výšku bariéry takto nehomogénnej Schottkyho diódy sme odvodili analytický vzťah

$$\varphi_{ap} = -\frac{k_B T}{q} \ln \left[\frac{k_B T}{q(\varphi_H - \varphi_L)} (e^{-q\varphi_L/k_B T} - e^{-q\varphi_H/k_B T}) \right], \quad (3)$$

kde φ_L a φ_H sú najnižšia a najvyššia bariéra zo štatistického rozdelenia. Celková prúdová hustota môže byť v takomto prípade vyjadrená rozdielom i_L and i_H , t. j. prúdových hustôt, ktoré by tiekli homogénnou diódou s rovnakou plochou, ak by mala mala výšku bariéry rovnú najnižšej φ_L , resp. najvyššej φ_H bariére z rozdelenia. Merania $I-V$ pri dvoch rôznych teplotách v podstate postačujú na určenie φ_L a φ_H , ale na verifikáciu typu rozdelenia je potrebné zmerať $I-V$ krivky pri viacerých teplotách.

Zaujímavou črtou tohto rozdelenia je aj fakt, že Richardsonov graf skonštruovaný pre diódu s takýmto rozdelením nehomogenít je skoro lineárny. To zároveň znamená, že konštrukcia tohto samotného grafu bez ďalšieho vyhodnotenia elektrických vlastností diódy sama neupozorní na možnú nehomogenitu vo výške bariéry diódy.

Myšlienku homogénneho rozdelenia výšok bariér sme využili pri interpretácii experimentálnych výsledkov svedčiacich o zvýšení bariéry v prípade diód $WSi_x/GaAs$ po rýchlom izotermálnom žíhaní [P2].

V literatúre najčastejšie traktované Gaussovské rozdelenie výšky bariér sme použili v práci [P3]. Je to pionierska práca, ktorá ako prvá vyriešila zakomponovanie sériového odporu, ktorý je vždy v reálnej štruktúre prítomný, do vzťahu pre prúd tečúci diódou. Ukázali sme, že pre prípad tzv. neinteragujúcich diód, pri ktorých predpokladáme, že každá čiastková dióda má svoj sériový odpor a tieto jednotlivé sériové kombinácie diódy a jej sériového odporu sú potom radené paralelne, celkový prúd bude určený vzťahom

$$I = A \int \rho(\varphi, \varphi_0, \sigma) i(\varphi, r) d\varphi, \quad (4)$$

kde

$$i = i_s \{ \exp[\beta(V - ri)] - 1 \} \quad (5)$$

a i_s je saturačná prúdová hustota daná vzťahom

$$i_s = A^* T^2 \exp(-\beta\varphi) \quad (6)$$

a β je $q/k_b T$. Zistili sme priamy vzťah medzi strednou kvadratickou odchýlkou rozdelenia výšky bariér a parametrami bariéry. Takisto sme ukázali, že zväčšovanie strednej kvadratickej odchýlky a znižovanie teploty merania spôsobuje znižovanie zdanlivej výšky bariéry a zvyšovanie koeficientu ideálnosti diódy. Zistili sme, že dôležitú úlohu v tom hrá veľkosť sériového odporu.

5.2. Extrakcia parametrov bariéry z $I-V$ meraní

Väčšina experimentálnych výsledkov potvrdzujúcich nehomogenitu bariér je známa z BEEM meraní. Spätaná analýza – dekonvolúcia parametrov bariéry zo samotnej $I-V$ krivky nie je jednoduchá a ani jednoznačná úloha. $I-V$ charakteristika je integrálnou krivkou a jej rozloženie na parciálne krivky čiastkových diód dohromady dávajúcich nameranú charakteristiku je vlastne riešením Fredholmovej integrálnej rovnice I. typu. Rovnice tohto typu sa označujú ako nekorektne zadaný problém (ill posed problem) – pri úlohách tohto typu nie je zabezpečené, že malá zmena vstupných parametrov spôsobí iba malú zmenu vo výsledku.

Výsledná charakteristika nie je závislá iba od štatistického zastúpenia jednotlivých bariér ale aj od ich priestorového rozloženia – ktorá bariéra susedí s ktorou a aká dlhá je ich spoločná hranica. V práci [P4] sme vypracovali metódu, ktorá s použitím numerických metód dokáže exaktne analyzovať tri parametre Schottkyho diód. Metódu pôvodne vyvinutú pre diódy s homogénnou výškou bariéry sme rozšírili aj na diódy s nehomogénnou bariérou. Problém sme riešili pre limitný prípad neinteragujúcich diód. Predpokladali sme, že štatistické rozdelenie výšok bariér je Gaussovské a hľadali sme parametre tohto rozdelenia – strednú hodnotu φ_0 , strednú kvadratickú odchýlku σ a sériový odpor jednotky plochy diódy $r=AR$. Celkový prúd diódou je opäť daný vzťahom

$$I = (\varphi_0, \sigma, r) = A \int \rho(\varphi, \varphi_0, \sigma) i(\varphi, r) d\varphi \quad (7)$$

kde

$$\rho(\varphi, \varphi_0, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\varphi - \varphi_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

je Gaussovské rozdelenie. Použijúc metódu najmenších štvorcov ako najlepší odhad, dostaneme podmienku pre sumu štvorcov

$$S = \sum_{j=1}^N \left(\frac{I_{ej} - I_j}{I_j}\right)^2, \quad (9)$$

kde I_{ej} je j -tá experimentálna hodnota, I_j je fitovacia hodnota pre $V=V_j$ a N počet napäťových bodov, v ktorých sa charakteristika merala. Sumácia relatívnych odchýliek medzi nameranými a odpovedajúcimi ideálnymi hodnotami, ktoré sa môžu líšiť o niekoľko rádov, bude mať minimálnu hodnotu pre riešenie. Aby sa zistilo minimum celkovej sumy odchýliek, riešia sa rovnice

$$\frac{\partial S}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

kde x symbolizuje všetky tri parametre charakterizujúce distribúciu výšok bariér v dióde a sériový odpor. Tieto normálové rovnice majú tvar

$$\frac{\partial S}{\partial \varphi_0} \approx \sum_{j=1}^N \left(\frac{I_{ej}}{I_j} - 1\right) \frac{I_{ej}}{I_{ej}^2} \int \frac{\varphi - \varphi_0}{\sigma^2} d\varphi = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \sigma} \approx \sum_{j=1}^N \left(\frac{I_{ej}}{I_j} - 1\right) \frac{I_{ej}}{I_{ej}^2} \int \frac{(\varphi - \varphi_0)^2 - \sigma^2}{\sigma^3} \rho_{ij} d\varphi = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial S}{\partial r} \approx \sum_{j=1}^N \left(\frac{I_{ej}}{I_j} - 1\right) \frac{I_{ej}}{I_{ej}^2} \int \frac{i_j + i_s}{1 + \beta r(i_j + i_s)} \rho_{ij} d\varphi = 0. \quad (13)$$

Riešenie týchto rovníc vieme nájsť Newtonovou-Raphsonovou metódou. Je známe, že táto

metóda konverguje iba lokálne a iteračný proces môže v princípe pri nevhodnom výbere počiatočného odhadu riešenia divergovať. Pri výbere počiatočného riešenia je preto potrebné postupovať obozretne. Samozrejme, poznatky z iného nezávislého merania (napr. BEEM) môžu byť pri tom nápomocné.

V skutočnosti táto úloha nemá jednoznačné riešenie. Rovnakú integrálnu I - V krivku môžeme získať pri viacerých kombináciach strednej hodnoty výšky bariéry rozdelenia, jeho strednej kvadratickej odchýlky a sériového odporu štruktúry. Naša metóda predpokladá, že dióda pozostáva z množstva čiastkových diód, ktoré sú spolu so svojimi sériovými odpormi radené paralelne. Inými slovami nepredpokladáme žiadny rozptyl prúdu v polovodiči. Iným prípadom je situácia, pri ktorej sa predpokladá úplný rozptyl prúdu v polovodičovom substráte. V tom prípade máme paralelne radené samotné čiastkové diódy a k nim je do série zaradený spoločný sériový odpor. Prvý prípad lepšie vystihuje nehomogénne diódy vytvorené na slabo dotovanom polovodiči a druhý na vysokodotovanom polovodičovom substráte. K druhému prípadu sa vrátíme neskôr a ukážeme, k akým závažným rozdielom vo výsledkoch vyhodnotenia tento rozptyl prúdu vedie.

5.3. Zdanlivá výška bariéry

Predpoklad Gaussovského rozdelenia výšok bariér nesie so sebou aj výhodu možnosti analyticky vypočítať zdanlivú výšku bariéry, ak poznáme parametre tohto rozdelenia. Zdanlivá výška bariéry bola prvýkrát vypočítaná Songom a kol. [14] a neskôr Wernerom a Güttlerom [15]. V tejto súvislosti sa v literatúre diskutovalo o integračných medziach, ktoré ohraničujú rozsah výšok bariér nachádzajúcich sa v štruktúre. Z matematického hľadiska je potrebné predpokladať, že sa v štruktúre môžu vyskytnúť výšky bariér v rozmedzí od $-\infty$ do $+\infty$. Z matematicko-formálneho hľadiska záporné hodnoty výšok bariér nie sú problémom. Z fyzikálneho pohľadu je však prinajmenšom zvláštne hovoriť o bariére, ak v skutočnosti ide o potenciálovú jamu [P10]. Ak hovoríme o bariére, automaticky máme na mysli jej pozitívne hodnoty. Pri nie veľmi nízkych teplotách merania a bežných štruktúrach sú našťastie stredné hodnoty výšok bariér a stredné kvadratické odchýlky také, že zastúpenie záporných výšok bariér v rozdelení je úplne zanedbateľné. Vzhľadom k exponenciálnej závislosti prúdu od napätia prúd tečúci cez bariéry s výškou väčšou ako je stredná výška bariéry veľmi rýchlo s rastúcou bariérou klesá. Horná integračná hranica sa zvykne brať ako dvojnásobok strednej výšky bariéry. Odrezaním záporných bariér a veľmi vysokých bariér je tento problém pri simulácii $I-V$ a $C-V$ charakteristík vyriešený. Samozrejme túto určitú deformáciu Gaussovho rozdelenia treba zväžiť pri normalizačnom koeficiente a normalizovať integrál z hustoty pravdepodobnosti na takto zúženom integračnom intervale. Tento postup odstráni potenciálne riziko určenia zápornej zdanlivej výšky bariéry, ktoré vyplývalo z presného analytického postupu stanoveného Songom a kol. [14] pre nízke teploty, nízke stredné hodnoty a veľké stredné kvadratické odchýlky rozdelenia.

5.4. Driftovo-difúzne priblíženie

Rozdiely medzi výškami bariér z $I-V$ a $C-V$ meraní sme študovali v práci [P5]. Ďalším experimentálne pozorovaným a teoreticky nevysvetleným javom je nelinearita C^2-V závislostí v oblasti napätí okolo napätia vyrovnaných pásov v priepustnom smere. Efekt je výraznejší pri nižších frekvenciách a väčšinou závisí od teploty, pri ktorej boli diódy žíhané. Pri interpretácii sa zvykne argumentovať, že odchýlky $I-V$ a $C-V$ v priepustnom smere od predpokladaného priebehu pramena z prechodu od kovom kontrolovaného k polovodiču kontrolovanému (majoritnými nosičmi) obsadeniu povrchových stavov.

Hlavný príspevok k diferenciálnej kapacite Schottkyho diódy pochádza zo zadného okraja oblasti priestorového náboja polovodiča. Rozloženie voľných nosičov náboja na rozhraní kovu a polovodiča a v blízkosti rozhrania dvoch rozdielnych bariér (nehomogenity v bariére) je veľmi málo závislé od zmeny priloženého napätia pri závernej polarizácii a pri malom priepustnom napätí.

Najprv popíšme prípad neinteragujúcich diód. Aproximácia ochudobnenia dáva pre diferenciálnu kapacitu Schottkyho diódy nasledovný vzťah

$$C = S \frac{dQ_D}{dV_D} = S \left[\frac{q \epsilon_s N_D}{2(V_i - \frac{kT}{q} - V)} \right]^{1/2}, \quad (14)$$

kde N_D je koncentrácia prímiesi, V_i je zabudované napätie a V priložené napätie. Graf závislosti C^2 od priloženého napätia je pre homogénnu koncentráciu dotujúcej prímiesi lineárny. V experimentálnej praxi sa však stretávame s prípadom lineárnej závislosti C^2-V pri závernej polarizácii, avšak pri prechode do oblasti priepustného napätia sa objavujú odchýlky od lineárneho priebehu. Nelinearity sa manifestujú ako dodatočná kapacita alebo naopak ako induktívna reaktancia. Tieto javy zatiaľ nie sú úplne objasnené a v literatúre sú spájané s povrchovými stavmi, injekciou minoritných nosičov náboja, javmi spojenými s nenulovým časom potrebným na prechod nosičov oblasťou priestorového náboja a pod. Vyskytol sa tiež názor, že induktívna reaktancia môže byť jednoducho dôsledkom inštrumentálnej chyby. Na tomto mieste by sme radi poznamenali, že z hľadiska $C-V$ merania sa dajú predpokladať ekvivalentné prejavy náboja v povrchových stavoch a redistribúcie voľných nosičov náboja v pripovrchovej oblasti polovodiča ako reakcie na zmenu vonkajšieho napätia. Koncepcia povrchových stavov však zápasí s pomerne vážnymi problémami v prípade neexistencie tenkej dielektrickej vrstvy medzi kovom a polovodičom.

Merať kapacitu Schottkyho diód v priepustnom smere je pomerne obtiažne kvôli veľkému vodivostnému prúdu, ktorý štruktúrou pri tejto polarizácii tečie. Kapacitu štruktúry je však možné simulovať pomocou tzv. driftovo-difúzneho priblíženia. Jeho podstatou je riešenie rovníc spojitosti pre elektróny aj diery a Poissonovej rovnice pre rozloženie náboja. V stave rovnováhy - bez časovej závislosti ide o sústavu rovníc

$$\begin{aligned}
 \Delta\varphi &= -(q/\epsilon_s)(p - n + N_d) \\
 \frac{\nabla \cdot J_n}{q} &= R \\
 J_n &= q(-\mu_n n \nabla \varphi + D_n \nabla n) \\
 \frac{\nabla \cdot J_p}{q} &= -R \\
 J_p &= q(-\mu_p p \nabla \varphi - D_p \nabla p).
 \end{aligned} \tag{15}$$

Výslednú rekombinačnú rýchlosť sme v našich výpočtoch považovali za nulovú. Štandardný postup riešenia takejto sústavy diferenciálnych rovníc využíva opäť Newtonovu-Raphsonovu metódu. Metóda však opäť konverguje iba lokálne a je preto potrebný dobrý počiatočný odhad riešenia.

Mayergoz [18] a Korman s Mayergozom [19] vyvinuli iteračnú metódu na riešenie takejto sústavy rovníc po diskretizácii. Metóda využíva Gummelovu blokovo-iteračnú techniku [20] na odpojenie Poissonovej rovnice a elektrónovej a dierovej rovnice spojitosti. Má dve výhody. Prvou je jej globálna konvergencia a druhou je skutočnosť, že nevyžaduje simultánne riešiť sústavu algebraických rovníc. Používa tzv. Slotboomove premenné (exponenciálne kvázifermiho potenciály) u a v definované vzťahmi

$$\begin{aligned}
 n &= n_i u \exp(\varphi / kT) \\
 p &= n_i v \exp(-\varphi / kT) \\
 u &= \exp(-\psi_n / kT) \\
 v &= \exp(\psi_p / kT)
 \end{aligned} \tag{16}$$

kde ψ_n a ψ_p sú kvázipotenciály pre elektróny a pre diery.

Skutočná kapacita štruktúry určená ako derivácia náboja indukovaného v štruktúre podľa napätia je daná vzťahom

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V} \approx \frac{Q_1 - Q_2}{V_1 - V_2}. \quad (17)$$

Pri numerických experimentoch sme používali pre určenie kapacity náboj indukovaný v dvoch napäťových stavoch vzdialených o 0,01 alebo 0,001 V bez zistenia rozdielu medzi výslednými kapacitami.

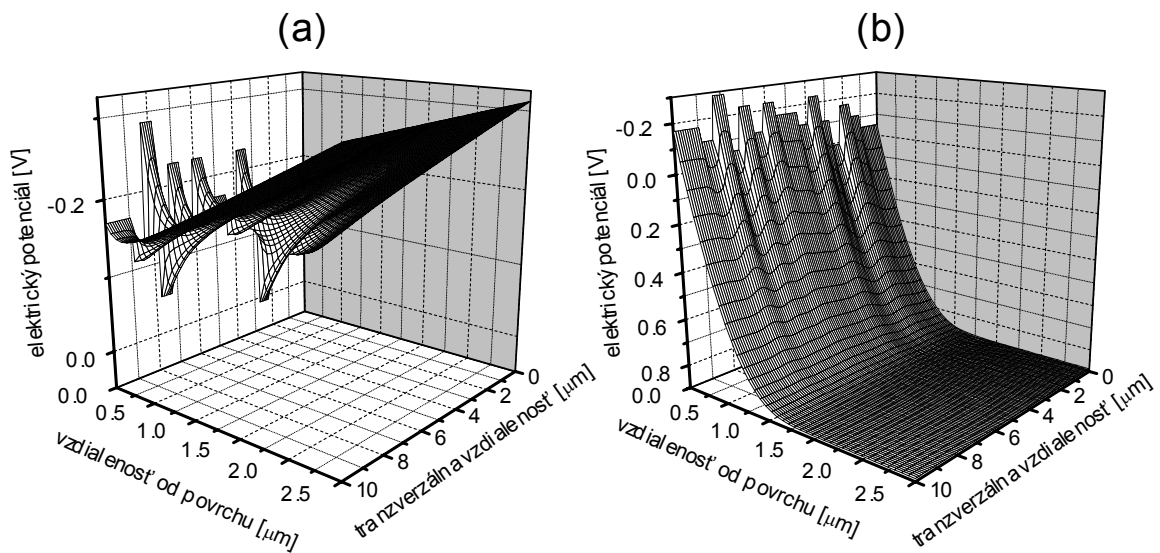
Na úplný popis vplyvu nehomogenity bariéry na jej kapacitu by bolo treba principiálne použiť trojrozmerný model štruktúry. Takýto model by vyžadoval neprijateľne veľký výpočtový čas aj pre relatívne malé siete. Fyzikálne ekvivalentné výsledky je však možné získať aj s použitím dvojrozmernej siete za predpokladu zmeny výšky bariéry iba v jednej dimenzii. Takýto postup významne znižuje celkový počet bodov siete potrebný na získanie poznatkov o vplyve nehomogenít na elektrické charakteristiky štruktúr.

V práci [P5] sme simulovali kapacitné závislosti nehomogénnej diódy s Gaussovským rozdelením nehomogenity výšky bariéry v dvoch modifikáciach. V prvom prípade susedili vedľa seba priestorovo partikulárne diódy, ktoré boli vedľa seba aj v energetickom rozložení – rozdiel vo výškach bariér susedných diód bol minimálny. V druhom prípade boli bariéry rozložené v priestore náhodne – pomocou generátora náhodných čísiel. V tomto prípade sú rozdiely medzi výškami dvoch susediacich bariér v priemere samozrejme vyššie.

Výsledkom štúdie je zistenie, že nehomogénna Schottkyho dióda so strednou výškou bariéry ako odpovedajúca homogénna dióda má veľmi podobný priebeh kapacity s napätím ako táto homogénna dióda. Takisto závislosť C^2-V je lineárna ako pri homogénnej dióde. $C-V$ krivky sú nerozoznatelné v závernom aj v priepustnom smere a obidve majú „anomálny“ kapacitný pik v priepustnom smere. Pik v prípade nehomogénnej diódy je však menej výrazný.

Tú istú numerickú metódu sme použili na vyšetrenie vplyvu energeticko-priestorovej korelácie medzi jednotlivými partikulárnymi diódami na $I-V$ krivky diód [P6]. Predpokladalo sa totižto, že táto korelácia a s ňou spojené zaškrtenie malých bariér a sedlový jav v priebehu potenciálu majú významný vplyv na $I-V$ krivky diód. Opäť sme použili Gaussovské rozdelenie nehomogenity výšok bariér. Diferenciálna forma riešených rovníc vplyv sedlového javu zahŕňa. Hrúbka diód bola pri simulácii zvolená ako približne dvojnásobok hrúbky oblasti priestorového náboja. Pri výpočtoch sme predpokladali diódy s dvomi koncentraciami prímiesí - 10^{21} and 10^{23} m^{-3} . Použitý interval výšok bariér musel byť z dôvodu reálneho času výpočtu obmedzený, t. j. najnižšie a najvyššie bariéry boli zanedbané. Napríklad v prípade rozdelenia so strednou výškou bariéry $\varphi_0 = 0,7 \text{ V}$ a $\sigma = 0,04 \text{ V}$ sme vzali v úvahu bariéry s výškami od 0,614 do 0,786 V a pre $\sigma = 0,08 \text{ V}$ interval bariér od 0,545 do 0,855 V.

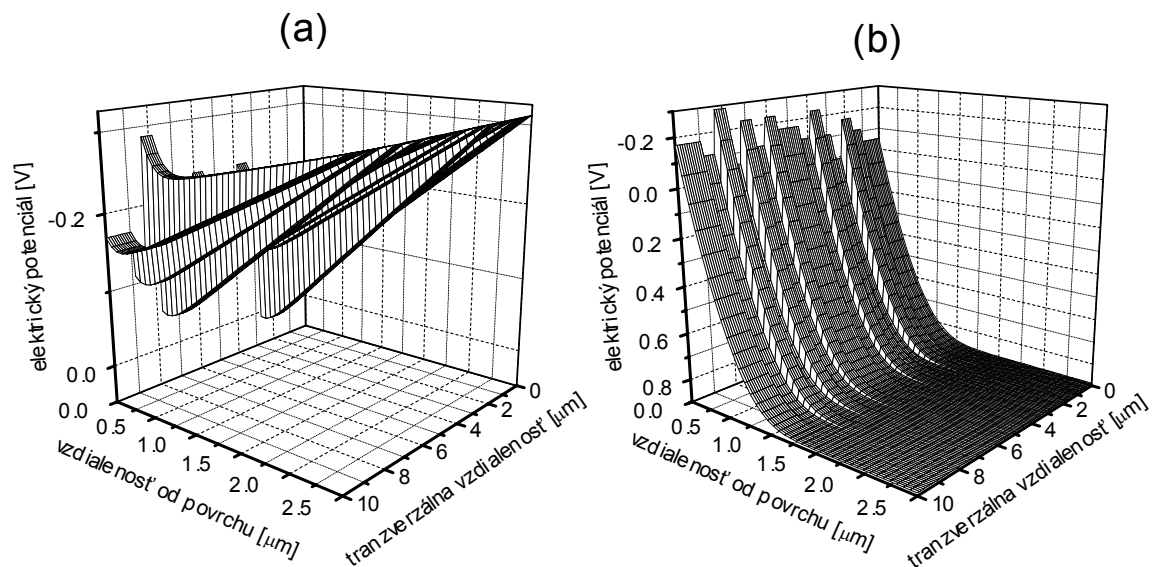
Opäťovne sme skúmali vplyv priestorovo-energetickej korelácie na výsledné $I-V$ a $C-V$ krivky. Určitá korelácia sa vzhľadom k fyzikálnym a chemickým podmienkam na rozhraní, ktoré sa väčšinou menia spojitě, dá vždy očakávať (obr. 1 a 2).



Obr. 1. Numericky spočítaný priebeh elektrického potenciálu pre štruktúru s rozmermi 10 $\mu\text{m} \times 0.1 \text{ m}$, stredná výška bariéry 0,7 V, štandardná odchýlka 0,08 V, koncentrácia prímiesi 10^{15} cm^{-3} , a (a) polarizácia 0,6 V v priepustnom smere a (b) 0,6 V v závernom smere.

Simulovali sme štruktúry s rovnakým relatívnym zastúpením jednotlivých partikulárnych diód ale s meniacim sa celkovým rozmerom štruktúry. Porovnanie výsledkov ukázalo minimálne rozdiely medzi malými a veľkými štruktúrami.

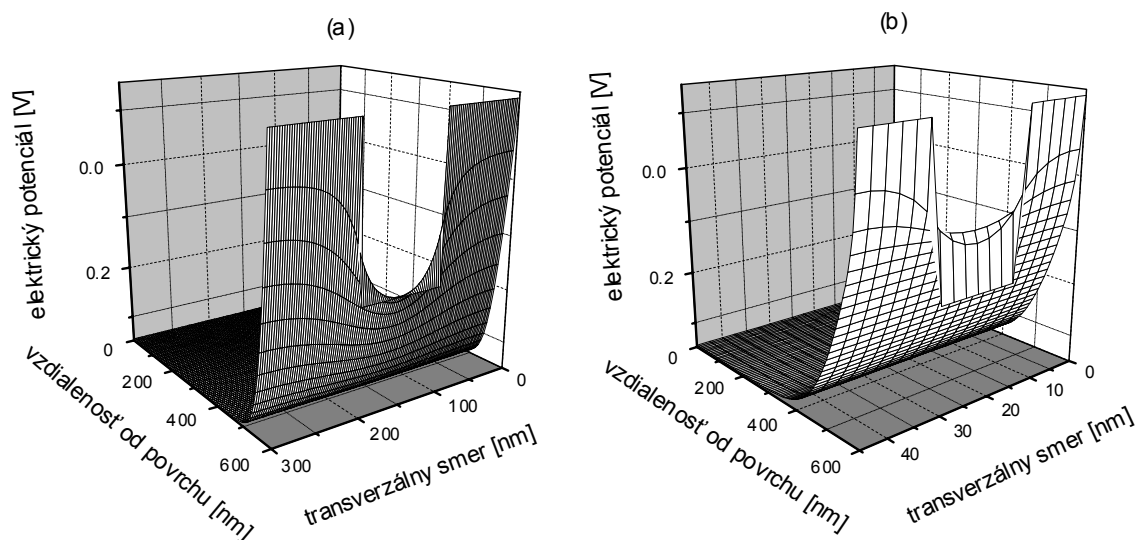
Výšky bariér počítané z C^2-V simulácií sú o niečo nižšie ako je stredná výška bariéry daného rozdelenia pre každú simulovanú štruktúru a sú vyššie ako zdanlivá výška bariéry spočítaná zo simulácie príslušnej $I-V$ krivky, čo je v súlade s experimentálne pozorovanými výsledkami. To ukazuje, že v štruktúrach s rozmerom nehomogenít väčším ako 112 nm sa neprejavuje vplyv efektu zaškrtenia.



Obr. 2. Numericky spočítaný priebeh elektrického potenciálu pre štruktúru s rozmermi 1 $\text{mm} \times 1 \text{ mm}$, stredná výška bariéry 0,7 V, štandardná odchýlka 0,08 V, koncentrácia prímiesi 10^{15} cm^{-3} , a (a) polarizácia 0,6 V v priepustnom smere a (b) 0,6 V v závernom smere.

Rovnakou metódou sme vyšetrovali vplyv koncentrácie dotujúcich atómov v kremíku na efekt zaškrtenia (pinch-off) potenciálu v blízkosti rozhrania kovu a polovodiča [P7] a výslednú zdanlivú bariéru diódy. Zistili sme, že tento vplyv dosahuje maximum v oblasti koncentrácií $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (obr. 3).

Driftovo-difúzne priblíženie sme ďalej použili na simuláciu I - V kriviek diód pripravených na polovodiči, ktorý bol nehomogénny v z -ovom rozmere, t. j. v smere do objemu polovodiča [P8, P9]. Tieto štruktúry mali na povrchu tenkú δ -dotovanú vrstvu s rovnakou alebo opačnou polaritou ako objem polovodiča. Rovnaká polarita sa často používa pri vytváraní Ohmického kontaktu a diódy s opačnou polaritou dopantu pri povrchu sa označujú ako diódy Shannonovho typu.



Obr. 3. Priebeh potenciálu pre koncentráciu prímеси $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ bez priloženého napätia. Rozmery nízko Bariérových oblastí sú (a) 101,65 nm a (b) 17,5 nm.

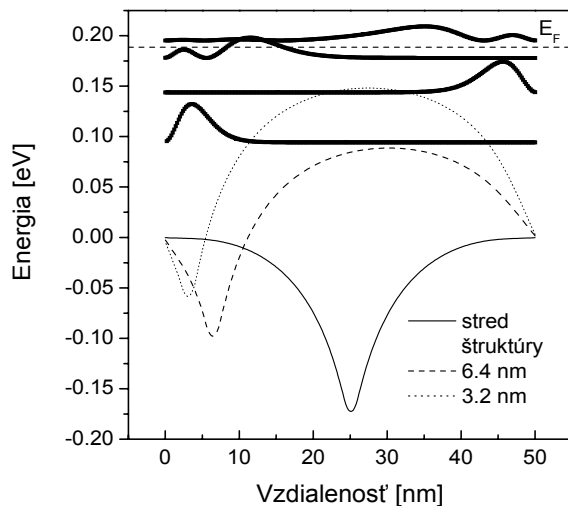
V práci [P10] sme vyšetrovali niektoré aspekty teplotnej závislosti prúdu v nehomogénnych diódach. Ukázali sme už spomenutú skutočnosť, že nekritické uplatnenie Gaussovského rozdelenia výšok bariér by teoreticky mohlo viesť pri nízkych teplotách a veľkých stredných kvadratických odchýlkach až k nefyzikálnym hodnotám zdanlivých výšok bariér, ktoré by spadali do záporných hodnôt, čo zrejme postráda fyzikálny zmysel.

5.5. Štruktúry s δ -dotovanými vrstvami

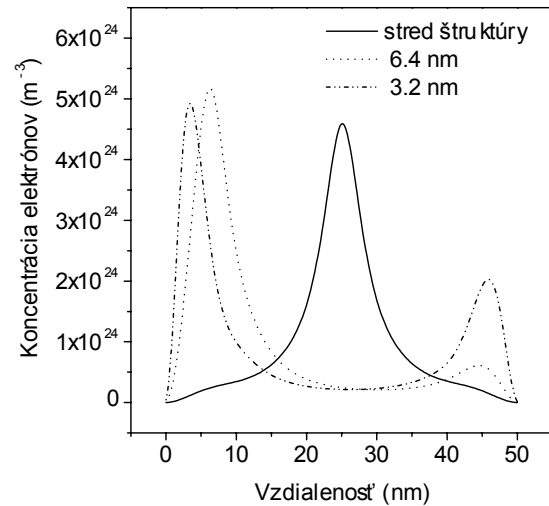
V práci [P11] sme zisťovali s akou presnosťou možno pomocou C - V merania určiť koncentráciu prímеси v δ -dotovaných vrstvách polovodiča. Koncentrácia prímеси sa pri tomto spôsobe merania zisťuje nepriamo z koncentrácie voľných elektrónov termicky uvoľnených z atómov dotujúcej prímеси. Pík elektrónovej koncentrácie je naspodu široký niekoľko Debyeových dĺžok. Rozmazanie elektrónovej koncentrácie v porovnaní s koncentráciou atómov ionizovanej prímеси je podmienené ich vzájomným previazaním prostredníctvom Poissonovej rovnice.

Otázkami elektrónovej štruktúry a obsadenia kvantových hladín elektrónov v subpásových (subband) hladinách v δ -dotovaných polovodičoch sme sa zaoberali

v práci [P12]. Špeciálne sme sa zaujímali o δ -dotované vrstvy umiestnené mimo stredu popisovanej štruktúry, tak ako je tomu pri využití týchto vrstiev na ovplyvnenie Ohmických a Schottkyho kontaktov. Zistili sme zaujímavý poznatok, možno v experimentálnej praxi a v literatúre aj prehliadaný. Existencia kvantovej



Obr. 4. Pribeh potenciálovej jamy pre rôzne polohy δ -dotovanej vrstvy v GaAs. Kvadrát vlnových funkcií a poloha Fermiho hladiny sú zobrazené pre vzdialenosť δ -dotovanej vrstvy od povrchu 3,2 nm a koncentrácia prímеси je $5 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$



Obr. 5. Pribeh elektrónovej koncentrácie pre plošnú koncentráciu prímеси $5 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ a rôzne polohy δ -dotovanej vrstvy. Poloha δ -dotovanej vrstvy je vždy naľavo od stredu vzorky.

potenciálovej jamy pri okraji polovodiča spojená s umiestnením δ -dotovanej vrstvy generuje vytvorenie druhej potenciálovej jamy pri druhom okraji polovodiča. Pri teoretických úvahách sa zvykne uvažovať neobmedzený rozmer polovodiča v smere k opačnému okraju štruktúry, čo obchádza reálny prípad konečného rozmeru súčiastky. V druhej potenciálovej jame sa takisto vytvorí dvojdimenzionálny (2D) elektrónový plyn. Vplyv vonkajšieho elektrického poľa a jeho orientácie na preobsadenie elektrónových hladín v jednotlivých kvantových jamách je obsahom práce [P13].

5.6. Teplotná závislosť I - V charakteristík

Štúdium teplotnej závislosti I - V kriviek umožňuje rozšírením experimentálnych poznatkov o jeden rozmer hlbšie poznať a analyzovať vodivostný mechanizmus riadiaci tok náboja cez rozhranie. Teplotnými závislosťami I - V charakteristík diód sme sa zaoberali teoreticky [P14] aj experimentálne [P15]. V prvom prípade sme simulovali pri rôznych teplotách driftovo-difúznym priblížením prúd n -Si diódou s tenkou pripovrchovou vrstvou s opačným typom vodivosti ako mal objem polovodiča. Zistili sme v súlade s experimentálnymi výsledkami známymi z literatúry, že bariéra Schottkyho diódy klesá s klesajúcou teplotou merania a naopak, faktor ideálnosti diódy s klesajúcou teplotou rastie. Vyvodili sme z toho záver, že pri nízkych teplotách termioiónová emisia nemusí byť rozhodujúcim transportným mechanizmom v takýchto štruktúrach. Simulácia teplotných závislostí C - V meraní ukázala pre tento spôsob extrakcie bariéry v podstate nezávislosť výšky bariéry od teploty.

V práci [P15] sme experimentálne analyzovali I - V charakteristiky Ni/Au/GaN diód s N- a Ga-polaritou. Pre obidva typy polarít GaN substrátu sme rovnako ako v práci [P14] zistili pokles výšky bariéry s klesajúcou teplotou. Rozdiel medzi výškami bariér pre jednotlivé polarities sme pripísali vplyvu fixného náboja na povrchu, ktorý je dôsledkom spontánnej polarizácie. Pri GaN s polaritou Ga zrejme pri teplotách nižších ako 200 K má na transport nosičov významný vplyv tunelovanie elektrónov. Vzhľadom na hodnoty koeficientu ideálnosti má tunelovanie v prípade N-polarity GaN významný vplyv už pri izbovej teplote.

5.7. Ohmický alebo Schottkyho kontakt?

K tomuto zamysleniu nás viedla séria publikácií [21-23], v ktorej autori skúmali nízke a podľa ich vyjadrenia [21] dokonca záporné bariéry Schottkyho diód pripravených na n -Si(100) polovodiči. Popudom k riešeniu tejto otázky bol fakt, že pri I - V meraní pri malých napäťových rozsahoch na kontaktoch vytvorených na polovodiči s malou koncentráciou dotujúcej prímеси nie je možné usúdiť, či je kontakt vo svojej podstate Ohmický, alebo máme do činenia so Schottkyho kontaktom s malou bariérou [P16]. Numerické metódy sa pri riešení tohoto problému opäť ukázali ako veľmi užitočné. Diskutovali sme charakter diód s rovnakou výškou bariéry pripravených na polovodiči s rôznou koncentráciou dotujúcej prímеси, ich I - V a C - V charakteristiky. I - V krivky takýchto diód majú podobný tvar, značný rozdiel možno očakávať pri C - V krivkách. Dôležitým výsledkom tejto štúdie je konštatovanie, že zdanlivo Ohmický kontakt pri danom napäťovom rozsahu sa môže ukázať byť usmerňujúcim pri zvýšení napäťového rozpätia merania. Vypracovali sme aj metódu na zistenie maximálnej Schottkyho bariéry diódy, ktorá má v danom napäťovom rozsahu ešte rovnakú, zdanlivo neusmerňujúcu charakteristiku ako Ohmický kontakt [P17].

5.8. Priesečníkové chovanie I - V kriviek

V poslednom období sa objavili v literatúre zaujímavé informácie o možnom pretínaní sa I - V kriviek Schottkyho diód meraných pri nižších teplotách. Z fyzikálneho hľadiska je efekt zaujímavý, lebo termoemísna teória predpokladá vyššiu energiu nosičov náboja pri vyššej teplote, a teda väčší počet nosičov náboja schopných pri vyššej teplote prekonať potenciálovú bariéru na rozhraní kov-polovodič. Pri napätiach väčších, ako je napätie spoločného bodu I - V kriviek, však tečie diódou väčší prúd pri nižšej teplote.

Spočiatku sa zdalo, že prekážkou pozorovania tohto javu bude sériový odpor diódy, ktorý je jej neoddeliteľnou súčasťou. My sme ukázali, že naopak, práve existencia sériového odporu je nevyhnutnou podmienkou pozorovania tohto javu aj u homogénnych diód. Pre obidva prípady - homogénnych i nehomogénnych diód so spoločným sériovým odporom sme odvodili analytický vzťah pre tzv. priesečníkové napätie. Je to minimálne napätie, pri ktorom majú I - T závislosti extrém. Naľavo aj napravo od tohto extrémálneho bodu možno nájsť pri danom napätí a vždy dvoch rôznych teplotách na I - V krivke rovnako veľké prúdy. Dotkneme sa najprv nehomogénnych diód, kde tento efekt nie je až taký prekvapivý.

Na spomínaný jav u nehomogénnych diód upriamili pozornosť Chand [24] a Chand a Bala [25]. Diskutovali tzv. analyticky a numericky generované krivky. Analyticky generované krivky v Chandovej terminológii sú I - V krivky generované pre štruktúry s jediným sériovým odporom. Je to vlastne systém diód radených paralelne s jedným spoločným odporom. Niekedy sa takéto diódy označujú ako interagujúce. Druhé usporiadanie, často označované ako neinteragujúce diódy, sme popísali vyššie.

Pri štúdiu priesečníkov I - V kriviek Schottkyho diód si treba uvedomiť, že významnú úlohu zohráva minimálne napätie, od ktorého vyššie má krivka I - T extrém. Toto napätie sa označuje ako “priesečníkové napätie”. Pre priesečníkové napätie nehomogénnych diód Chand odvodil vzťah

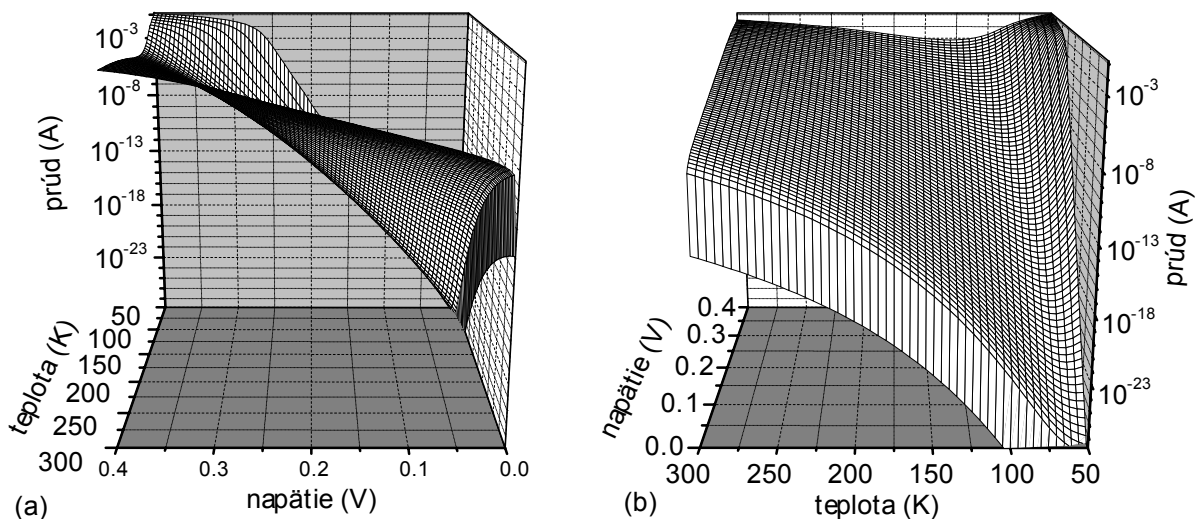
$$V_i = \bar{\varphi} + \frac{2kT}{q} - \frac{\sigma^2 q}{kT}. \quad (18)$$

Výpočet bol urobený pre ideálnu nehomogénnu diódu bez sériového odporu.

My sme riešili reálnu úlohu, v ktorej je treba vždy počítať s vplyvom existencie sériového odporu diódy. Pre oblasť napätí $V > 3kT/q$ sme odvodili analytický vzťah pre priesečníkové napätie aj so započítaním sériového odporu v tvare [P18]

$$V_i = \frac{2kT}{q} + \bar{\varphi} - \frac{\sigma^2 q}{kT} + RAA**T^2 e^2 \exp[-(\frac{\sigma q}{kT})^2]. \quad (19)$$

Vidieť, že toto napätie klesá s rastúcou strednou kvadratickou odchýlkou rozdelenia v dôsledku člena $\sigma^2 q/kT$ a závislosť od sériového odporu je znižovaná faktorom $\exp[-(\frac{\sigma q}{kT})^2]$. Výsledkom je, že priesečníkové napätie zostáva v oblasti, kde sa I - V krivky bežne merajú, aj v prípade väčšieho sériového odporu.



Obr. 6. $I=I(V,T)$ závislosť nehomogénnej GaAs Schottkyho diódy so strednou hodnotou výšky bariéry $\bar{\varphi} = 0,7$ V, štandardnou odchýlkou $\sigma = 0,06$ V a sériovým odporom $R = 1 \Omega$ z dvoch odlišných pohľadov.

Pri homogénnych diódach je situácia z hľadiska možnosti postihnúť priesečník I - V kriviek pri elektrických meraniach komplikovanejšia. Prípád bez vplyvu sériového odporu opäť študoval Chand [24]. V tomto prípade prišiel k záveru, že priesečník sa bežne experimentálne nepozoruje kvôli vplyvu sériového odporu, ktorý neumožní

prúdu neobmedzene rásť s napätím do oblasti, kde by sa mali ideálne $I-V$ krivky teoreticky pretnúť. Pre priesečníkové napätie odvodil Chand vzťah

$$V_i = \varphi + \frac{2kT}{q} . \quad (20)$$

Priesečníkové napätie teda spadá do napäťovej oblasti, kde pre ideálnu diódu už nemôže platiť klasický termoemisný vzťah pre prúd. Pre napätie väčšie ako je výška bariéry $V > \varphi$ bariéra na rozhraní kov–polovodič pre nosiče náboja už neexistuje a veľkosť prúdu pretekajúceho štruktúrou je určená už iba Ohmovým zákonom. Takže paradoxne práve neexistencia sériového odporu a nie jeho prítomnosť by spôsobila nemožnosť pozorovania priesečníka $I-V$ kriviek. Vychádzajúc z tejto úvahy sme podobným postupom ako pre nehomogénne diódy so spoločným sériovým odporom odvodili vzťah pre priesečníkové napätie v tvare [P19]

$$V_i = \varphi + \frac{2kT}{q} + RAA**T^2e^2 \quad (21)$$

a pre prípad s koeficientom ideálnosti diódy odlišným od hodnoty $n = 1$

$$V_i = n\varphi + \frac{2nkT}{q} + RAA**T^2e^2 . \quad (22)$$

Vec má však určitý háčik. Sériový odpor diód je tvorený odporom kvázineutrálnej oblasti polovodiča, odporom sériového kontaktu a odporom vonkajších prívodov. Nie všetky časti tohoto odporu sú škálované s plochou diódy. To znamená, že s klesajúcou plochou neklesá rovnako rýchlo aj odpor diódy. Ukázali sme, že na to, aby bol priesečník pozorovateľný pri dostatočne malých napätiach – napätie zhruba do $2V_2$ je potrebné, aby rozmery, napr. GaAs diódy, boli na úrovni rádovo jednotiek μm^2 a v prípade Si diód musí byť rozmer diód už v nanometrovej oblasti. Rozdiel v požadovaných rozmeroch GaAs a Si diód je daný rozdielom v hodnotách Richardsonovej konštanty pre jednotlivé materiály, ktorá vstupuje do vzťahu pre priesečníkové napätie. Väčšia hodnota tejto konštanty znamená vyššiu hodnotu priesečníkového napätia pre rovnaké ostatné parametre.

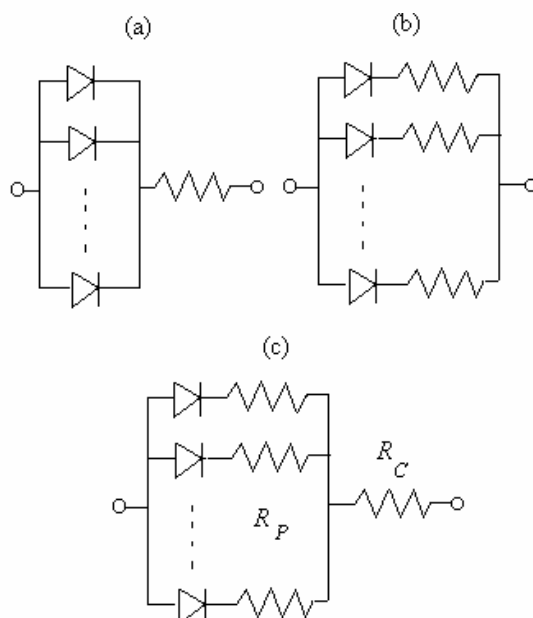
Dôsledkom faktu, že $I-V$ krivky merané pri rôznych teplotách sa podľa našich výpočtov vždy pretínajú je skutočnosť, že krivky konvergujú s rastúcim napätím k spoločnej hodnote prúdu v opačnom usporiadaní v smere prúdovej osi, než sme zvyknutí z bežných meraní predpokladať. Nízkotepelné krivky sa nachádzajú prúdovo vyššie ako vysokotepelné, čo je prekvapivé z pohľadu skúsenosti z merania diód veľkých rozmerov.

Pri porovnaní výsledkov pre nehomogénne a homogénne diódy vidieť, že priesečníky $I-V$ kriviek nehomogénnych diód sú napäťovo k sebe bližšie ako u homogénnych diód. Je to zrejme dôsledok toho, že nehomogénna dióda s jedným sériovým odporom môže byť nahradená pri danej teplote homogénnou diódou so zdanlivou bariérou, ktorá sa však s teplotou mení a preto v konečnom dôsledku pri rôznych teplotách pracujeme vlastne s rôznymi diódami.

5.9. Vplyv laterálneho rozptylu prúdu na extrahované parametre

Na záver spomeňme vplyv vyššie popísaného usporiadania sériového odporu nehomogénnych diód na extrahované parametre - výšku bariéry, koeficient ideálnosti a extrahovaný sériový odpor. Pre tri rôzne usporiadania sériového odporu u

nehomogénnych diód sme simulovali príslušné $I-V$ krivky pre rôzne teploty. V prípade úplného laterálneho rozptylu prúdu máme prípad s jediným spoločným sériovým odporom a v prípade nulového rozptylu ide o tzv. neinteragujúce diódy. Tretí prípad je prechodom medzi dvomi spomenutými a je zrejme skutočným a reálnym prípadom (obr. 7).



Obr. 7. Náhradná schéma nehomogénnej diódy (a) s úplným rozptylom prúdu (b) bez laterálneho rozptylu prúdu – dióda je tvorená súborom neinteragujúcich čiastkových diód a (c) s čiastočným rozptylom prúdu v polovodičovom substráte.

V prvom prípade spoločného sériového odporu môžeme pre celkový prúd tečúci nehomogénnou diódou písať

$$I = \int_0^{2\bar{\varphi}} AA^{**}T^2 \rho(\varphi) \exp(-q\varphi/kT) \{ \exp[q(V - RI)/kT] - 1 \} d\varphi, \quad (23)$$

kde A je plocha diódy, A^{**} je Richardsonova konštanta, $\rho(\varphi)$ je Gaussovské rozdelenie výšok bariér a $\bar{\varphi}$ je stredná hodnota rozdelenia. Rovnicu je samozrejme potrebné riešiť numericky pre každý bod $I-V$ krivky.

V prípade bez laterálneho rozptylu prúdu bude vzťah pre celkový prúd diódou

$$I = \int_0^{2\bar{\varphi}} A\rho(\varphi)j(\varphi)d\varphi, \quad (24)$$

kde

$$j(\varphi) = A^{**}T^2 \exp(-q\varphi/kT) \{ \exp[q(V - rj(\varphi))/kT] - 1 \}, \quad (25)$$

prítom $r = RA$ je plošný odpor (Ωm^2) a $j=j(\varphi)$ je prúdová hustota ako funkcia výšky bariéry.

V treťom najobecnejšom prípade píšeme pre prúdovú hustotu vzťah

$$j(\varphi) = A^{**}T^2 \exp(-q\varphi/kT) \{ \exp[q(V - rj(\varphi) - R \int_0^{2\bar{\varphi}} Aj(\varphi)\rho(\varphi)d\varphi)/kT] - 1 \} \quad (26)$$

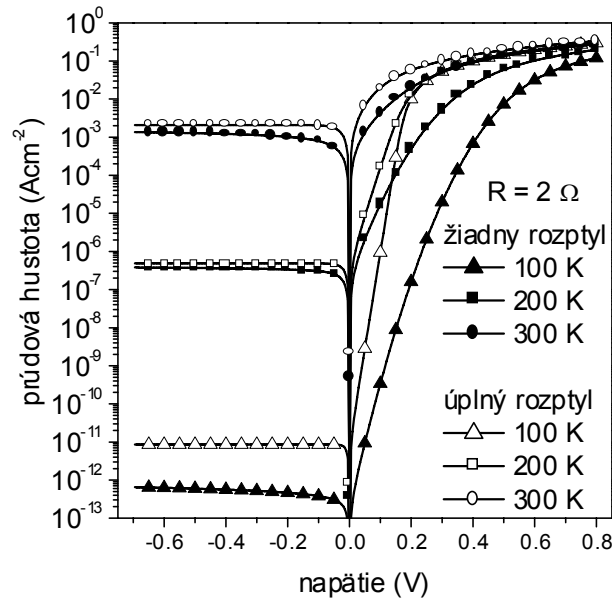
a vzťah pre celkový prúd bude

$$\int_0^{\bar{\varphi}} A\rho(\varphi)j(\varphi)d\varphi = \int_0^{\bar{\varphi}} AA^{**}T^2\rho(\varphi)\exp(-q\varphi/kT)\{\exp[q(V-rj(\varphi)-R\int_0^{\bar{\varphi}}A\rho(\varphi)j(\varphi)d\varphi)/kT]-1\}d\varphi \quad (27)$$

alebo

$$I = \int_0^{\bar{\varphi}} AA^{**}T^2\rho(\varphi)\exp(-q\varphi/kT)\{\exp[q(V-rj(\varphi)-RI)/kT]-1\}d\varphi. \quad (28)$$

Vo vnútornej iteračnej slučke sme riešili prúd tečúci každou elementárnou diódou s danou výškou bariéry a vo vonkajšej slučke potom celkový prúd [P20] (obr. 8).



Obr. 8. Simulované I - V krivky nehomogénnej Si Schottkyho diódy s $\bar{\varphi} = 0,7$ V, $\sigma = 0,08$ V a $R = 2\Omega$. Krivky sú generované pre prípad úplného a žiadneho rozptylu prúdu v substráte a teploty 100, 200 a 300 K.

Všeobecne sa má za to, že odklon koeficientu ideálnosti od hodnoty $n = 1$ je mierou odklonu vodivostného mechanizmu diódy od termoemisného mechanizmu. Naše výsledky ukazujú veľmi dôležitú skutočnosť, že aj v prípade čistého termoemisného vodivostného mechanizmu môže byť výsledný koeficient ideálnosti diódy odlišný od jednotky, ak máme do činenia s nehomogénnou diódou s rozptýleným odporom. Naopak, aj pre nehomogénnu diódu môže byť výsledný koeficient ideálnosti rovný jednotke, ak je sériový odpor spoločný všetkým diódam. Sériový odpor možno pomerne jednoducho extrahovať z I - V krivky diódy v prípade homogénnej diódy. V prípade nehomogénnej diódy je však situácia podstatne zložitejšia.

Dôvod tohoto výsledku je nasledovný. Napät'ový úbytok na spoločnom odpore v prípade úplného rozptylu prúdu v polovodiči je pre všetky čiastkové diódy rovnaký a na samotných diódach je v tomto prípade rovnaký potenciálový rozdiel. Situácia je odlišná pri iba čiastočnom, prípadne žiadnom laterálnom rozptyle prúdu v polovodiči. Skutočné rozdiely napätia na čiastkových diódach sa teraz menia od diódy k dióde.

Výsledná I - V krivka v tomto prípade nemôže byť fitovaná jedinou exponenciálou s koeficientom ideálnosti $n = 1$. Koeficient ideálnosti svojim charakterom a polohou v exponenciálnom člene v podstate redukuje priložené napätie na diódu. Tretí parameter – sériový odpor môže byť pri tomto usporiadaní vyhodnotený fitovacím programom tiež iba ako zdanlivý, pretože nepoznáme a z merania nemôžeme zistiť jeho skutočné usporiadanie.

Naproti tomu, jediný parameter, ktorého hodnotu extrahujeme z diódy ako zdanlivú v prípade jediného spoločného sériového odporu, je zdanlivá výška Schottkyho bariéry. Koeficient ideálnosti v tomto prípade vyjadruje skutočný koeficient ideálnosti za predpokladu, že je u všetkých partikulárnych diód rovnaký a extrahovaný sériový odpor je skutočným sériovým odporom diódy.

6. Závery pre realizáciu v spoločenskej praxi a pre ďalší rozvoj vedy

Prezentované štúdie predstavujú ucelený súbor prác posúvajúcich metódy analyzujúce transport nosičov cez rozhranie kov–polovodič, ktoré je základným stavebným prvkom polovodičovej elektroniky, na kvalitatívne vyššiu úroveň. Dovtedajšie metódy sa pri vyhodnocovaní elektrických vlastností Schottkyho diód v prevažnej miere orientovali na pomerne jednoduché a približné postupy.

Tento pôvodný postup v podstate neumožňoval extrakciu takéto dôležitého parametra štruktúry, akou je jej sériový odpor. Zmenu tohto stavu priniesla až veľmi dôležitá práca Nordeho [26]. Jednoduchý spôsob vyhodnotenia takisto absolútne neposkytoval možnosť urobiť analýzu elektrických parametrov v prípade nehomogénnych diód, pri ktorých dióda nie je charakterizovaná jednou ostrou bariérou ale viacerými rôznymi bariérami, prípadne celým spektrom bariér s daným štatistickým rozložením v štruktúre.

Numerický postup umožnil samozrejme aj vyhodnotenie sériového odporu nehomogénnej diódy, ktorý dovtedy nebolo absolútne možné používanými postupmi zo štruktúry extrahovať. Vypracovali sme nielen numerickú metódu na získanie troch štandardných parametrov z I - V krivky – výšky bariéry, koeficientu ideálnosti a sériového odporu homogénnych diód, ale takisto metódu na určenie parametrov štatistického rozdelenia výšok bariér – strednej hodnoty rozdelenia a strednej kvadratickej odchýľky rozdelenia spolu so sériovým odporom za predpokladu, že štatistické rozdelenie má Gaussovský charakter. V tomto prípade ide o riešenie spomínanej inverznej úlohy, keď z integrálnej krivky, ktorou je I - V charakteristika, spätne analyzujeme priebeh podintegrálnej funkcie.

Pri vyhodnocovaní nehomogénnych diód sa autori v prevažnej miere snažia držať teórie a postupu vypracovaného Tungom [8,10]. Tento postup primárne vychádza z predpokladu, že dióda je homogénna a v nej sú izolované ostrovčeky majúce iné bariérové parametre. Teda akési homogénne pozadie, z ktorého vystupujú ojedinelé nehomogenity. My sme rozpracovali postup, ktorý nevníma nehomogénne diódy ako „defektné“ homogénne diódy, ale zmes diód s roznoými výškami bariér chápe ako dôsledok štatistického rozloženia určitého fyzikálneho parametra štruktúry, napr. kryštalického usporiadania na rozhraní kov–polovodič, štatistického rozloženia hrúbky tenkej dielektrickej vrstvy na rozhraní a pod. Driftovo-difúznou metódou sme

ukázali, že existencia štatistického rozdelenia výšok bariér nevedie k tak významnej zmene parametrov diódy, ako je tomu v prípade „defektnej“ teórie Tunga.

Analyzovali sme vplyv koncentrácie atómov dotujúcej prímеси na efekt zaškrtania (pinch-off). Ukázali sme, že susedstvo dvoch bariér z rozdelenia dosahuje v závislosti od koncentrácie dotujúcich atómov prímеси najväčší vplyv na zdanlivú bariéru diódy pri koncentrácii okolo 10^{16} cm^{-3} . Vplyv na zdanlivú výšku bariéry a koeficient ideálnosti je pre túto koncentráciu najväčší.

Upozornili sme aj na vzťah Schottkyho a Ohmických kontaktov. Za ohmické kontakty sa považujú kontakty kovu s polovodičom, pri ktorých nevzniká pod rozhraním v oblasti polovodiča oblasť priestorového náboja, alebo keď vzniká, tak je taká tenká, že nosiče náboja cez ňu tunelujú. Za určitých okolností však môžeme mať do činenia so Schottkyho kontaktom, ktorý sa pri elektrických meraniach manifestuje ako Ohmický. Môže k tomu dôjsť, ak je Schottkyho bariéra relatívne nízka (0.35 – 0.4 V) a koncentrácia dotujúcej prímеси v polovodiči nízka, a teda sériový odpor štruktúry vysoký. Ukázali sme, že I - V krivky takejto štruktúry môžu v obmedzenom napäťovom rozsahu vykazovať linearitu spájanú s Ohmickým chovaním. Je to dôsledok toho, že sériový odpor ovplyvňuje vedenie prúdu už v závernom smere a krivka je potom napäťovo symetrická. Efekt je možné odhaliť meraním charakteristiky v širšom napäťovom rozsahu.

Ďalším príspevkom je podrobná analýza priesečnickového chovania I - V kriviek Schottkyho diód a vplyvu sériového odporu diódy na možnosť jeho experimentálneho pozorovania. Pre obidva prípady, ako pre homogénne, tak aj pre nehomogénne diódy sme odvodili analytický vzťah pre napätie, pri ktorom sa dá očakávať priesečník I - V kriviek diódy meraných pri rôznych teplotách. Možnosť nájdenia takéhoto vzťahu v uzatvorenej forme je pomerne prekvapivá, pretože pri započítaní sériového odporu to nie je možné už ani pre prúd tečúci diódou. Ukázali sme, že na to, aby bol efekt pozorovateľný pri dostatočne malých napätiach je potrebné, aby napr. v prípade Si diód bol ich rozmer v nanometrovej oblasti, čo je zrejme aj dôvodom, prečo sa bežne tento jav nepozoruje.

Úplne nové a veľmi zaujímavé výsledky sme získali pri vyšetrení vplyvu laterálneho rozptylu prúdu v polovodičovom substráte diódy na jej parametre. Existencia úplného laterálneho rozptylu prúdu zabezpečí, že z I - V merania pri jednej teplote nemôžeme usúdiť, či je dióda homogénna alebo nie. Prípadná nehomogenita diódy nemá v tomto usporiadaní vplyv na koeficient ideálnosti. Na nehomogenitu výšky bariéry možno súdiť iba ak bude výška bariéry iná pre inú teplotu merania. V prípade žiadneho laterálneho rozptylu prúdu bude faktor ideálnosti odlišný od jednotky. Je teda zrejme, že samotná nehomogenita výšky bariéry nie je automaticky príčinou nejednotkového koeficientu ideálnosti, ale je to podmienené aj neúplným rozptylom prúdu v polovodiči. Po prvýkrát bolo takto preukázané, že aj pri čistom termoemisnom móde vedenia prúdu cez rozhranie kov-polovodič môže Schottkyho dióda vykazovať koeficient ideálnosti odlišný od jednotky.

Všetky tieto dosiahnuté teoretické výsledky sú priamo využiteľné v mikroelektronických prvkoch, kde sú prechody kov-polovodič buď priamo funkčnými súčiastkami (diódy), ich časťami (hradlový kontakt vo všetkých typoch MESFET tranzistorov) alebo sprostredkujú nevyhnutný kontakt polovodičovej aktívnej časti súčiastky s ďalšími súčiastkami a obvody.

7. Literatúra

1. Schottky, W., *Naturwiss.* **8** (1938) 299.
2. Mott, N.F., *Proc. Cambridge Phil. Soc.* **34** (1938) 568.
3. Bardeen, J., *Phys. Rev.* **71** (1947) 717.
4. Sze, M.S., *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, New York, 1981.
5. Ohdomari, I. and Tu, K.N., *J. Appl. Phys.* **51** (1980) 3735.
6. Freeouf, J.L., Jackson, T.N., Laux, S.E, and Woodall, J.M., *Appl. Phys. Lett.* **40** (1982) 634.
7. Freeouf, J.L., Jackson, T.N., Laux, S.E, and Woodall, J.M., *J. Vac. Sci. Technol.* **21** (1982) 570.
8. Tung, R.T., *Appl. Phys. Lett.* **58** (1991) 2821.
9. Sullivan, J.P., Tung, R.T., and Pinto, R.M., *J. Appl. Phys.* **70** (1991) 7403.
10. Tung, R.T., *Phys. Rev. B* **45** (1992) 13 509.
11. Olbrich, A., Vancea, J., Kreupl, F., and Hoffmann, J. *Appl. Phys.* **83** (1998) 358.
12. Ru, G.-P., Qu, X.-P., Zhu, S.-Y., and Li, B.-Z., *J. Vac. Sci. Technol. B* **18** (2000) 1942.
13. Talin, A.A., Williams, R.S., Morgan, B.A., Ring, K.M., and Kavanagh, K.L., *J. Vac. Sci. Technol. B* **12** (1994) 2634.
14. Song, Y.P., Van Meirhaeghe, Laflère, E.H, and Cardon, F., *Solid-State Electron.* **29** (1986) 633.
15. Werner J.H., Güttler, H.H., *J. Appl. Phys.* **69** (1991) 1522.
16. Horváth, Zs.J., *Vacuum* **46** (1995) 963.
17. Talin, A.A., Williams, R.S., Morgan, B.A., Ring, K.M., and Kavanagh, K.L., *Phys. Rev. B* **49** (1994) 16 474.
18. Mayergoyz, I.D., *J. Appl. Phys.* **59** (1986) 195.
19. Korman, C.E., Mayergoyz, I.D., *J. Appl. Phys.* **68** (1990) 1324.
20. Gummel, H.K., *IEEE Trans. Electron. Devices* ED-**11** (1964) 455.
21. Tao, M., Agarwal, S., Maldonado, E., and Kirk, W.P., *Solid-State Electron.* **48** (2004) 335.
22. Tao, M., Udeshi, D., Basit, N., Maldonado, E., and Kirk, W.P., *Appl. Phys. Lett.* **82** (2003) 1559.
23. 21 Tao, M., Agarwal, S., Udeshi, D., Basit, N., Maldonado, E., and Kirk, W.P., *Appl. Phys. Lett.* **83** (2003) 2593.
24. Chand, S., *Semicond. Sci. Technol.* **19** (2004) 82.
25. Chand, S. and Bala, *Appl. Surf. Sci.* **252** (2005) 358.
26. Norde, H., *J. Appl. Phys.* **50** (1979) 5052.

8. Štúdie uchádzača tvoriace predmet dizertačnej práce

- [P1] **Osvald, J.** On barrier height inhomogeneities at polycrystalline metal-semiconductor contacts, *Solid-State Electron.* **35** (1992) 1629-32.
- [P2] **Osvald, J.** and Lalinský T., Barrier height enhancement in WSi_x/GaAs Schottky diodes by rapid thermal annealing, *J. Mat. Sci.: Mater. Electronics* **4** (1993) 267-70.
- [P3] Dobročka, E. and **Osvald J.**, Influence of barrier height distribution on the parameters of Schottky diodes, *Appl. Phys. Lett.* **65** (1994) 575-7.
- [P4] **Osvald, J.** and Dobročka, E., Generalized approach to the parameter extraction from I - V characteristics of Schottky diodes, *Semicond. Sci. Technol.* **11** (1996)1198-202.
- [P5] **Osvald, J.** and Burian, E., C - V dependence of inhomogeneous Schottky diodes, *Solid-State Electron.* **42** (1998) 191-5.
- [P6] **Osvald, J.**, Numerical study of electrical transport in inhomogeneous Schottky diodes, *J. Appl. Phys.* **85** (1999) 1935-42.
- [P7] **Osvald, J.**, Doping concentration dependence of apparent parameters of Schottky diodes with low-barrier defects, *Semicond. Sci. Technol.* **16** (2001) 197-201.
- [P8] **Osvald, J.**, Schottky diodes with a δ -doped near-surface layer, *J. Appl. Phys.* **90** (2001) 6205-9.
- [P9] **Osvald, J.**, Numerical study of barrier height enhancement in $n\text{-In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ Schottky diodes using a p-type near-interface layer, *phys. stat. sol. (c)* **0** (2003) 928-33.
- [P10] **Osvald, J.**, New aspects of the temperature dependence of the current in inhomogeneous Schottky diodes, *Semicond. Sci. Technol.* **18** (2003) L24-6.
- [P11] **Osvald, J.**, C - V measurement of a doping profile of δ -doped GaAs and its spatial resolution – numerical study, *Acta Physica Slovaca* **53** (2003) 129-33.
- [P12] **Osvald, J.**, Self-consistent analysis of Si δ -doped layer placed in a non-central position in GaAs structure, *Physica E* **23** (2004) 147-51.
- [P13] **Osvald, J.**, Electronic properties of a near surface Si δ -doped GaAs under an applied electric field, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** (2004) 2655-9.

- [P14] **Osvald, J.**, and Horváth, Zs.J., Theoretical study of the temperature dependence of electrical characteristics of Schottky diodes with an inverse near-surface layer, *Appl. Surf. Sci.* **234** (2004) 349-54.
- [P15] **Osvald, J.**, Kuzmík, J., Konstantinidis, G., Lobotka, P., and Georgakilas, A., Temperature dependence of GaN Schottky diodes I - V characteristics, *Microelectr. Engn.* **81** (2005) 181-7.
- [P16] **Osvald, J.**, Comment on “Negative Schottky barrier between titanium and n-type Si(001) for low-resistance ohmic contacts”, *Solid-State Electron.* **48** (2004) 2347-9.
- [P17] **Osvald, J.**, Ohmic contacts to moderately doped semiconductors – are they really Ohmic or low-barrier Schottky contacts?, *Semicond. Sci. Technol.* **20** (2005) 611-4.
- [P18] **Osvald, J.**, Series resistance influence on intersecting behaviour of inhomogeneous Schottky diodes I - V curves, *Solid-State Electron.* **50** (2006) 228-31.
- [P19] **Osvald, J.**, Intersecting behaviour of nanoscale Schottky diodes I - V curves, *Solid State Commun.* **138** (2006) 39-42.
- [P20] **Osvald, J.**, Influence of lateral current spreading on the apparent barrier parameters of inhomogeneous Schottky diodes, *J. Appl. Phys.* **99** (2006) 033708.

9. Ďalšie štúdie uchádzača majúce väzbu na dizertačnú prácu

9.1. Publikované štúdie

- [1] **Osvald, J.**, and Šandrik, R., Interdiffusion between some refractory metal silicides and GaAs, *Thin Solid Films* **169** (1989) 223-8.
- [2] Aristov, V.Yu., Le Lay, G., Soukiassian, P., Hricovini, K., Bonnet, J.E., **Osvald, J.**, Olsson, O., *Europhys. Lett.* **26** (1994) 359-64.
- [3] Aristov, V.Yu., Le Lay, G., Hricovini, K., Talebib-Ibrahimi, A., Dumas, P., Günther, R., **Osvald, J.**, Indlekofer, G., Nearly complete tuning of the Fermi level position at a prototypical meta-silicon interface – lead on unpinned Si(111)1x1-H, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **68** (1994) 419-26.

- [4] Aristov, V.Yu., Le Lay, G., Soukiassian, P., Hricovini, K., Bonnet, J.E., **Osvald, J.**, Olsson, O., Cs-induced highest E_F jump above InAs(110) conduction-band minimum, *J. Vac. Sci. Technol. B* **12** (1994) 2709-12.
- [5] Dobročka, E. and **Osvald, J.**, Response to "Comment on 'Influence of barrier height distribution on the parameters of Schottky diodes'", *Appl. Phys. Lett.* **66** (1995) 3069.
- [6] **Osvald, J.**, Hricovini, K., Le Lay, G., and Aristov, V.Yu., Pb/Si(111)1x1-H Schottky barrier height, *Fizika A* **4** (1995) 191-7.
- [7] Lalinský, T., **Osvald, J.**, Mozolová, Ž., Šišolák, J. and Constantinidis, G., Ir-Al bimetallic Schottky contact systems on GaAs, *Fizika A* **4** (1995) 431-7.
- [8] Lalinský, T., **Osvald, J.**, Machajdík, D., Mozolová, Ž. and Šišolák, J., High temperature stable Ir-Al/n-GaAs Schottky diodes: Effect of the barrier height controlling, *J. Vac. Sci. Technol. B* **14** (1996) 657-61.
- [9] Lalinský, T., Breza, J., Vogrinčič, P., **Osvald, J.**, Mozolová Ž. and Šišolák, J., Iridium-based multilayer contacts to n-GaAs, *Solid-State Electron.* **42** (1998) 205-10.
- [10] **Osvald, J.**, Response to „Comment on 'Numerical study of electrical transport in inhomogeneous Schottky diodes'“, *J. Appl. Phys.* **88** (2000) 7368-9.

9.2. Príspevky v zborníkoch z konferencií

- [1] **Osvald, J.**, Pavlenda, P., Stabilita vrstiev WSi_x na GaAs pri vysokých teplotách. Zb. zo 6. Čs. konferencie o tenkých vrstvách 1987, Eds. Hájek, Z., Růžička, T., Mariánské Lázně, JČSMF 1987, II. díl, p. 175.
- [2] **Osvald, J.**, Pavlenda, P., Příprava a vlastnosti vrstiev WSi_x pre metalizáciu IO. Zb. Integrované obvody '87, Velké Karlovice, 1987, p. 100.
- [3] **Osvald, J.** and Dobročka, E., The influence of postimplantation annealing on stresses in GaAs waters. In: Proc. 3rd Conf. on Physics and Technology of GaAs and other III-V Semiconductors. Ed. Kordoš, P. Zürich, Trans. Tech. Publ. 1989, p. 219.
- [4] Aristov, V.Yu., Le Lay, G., Hricovini, K., Taleb-Ibrahimi, A., **Osvald, J.**, Dumas, P., Günther, R., and Indlekofer, G., Tuning the Fermi level position through nearly the whole gap at a non-reactive metal-silicon interface. In:

Formation of Semicond. Interfaces. Proc. 4th Int. Conf. Forschungszentrum Jülich. Ed.: Lengeler, B., Lüth, H., Singapore, World Science, 1993, p. 245.

- [5] **Osvald, J.** and Lalinský, T., The influence of rapid thermal annealing on the WSi_x/GaAs Schottky barrier height. In: Ed. Tvarožek, V. and Németh, Š.: Proc. of 7th Czecho-Slovak Conference on Thin Films, Liptovský Mikuláš 1993, p. 165.
- [6] Le Lay, G., Aristov, V.Yu., Hricovini, K., Taleb-Ibrahimi, A., Dumas, P., **Osvald, J.**, and Indlekofer, G., Schottky limit on ideally H-terminated unpinned silicon(111) surfaces. In: Control of Semiconductor Interfaces. Proc. 1st Int. Symposium on Control of Semiconductor Interfaces. Ed.: Ohdomari, I. Amsterdam, Elsevier 1994, p. 39.
- [7] Lalinský, T., **Osvald, J.**, Breza, J., Vogrinčič, P., Mozolová, Ž., and Šišolák, J., Indium-based multilayer contact systems to n-GaAs. In: Proc. Int. Conf. Advanced Semiconductor Devices and Microsystems - ASDAM '96. Ed. Lalinský, T., Dubecký, F., Osvald, J., Haščík, Š., Bratislava, 1996, p. 33.
- [8] **Osvald, J.** and Burian, E., C - V dependencies of inhomogeneous Schottky diodes. In: Proc. of the Int. Conf. on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems - ASDAM '96. Eds.: Lalinský, T., Dubecký, F., Osvald, J., Haščík, Š., Bratislava, 1996, p. 177.
- [9] **Osvald, J.** and Burian, E., Self-consistent analysis of electronic structure of coupled δ -doped layers in GaAs. In: Heterostructure Epitaxy and Devices - HEAD'97, Eds. Kordoš, P. and Novák, J. NATO ASI Series 4/45. Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 1998, p. 79.
- [10] **Osvald, J.**, The influence of the pinch-off effect on I-V curves of inhomogeneous Schottky diodes. In: Proc. 2nd Int. Conf. on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems - ASDAM '98. Ed.: Breza, J. Piscataway, IEEE 1998, p. 141.
- [11] **Osvald, J.**, Delta-doped layer influence on Schottky diode parameters. In: Int. Conf. Advanced Semiconductor Devices Microsystems - ASDAM 2000. Ed. Osvald, J., Haščík, Š., Kuzmík, J., and Breza, J., Piscataway. IEEE 2000, p. 391.
- [12] **Osvald, J.**, C - V curves of Schottky diodes with a near-surface δ -doped layer. In: Proc. of the 37th Int. Conf. on Microelectronics, Devices and Materials and the Workshop on Optoelectronic Devices and Applications. Eds. Smole, F., Topič, M., Šorli, I. Ljubljana, MIDEM, Society for Microelectronics, Electronic Components and Materials 2001, p. 155.

- [13] **Osvald, J.**, *C-V* measurement of a doping profile of δ -doped GaAs and its spatial resolution, Proc. 3rd SSSI, Solid State Surfaces and Interfaces III, Nov 19-21, 2002, Smolenice, Slovakia, p. 59.
- [14] **Osvald, J.**, Electronic properties of near surface Si delta-doped GaAs, Proc. 3rd SSSI, Solid State Surfaces and Interfaces III, Nov 19-21, 2002, Smolenice, Slovakia, p. 61.

9.3. Kapitoly v monografiách

- [1] Missous, M., Morgan, D.V., Wood, J., Grovenor, C.R.M., Kendelewicz, T., McGlip, J.F., Duke, C.B., **Osvald, J.**, Schwartz, G.P., and Wieder, H.H., Interfaces and contacts. In: Properties of Gallium Arsenide, 2nd ed., emis datareviews series, INSPEC, London and New York, The Institution of Electrical Engineers 1990, p. 383.
- [2] **Osvald, J.**, Structure of silicide/GaAs interfaces. In: Properties of Gallium Arsenide, 3rd ed., edited by Brozel, M.R. and Stillman, G.E., emis datareviews series, INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, London, 1996, p. 516.
- [3] **Osvald, J.**, Electrical properties of inhomogeneous Schottky diodes, in „New Developments in Semiconductor Research“, ed. Miller, T.S., Nova Science Publishers, New York, 2005, p. 113.

10. Citačný ohlas prác uchádzača

* označené citácie sú mimo databázy SCI

Osvald, J. and Horváth, Zs.J.: Theoretical study of the temperature dependence of electrical characteristics of Schottky diodes with an inverse near-surface layer, *Appl. Surf. Sci.* **234** (2004) 349.

1. Biber, M.: *Semicond. Sci. Technol.* **21** (2006) 1.
2. Özdemir, A.F.: *Semicond. Sci. Technol.* **21** (2006) 298.
3. Karatas, S.: *Appl. Surf. Sci.* **252** (2006) 2209.

Osvald, J.: Electronic properties of a near surface Si δ -doped GaAs under an applied electric field, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** (2004) 2655-2659.

1. Dakhlaoui, H.: *J. Magnetism Magnetic Mater.* **293** (2005) 215.
2. Rodriguez-Vargas, I.: *J. Appl. Phys.* **99** (2006) 033702.

Osvald, J.: Self-consistent analysis of si delta-doped layer placed in a non-central position in GaAs structure, *Physica E* **23** (2004) 147.

1. Blacksberg, J.: *J. Appl. Phys. Lett.* **87** (2005) 254101.
2. Rodriguez-Vargas, I.: *J. Appl. Phys.* **99** (2006) 033702.

Osvald, J.: New aspects of the temperature dependence of the current in inhomogeneous Schottky diodes, *Semicond. Sci. Technol.* **18** (2003) L24-L26.

1. Chand, S.: *Semicond. Sci. Technol.* **19** (2004) 82.
2. Blasciuc-Dimitriu, C.: *Semicond. Sci. Technol.* **20** (2005) 10.
3. Chand, S.: *Semicond. Sci. Technol.* **20** (2005) 1143.
4. Chand, S.: *Appl. Surf. Sci.* **252** (2005) 358.

Osvald J.: Comment on „Negative Schottky barrier between titanium and n-type Si(001) for low-resistance Ohmic contacts, *Solid-State Electronics* **48** (2004) 2347-2349.

1. Tao, M.: *Solid-State Electron.* **48** (2004) 2351.

Osvald J.: Schottky diodes with a delta-doped near-surface layer, *J. Appl. Phys.* **90** (2001) 6205.

- * 1. Horváth, Zs.J.: *Proc. 11th Int. Workshop Physics of Semiconductor Devices 2001, Delhi, India.* Eds.: V. Kumar and P. K. Basu. Allied Publisher Ltd., New Delhi 2002, p. 265.
2. Shashkin, V.: *J. Appl. Phys.* **95** (2004) 2190.
 3. Roccaforte, F.: *Appl. Phys. Lett.* **85** (2004) 6152.
 4. Roccaforte, F.: *J. Appl. Phys.* **97** (2005) 123502.
 5. Horváth, Zs.J.: *Curr. Appl. Phys.* **6** (2006) 205.

Osvald, J.: Response to „Comment on „Numerical study of electrical transport in inhomogeneous Schottky diodes“, *J. Applied Physics* **88** (2000) 7368-9.

1. Jiang, Y.L.: Chin. Phys. Lett. **19** (2002) 553.
- * 2. Rossi, R.C.: PhD thesis. Pasadena, California Institute of Technology, 2002.
3. Ru, G. P.: Solid-State Electron. **49** (2005) 606.

Osvald, J.: Numerical study of electrical transport in inhomogeneous Schottky diodes, J. Applied Physics **85** (1999) 1935-1942.

1. Tung, R.T.: J. Appl. Phys. **88** (2000) 7366.
2. Rossi, R.C.: Appl. Phys. Letters **77** (2000) 2698.
3. Dmitriev, G.: J. Comm. Technol. Electron. **45** (2000) 201.
4. Bezák, V.: Czechosl. J. Phys. **51** (2001) 829.
5. Tung, R.T.: Mat. Sci. Engn. R **35** (2001) 1.
6. Rossi, R.C.: J. Phys. Chem. B **105** (2001) 12303.
- *7. Pelucchi, E.: Ph.D. thesis. Bremen: Univ. Bremen 2001.
8. Guliants, E. A.: Appl. Phys. Lett. **80** (2002) 1474.
9. Zhdanov, V. P.: Surf. Sci. **512** (2002) L331.
10. Karpov, V. G.: Appl. Phys. Lett. **80** (2002) 4256.
11. Jiang, Y.L.: Chin. Phys. Lett. **19** (2002) 553.
- *12. Karpov, V.G.: 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. 2002, Piscataway, IEEE 2002, p. 2P2.14.
- *13. Rossi, R.C.: PhD thesis. Pasadena, California Institute of Technology, 2002.
- *14. Bai, S.: Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **742** (2002) 151.
15. Ru, G. P.: Solid-State Electron. **49** (2005) 606.
16. Aydogan, S.: Polymer **46** (2005) 10982.

Osvald, J. and Burian, E.: C-V dependence of inhomogeneous Schottky diodes, Solid-St. Electron. **42** (1998) 191.

1. Jones, F.E.: J. Appl. Phys. **90** (2001) 1001.
2. Lonergan, M. C.: J. Chem. Phys. **115** (2001) 433.
3. Shigiltchhoff, O.: Mater. Sci. Forum **433-4** (2002) 705.
- *4. Rossi, R.C.: PhD thesis. Pasadena, California Institute of Technology, 2002.
- *5. Bai, S.: Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **742** (2003) K3.1.1.
6. Moscatelli, F.: Mater. Sci. Forum **457-60** (2004) 993.
7. Roy, S.: Solid-State Sci. **6** (2004) 377.
8. Aydogan, S.: Polymer **46** (2005) 563.
9. Altindal, S.: Solar Energy Mater. Solar Cells **85** (2005) 345.
10. Kanbur, H.: Appl. Surf. Sci. **252** (2005) 1732.

Osvald, J. and Dobročka, E.: Generalized approach to the parameter extraction from Schottky diodes *I-V* characteristics, Semicond. Sci. Technol. **11** (1996) 1198-1202.

1. Le Lay, G.: J. Phys. IV **7** (1997) 115.
- *2. Jayavel, P.: In: Physics of Semiconductor Devices 1 . Ed. V.Kumar. New Delhi, Narosa Publ. House 1998, p. 321.
- *3. Horváth, Zs. J.: In: Physics of Semiconductor Devices 2 . Ed. V.Kumar. New Delhi, Narosa Publ. House 1998, p.1085.
4. Ortiz-Conde, A.: Solid-State Electron. **43** (1999) 845.
5. Bezák, V.: Czechosl. J. Phys. **51** (2001) 829.

- *6. Wong, H.: Proceedings of the IEEE Hong Kong Electron Devices Meeting 2001, p. 38.
- 7. Ferhat-Hamida, A.: Solid-State Electron. **46** (2002) 615.
- *8. Rossi, R.C.: PhD thesis. Pasadena, California Institute of Technology, 2002.
- 9. Biber, M.: Semicond. Sci. Technol. **21** (2006) 1.

Lalinský, T., **Osvald, J.**, Machajdík, D., Mozolová, Ž., Šišolák, J., Constantinidis G., and Kobzev A.P.: High-temperature stable Ir-Al/n-GaAs Schottky diodes: Effect of the barrier height controlling, J. Vac. Sci. Technol. B **14** (1996) 657.

- 1. Elkhakani, M.A.: J. Vac. Sci. Technol. A **16** (1998) 885.
- 2. Chen, C.P.: J. Vac. Technol. B **17** (1999) 432.
- *3. Venger, E.F.: Mežfaznyje vzaimodeistvija i mechanizmy degradacii v strukturach metall-InP i metall-GaAs. Kyjev: Nac. Akad. Nauk Ukrajiny 1999.
- 4. Jang, J.H., Electronics Lett. **40** (2004) 1550.
- 5. Jang, J.H., Electronics Lett. **40** (2004) 77.

Lalinský, T., **Osvald, J.**, Breza, J., Vogrinčič, P., Mozolová, Ž., and Šišolák, J.: Indium-based multilayer contact systems to n-GaAs. In: Proc. Int. Conf. Advanced Semiconductor Devices and Microsystems - ASDAM 96. Ed. Lalinský, T. Bratislava 1996, p. 33.

- *1. Venger, E.F.: Mežfaznyje vzaimodeistvija i mechanizmy degradacii v strukturach metall-InP i metall-GaAs. Kyjev: Nac. Akad. Nauk Ukrajiny 1999.

Osvald, J., Burian, E.: C-V dependencies of inhomogeneous schottky diodes. In: Proc. of the Int. Conf. on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems - ASDAM 96. Eds.: Lalinský, T., Dubecký, F., Osvald, J., Haščík, Š. Bratislava 1996, p. 177.

- *1. Horváth, Zs.J.: Physics of Semiconductor Devices 2 . Ed. V.Kumar. New Delphi, Narosa Publ. House 1998, p. 1085.
- *2. Horváth, Zs.J.: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering **3359** (1997) 65.

Dobročka, E. and **Osvald, J.**: Influence of barrier height distribution on the parameters of Schottky diodes, Appl. Phys. Lett. **65** (1994) 575.

- 1. Sands, D.: J. Appl. Phys. **77** (1995) 3295.
- 2. Horváth, Zs.J.: Appl. Phys. Lett. **66** (1995) 3068.
- 3. Di Dio, M.: Solid-State Electron. **38** (1995) 1923.
- 4. Chand, S.: Semicond. Sci. Technol. **11** (1996) 1203.
- 5. Chand, S.: J. Appl. Phys. **80** (1996) 288.
- *6. Horváth, Zs.J.: In: Proc. Int. Conf. on Adv. Semicond. Devices and Microsystems (ASDAM'96), Smolenice (1996), p. 197.
- *7. Horváth, Zs.J.: In: Proc. Int. Conf. on Adv. Semicond. Devices and Microsystems (ASDAM'96), Smolenice (1996), p. 263.
- *8. Anderson, W.A.: Diffusion and Defect Data. Pt A Defect and Diffusion Forum, **136-137** (1996), p. 21.

- *9. Horváth, Zs.J.: In: Proc. 24th Int. Conf. on Microelectronics (MIEL 96) and 32nd Symp. on Devices and Materials (SD 96), Nova Gorica (Slovenia), p. 365.
- *10. Horváth, Zs.J.: In: Proc. 24th Int. Conf. on Microelectronics (MIEL 96) and 32nd Symp. on Devices and Materials (SD 96), Nova Gorica (Slovenia), p. 371.
11. Chand, S.: J. Appl. Phys. **82** (1997) 5005.
12. Chand, S.: Semicond. Sci. Technol.. **12** (1997) 899.
- *13. Horváth, Zs.J.: In: Optical diagnosis of materials and devices for opto-, micro-, and quantum electronics 1997, (Int. Conf. held in Kiev, May 1997, eds.: Svechnikov, S.V, Valakh, M.Y.), Proc. of SPIE **3359** (1997) 65.
14. Horváth, Zs. J.: Solid-State Electron. **42** (1998) 221.
15. Ivančo, J.: Solid-State Electron. **42** (1998) 229.
- *16. Horváth, Zs. J.: In: Physics of Semiconductor Devices 2 . Ed. V.Kumar. New Delhi, Narosa Publ. House 1998, p.1085.
17. Pipinys, P.: J. Appl. Phys. **86** (1999) 6875.
18. Jones, F.E.: J. Appl. Phys. **86** (1999) 6431.
19. Anilturk, O.S.: Semicond. Sci. Technol. **14** (1999) 1060.
20. Singh, R.: Bull. Mat. Sci. **23** (2000) 471.
21. Chand, S.: Indian J. Engn. Mat. **S7** (2000) 268.
22. Anilturk, O.S.: Solid-State Electron. **44** (2000) 41.
- *23. Horváth, Zs.J.: In: Proc. Int. Conf. on Adv. Semicond. Devices and Microsystems (ASDAM 2000), Smolenice (2000), p. 39.
24. Bezák, V.: Czechosl. J. Phys. **51** (2001) 829.
25. Maeda, K.: Appl. Surf. Sci. **190** (2002) 445.
26. Pipinys, P.: Solid-State Electron. **46** (2002) 1283.
27. Chand, S.: Semicond. Sci. Technol. **17** (2002) L36.
28. Alonso, C.F.: Appl. Phys. Lett. **80** (2002) 3751.
29. Shigiltchhoff, O.: Mat. Sci. For. **433-4** (2002) 705.
- *30. Rossi, R.C.: PhD thesis. Pasadena, California Institute of Technology. 2002.
31. Jiang, Y.L.: J. Appl. Phys. **93** (2003) 866.
32. Nuhoglu, C.: Semicond. Sci Technol. **18** (2003) 642.
33. Karatas, S: Appl. Surf. Sci. **217** (2003) 250.
- *34. Dmitruk, N.L.: phys. stat. sol. (c) **0** (2003) 933.
- *35. Horváth, Zs.J.: Proc. SPIE **5136** (2003) 200.
- *36. Chand, S.: ASDAM '04, Piscataway, IEEE 2004, p. 251.
37. Tugluoglu, N.: Semicond. Sci Technol. **19** (2004) 1092.
38. Tugluoglu, N.: Chin. Phys. Lett. **21** (2004) 1795.
39. Acar, S.: Appl. Surf. Sci. **233** (2004) 373.
40. Saglam, M.: Physica B **348** (2004) 397.
41. Chand, S.: Semicond. Sci. Technol. **19** (2004) 82.
42. Akkilić, K.: Phys. Scripta **70** (2004) 364.
43. Aydogan, S.: Polymer **46** (2005) 563.
44. Nuhoglu, C.: Appl. Surf. Sci. **250** (2005) 203.
45. Cetin, H.: Semicond. Sci. Technol. **20** (2005) 625.
46. Madaleno, J.C.: Diamond Related Mater. **14** (2005) 584.
47. Chand, S.: Appl. Surf. Sci. **252** (2005) 358.
48. Ayyildiz, E: Appl. Surf. Sci. **252** (2005) 1153.

49. Chand, S.: *Semicond. Sci. Technol.* **20** (2005) 1143.
50. Ramadan, W.: *Phys. Rev. B* **72** (2005) 205333.
51. Horváth, Zs.J.: *phys. stat. sol. (c)* **2** (2005) 1423.
52. Özdemir, A.F.: *Semicond. Sci. Technol.* **21** (2006) 298.
53. Karatas, S.: *Appl. Surf. Sci.* **252** (2006) 2209.
54. Chand, S., *Physica B*, **373** (2006) 284.
55. Jin, L.J.: *Thin Solid Films*, **504** (2006) 149.
56. Madaleno, J.C.: *Thin Solid Films*, in press.

Aristov, V.Yu., Le Lay, G., Soukiassian, P., Hricovini, K., Bonnet, J.E., **Osvald, J.**, and Olsson, O.: Alkali-metal-induced highest Fermi-level pinning position above semiconductor conduction band minimum, *Europhys. Lett.* **26** (1994) 359.

1. Betti, M.G.: *Europhys. Lett.* **32** (1995) 235.
2. Olsson, L.O.: *Phys. Rev. B* **52** (1995) 1470.
3. Flores, F.: *Surf. Rev. Lett.* **2** (1995) 513.
4. Betti, N.G.: *J. Elect. Spectr. Relat. Phys.* **76** (1995) 459.
5. Betti, M.G.: *Phys. Rev. B* **53** (1996) 13605.
6. Neuhold, G.: *Phys. Rev. B* **54** (1996) 8623.
7. Betti, M.G.: *Phys. Rev. B* **57** (1998) 4544.
8. Biagi, R.: *Surf. Sci.* **404** (1998) 547.
9. Karlsson, H.S.: *Surf. Sci.* **404** (1998) 590.
10. Karlsson, H.S.: *Surf. Sci.* **407** (1998) L687.
11. Morgenstern, M.: *Phys. Rev. B* **62** (2000) 7257.
12. Morgenstern, M.: *Phys. Rev. B* **61** (2000) 3805.
13. Modesti, S.: *Surf. Sci.* **447** (2000) 133.
14. Biagi, R.: *Phys. Rev. B* **64** (2001) 195407.
15. Getzlaff, M.: *Phys. Rev. B* **63** (2001) 205305.
16. Schieffer, P.: *Surf. Sci.* **497** (2002) 341.
17. Morgenstern, M.: *Phys. Rev. B* **65** (2002) 155325.
18. Abe, S.: *Phys. Rev. B* **66** (2002) 205309.
19. Morgenstern, M.: *Japan. J. Appl. Phys.* **42** (2003) 4809.
20. Biagi, R.: *Phys. Rev. B* **67** (2003) 155325.
21. Rickert, K.A.: *Appl. Phys. Lett.* **82** (2003) 3254.
22. Morgenstern, M.: *Surf. Rev. Lett.* **10** (2003) 933.
23. Tsuji, Y.: *Appl. Phys. Lett.* **87** (2005) 062103.

Aristov, V.Yu., Le Lay, G., Soukiassian, P., Hricovini, K., Bonnet, J.E., **Osvald, J.**, and Olsson, O.: Cs-induced highest EF jump above InAs(110) conduction-band minimum, *J. Vac. Sci. and Technol. B* **12** (1994) 2709.

1. Betti, N.G.: *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **76** (1995) 459.
2. Martinelli, V.: *Surf. Sci.* **391** (1997) 73.
3. Grupp, C.: *Surf. Sci.* **408** (1998) 160
4. Frost, F.: *J. of Appl. Phys.* **85** (1999) 8378.
5. Betti, M.G.: *Solid-State Commun.* **110** (1999) 661.
6. Morgenstern, M.: *Phys. Rev. B* **61** (2000) 13805.
7. Betti, M.G.: *Surf. Sci.* **454** (2000) 539.

- *8. Frost, F.: Diffusion and Defect Data. Pt A Defect and Diffusion Forum **183** (2000) 127-146.
- 9. Betti, M.G.: Surf. Sci. **477** (2001) 35.
- 10. Getzlaff, M.: Phys. Rev. B **63** (2001) 205305.
- 11. Betti, M.G.: Phys. Rev. B **63** (2001) 155315.
- 12. Morgenstern, M.: Phys. Rev. B **65** (2002) 155325.
- 13. Morgenstern, M.: Surf. Rev. Lett. **10** (2003) 933.
- 14. Paggel, J.J.: Phys. Rev. B **69** (2004) 035310.
- *15. Ozawa, K.: e-Journal of Surface Science and Nanotechnology **3** (2005) 299.

Aristov, V.Yu., Le Lay, G., Hricovini, K., Taleb-Ibrahimi, A., Dumas, P., Gunther, R., **Osvald, J.**, and Indlekofer, G.: Nearly complete tuning of the Fermi level position at a prototypical metal-silicon interface: lead on unpinned Si(111)1x1-H, J. Electron Spectr. Rel. Phenom. **68** (1994) 419.

- 1. Kampen, T.U.: Appl. Phys. A **60** (1995) 391.
- 2. Leisenberger, F.P.: Surf. Sci. **383** (1997) 25.
- 3. Ziegler, J.C.: Electrochim. Acta **45** (1999) 827.
- 4. Hirschauer, B.: Appl. Surf. Sci. **148** (1999) 164.
- 5. Grupp, C.: J. of Electron Spectr. Rel. Phenom. **103** (1999) 309.
- 6. Grupp, C.: Surf. Sci. **435** (1999) 585.
- 7. Ziegler, J.C.: Surf. Sci. **452** (2000) 150.

Le Lay, G., Aristov, V.Yu., Hricovini, K., Taleb-Ibrahimi, A., Dumas, P., **Osvald, J.**, and Indlekofer, G.: Schottky limit on ideally H-terminated unpinned silicon(111) surfaces. In: Control of Semiconductor Interfaces. Proc. 1st Int. Symposium on Control of Semiconductor Interfaces. Ed.: Ohdomari I., Oshima, M., Hiraki, A. Amsterdam, Elsevier 1994, p. 39.

- 1. Morgen, P.: Appl. Surf. Sci. **117** (1997) 72.
- *2. Hara, S.: Denshi Gijutsu Sogo Kenkyusho Iho/Bulletin of the Electrotechnical Laboratory **63** (1999) 13.
- 3. Hara, S.: Appl. Surf. Sci. **162** (2000) 19.
- 4. Hara, S.: Surf. Sci. **494** (2001) L805.
- 5. Teraji, T.: Phys. Rev. B **70** (2004) 035312.

Osvald, J., Hricovini, K., Le Lay, G., and Aristov, V.Yu., Pb/Si(111)1x1-H Schottky barrier height. In: Slovenian-Hungarian-Croatian-Austrian 6th Joint Vacuum Conf. Bled (Slovinsko) 1995, Fizika A **4** (1995) 191.

- 1. Horváth, Zs.J.: Vacuum **46** (1995) 963.

Aristov, V.Yu., Le Lay, G., Hricovini, K., Taleb-Ibrahimi, A., **Osvald, J.**, Dumas, P., Günther, R., and Indlekofer, G.: Tuning the Fermi level position through nearly the whole gap at a non-reactive metal-silicon interface. In: Formation of Semicond. Interfaces. Proc. 4th Int. Conf. Forschungszentrum Jülich. Ed.: Lengeler, B., Lüth, H. Singapore, World Sci. 1993, p. 245.

- 1. Nishiyama, A.: Surf. Sci. **350** (1996) 229.
- *2. Würde, K.: Surf. Rev. Lett. **5** (1998) 105.

Osvald, J.: The barrier height inhomogeneities influence on electrical parameters of Schottky diodes. In: Int. Workshop "Characterization of Semiconductor Substrates and Structures". Smolenice 1992. Abstracts.

*1. Horváth, Zs.J.: Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **260** (1993) 367.

Dobročka, E. and **Osvald, J.:** Simulation of Schottky diodes with inhomogeneous barrier. In: Int. Workshop "Characterization of Semiconductor Substrates and Structures". Smolenice 1992. Abstracts.

*1. Horváth, Zs.J.: Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **260** (1993) 367.

Osvald, J.: On the barrier height inhomogeneities at polycrystalline metal semiconductor contacts, Solid-St. Electron. **35** (1992) 1629.

1. Horváth, Zs.J.: Vacuum **46** (1995) 963.

2. Chand, S.: Semicond. Sci. Technol. **12** (1997) 899.

3. Donoval, D.: Solid-State Electron. **42** (1998) 235.

*4. Horváth, Z.: In: Physics of Semicond. Devices 2. Ed. V.Kumar. New Delphi, Narosa Publ. House 1998, p. 1085.

*5. Rang, T.: In: MICROSIM II - Simulation and Design of Microsystems and Microstructures. Eds. Adey, R.A., Renaud, Ph. Southampton, Comput. Mechanics Inc. 1998, p. 23.

6. Anilturk, O.S.: Semicond. Sci. Technol. **14** (1999) 1060.

7. Drobny, V.: ASDAM '98, Piscataway, IEEE 1998, p. 133.

8. Anilturk, O.S.: Solid-St. Electron. **44** (2000) 41.

9. Lewis, N.S.: J. of Electroanalytical Chemistry **508** (2001) 1.

10. Jiang, Y.L.: Chin. Phys. Lett. **19** (2002) 553.

*11. Rossi, R.C.: PhD thesis. Pasadena, California Institute of Technology, 2002.

Missous, M., Morgan, D.V., Wood, J., Grovenor, C.R.M., Kendelewicz, T., McGlip, J.F., Duke, C.B., **Osvald J.**, Schwartz, G.P., and Wieder, H.H.: In: Properties of Gallium Arsenide. 2nd ed. London, INSPEC 1990, p. 383.

1. Gombia, E.: J. of Appl. Phys. **84** (1998) 5337.

Osvald, J. and Šándrik, R.: Interdiffusion between some refractory metal silicides and GaAs, Thin Solid Films **169** (1989) 223.

1. Mathew, S.: Thin Solid Films **254** (1995) 278.

Osvald, J.: Influence of electron topography on electrical parameters of MOS structures, phys. stat. sol. (a) **90** (1985) K225.

1. Eden, K.: Appl. Surf. Sci. **36** (1989) 421.

Vávra, I., Lobotka, P., Zachar, F., and **Osvald, J.:** TEM in situ observation of electromigration damage in Al-Cu stripe, phys. stat. sol. (a) **63** (1981) 363.

1. Rodbell, K.P.: Thin Solid Films **108** (1983) 95.

2. Zehe, A.: J. Phys. F **16** (1986) 407.

3. Luby, S.: Thin Solid Films **116** (1984) 97.

4. Fantini, F.: Microelectr. and Reliability **24** (1984) 275.
- *5. Chang, C.Y.: Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 255. Materials Research 1991, p.125.
6. Lloyd, J.R.: J. Appl. Phys. **71** (1992) 3231.
7. Vook, R.W.: Appl. Surf. Sci. **60-1** (1992) 71.
8. Fritzsche, B.: Crystal Res. Technol. **28** (1993) K44.
9. Vook, R.W.: Mat. Chem. Phys. **36** (1994) 199.
10. Patrinos, A.J.: J. of Appl. Phys. **75** (1994) 7292.
11. Arzt, E.: J. Appl. Phys. **76** (1994) 1563.
12. Lloyd, J.R.: Appl. Phys. Lett. **69** (1996) 2486.
13. Riege, S.P.: Appl. Phys. Lett. **69** (1996) 2367.
14. Okabayashi, H.: Appl. Phys. Lett. **68** (1996) 1066.
15. Okabayashi, H.: Japan. J. of Appl. Phys. **35** (1996) 1102.
16. Shih, W.C.: Thin Solid Films **292** (1997) 103.
17. Zehe, A.: Microelectron. Reliab. **42** (2002) 1849.
18. Zehe, A.: Crystal Res. Technol. **37** (2002) 817.
19. Zehe, A.: Modern Phys. Lett. B **16** (2002) 299.
20. Zehe, A.: Mater. Lett. **57** (2003) 3729.

Osvald, J. – 0000 - Communication

1. Horváth, Zs.J.: Solid-State Electron. **42** (1998) 221.

Spolu **209 citácií**, z toho **38** mimo databázu SCI.

Summary

The thesis is a set of works devoted to the analysis of the electron transport through the metal semiconductor interface using numerical mathematical methods. Numerical methods enabled more exact extraction of Schottky diodes parameters at the assumption of the thermionic emission mode of transport than standard methods used up to now. Its use enlarges the possibilities to study inhomogeneous Schottky diodes, which could not be analyzed by former methods. By description of inhomogeneous diodes we assumed homogeneous and Gaussian statistical distribution of barrier heights. For the case of homogeneous distribution we have developed the expression for the apparent barrier height.

The case of the Gaussian barrier height distribution we analyzed for two theories of the electron transport through the interface – thermionic emission and drift-diffusion approximation. In the case of thermionic mode of transport we explained comprehensive and decisive influence of the series resistance connection to the diodes on the extracted parameters of the device. We have found out that for inhomogeneous diode the ideality factor different from unity may be obtained also for pure thermionic emission for the case of non-interacting diodes. On the other hand if the diodes have common series resistance the final ideality factor remains unity. Using the drift-diffusion approximation we have shown that the statistical distribution of the barrier heights has not so important influence on the apparent barrier parameters as is expected for isolated low-barrier defects in otherwise homogeneous diode as was described by Tung.

The influence of a δ -doped thin layer near the surface of the semiconductor depends on the dopant polarity. In the case of the opposite dopant polarity than in the bulk the barrier height and also the ideality factor increased. For the same type dopant polarity the influence of the δ -doped layer on the barrier is negligible if we use the drift-diffusion approximation.

By the study of the quantum states in the energy subbands in the two-dimensional electron gas created by the δ -doped layer near the semiconductor surface we found out, that at the opposite end of the structure the second quantum well is created where also 2D electrons are concentrated. Under the influence of external electric field and in dependence on its orientation a redistribution of electrons between the energy level in the well and also between the wells occurs.

We also described so called intersection behaviour of I - V characteristics of Schottky diodes. In contrary to the previous conceptions about impossibility to observe I - V curves intersections because of the series resistance presence in the diodes we have shown that right its existence enables it not only at inhomogeneous but also at homogeneous diodes. We have derived analytical expressions for so called intersection voltages for both types of diodes.

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertationsarbeit ist ein Sammelwerk, der auf die Analysen des Transportes der Ladungsträgern durch die Grenzfläche Metall-Halbleiter eingestellt ist. Im Vergleich zu bisherigen Methoden hat die Anwendung der numerisch-mathematischen Methoden die Extraktion der Parametern der Schottky Dioden unter der Voraussetzung des thermischen Emissionstransportes mit grösserer Genauigkeit ermöglicht. Somit hat sich das Studium der inhomogenen Dioden erheblich erweitert. Bei der Beschreibung der inhomogenen Dioden hatten wir Gaussche statistische Verteilung vorausgesetzt. Für die homogene Verteilung wurde eine Beziehung für die scheinbare Höhe der Barriere solcher Diode abgeleitet.

Dioden mit der Gausschen Barrierehöhenverteilung wurden mit Zwei Theorien des Transportes der Ladunsträgern durch die Grenzfläche analysiert – mit dem thermischen Emissionsmodell und mit dem Drift-Difussionsmodell. Bei dem thermischen Emissionsmodell wurde ein wesentlicher und entscheidener Einfluss der Weise der Schaltung des Serienwiderstandes auf extrahierende Diodenparametern festgestellt. Wir haben erfunden dass für inhomogene Dioden der Idealitätsfaktor für den Fall der nichtinteragierende Dioden trotz rein thermischen Emissionstransport anders als Einz ist.

Andererseits wenn die Dioden eine gemeinsamer Serienwiderstand haben das resultierende Idealitäts faktor bleibt Einz. Mit Drift-Difussions Annäherung wurde festgestellt, dass die statistische Verteilung der Barrierenhöhen nich so wesentlicher Einfluss auf die scheinbaren Parametern der Dioden hat als ist es im Fall des homogenen Hintegründen mit izolierenden Inhomogenitäten.

Der Einfluss der δ -dotierenden Schichten, die sich unter der Oberfläche des Halbleiters befinden, hängt von der Polarität des Dopantes ab. Wenn der Typ des Dopantes dem Volumen des Halbleiters nicht gleich war, die Barriere und Idealitätsfaktor sind gestigen. Wenn der Typ des Dopantes der gleiche war, war der Eifluss der δ -dotierenden Schichten auf die Barrierenhöhe, die mit Drift-Diffusion Annäherung simuliert wurde, sehr klein.

Die Untersuchungen von Quantenzustände in der Unterbändern des zweidimensionales Elektronenengases beim δ -dotierenden Schichten nahe der Oberfläche geformt gezeigt haben, dass an der anderen Kante der Struktur die zweite Potentialgrube mit zweidimensionalen Elektronen auch geformt ist. Durch die Wirkung des Äusserlichen Elektrischen Feldes und in der Abhängigkeit von seiner Polarisaton, können sich die Elektrone zwischen energetischen Niveaus umgruppieren, sowohl innerhalb eine Grube als auch inzwischen der Gruben.

Es wurde auch sogenanntes Kreuzverhalten der $I-V$ Charakteristiken der Schottky Dioden untersucht. Im Verschiedenheit zu bisherigen Vorstellungen über die Unmöglichkeit der Kreuzung der $I-V$ Charakteristiken aufgrund des Serienwiderstandes zu beobachten, haben wir gezeigt, dass gerade die Existenz des Serienwiderstandes diese Beobachtung ermöglicht. Die analytische Beziehung für die Kreuzspannungen der homogenen und inhomogenen Dioden wurden ebenfalls abgeleitet.