

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
ELEKTROTECHNICKÁ FAKULTA
KATEDRA MIKROELEKTRONIKY**

**ELEKTROFYZIČKÉ VLASTNOSTI ŠTRUKTÚR MOS
S IMPLANTOVANÝM SUBSTRÁTOM**

KANDIDÁTSKA DIZERTAČNÁ PRÁCA

Vypracoval :

Ing. Vladimír Botka

Školský rímský:

Prof. Ing. Otto Csabay, DrSc.

Bratislava, apríl 1991

Obsah

ÚVOD.....	1
1. SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY.....	6
1. 1 Základné poznatky o štruktúre MOS.....	7
1. 2 Ideálna štruktúra MOS.....	7
1. 3 Kapacitné závislosti ideálnej štruktúry MOS.....	8
1. 4 Reálna štruktúra MOS.....	11
2. CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	15
METÓDY SPRACOVANIA PROBLEMATIKY	
3. Použité metódy merania štruktúry MOS.....	16
3. 1 Vysokofrekvenčná metóda.....	17
3. 2 Kvázistatická metóda.....	18
3. 3 Q - C metóda.....	19
3. 4 Metóda konštantnej šírky OPN a určenie generačného času života minoritných nosičov náboja.....	27
4. Metódy určenia ďalších parametrov štruktúry MOS....	34
4. 1 Určenie koncentračného profilu prímesí v podpovrchovej oblasti polovodiča.....	34
4. 1. 1 Korekcia koncentrácie dotujúcich prímesí pri povrchu polovodiča.....	35
4. 1. 2 Určenie hĺbky koncentračného profilu.....	36
4. 1. 3 Vplyv pascí rozhrania Si-SiO ₂ a generácie minoritných nosičov náboja.....	40
4. 1. 4 Výpočet koncentračného profilu dotujúcich prímesí z priebehu majoritných nosičov náboja a overenie použitých modelov.....	41
4. 2 Určenie hustoty pascí rozhrania Si - SiO ₂	47
4. 2. 1 Porovnanie vysokofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej CV závislosti.....	47
4. 2. 2 Porovnanie experimentálnej a teoretickej	

kvázistatickej CV závislosti.....	51
DISKUSIA EXPERIMENTÁLNYCH VÝSLEDKOV	
5. Pracovisko pre automatizovaný zber dát.....	55
5. 1. Meranie HF C-V závislostí.....	58
5. 2. Meranie kvázistatických C-V závislostí.....	60
5. 3. Meranie metódou konštantnej šírky OPN.....	63
5. 4. Časové diagramy použitých metód.....	66
6. Spracovanie dát a zobrazenie získaných parametrov štruktúr MOS.....	72
6. 1. Určenie koncentračného profilu dotujúcich prímesí, dávky implantácie a napäťia vyrovnaných pásov.....	73
6. 2. Určenie hrúbky oxidovej vrstvy.....	76
6. 3. Určenie pascí rozhrania Si-SiO ₂	77
6. 4. Určenie generačného času života minoritných nosičov náboja.....	77
7. Experimentálne výsledky.....	80
8. SÚHRN VÝSLEDKOV S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKOV.....	91
9. ZÁVERY PRE PRAX A ROZVOJ VEDNEJ DISCIPLÍNY.....	97

Dodatky

Dodatok 1. Numerické riešenie Poissonovej rovnice.....	99
Dodatok 2. Úprava Poissonovej rovnice do normalizovaného tvaru.....	102
Dodatok 3. Výpočet kapacity štruktúry MOS.....	103
Dodatok 4. Termodynamická rovnováha v nehomogénne dotovanom substráte.....	104
Dodatok 5. Zapojenie Q-C metódy a metodika merania parazitných kapacít.....	104

Dodatok 5.1.	Určenie parazitnej kapacity C_p	106
Dodatok 5.2.	Určenie parazitnej kapacity C_x	107
Dodatok 5.3.	Určenie kapacity C_{LF}	108
Dodatok 5.4.	Korekcia vysokofrekvenčnej kapacity C_m	108
Dodatok 6.	Určenie povrchového potenciálu ϕ_s z Q-C metódy.....	109
Dodatok 7.	Určenie povrchového potenciálu ϕ_{ss} pri nulovom napäti hradla.....	110
Dodatok 8.	Programy zberu, spracovania a zobrazenia dát pre plošné rozloženie parametrov štruktúr MOS.....	113

Obrázky

obr. 1.1	Priebeh koncentrácie prímesí a voľných nosičov náboja pri prechode štruktúry MOS z akumulácie do hlbokého ochudobnenia.....	9
obr. 1.2	Priebeh povrchového potenciálu $\phi_s(V_g)$	10
obr. 1.3	Priebeh kapacity štruktúry MOS C(V).....	11
obr. 3.1	Schematické znázornenie zapojenia Q-C metódy...	20
obr. 3.2	Porovnanie VF C-V závislostí štruktúry MOS a povrchového potenciálu v stave termodynamickej rovnováhy a v stave hlbokého ochudobnenia zís- kané pomocou Q-C metódy.....	23
obr. 3.3	Porovnanie C-V závislostí štruktúry MOS.....	24
obr. 3.4	Porovnanie C-V závislostí štruktúry MOS.....	25
obr. 3.5	Závislosť $dV_g/dt = f(w)$ získaná metódou konštant- nej šírky OPN.....	31
obr. 3.6	Hlbkový profil $\tau_g(x)$	32
obr. 3.7	Hlbkový profil $N(x)$	32
obr. 4.1	Porovnanie postupov výpočtu šírky OPN.....	37
obr. 4.2	Vplyv generácie minoritných nosičov náboja na	

výpočet $N(x)$	40
obr. 4. 3 Porovnanie koncentračného profilu prímesí a majoritných nosičov náboja.....	42
obr. 4. 4 Overenie metódy výpočtu koncentračného profilu ..	45
obr. 4. 5 Overenie metódy výpočtu koncentračného profilu ..	46
obr. 4. 6 VF C-V a $\rho_e(V)$ závislosť získaná pomocou Q-C metódy.	48
obr. 4. 7 VF C-V a NF C-V závislosť získaná pomocou Q-C metódy.	49
obr. 4. 8 Hustota pascí rozhrania Si-SiO ₂ určená z porovnania VF a NF C-V závislosti.....	50
obr. 4. 9 Porovnanie teoretickej a experimentálnej NF C-V závislosti.....	52
obr. 4. 10 Hustota pascí rozhrania Si-SiO ₂ určená z porovnania teoretickej a experimentálnej NF C-V závislosti.....	52
obr. 5. 1 Bloková schéma zapojenia prístrojov automatizovaného pracoviska.	55
obr. 5. 2 Zapojenie prístrojov pre metódu konštantnej šírky OPN.	64
obr. 5. 3 Časový diagram rovnovážnej VF C-V metódy.	67
obr. 5. 4 Časový diagram nerovnovážnej VF C-V metódy.	68
obr. 5. 5 Časový diagram kvázistatickej C-V metódy.	69
obr. 5. 6 Časový diagram metódy konštantnej šírky OPN.	70
obr. 6. 1 Plošné rozloženie $N(x)$ na kremíkovej doske pre rôzne vzdialenosť od povrchu polovodiča....	74
obr. 6. 2 Plošné rozloženie V_{fb} na kremíkovej doske.	75
obr. 6. 3 Plošné rozloženie dávky implantácie na kremíkovej doske.	75
obr. 6. 4 Plošné rozloženie h_{ox} na kremíkovej doske.	76
obr. 6. 5 Plošné rozloženie D_{it} na kremíkovej doske.	78
obr. 6. 6 Plošné rozloženie τ_g na kremíkovej doske.	78
obr. 7. 1 Plošné rozloženie špecifického odporu 2D.	82
obr. 7. 2 Plošné rozloženie špecifického odporu 3D.	82

obr. 7. 3	Priebehy N(x) testovaných kremíkových dosiek.....	83
obr. 7. 4	Závislosť množstva aktívnych prímesí od dávky implantácie.....	85
obr. 7. 5	Porovnanie koncentračných profilov vypočítaných pomocou CV meraní a simulácie Pearson IV.....	87
obr. 7. 6	Závislosť V_{fb} od hrúbky oxidu h_{ox}	88
obr. D1	Zapojenie Q-C metódy.....	105
obr. D2	Zapojenie Q-C metódy pre VF meranie.....	109
obr. D3	Priebeh potenciálu v polovodiči $\phi(x)$	111

Tabuľky

tab. 3. 1	Porovnanie normovanej vysokofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej kapacity štruktúry MOS pre metódy VF, NF a QC (obr. 3. 3).....	26
tab. 3. 2	Porovnanie normovanej vysokofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej kapacity štruktúry MOS pre metódy VF, NF a QC (obr. 3. 4).....	27
tab. 4. 1	Výpočet koncentračného profilu N(x).....	39
tab. 7. 1	Špecifický odpor kremíkových dosiek pred technologickým spracovaním.....	80
tab. 7. 2	Dávky implantácie.....	84
tab. 7. 3	Dávky implantácie.....	84
tab. 7. 4	Stredné hodnoty a smerodajné odchýlky V_{fb} a h_{ox}	87
tab. 7. 5	Stredné hodnoty a smerodajné odchýlky D_{it}	89
tab. 7. 6	Stredné hodnoty a smerodajné odchýlky τ_g	90

Zoznam použitých symbolov

A	plocha štruktúry MOS	m^2
C	kapacita	F
C_i	kapacita napäťovo-nezávislého kondenzátora	F
	Q-C metódy	F
$C_{i_{HF}}$	HF kapacita napäťovo-nezávislého kondenzátora	F
	Q-C metódy	F
$C_{i_{LF}}$	LF kapacita napäťovo-nezávislého kondenzátora	F
	Q-C metódy	F
C_m	kapacita sériovo-paralelného zapojenia kondenzátorov Q-C metódy	F
C_{moe}	diferenciálna kapacita štruktúry MOS	F
C_{moe}^{HF}	vysokofrekvenčná kapacita štruktúry MOS	F
C_{moe}^{LF}	nízkofrekvenčná kapacita štruktúry MOS	F
C_{moe}^{TLF}	teoretická nízkofrekvenčná kapacita štruktúry MOS	F
C_{ox}	kapacita oxidovej vrstvy štruktúry MOS	F
C_{sc}	kapacita oblasti priestorového náboja	F
C_v	parazitná kapacita Q-C metódy	F
C_x	parazitná kapacita Q-C metódy	F
D	dávka implantovaných atómov v polovodiči	m^{-2}
D_i	dávka implantovaných atómov zadaná v procese implantácie	m^{-2}
D_{it}	hustota pásčí rozhrania Si-SiO ₂	$m^{-2} eV^{-1}$
D_n	difúzny koeficient elektrónov	$m^2 s^{-1}$
E	energia	eV
E_c	energia dolného okraja vodivostného pásma	eV
E_f	energia Fermiho hladiny v polovodiči	eV
E_i	energia intrinziekej Fermiho hladiny	eV
E_v	energia horného okraja valenčného pásma	eV
G_m	vodivosť sériovo-paralelného zapojenia	

	kondenzátorov Q-C metódy	S
h_{ox}	hrúbka oxidovej vrstvy štruktúry MOS	m
I_i	elektrický prúd	A
I_g	generačný prúd minoritných nosičov náboja	A
k	Boltzmannova konštantă	$1.38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$
L_D	Debayova dĺžka	m
L_{DE}	extrinziecká Debayova dĺžka	m
N	koncentrácia dotujúcich prímesí v polovodiči	m^{-3}
n	koncentrácia elektrónov v polovodiči	m^{-3}
N_A	koncentrácia akceptorov	m^{-3}
N_b	koncentrácia substrátu	m^{-3}
N_D	koncentrácia donorov	m^{-3}
N_{max}	maximálna koncentrácia dotujúcich prímesí v polovodiči	m^{-3}
n_i	intrinziecká koncentrácia nosičov náboja v kremíku	$1.45 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$
P	koncentrácia dier v polovodiči	m^{-3}
Q	elektrický náboj	C
q	náboj elektrónu	$1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Q_{de}	poruchový náboj v oxidovej vrstve a na jej rozhraní s polovodičom a kovom štruktúry MOS	C
R_p	stredná hodnota rozloženia implantovaných atómov v polovodiči	m
ΔR_p	rozptyl rozloženia implantovaných atómov v polovodiči	m
T	teplota	K
t	čas	s
u	normovaný elektrický potenciál v polovodiči	
u_f	normovaný Fermiho potenciál v polovodiči	
u_s	normovaný potenciál na povrchu polovodiča	
V	napätie	V
V_a	napätie na sériovo-paralelnom zapojení	

	Kondenzátorové Q-C metódy	V
V_{fb}	napätie výrovnaných pásov štruktúry MOS	V
V_g	napätie na hradlovéj elektrode štruktúry MOS	V
V_t	napätie v spoločnom bode sériovo-paralelného zapojenia kondenzátorov Q-C metódy	V
V_{ox}	úbytok napäcia na oxidovej vrstve štruktúry MOS	V
w	šírka oblasti preistorového náboja	m
x	vzdialenosť	m
\bar{z}	stredná hodnota náhodnej premennej z	
σz	rozptyl náhodnej premennej z	
z'	preistorová derivácia premennej z	
β	$= q / kT$	
ϵ	permittivita	Fm^{-1}
ϵ_s	permittivita kremika	Fm^{-1}
ϵ_{ox}	permittivita oxida kremičitého	Fm^{-1}
ϕ	elektrický potenciál	V
P_f	Fermiov potenciál	V
P_{me}	rozdiel výstupných potencialov kovu a polovodiča	V
P_e	úbytok napäcia na vrstve polovodiča	
	t. zv. povrchový potenciál	V
μ_n	pohyblivosť elektrónov v polovodiči	$m^2 V^{-1} s^{-1}$
μ_p	pohyblivosť dier v polovodiči	$m^2 V^{-1} s^{-1}$
ω	uhlová frekvencia	s^{-1}
ρ	hustota elektrického náboja	Cm^{-3}
τ_g	generačná doba minoritných nosičov náboja	s

ÚVOD.

Oblast diagnostiky štruktúr MOS bola v posledných desaťročiach predmetom rozsiahleho výskumu a v súčasnosti sa nachádza v štádiu rutinného používania. Mnohé metodiky určovania parametrov štruktúr MOS možno v súčasnosti považovať za uzavreté o čom svedčia rozsiahle monografie publikované v tejto oblasti [1] [2] [3] [4]. Zároveň je k dispozícii profesionálne prístrojové vybavenie pre určovanie parametrov štruktúr MOS, ktoré slúži pre rýchlu diagnostiku technológie výroby polovodičových prvkov a integrovaných obvodov. Mnohé technologické postupy používané v súčasnosti pri výrobe diskrétnych polovodičových súčiastok a integrovaných obvodov na báze kremíka sú dostatočne preškúmané a pri ich používaní sa dosahuje vysoká reprodukovanosť parametrov, avšak stále ešte možno nájsť oblasti, v ktorých vývoj diagnostiky polovodičových prvkov pomocou štruktúr MOS nie je ukončený.

V snahu o vyššiu efektívnosť výroby sa prejavuje tendencia používať kremíkové dosky stále väčších priemerov, čo prináša v spojení s problematikou výťažnosti potrebu štatistického prístupu k výhodnocovaniu testovaných parametrov jednotlivých štruktúr. Merané parametre testovacích štruktúr úzko súvisia s hodnotami technologických parametrov dosiahnutých v procese výroby a funkčnosť hotovej súčiastky závisí od veľkého množstva jednotlivých technologických krokov, ktoré sa pohybujú v určitých tolerančných medziach. Pri zvyšovaní hustoty integrácie a s tým súvisiacim zmenšovaním rozmerov jednotlivých integrovaných elementov sa stáva dôležitou otázkou tolerančných intervalov technologických parametrov. Automatizácia výroby súvisí spravidla s veľkým objemom výroby, ktorej efektívnosť zaistuje v najväčšej miere jej technológia. Podrobnejšia analýza technologických operácií nie je zdaleka jednoduchou záležitosťou a vyžaduje veľké

množstvo experimentov a pokusov. Výsledky týchto experimentov je nutné efektívne snímať a pre vyhodnotenie použiť výpočtovú techniku, pričom objem snímaných a vyhodnocovaných dát vyžaduje použitie databázových systémov. Existuje celá rada matematických metód, ktoré sú pre tieto účely vhodné a sú k dispozícii balíky programov, ktoré riešia problémy analýzy technologických procesov [5]. Pravdepodobne prevláda pri výrobe integrovaných obvodov heuristický prístup k riešeniu otázok funkčnosti produktov a objasnenie závislosti niektorých parametrov môže viest' k exaktnejšiemu rozhodovaniu pri riadení chodu technologických zariadení.

V tejto práci sme sa pokúsili o sprístupnenie informácií o plošnom rozložení niektorých parametrov štruktúr MOS na kremíkovej doske so zameraním sa na proces iónovej implantácie, ktorá vytváraním nehomogénnego hĺbkového rozloženia prímesných atómov v polovodiči vyžaduje prispôsobenie metód merania tejto podmienky. Plošné zobrazenie parametrov štruktúr MOS je založené na veľkom množstve meraní a spracovanie dát a aplikácia kapacitných metód na testovanie celej kremíkovej dosky, si vyžaduje vybudovanie adekvátnych prostriedkov zberu, spracovania a zobrazenia dát. Niektoré zo skúmaných parametrov vykazujú geometrickú symetriu a iné sa náhodne pohybujú v určitom intervale hodnôt. Plošné zobrazenie skúmaných parametrov tak poskytuje rýchlu a prehľadnú informáciu o kvalite jednotlivých technologických krokov, od ktorých hodnota skúmaného parametra závisí. Zároveň si možno pomocou tejto vizuálnej informácie vytvoriť predstavu o fluktuáciách skúmaných parametrov na kremíkovej doske a neprikladať váhu náhodne zmeraným extrémnym hodnotám.

Ďalším pokračovaním predkladanej práce by malo byť hľadanie súvislostí medzi parametrami testovacích štruktúr rôznych druhov (napr. štruktúra MOS, tranzistorové štruktúry) so za-

mieraním na zlepšenie výťažnosti výroby integrovaných obvodov. Pravdepodobne by bolo možné na základe poznatkov o miere závislosti medzi jednotlivými parametrami rozhodnúť, aká zmena technologického parametra ovplyvní funkčnosť produkovanej súčiastky.

Vlastná práca zahŕňa v sebe viacero oblastí vedecko-výskumnnej činnosti, ktoré možno nasledovne vyčleniť:

- fyzikálne základy použitých metód a interpretácia výsledkov
- automatizácia experimentu
- použitie numerickej matematiky pre riešenie fyzikálnych rovnic a spracovanie dát
- tvorba programového vybavenia.

Kapitola 1 obsahuje prehľad súčasného stavu skúmanej problematiky a zaobráva sa problematikou ideálnej a reálnej štruktúry MOS. Pre získanie informácií o fyzikálnych dejoch v ideálnej štruktúre MOS sme numericky vyriešili jednodimenzionálnu Poissonovu rovnicu pre nehomogénne rozloženie prímesí v polovodiči a zároveň sme získali teoretické kapacitne-napäťové závislosti štruktúry MOS. Kapitola 2 obsahuje ciele dizertačnej práce. Použité metódy mérania a postupy určovania niektorých parametrov štruktúr MOS sú popísané v kapitole 3 a 4. Pritom boli rozpracované jendako metódy používané v minulosti na Oddelení polovodičových štruktúr a integrovaných obvodov, a zároveň sa zaviedli nové, doteraz u nás nepoužívané metódy (metóda Q-C, metóda konštantnej šírky oblasti priestorového náboja). Kapitola 5 obsahuje niektoré myšlienky realizácie automatizovaného zberu a predspracovania dát. Riešia sa tu problémy štruktúr dátových súborov, zabezpečenie proti strate nameraných dát a manipulácie s jednotlivými záznamami dátových súborov. Zároveň sú v tejto časti spomenuté niektoré riešenia problémov spojených s automatickou realizáciou.

tomatizáciou experimentu. Napriek tomu, že tento okruh otázok nesúvisí priamo s fyzikálnou stránkou prevedených meraní, je potrebné zdôrazniť, že bez ich systematického vyriešenia by prakticky nebolo možné efektívne realizovať automatizované pracovisko pre sledovanie plošného rozloženia elektrofyzikálnych parametrov štruktúr MOS. Spracovanie nameraných dát a zobrazenie výsledkov plošného rozloženia parametrov je uvedené v kapitole 6 a kapitola 7 obsahuje tabuľky s výsledkami experimentu. Zároveň sú tu uvedené aj výsledky skúmania vzájomnej korelácie niektorých parametrov štruktúr MOS.

Použité programy sú väčšinou napísané v jazyku C a iba niektoré podprogramy spracovania dát a numerického riešenia fyzikálnych rovníc používajú programovací jazyk Fortran. Celý systém programov bol realizovaný pod operačným systémom MS DOS. Prenos programov pod iný operačný systém by vyžadoval vyriešenie nasledovných okruhov problémov :

- riadenie zbernice IMS-2
- prispôsobenie sa systému práce so súbormi
- grafické zobrazenie údajov.

Pre väčšiu prehľadnosť textu boli niektoré jej dielčie časti presunuté do dodatkov. Práca obsahuje značný počet obrázkov, ktoré pomáhajú doplniť text a samy o sebe poskytujú množstvo informácií.

Literatúra

- [1] Nicollian E.H., Brews J.R. : MOS Physics and Technology. John Wiley and Sons. New York 1982.
- [2] Grove A.S. : Physics and Technology of Semiconductor devices. John Wiley and Sons. New York 1967.
- [3] Sze S.M. : Physics of semiconductor devices. John Wiley

and Sons. New York 1969.

- [4] Runyan W.R., Bean K.E. : Semiconductor integrated circuit processing technology. Addison-Wesley 1990.
- [5] AIP ve vývoji technologie pro automatizovanou výrobu. Zborník zo seminára. Dom techniky ČSVTS Pardubice 1990.

1. Súčasný stav problematiky.

Dosiaľ používané metódy pre analýzu elektrofyzikálnych vlastností štruktúry MOS sú založené na predpoklade, že jej substrát má homogénnu dotáciu prímesí. Táto problematika bola riešená na Katedre mikroelektroniky v rámci štátnych výskumných úloh [1.1] [1.2] a v kandidátskych dizertačných prácach [1.5] [1.6] [1.7] [1.8]. Tieto práce poskytujú potrebný prehľad o riešení uvedenej problematiky vo svete a tiež na našom pracovisku. Keďže v súčasnosti sa pri výrobe unipolárnych integrovaných obvodov využíva iónová implantácia pre riadenie elektrických vlastností integrovaných súčiastok, je žiaduce pre ovládanie vlastností polovodičových štruktúr poznáť parametre štruktúr MOS s nehomogénnou dotáciou substrátu. Pre tieto účely bola výskumná úloha "Elektrofyzikálne vlastnosti mikroelektronických štruktúr" [1.3] [1.4] zameraná na vývoj diagnostických metod pre výskum vlastností technologických procesov pomocou štruktúr MOS s nehomogénnou dotáciou prímesí a ich aplikáciu na riešenie problémov Česko-Slovenského polovodičového priemyslu. Z tohto zamerania štátnej výskumnnej úlohy vychádza aj zameranie predloženej kandidátskej dizertačnej práce. Potreba riešiť tento problém vychádza aj zo skutočnosti, že dosiaľ sa u nás touto problematikou, pokiaľ je nám známe, nikto nezaoberal. Naviac sa problematika rozšírila aj na výskum homogeneity rozloženia elektrofyzikálnych parametrov štruktúr MOS na kremíkovom substráte, ktorá je mimoriadne závažná aj z hľadiska zvýšenia kvality procesu vytvárania polovodičových štruktúr a integrovaných obvodov planárnu technológiou.

Na základe predchádzajúcich skutočností uvedieme v ďalšej časti tejto kapitoly len najnutnejšie poznatky, ktoré sú potrebné pre riešenie danej problematiky.

1.1. Základné poznatky o štruktúre MOS.

Štruktúra MOS tvorí jednoduchú testovaciu štruktúru, ktorou mieraním možno skúmať skoro všetky jej elektrické vlastnosti. Výhodnosť štruktúry MOS spočíva v jednoduchosti jej výroby a jednoduchosti analýzy jej vlastností. Jednoduchosť analýzy vyplýva z toho, že analyzovaný systém je v teplnej rovnováhe a zároveň jednodimenzionálny prístup je pre väčšinu javov dostatočne presný. Elektrickými méraniami štruktúry MOS možno skúmať vlastnosti objemu SiO_2 , jeho rozhrania s polovodičom a kovom, ako aj vlastnosti podpovrchovej oblasti polovodiča.

1.2. Ideálna štruktúra MOS.

Štruktúru MOS možno považovať za dvojpól, ktorého náhradnú schému si možno predstaviť ako sériové zapojenie napäťovonezávislej kapacity oxidu C_{ox} a kapacity oblasti priestorového náboja (OPND) $C_{ss}(\rho_s)$, ktorá je funkciou povrchového potenciálu polovodiča. Potom pre kapacitu štruktúry MOS platí [1]

$$\frac{1}{C_{mos}(V_g)} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{ss}(\rho_s)} \quad (1.1)$$

Pri analýze štruktúry MOS sa používajú nasledovné zjednodušujúce predpoklady, ktoré definujú ideálnu štruktúru MOS :

1. hustota pascí rozhrania Si-SiO₂ je rovná nule
2. v izolátore, ktorý tvorí SiO₂, sa nenachádzajú náboje
3. rozdiel výstupných potenciálov z kovu a polovodiča je rovný nule
4. platí vzťah $V_g = V_{ox} + \rho_s$.

V závislosti od hradlového napätia možno rozlísiť tieto pracovné režimy štruktúry MOS :

1. režim obohatenia
2. stav vyrovnaných pásov
3. režim ochudobnenia a inverzie (hlbokého ochudobnenia).

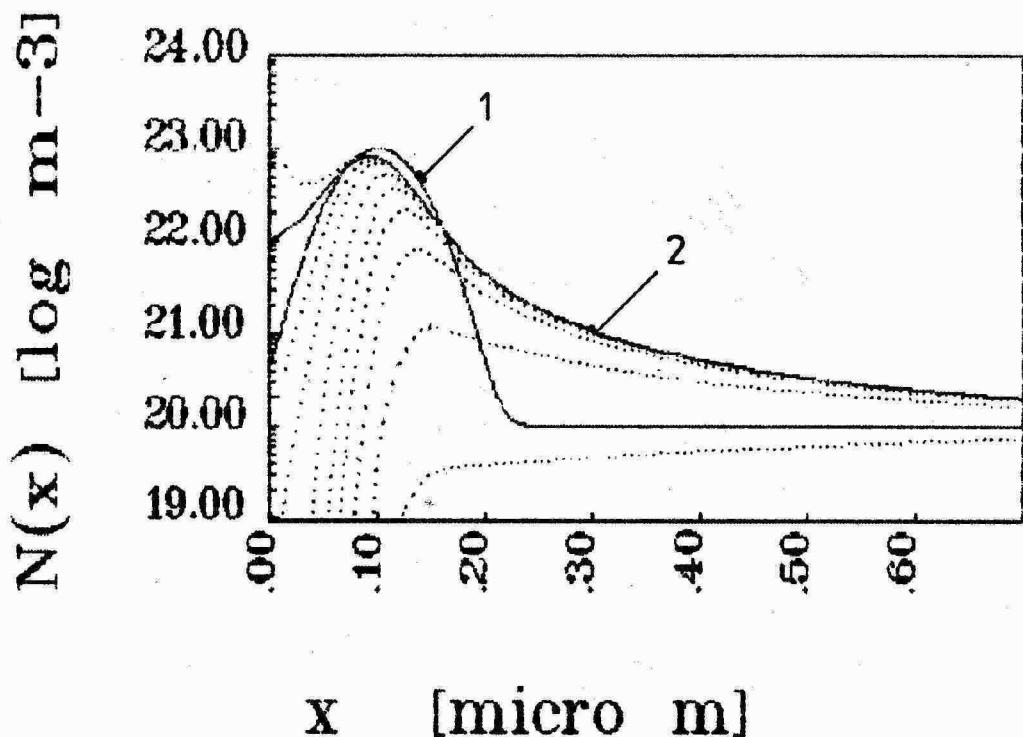
1.3. Kapacitné závislosti ideálnej štruktúry MOS.

Pre všetky uvedené prípady platí v polovodiči jednodimensionálna Poissonova rovnica

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = - \frac{q}{\epsilon} (p - n + N_D - N_A), \quad (1.2)$$

ktorá určuje priebeh elektrického potenciálu φ ako funkciu vzdialenosť od povrchu polovodiča x . Rovnicu (1.2) možno analyticky vyriešiť len pre určité špeciálne prípady priebehu koncentrácie prímesí a vo všeobecnosti treba použiť numerické metódy [1.9] [1.10]. Potom pre známy priebeh koncentrácie prímesí v polovodiči možno získať priebeh elektrického potenciálu v polovodiči, pričom napätie hradla po-važujeme za parameter, určujúci stav štruktúry. Pre bližšie ozrejmnenie fyzikálnych procesov v štruktúre MOS pri prechode zo stavu akumulácie do inverzie, alebo hlbokého ochudobnenia sme riešili rovnicu (1.2), kde pri vhodnej variácii parametra V_g možno zároveň získať priebeh povrchového potenciálu ako funkciu napäťia hradla $\varphi(V_g)$ a závislosť kapacity štruktúry MOS $C_{mos}(V_g)$ (dodatok 1).

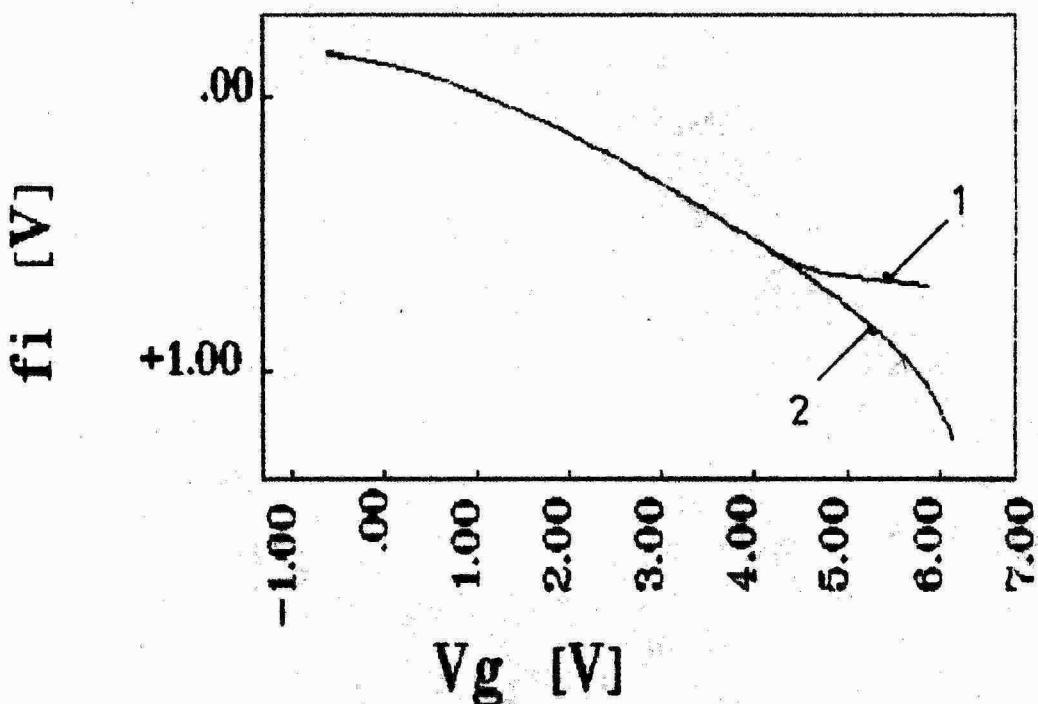
Na obr. 1.1 je znázornený priebeh koncentrácie prímesí v polovodiči (simulovaný Gaussovským priebehom) a priebehy majoritných nosičov náboja pre stav štruktúry meniaci sa od obohatenia do inverzie, znázorňujúce dej ochudobňovania pod-povrchovej oblasti polovodiča. Tu vidieť, že priebeh koncentrácie majoritných nosičov v implantovanej oblasti nadobúda maximum a potom klesá ku koncentrácií substrátu, ktorú dosiahne v bode nulového elektrického potenciálu. Zároveň je zrejmý rozdiel medzi priebehom koncentrácie prímesí a prie-



OBR. 1.1 Priebeh koncentrácie prímesí v pod povrchovej oblasti polovodiča simulovaný Gaussovským rozložením [1.11] s nasledovnými parametrami $R = 0.1 \mu\text{m}$; $\Delta R = 0.03 \mu\text{m}$; $N_{\max} = 10^{23} \text{ m}^{-3}$; $N_{\text{bulk}} = 10^{20} \text{ m}^{-3}$ (označený plnou čiarou 1). Priebeh majoritných nosičov náboja pre $V_g = 0$ (označený plnou čiarou 2). Bodkovanými čiarami sú znázornené priebehy koncentrácií majoritných nosičov pre napäcia hradla rôzne od nuly. Stav termodynamickej rovnováhy medzi rozložením prímesí a nosičov náboja je popísaný v dodatku 4.

behom koncentrácie majoritných nosičov náboja v stave termodynamickej rovnováhy pre nulové napätie hradla, ktorý vzniká v dôsledku difúzie majoritných nosičov náboja.

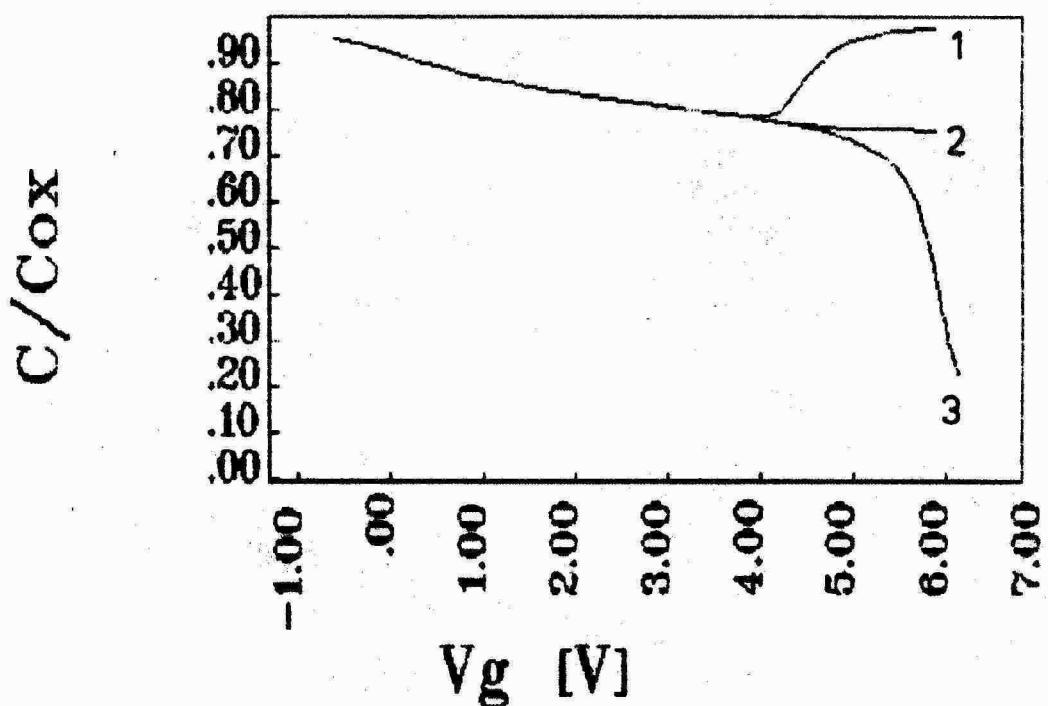
Na obr. 1.2 sú znázornené priebehy povrchového potenciálu pre rôzne režimy merania štruktúry MOS. V oblasti obohatenia a ochudobnenia sú obidva priebehy rovnaké. Od počiatku inverzie sa povrchový potenciál pre LF a HF meranie ustaluje v dôsledku vytvárania inverznej vrstvy. Krivka hlbokého



OBR.1.2 Priebeh povrchového potenciálu $\phi_s(V_g)$ ako funkcie napäťia hradla pre nízkofrekvenčné (LF) a vysokofrekvenčné (HF) meranie (označený 1) a pre meranie v stave hlbokého ochudobnenia (označený 2).

ochudobnenia ďalej klesá. Tento stav sa v reálnej štruktúre ukončí elektrickým prieražom.

Na obr.1.3 sú znázornené kapacitno-napäťové závislosti štruktúry MOS. Všetky tri krivky majú spoločný priebeh v oblasti obohatenia a ochudobnenia (spoločný priebeh majú aj krivky povrchového potenciálu). V tejto časti klesá kapacita pomaly, pretože oblasť priestorového náboja sa rozpína cez oblasť s vysokou koncentráciou prímesí (obr.1.1). Od počiatku inverzie sa krivky rozdeľujú. Nízkofrekvenčná krivka, ktorá zaznamenáva inverznú vrstvu, stúpa až ku kapacite oxidu. Vysokofrekvenčná krivka nezaznamenáva inverznú vrstvu,



OBR. 1.3 Priebeh kapacity štruktúry MOS v závislosti od napäťa hradla pre nízkofrekvenčné meranie (označené 1), vysokofrekvenčné meranie (označené 2) a meranie v stave hlbokého ochudobnenia (označené 3).

protože minoritné nosiče nestačia sledovať vysokofrekvenčný merací signál, avšak kapacita už ďalej neklesá, protože so zvyšovaním napäťa hradla sa zvyšuje prevažne koncentrácia minoritných nosičov v inverznej vrstve a oblasť priestorového náboja sa ďalej nerozpína. V stave hlbokého ochudobnenia sa nevytvára inverzná vrstva a so zvyšovaním napäťa hradla sa oblasť priestorového náboja nadalej rozpína a kapacita klesá. Z obr. 1.3 je vidieť, že po prekonaní oblasti s vysokou koncentráciou prímesí krvka hlbokého ochudobnenia začína klesať rýchlejšie.

1.4. Reálna štruktúra MOS.

Odlišnosť ideálnej a reálnej štruktúry MOS bola obsažne

spracovaná v práci [1.12] a tu uvedieme len prehľad tejto problematiky.

Elektrické vlastnosti reálnej štruktúry MOS sa líšia od ideálneho modelu hlavne vplyvom poruchových nábojov v oxidovej vrstve a na jej rozhraní s polovodičom a kovom, ktoré možno rozdeliť do nasledovných skupín:

- náboj pohyblivých iónov vo vrstve oxidu - Q_m
- náboj ionizovaných pascí v oxide - Q_{ox}
- fixný náboj na rozhraní Si-SiO₂, spôsobený nestechiometrickým zložením v oblasti fázového prechodu - Q_f
- náboj pascí na rozhraní Si-SiO₂ - Q_{it} .

Zároveň na elektrické vlastnosti štruktúry MOS vplýva aj rozdiel výstupných potenciálov elektrónov z kovu a polovodiča, $\varphi_{me} \neq 0$.

Okrem uvedených poruchových nábojov na elektrické vlastnosti štruktúry MOS vplývajú aj geometrické nedokonalosti štruktúry, ako aj zmena hrúbky izolačnej vrstvy a nerovnosť plochy rozhrania Si-SiO₂. Pri prechode k veľmi veľkej integrácii vznikla potreba zaoberať sa aj mikrodefektami v objeme kremíka, ktoré predstavujú poruchy kryštalickej mriežky pri výrobe monokryštálu, jeho primárnom spracovaní do formy kremíkového plátku a v priebehu technologického spracovania súčiastky. Ak sa uvedené defekty nachádzajú vo funkčnej oblasti súčiastky, majú nepriaznivé účinky na elektrické parametre, avšak v objeme polovodiča mikrodefekty vhodných veľkostí spôsobujú getračné efekty, čo sa často využíva na tvorbu tzv. denudovanej zóny. Zámerným vytváraním mikrodefektov v objeme polovodiča pomocou implantácie uhlíka a následným tepelným spracovaním možno napríklad podstatne zvýšiť dobu života minoritných nosičov náboja [1.13]. V práci [1.14] autori zreteľne zobrazili pomocou pomocou laserovej rastrovacej tomografie denudovanú zónu pri povrchu kremíka, vytvorenú getračnými efektami mikroprecipitátov SiO_x. Zároveň je z obrázkov vidieť mikroprecipitáty v objeme

polovodiča, vytvorené pomocou kysíka a patričného tepelného spracovania.

Literatúra

- [1.1] Csabay O. et al: Výskum štruktúr MIS a pasívacie. Záverečná správa štátnej výskumnnej úlohy III-4-3/2. EF SVŠT, Bratislava 1980.
- [1.2] Csabay O. et al: Výskum elektrofyzikálnych vlastností mikroelektronických unipolárnych štruktúr. Záverečná správa štátnej výskumnnej úlohy III-6-1/13. EF SVŠT, Bratislava 1985.
- [1.3] Csabay O., Botka V. et al: Elektrofyzikálne vlastnosti mikroelektronických štruktúr. Priebežná správa Štátnej výskumnnej úlohy III-7-2/04. Katedra mikroelektroniky EF SVŠT, Bratislava 1988.
- [1.4] Csabay O., Botka V. et al: Elektrofyzikálne vlastnosti mikroelektronických štruktúr. Záverečná správa Štátnej výskumnnej úlohy III-7-2/04, Katedra mikroelektroniky EF SVŠT, Bratislava 1990.
- [1.5] Žiška M.: Kandidátska dizertačná práca. Katedra mikroelektroniky EF SVŠT, Bratislava 1985.
- [1.6] Harmatha L.: Výskum vlastností štruktúry MIS v nerovnovážnom stave kapacitnou metódou. Kandidátska dizertačná práca. Katedra mikroelektroniky EF SVŠT, Bratislava 1983.
- [1.7] Valehrachová D.: Kandidátska dizertačná práca. Katedra mikroelektroniky EF SVŠT, Bratislava
- [1.8] Kinder R.: Príspěvok ku skúmaniu koncentračných profilov implantovaných vrstiev. Kandidátska dizertačná práca. EF SVŠT Bratislava 1984.
- [1.9] El-Sissi H., Cobbold R.S.C.: Electronic Letters 25 (1973) s. 594.

- [1.10] Klopfenstein R. W., Wu Chung P.: IEEE Trans. on electron. devices ED-22 (1975) s. 329.
- [1.11] Ryssel H., Ruge I.: Ionenimplantation. Stuttgart 1978
- [1.12] Csabay O.: Niektoré technologické a fyzikálne problémy štruktúr MIS. Doktorská dizertačná práca. Katedra mikroelektroniky, EF SVŠT, Bratislava 1986.
- [1.13] Skorupa W., Kögl R. : Electronics Letters Vol. 25 (1989) s. 1898.
- [1.14] Gall P. at al. : Electronics Letters Vol. 25 (1989) s. 429.

2. Ciele dizertačnej práce.

I. Vybudovanie automatizovaného experimentálneho pracoviska pre analýzu elektrofyzikálnych vlastností štruktúr MOS s nehomogénnym rozložením dotujúcich prímesí v substráte, s možnosťou sledovať plošné rozloženie skúmaných parametrov na kremíkovom substráte. Súčasťou pracoviska sú vysokofrekvenčná C-V metóda (vrátane ochudobnenej C-V metódy), nízkofrekvenčná C-V metóda, metóda konštantnej šírky OPN (CCT) a Q-C metóda.

II. Metódy uvedené v bode I automatizovať s využitím riadiaceho počítača PC AT pod operačným systémom MS DOS. Pre reálizáciu metód využiť interfejs GPIB PCIIA, meracie prístroje HP4280a, Keithley 642 a hrotové krokovacie zariadenie Zond AS.

III. Realizované metódy použiť pre určenie hĺbkových koncentračných profilov implantovaných prímesí, hrúbky oxidovej vrstvy, napäcia vyrovnaných pásov, hustoty pascí rozhrania Si-SiO₂ a hĺbkového profilu generáčného času života minoritných nosičov náboja. Analyzovať problémy vznikajúce pri určovaní parametrov štruktúr MOS v spojení s nehomogénou dotáciou substrátu.

IV. Zistiť hĺbkové koncentračné profily aktívnych prímesí a ich rozloženia na kremíkovom substráte pre rôzne dávky implantácie v rozsahu od $0.6 \cdot 10^{15}$ do $60.0 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$. Zistiť ako vplýva implantačná dávka na vlastnosti rozhrania Si-SiO₂ a hĺbkový profil času života minoritných nosičov náboja. Navrhnuť metodiku pre identifikáciu množstva implantovaných iónov v polovodičovom substráte pomocou kapacitnej metódy.

3. Použité metódy merania štruktúry MOS.

Kapacitne-napäťové (C-V) metódy, ktorými sa v tejto práci budeme zaoberať, poskytujú komplexné informácie o elektrofyzikálnych parametroch štruktúry MOS. Pre určenie niektorých parametrov postačuje vyhodnotenie dát nameraných pomocou jednej metódy, no vo väčšine prípadov kombináciou viacerých metód možno získať presnejšie výsledky. V predchádzajúcej kapitole sme na príklade výpočtu C-V závislostí ideálnej štruktúry MOS demonštrovali rozdiely medzi napäťovými závislosťami kapacity štruktúry MOS, meranými rozličnými metodami:

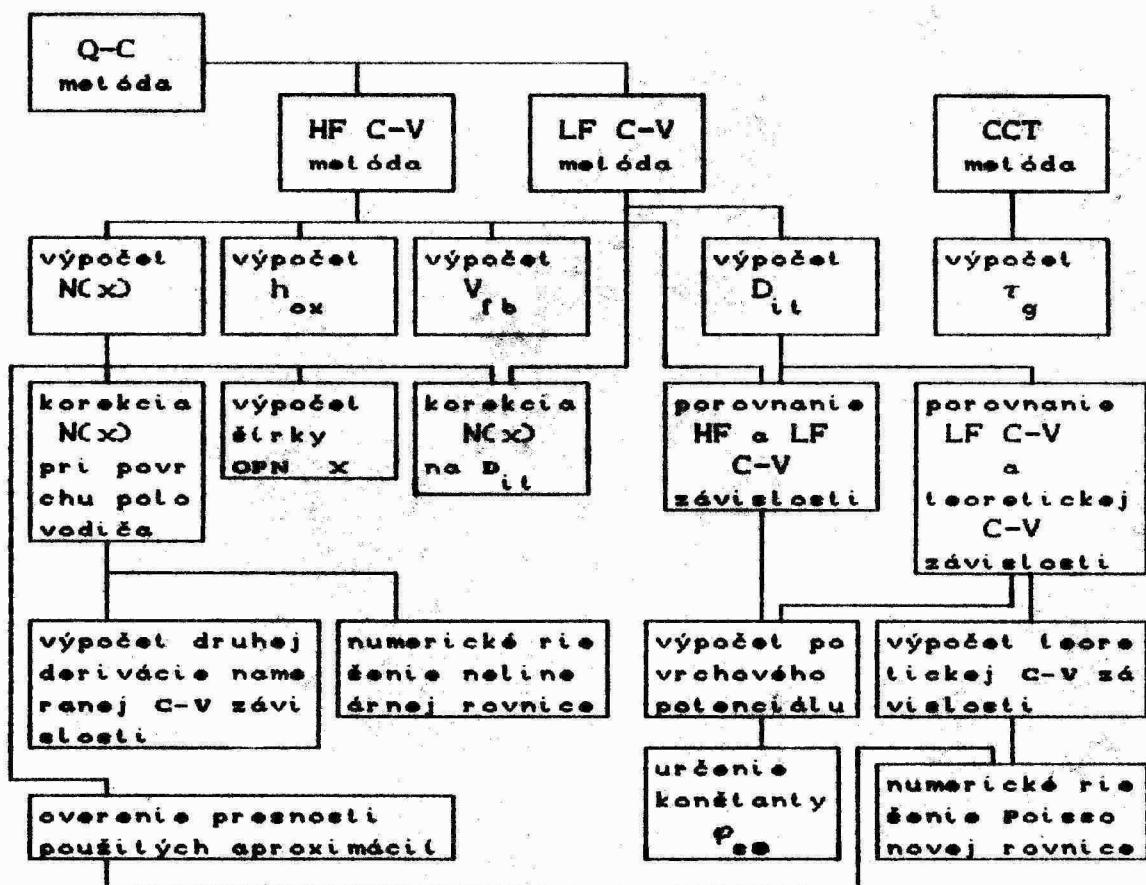
- nízkofrekvenčnou (prípadne kvázistatickou) C-V metódou
- rovnovážnou vysokofrekvenčnou C-V metódou
- nerovnovážnou vysokofrekvenčnou C-V metódou.

Okrem uvedených metód sme v dizertačnej práci použili Q-C metódu, ktorá kombinuje vlastnosti vysokofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej C-V metódy. Určenie tých istých C-V závislostí pomocou rôznych metód zároveň predstavuje určitý druh kontroly presnosti merania. To je výhodné hlavne v prípadoch, kedy určenie absolútnej chyby merania predstavuje komplexný problém. Pre meranie generačného času života minoritných nosičov náboja sme použili metódu konštantnej šírky OPN [3.1], ktorej výhodou oproti klasickej Zerbstovej C-t metóde [3.2] je väčšia rýchlosť merania. Modifikácia metódy konštantnej šírky OPN [3.3] zároveň eliminuje vplyv bočnej injekcie minoritných nosičov náboja do OPN zo substrátu.

Výhodou uvedených metód je, že nie sú deštruktívne, čo ich v spojení s ich rýchlosťou predurčuje pre rutinné použitie v priemysle. V laboratórnych podmienkach je vhodné tieto metódy overiť pomocou ďalších metód, ktoré možno považovať za doplnkové. Tak je tomu pri meraní koncentračného profilu prímesí, napríklad metódou rozptylového odporu, elektrochemickou kapacitnou metódou, prípadne SIMS. Vhodné je aj overenie

nie koncentračného profilu pomocou simulácie technologického procesu. Pri skúmaní energetických stavov nachádzajúcich sa v zakázanom pásme polovodiča, kvalitné informácie poskytuje metóda DLTS.

Uvedené C-V metódy predstavujú podmnožinu širokej oblasti diagnostiky štruktúr MOS pomocou kapacitných meraní. Nasledujúca schéma znázorňuje ich vzťah ku skúmaným parametrom, ktoré boli predmetom tejto práce a zároveň poukazuje na okruhy problémov, ktoré bolo potrebné riešiť.



3.1. Vysokofrekvenčná C-V metóda.

Pri meraní vysokofrekvenčnou kapacitnou metódou je MOS

štruktúra jednosmerným hradlovým napäťom privodená do požadovaného stavu a jej kapacita sa určí z prúdovej odozvy na vysokofrekvenčný signál malej amplitúdy, ktorý je nasuperponovaný na jednosmerné hradlové napätie. Meraním fázového posunu medzi vysokofrekvenčným napäťovým signálom a prúdom možno okrem kapacity zároveň vyhodnotiť aj vodivosť štruktúry. Veľkosť frekvencie meracieho signálu je daná kompromisom medzi požiadavkou čo najvyššej frekvencie zo strany ovplyvnenia merania rýchlymi pascami rozhrania Si-SiO₂ a technickými možnosťami štandardných meracích prístrojov. V našom experimente sme použili prístroj HP4280a, ktorého meraci signál má pevne stanovenú frekvenciu 1 MHz a veľkosť amplitúdy meracieho signálu možno voliť 10 mV, alebo 30 mV. Spomenutý prístroj možno riadiť pomocou zbernice IMS-2. Treba uviesť, že prístroj v spojení s riadiacim počítačom PC AT je schopný v blokovom prenose zmerať a v binárnom formáte preniesť do riadiaceho počítača 680 bodov (čo je limit pre blokový prenos) C-V a G-V závislosti za 25 sekúnd. Uvedený časový údaj uvádzame na základe vykonaných vlastných experimentov.

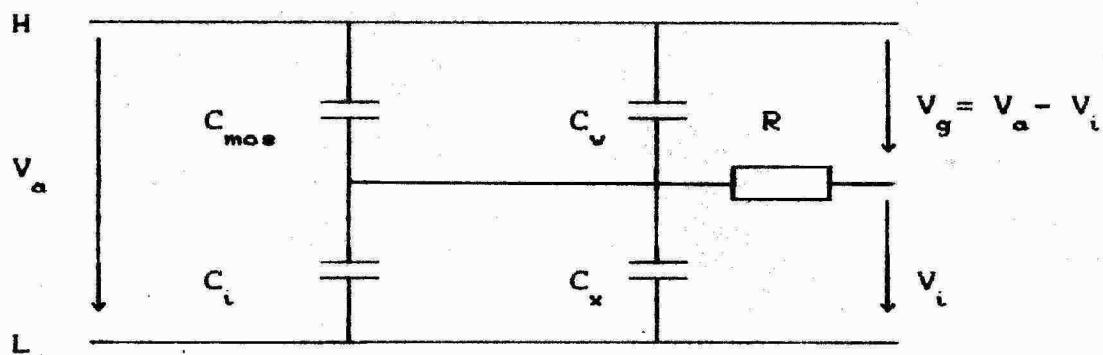
3.2. Kvázistatická C-V metóda.

Pri meraní kvázistatickou kapacitnou metódou je MOS štruktúra nabíjaná pomalým, v čase narastajúcim hradlovým napäťom. Kapacita MOS štruktúry je určená ako závislosť nabíjacieho prúdu a rýchlosťi nárastu hradlového napäťa. Z uvedeného vyplýva, že na realizáciu metódy je potrebný zdroj kontinuálne narastajúceho napäťa a ampérmetr. Rýchlosť narastania napäťa musí byť dostatočne malá, aby bola štruktúra počas merania stále v termodynamickej rovnováhe. Na druhej strane zase so zmenšovaním rýchlosťi sa zmenšuje aj prúd, ktorý musíme merať. Pre väčšinu meraných vzoriek vyhovovala rýchlosť rádovo 10^{-2} V/s, čo predstavuje pre ka-

pacitu 100 pF nabíjací prúd 10^{-12} A . V našom experimente sme použili na méranie prúdu elektrometer Keithley 642, ktorý meria prúd v rozsahu od 10^{-8} A do 10^{-17} A s rozlíšením 5 číslic na rozsah. Treba podotknúť, že okrem iných vynikajúcich vlastností prístroja výrobca zaručuje efektívnu hodnotu šumu menšiu ako $8 \times 10^{-17} \text{ A}$. Zdroj narastajúceho napäťia, ktorý bol postavený na našej katedre, umožňuje nastavenie rýchlosťi nárastu napäťia v rozsahoch od 10 V/s do 10^{-3} V/s s rozlíšením 1% rozsahu. Oba prístroje možno riadiť pomocou zbernice IMS-2. Hlavným zdrojom chýb pri kvázistatickej metóde je nepresnosť určenia rýchlosťi nárastu napäťia hradla [1.5]. Pred každým meraním je potrebne presne zmerať rýchlosť nárastu napäťia, ktorá sa potom použije pri výpočte kapacity. Rýchlosť nárastu napäťia pre zvolený rozsah určujeme v našom prípade z podielu zmeny napäťia a času za 10 s . Uvedná hodnota má potom význam strednej hodnoty a jej použitie pri výpočte predpokladá lineárny nárast napäťia, ktorý sme experimentálne overili pre reprezentatívnu vzorku rozsahov nárastu napäťia v čase.

3.3. Q - C metóda.

Q-C metóda [3.4] predstavuje kombináciu vysokofrekvenčnej C-V metódy a nábojovej Q-V metódy [3.5]. Jej princíp je nasledovný. Do série s kondenzátorom tvoreným štruktúrou MOS je zapojená napäťovo nezávislá kapacita, ktorú označíme C_i . Na sériovo-paralelné zapojenie kondenzátorov, ktoré je znázornené na obr. 3.1, pripojíme jednosmerné napätie V_a a mériame napätie V_i v spoločnom bode zapojenia kondenzátorov, ktoré predstavujú kapacitný delič. Kondenzátory označené C_v a C_x znázorňujú parazitné kapacity. C_v je kapacita medzi stoličkom a zdvihnutým hrotom sondy a C_x je kapacita spoločného bodu zapojenia kondenzátorov voči zemi. Zároveň s meraním napäťia V_i mériame aj kapacitu C_m a vodivosť G_m po-



OBR. 3.1 Schématické znázornenie zapojenia kondenzátorov Q-C metódy.

mocou vysokofrekvenčného signálu na superponovaného na napäť V_a . Medzi spoločný bod zapojenia kondenzátorov a vstup voltmetra je pripojený odpor, ktorý spolu s kapacitou prívodných vodičov voltmetra a vstupnou kapacitou voltmetra tvorí dolnopriepustný filter, spôsobujúci, že merané napätie nie je ovplyvnené vysokofrekvenčným signálom. Z uvedeného zároveň vyplýva, že veľkosť kapacity medzi spoločným bodom zapojenia a bodom L sa bude lísiť pre jednosmerné a vysokofrekvenčné meranie. Označme preto kapacitu C_i pre jednosmerné meranie $C_{i_{LF}}$ a pre vysokofrekvenčné meranie $C_{i_{HF}}$. Spomenutý odpor spolu so vstupným odporom voltmetra tvorí napäťový delič. Aby tým nebolo ovplyvnené meranie napätia, treba použiť voltmeter s vysokým vstupným odporom. Tu treba spomenúť vhodnosť použitia elekromeru Keithley 642, ktorého vstupný odpor v režime merania napätia je približne $10^{16} \Omega$ a jeho parazitná vstupná kapacita sú 2 pF. Detailný popis zapojenia Q-C metódy, eliminácia parazitných kapacít, prípadne metódika ich merania je popísaná v dodatku 5. Ak poznáme kapacitu oxidovej vrstvy štruktúry MOS C_{ox} a veľkosť kapacity $C_{i_{LF}}$, môžeme vypočítať hodnotu povrchového potenciálu φ_s z nasle-

dovného vzťahu, odvodeneho v dodatku 6.

$$\rho_s = \rho_{so} + V_g \left(1 + \frac{C_v}{C_{ox}} \right) - V_t \frac{C_{i,LF} + C_x}{C_{ox}} . \quad (3.1)$$

Zároveň môžeme určiť nízkofrekvenčnú kapacitu štruktúry MOS

$$C_{mos}^{LF} = C_{ox} \left(1 - \frac{d\rho_s}{dV_g} \right) . \quad (3.2)$$

Poruchové náboje nachádzajúce sa v meranej štruktúre MOS spôsobujú, že povrchový potenciál polovodiča nadobúda hodnotu ρ_{so} aj pri nulovom napäti hradla. Veľkosť tejto konštanty možno určiť z porovnania nameranej a teoretickej závislosti povrchového potenciálu od šírky OPN $\rho_s(x)$. Metóda určenia ρ_{so} je popísaná v dodatku 7. Tu možno poznamenať, že pre výpočet C_{mos}^{LF} hodnotu tejto konšstanty nepotrebujeme, ako je zrejmé zo vzťahov (3.1) a (3.2).

Z nameraných hodnôt C_m a G_m môžeme určiť vysokofrekvenčnú kapacitu štruktúry MOS pomocou nasledovných vzťahov. Najprv vypočítame odpovedajúci odpor R_m a reaktanciu X_m

$$R_m = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} . \quad (3.3a)$$

$$X_m = \frac{\omega C_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} . \quad (3.3b)$$

, ktoré použijeme vo vzťahu

$$C_{mos}^{HF} = - \frac{R_m^2 + (X_m + \frac{1}{\omega C_{i,HF}} + \omega C_v D^2)^2}{\omega D^2 (X_m + \frac{1}{\omega C_{i,HF}} + \omega C_v D^2)^2} . \quad (3.3c)$$

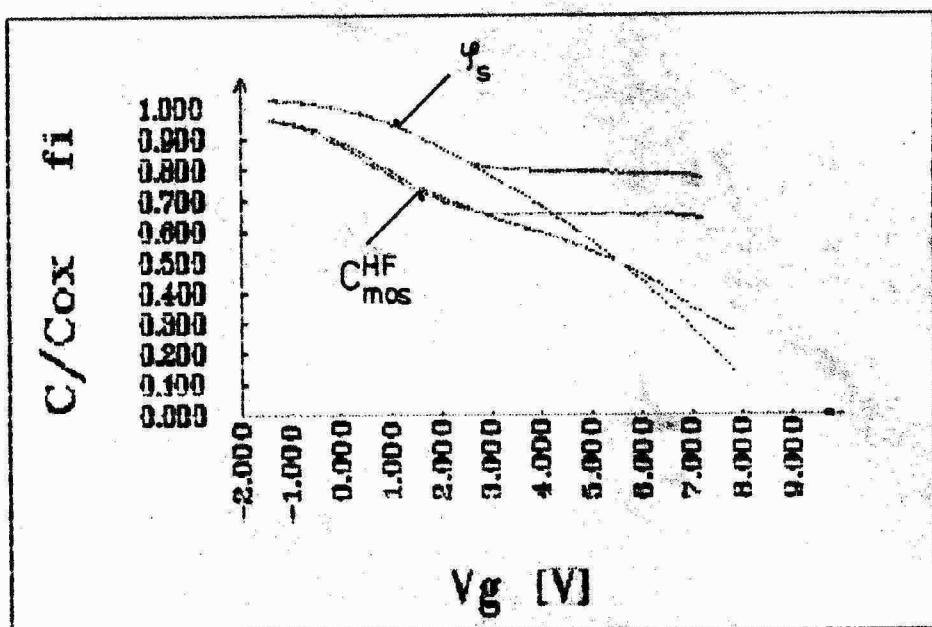
, kde

$$D^2 = R_m^2 + (X_m + \frac{1}{\omega C_{i,HF}})^2 . \quad (3.3d)$$

Podrobnyj popis a odvodenie uvedených vzťahov je popísaný v dodatku 1 literatúry [3.6]. Q-C metóda poskytuje celý rad výhod. Umožnuje simultánne meranie vysokofrekvenčnej a

nízkofrekvenčnej C-V závislosti, čo zaručuje rovnaké podmienky mérania pre obe závislosti a vylučuje možnosť ich vzájomného napäťového posuvu, ktorý sa môže objaviť ak by boli závislosti snímané sekvenčne. Zároveň méranie nízkofrekvenčnej C-V závislosti je statické a nie je závislé od dynamiky hradlového napätia. Pre určenie koncentračného profilu prímesí v podpovrchovej oblasti polovodiča je výhodné poznáť priebeh povrchového potenciálu, čo umožňuje výpočet nezaťažených pascami rozhrania Si-SiO₂. Uvedené výhody sú vykompenzované náročnosťou metódy na použitie prístroja. Kritickým bodom realizácie metódy je odizolovanie spoločného bodu zapojenia kondenzátorov. Pripojené napätie V_a sa musí rozložiť na kondenzátoroch podľa ich kapacít a nie podľa ich zvodových odporov. To vyžaduje použitie kvalitného kondenzátora C_i a usporiadanie rozloženia jednotlivých komponentov metódy tak, aby bol zvodový prúd zo spoločného bodu na zem čo najmenší. Tým sú z použitia Q-C metódy vylúčené štruktúry MOS, ktoré majú veľké zvodové prúdy spôsobené nedokonalosťou oxidovej vrstvy. Pre méranie v stave termodynamickej rovnováhy, ako uvádzajú autori metódy [3.7], je potrebné aby sa napätie V_i nemenovalo najmenej počas 10 sekúnd o veľkosť rádovo 10⁻³ V. Pre účely určenia koncentračného profilu môžeme merať nerovnovážnu C-V závislosť, pri ktorej sa zvodové prúdy zo spoločného bodu na zem neprejavia v takej miere, pretože merané napätie je odčítavané okamžite po priložení napäťia. Na obr. 3.2. sú znázornené normované priebehy HF C-V závislosti štruktúry MOS a priebehu povrchového potenciálu od napäťia hradla určené pomocou Q-C metódy pre méranie v stave termodynamickej rovnováhy a v stave hlbokého ochudobnenia. Použité prístroje v implementácii metódy na našom oddelení [3.8] [3.9] možno riadiť pomocou zbernice IMS-2 a namerané hodnoty napäti V_a, V_i, kapacity C_m a vodivosti G_m uložiť do diskového súboru pre ďalšie spracovanie.

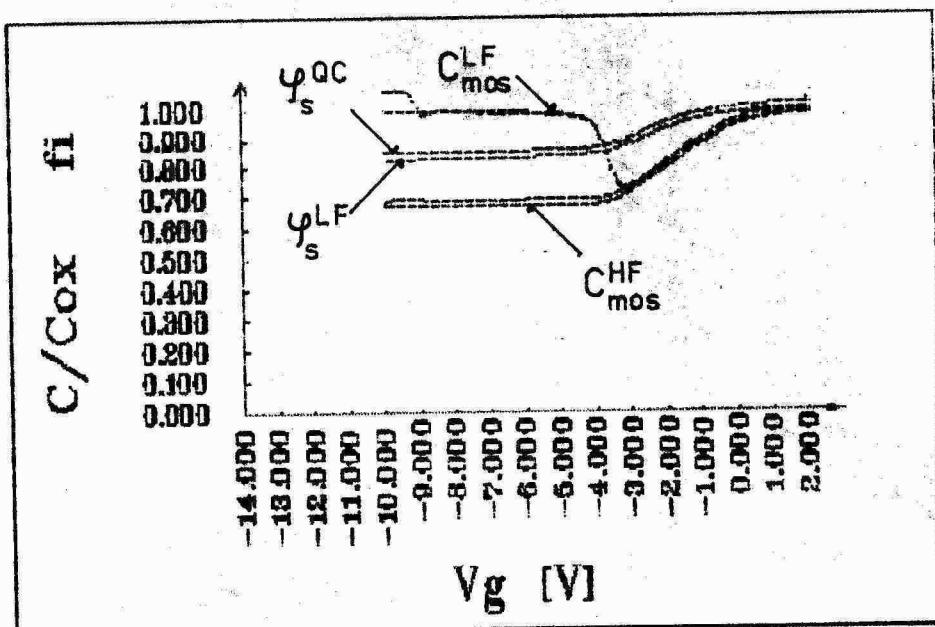
Pre overenie presnosti Q-C metódy sme na tej istej



OBR. 3.2 Normované priebehy HF C-V závislosti štruktúry MOS a priebehu povrchového potenciálu od napäťia hradla určené pomocou Q-C metódy pre meranie v stave termodynamickej rovnováhy a v stave hlbokého ochudobnenia. Priebehy $\rho_s(V_g)$ sú zobrazené s použitím normovania $1 - \rho_s / \rho_{norm}$, kde $\rho_{norm} = 3.33$ V.

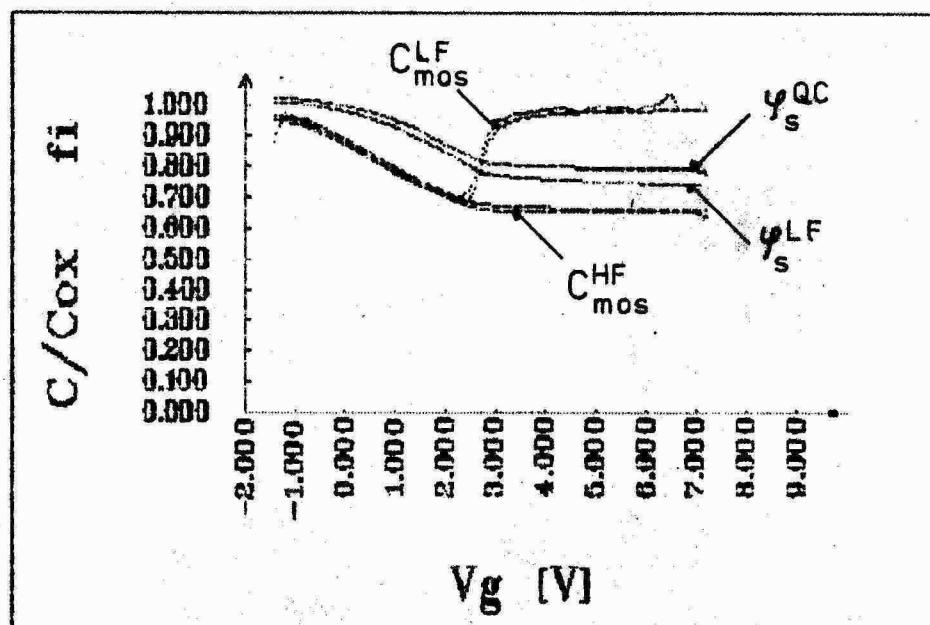
štruktúre MOS urobili samostatné vysokofrekvenčné a nízkoefrekvenčné meranie a zároveň vypočítali tie isté kapacitné závislosti z namenaných hodnôt Q-C metódy. Výsledné krvky sú na obr. 3.3 a obr. 3.4.

Pre kvantitatívne porovnanie výsledkov znázornených na obr. 3.3 a obr. 3.4 uvádzame v tab. 3.1 a tab. 3.2 číselné hodnoty normovaných kapacít C_{mos}^{HF} a C_{mos}^{LF} pre metódy HF, LF a Q-C a ich rozdiel vyjadrený relatívnu chybou. Z tabuľiek vidieť rozdiel medzi jednotlivými C-V závislosťami, čo je spôsobené jednak nepresnosťami pri určovaní parazitných kapacít a jednak zvodovými prúdmi použitých kondenzátorov. Autori metódy doporučujú pre elimináciu zvodových prúdov, ktoré spôsobuje



OBR. 3.3 Normované priebehy kapacity štruktúry MOS so substrátom typu N ako funkcie napäťia hradla pre rovnovážne vysokofrekvenčné a kvázistatické meranie. Zároveň sú znázornené tie isté charakteristiky získané pomocou Q-C metódy. Pre úplnosť je na obrázku znázornená závislosť povrchového potenciálu $\varphi_s(V_g)^{QC}$ získaná pomocou Q-C metódy a závislosť $\varphi_s(V_g)^{LF}$ vypočítaná integrovaním nízkofrekvenčnej C-V závislosti pomocou Berglundovho integrálu. Priebehy $\varphi_s(V_g)$ sú zobrazené s použitím normovania $1 - \varphi_s / \varphi_{norm}$, kde $\varphi_{norm} = -3.33$ V.

vlhkosť prostredia, použiť vzduchový kondenzátor C_t a na meranú vzorku usmerniť v priebehu merania prúd dusíka, ktorý zabráni kondenzovaniu vodných pár z okolia.



OBR. 3.4 Normované priebehy kapacity štruktúry MOS so substrátom typu P ako funkcie napäťa hradla pre rovnovážne vysokofrekvenčné a kvázistatické meranie. Zároveň sú znázornené tie isté charakteristiky získané pomocou Q-C metódy. Pre úplnosť je na obrázku znázornená závislosť povrchového potenciálu $\varphi_s(V_g)^{QC}$ získaná pomocou Q-C metódy a závislosť $\varphi_s(V_g)^{LF}$ vypočítaná integrovaním nízkofrekvenčnej C-V závislosti pomocou Berglundovho integrálu. Priebehy $\varphi_s(V_g)$ sú zobrazené s použitím normovania $1 - \varphi_s / \varphi_{norm}$, kde $\varphi_{norm} = 3.33$ V.

C_{mos}^{HF}			C_{mos}^{LF}		
HF [%]	QC[%]	Δ_r [%]	LF[%]	QC[%]	Δ_r [%]
99.67	98.30	+1.37	97.85	99.14	-1.32
98.56	96.69	+1.89	96.59	97.05	-0.47
95.73	93.89	+1.92	93.93	94.51	-0.61
89.89	87.75	+2.39	88.26	88.57	-0.36
82.15	80.17	+2.41	81.43	81.82	-0.47
74.83	73.09	+2.33	73.79	74.57	-1.06
69.69	67.81	+2.70	86.08	86.33	-0.29
69.10	67.20	+2.74	97.20	97.73	-0.54
68.97	67.08	+2.74	98.27	98.74	-0.48
68.91	67.03	+2.72	98.75	99.38	-0.64
68.90	67.01	+2.75	99.04	98.68	-0.36
68.90	67.03	+2.70	99.20	99.87	-0.67

TAB. 3.1 Porovnanie normovanej vyskofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej kapacity štruktúry MOS (obr. 3.3) pre metódy HF, LF a Q-C. Rozdiel krieviek je vyjadrený relatívou chybou.

C_{mos}^{HF}			C_{mos}^{LF}		
HF [%]	QC[%]	Δ_r [%]	LF [%]	QC[%]	Δ_r [%]
96.30	95.71	+0.62	94.80	94.89	-0.09
92.88	92.07	+0.87	91.03	92.83	-1.98
87.52	86.48	+1.19	85.97	87.53	-1.81
81.39	80.09	+1.60	79.70	81.20	-1.88
75.71	74.55	+1.53	74.24	76.00	-2.37
71.17	69.79	+1.98	69.89	70.65	-1.08
67.77	66.41	+2.00	80.77	83.57	-3.47
67.14	65.85	+1.93	94.72	96.93	-2.33
66.82	65.73	+1.62	96.77	98.26	-1.53
66.65	65.63	+1.52	97.47	98.06	-0.60
66.62	65.59	+1.53	97.94	99.46	-1.56
66.58	65.54	+1.56	98.15	99.39	-1.26

TAB. 3.2 Porovnanie normovanej vyskofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej kapacity štruktúry MOS (obr. 3.4) pre metódy HF, LF a Q-C. Rozdiel krieviek je vyjadrený relatívou chybou.

3.4. Metóda konštantnej šírky OPN a určenie generačného času života minoritných nosičov náboja.

Kvalitu substrátu štruktúry MOS možno posúdiť z generačného času života minoritných nosičov náboja, ktorý budeme označovať τ_g . Klasickou metódou určenia tohto parametra je Zerbstova metóda [3.2], ktorá určuje τ_g z relaxačného času prechodu štruktúry MOS z nerovnovážneho

stavu do rovnovážneho. V súčasnej dobe polovodičový priemysel pracuje s kremíkovými doskami vysokej kvality, ktorých relaxačný čas sa pohybuje rádovo v oblasti desiatok minút., čo vylučuje efektívne použitie Zerbstovej metódy pri kontrole polovodičovej technológie. Podstatné zrýchlenie procesu určenia τ_g kvalitných kremíkových substrátov umožňuje metóda konštantnej šírky OPN [3.1]. Jej princíp je nasledovný. Štruktúru MOS priviedieme napäťovým impulzom na hradle do ne-rovnovážneho stavu hlbokého ochudobnenia. Generácia minoritných nosičov náboja spôsobuje tvorbu inverznej vrstvy na povrchu polovodiča, odtienenie substrátu a následné zužovanie OPN, ktoré sa prejaví nárastom kapacity štruktúry MOS. Vplyv generácie minoritných nosičov náboja na šírku OPN možno kompenzovať zvyšovaním napätia na hradle a tým udžiavať konštantnú šírku OPN. Je zrejmé, že rýchlosť nárastu napätia hradla bude závisieť od rýchlosťi generácie minoritných nosičov náboja, čo možno vyjadriť nasledovným vzťahom [3.3]

$$I_g = C_{ox} \frac{dV}{dt}, \quad (3.4)$$

kde I_g predstavuje generačný prúd minoritných nosičov náboja, ktoré vytvárajú inverznú vrstvu. Generačný čas života minoritných nosičov τ_g potom môžeme vyjadriť pomocou generačného prúdu I_g [3.3]

$$\tau_g = \frac{q \times n_i}{2 I_g}. \quad (3.5)$$

V uvedenej metóde predpokladáme, že prírastok náboja v inverznej vrstve je tvorený len minoritnými nosičmi náboja, ktoré sa generujú v OPN. Tým zanedbávame difúziu minoritných nosičov zo substrátu a povrchu polovodiča, čo môže skresliť namerané výsledky. Skreslenie výsledkov môže nastaviť hlavne vtedy, ak priestor, v ktorom sa nachádza meraná vzorka, nie je dokonale uzavretý, čo spôsobí, že dovnútra vniká svetlo. Dvojice elektrón-diera, generované zachytenými fotónmi na po-

vrchu polovodiča, prispievajú ku generačnému prúdu a vypočítané hodnoty τ_g budú menšie ako je ich skutočná hodnota. Vplyv uvedených javov možno eliminovať, ak budeme určovať τ_g z rozdielu smerníc nameraných závislostí $V_g(t)$ pre rôzne šírky OPN [3.3], [3.10], [3.11], [3.12]. Generačný prúd, tvorený minoritnými nosičmi náboja, ktoré sa generujú v OPN, potom môžeme vyjadriť vzťahom

$$I_g = C_{ox} \left[\frac{dV_g}{dt} \Big|_{c1} - \frac{dV_g}{dt} \Big|_{c2} \right] , \quad (3.6)$$

a generačný čas τ_g

$$\tau_g = \frac{q \Delta x n_i}{2 I_g} , \quad (3.7)$$

kde Δx je vzdialenosť o ktorú sa rozšíri OPN pri zmene kapacity z C_1 na C_2

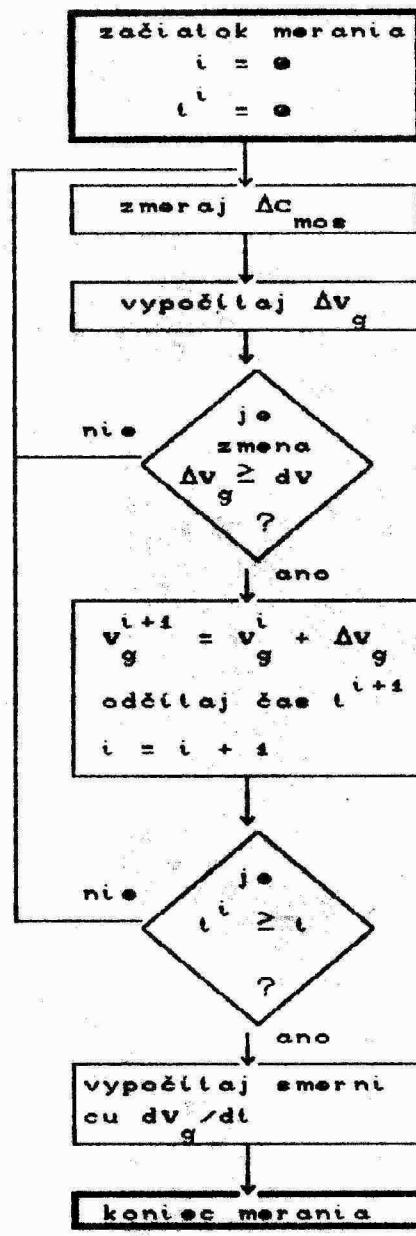
$$\Delta x = \epsilon \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1} \right) . \quad (3.8)$$

Vypočítaná hodnota τ_g zo vzťahu (3.7) potom predstavuje strednú hodnotu generačného času života minoritných nosičov náboja v oblasti polovodiča vymedzenej vzdialenosťou Δx . Problematika nerovnovážnych meraní bola na našom oddelení spracovaná v práci [1.6] a analógová implementácia uvedenej metódy bola spracovaná v práci [3.13]. Súčasťou tejto dizertačnej práce je číslicová implementácia metódy konštantnej šírky OPN. Na meranie kapacity bol použitý prístroj HP4280a, ktorý zároveň obsahuje aj zdroj jednosmerného napäťia. Metóda bola automatizovaná pomocou zbernice IMS-2. Najdôležitejšiu časť riadiaceho programu predstavuje slučka, v ktorej sa udržuje konštantná kapacita štruktúry MOS v nerovnovážnom stave pomocou zmeny napäťia na hradle. Ak poznáme priebeh koncentračného profilu v polovodiči, môžeme vypočítať potrebnú zmenu napäťia hradla pre nameranú zmenu kapacity štruktúry MOS zo vzťahu [3.3]

$$\frac{dV_g}{dq} = \frac{q \in N}{C_{mos}^a}$$

(3.9)

Ak zároveň meríame čas, získame závislosť $V_g(t)$. Postup merania jednej závislosti $V_g(t)$ je znázornený nasledujúcim vývojovým diagramom.



Po pripojení napäťa V_g meríame body (V_g, t) pre $i=1, 2, \dots$

ΔC_{mos} je zmena kapacity štruktúry MOS spôsobená generáciou minoritných nosičov náboja

pre malé zmeny ΔC_{mos} vypočítame ΔV_g podľa vzťahu (3.9)

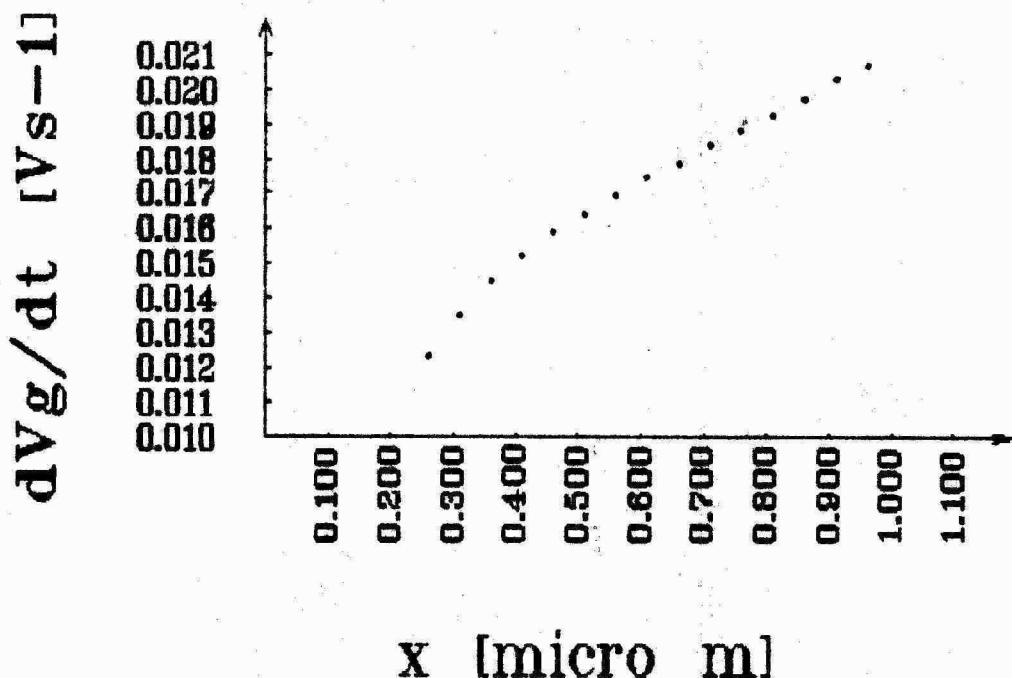
dV_g je rozlišovacia schopnosť zdroja napäťa

zvýšime hradlové napätie, odčítame čas a inkrementujeme index

t je čas merania určovaný operátorm

výsledkom merania je smericá závislosť $V_g(t)$

meranie môžeme opakovať pre rôzne počiatocné hodnoty V_g .

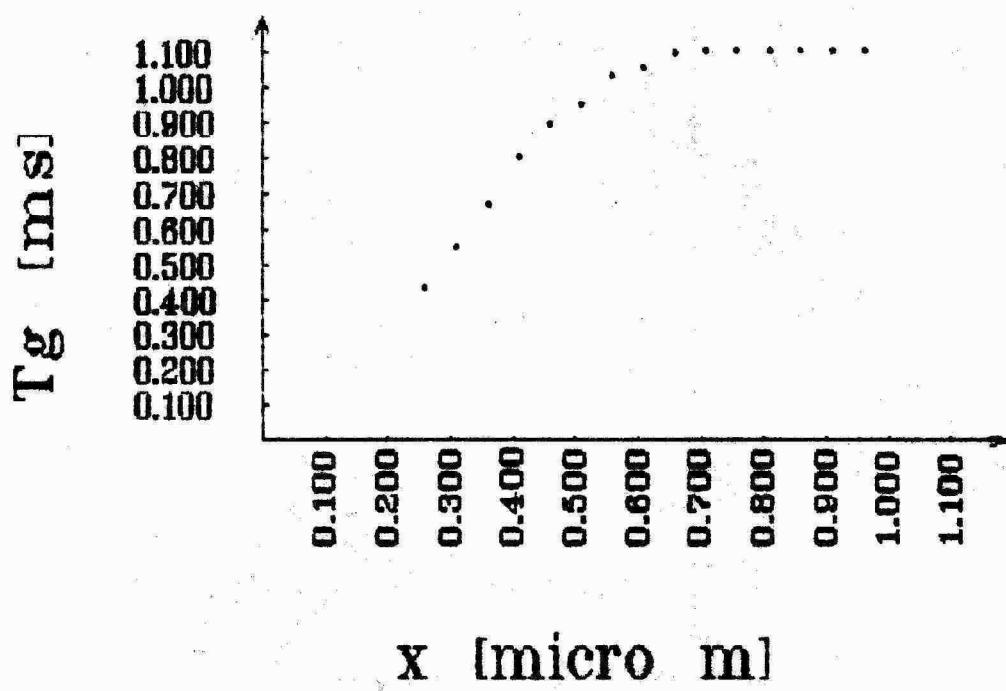


OBR. 3.5 Závislosť dV_g/dt od šírky OPN získaná pomocou metódy konštantnej šírky OPN.

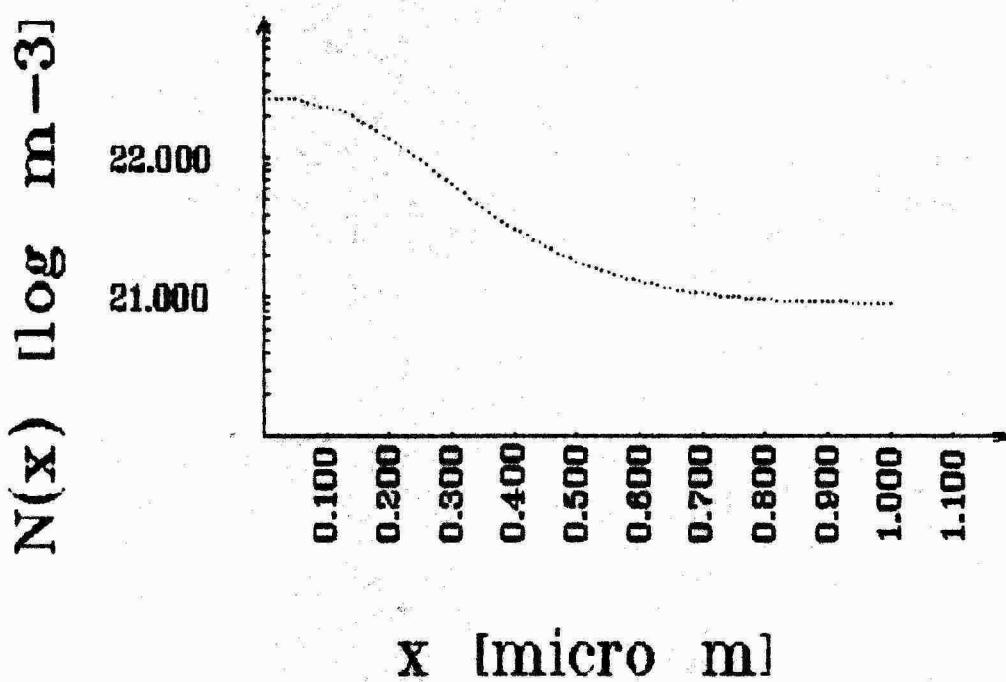
Na obr. 3.5 je znázornená závislosť dV_g/dt od šírky OPN. Za predpokladu udržania konštantnej šírky OPN sa nemenia potenciálové pomery v polovodiči a generácia minoritných nosičov je konštantná, z čoho vyplýva linearita závislosti $V_g(t)$. Smernice dV_g/dt potom možno určiť lineárrou regresiou nameraných závislostí $V_g(t)$. Nie je ľahké si predstaviť, že vzťahy (3.6) až (3.8) predstavujú diskretizáciu spojitého priebehu $\tau_g(x)$. Ak namerané hodnoty $dV_g/dt = f(x)$ approximujeme spojitou funkciou, môžeme vyjadriť hlbkový profil $\tau_g(x)$ vzťahom

$$\tau_g(x) = \frac{q n_i}{2 C_{ox}} \left[\frac{d \left(\frac{dV_g}{dt} \right)}{dx} \right]^{-1} \quad (3.10)$$

Na obr. 3.6 je znázorený priebeh $\tau_g(x)$, vypočítaný z nameraných dát zobrazených na obr. 3.5 a na obr. 3.7 je



OBR. 3.6 Hľbkový profil generačného času života minoritných nosičov náboja.



OBR. 3.7 Hľbkový profil koncentrácie dotujúcich prímesí $N(x)$. Koncentračný profil prímesí bol vytvorený implantáciou P^{31} s dávkou $8.0 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$ pri energii 120 keV. Aktivácia prebiehala počas 40 minút pri teplote 1050°C v atmosféri N_2 .

hlíbkový koncentračný profil $N(x)$ skúmanej štruktúry.

Literatúra

- [3.1] Pierret R.F., Small D.W.: IEEE Trans. on elektron. dev. 22 (1975) s. 1052.
- [3.2] Zerbst M.: Z. Angew. Phys. 22 (1966), s. 30.
- [3.3] Eades W.D., Shott J.D., Swanson R.M.: IEEE Trans. on elektron. dev. 30 (1983) s. 1274.
- [3.4] Nicollian E.H., Brews J.R.: Solid St. Electron. 27 (1984) s. 953.
- [3.5] Ziegler K., Klausmann E.: Appl. Phys. Lett. 26 (1975) s. 400.
- [3.6] Boulin D.M., Brews J.R., Nicollian E.H.: Solid St. Electron. 27 (1984) s. 977.
- [3.7] Brews J.R., Nicollian E.H.: Solid St. Electron. 27 (1984) s. 963.
- [3.8] Batka V., Csabay O., Jamrich M.: S. celoštátna konferencia Mikroelektronika 1989, Dom techniky ČSVTS Bratislava, 1989 s. 59.
- [3.9] Jamrich M.: Q-C metóda pre skúmanie štruktúr MIS. Diplomová práca, Katedra mikroelektroniky, EF SVŠT, Bratislava 1988.
- [3.10] Beyer A., Markgraf W.: Wiss. Z. d. Techn. Hochsch. Karl-Marx-Stadt 28 (1986) s. 479.
- [3.11] Lal, Vasi: Solid St. Electron. 30 (1987) s. 801.
- [3.12] Hof, Mortthers, Roenker: Solid St. Electron. 31 (1988) s. 937.
- [3.13] Pilka K.: Nеровноважна капацітна метода з константною шириной ОРН, Katedra mikroelektroniky, EF SVŠT, Bratislava 1989.

4. Metódy určenia ďalších parametrov štruktúry MOS.

V kapitole 3. sme popísali C-V metódy, ktoré budeme používať na určovanie parametrov štruktúr MOS. Predovšetkým sa budeme zaoberať určením koncentračného profilu dotujúcich prímesí v pod povrchovej oblasti polovodiča, pretože niektoré metódy určovania ďalších parametrov štruktúry MOS vychádzajú z predpokladu, že priebeh koncentrácie je známy. Pri určovaní priebehov koncentračných profilov, ktoré nie sú homogénne, sa používajú modely, ktorých presnosť aproximácie daného fyzikálneho javu závisí od gradientu koncentrácie prímesí [4.1] [4.2] [4.3] [4.4]. Aby sme overili presnosť použitých approximácií, vykonali sme porovnanie koncentračných profilov:

- použitého pri výpočte teoretickej C-V závislosti a
- získaného z tejto teoretickej C-V závislosti [4.5].

Výsledky sú uvedené v časti 4.1.4.

Ďalším parametrom, ktorý budeme určovať, je hustota pascí rozhrania Si-SiO₂. Tu prichádzajú do úvahy dva postupy. Porovnanie vysokofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej C-V závislosti, alebo porovnanie experimentálnej a teoretickej C-V závislosti. Ich aplikácia je popísaná v časti 4.2.

Určenie generačného času života minoritných nosičov náboja, ktoré súvisí s metódou konštantnej šírky OPN, bolo popísané v časti 3.4.

4.1. Určenie koncentračného profilu prímesí v pod povrchovej oblasti polovodiča.

Problematika merania koncentračných profilov bola na našom oddelení spracovaná v práci [4.6]. Tu sa budeme zaoberať len niektorými aspektmi tejto problematiky, ktoré súvisia s určením nehomogénneho koncentračného profilu prímesí v polo-

vodiči.

Samostatné okruhy problémov pri určovaní koncentračného profilu prímesí, ktorý označíme $N(x)$, tvoria:

- korekcia vypočítanej koncentrácie v oblasti od povrchu polovodiča do hĺbky $2L_{DE}$ [4.7] [4.8]
- určenie hĺbky vypočítanej koncentrácie, opierajúca sa o modely určenia šírky OPN [4.9] [4.10] [4.11]
- korekcia vplyvu pascí rozhrania Si-SiO₂ [4.12]
- rozdiel medzi koncentráciou dotujúcich prímesí $N(x)$ a koncentráciou majoritných nosičov náboja $n(x)$.

Postupne sa budeme zaoberať uvedenými okruhmi problémov.

4.1.1. Korekcia koncentrácie dotujúcich prímesí pri povrchu polovodiča.

Známy vzťah pre výpočet $N(x)$ [2]

$$N(x) = \frac{2}{q \epsilon} \left[\frac{d C_{ee}^{-2}}{d \rho_s} \right]^{-1}, \quad (4.1)$$

bol odvodený z riešenia Poissonovej rovnice s použitím aproximácie hlbokého ochudobnenia. Táto aproximácia neplatí pre šírku OPN menšiu ako $2L_{DE}$. Aby sme dosiahli správne výsledky aj v tejto oblasti, musíme $N(x)$ vypočítané podľa (4.1) korigovať postupom odvodeným v [4.7] [4.8]. Z práce [4.7] je zrejmý aj fyzikálny význam tejto korekcie, ktorá je funkciou povrchového potenciálu

$$N(x)_{\text{korigované}} = N(x) f(\rho_s), \quad (4.2)$$

kde

$$f(\rho_s) = \frac{1}{1 - e^{-\beta \rho_s}} - \frac{e^{-\beta \rho_s} \left[e^{-\beta \rho_s} + \beta \rho_s - 1 \right]}{\left[1 - e^{-\beta \rho_s} \right]} \quad (4.3)$$

$$\beta = \frac{q}{kT}$$

Povrchový potenciál, použitý vo vzťahu (4.3) možno určiť podľa [4.7] numerickým riešením rovnice

$$\frac{C_{sc}^2}{\rho_s} \frac{dC_{sc}^{-2}}{d\rho_s} = \frac{\frac{-\beta\rho_s}{1-e}}{\frac{-\beta\rho_s}{e+\beta\rho_s-1} + \frac{2e^{-\beta\rho_s}}{1-e}} \quad (4.4)$$

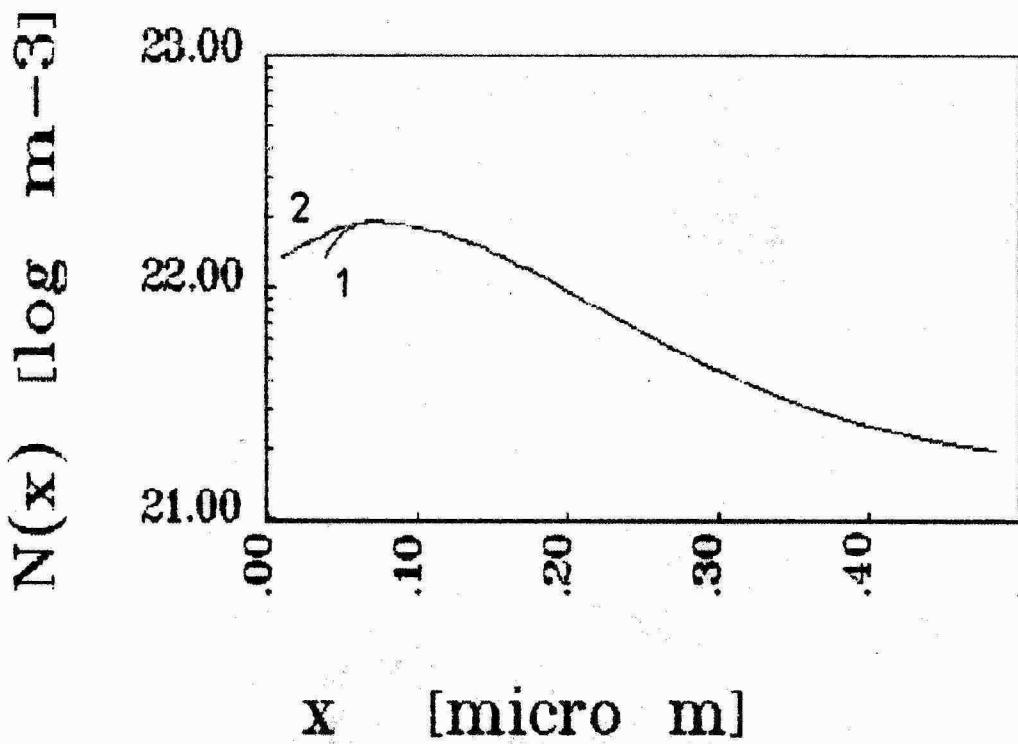
Tu treba poznamenať, že vzťah (4.4) bol odvodený pomocou vzťahu pre kapacitu OPN C_{sc} , ktorý predpokladá homogénnu koncentráciu prímesí. Pretože experimentálne zistená diferenciálna kapacita C_{sc} závisí od zmeny náboja na hranici OPN (čo využíva vzťah (4.1)), bude povrchový potenciál získaný zo vzťahu (4.4) predstavovať potenciál, ktorý by bol na povrchu polovodiča, ak by koncentrácia $N(x)$ v celej oblasti OPN bola konštantná a zároveň rovná koncentrácii na hranici OPN (ktorú určujeme podľa (4.1)). Z uvedeného vyplýva, že pre nehomogénne dotované substraty pomocou vzťahu (4.4) nemožno získať skutočný priebeh $\varphi(V)$, napriek tomu, že korekcia (4.2) dáva dobré výsledky aj v tomto prípade.

4.1.2. Určenie hĺbky koncentračného profilu.

Po určení koncentrácie podľa vzťahu (4.2) treba zároveň určiť polohu vypočítanej koncentrácie. Bežne používaný vzťah vychádzajúci z modelu doskového kondenzátora (čo predstavuje aproximáciu hlbokého ochudobnenia)

$$w(C_{sc}) = \frac{E}{C_{sc}} \quad (4.5)$$

neplatí pre hĺbky menšie ako $2L_{DE}$. V tejto oblasti možno použiť vzťah odvodený pomocou aproximácie priebehu potenciálu v polovodiči $\varphi(x)$. Uvedená problematika bola na našom oddeľení podrobne spracovaná v [4.13] [4.14], keď boli použité výsledky prác [4.9] [4.10] [4.11]. Pre výpočet hĺbky v tejto oblasti môžeme použiť vzťah, ktorý predstavuje aproximáciu



OBR. 4.1 Priebeh koncentrácie dotujúcich prímesí v polovodiči vypočítaný zo vzťahu (4.2). Vzdialenosť od povrchu bola určená určená zo vzťahov (4.5) krvka 1 a (4.6) krvka 2.

priebehu potenciálu v polovodiči $\varphi(x)$ [1]

$$w(\rho_e) = \sqrt{2} L_{DE} \left[e^{-\beta \rho_e} + \beta \rho_e - 1 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4.6)$$

kde

$$L_{DE} = \left[\frac{\epsilon}{\beta q N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.7)$$

je extrinznická Debayova dĺžka, pri výpočte ktorej sme použili koncentráciu získanú zo vzťahu (4.2). Vo vzťahu (4.6) použijeme hodnotu ρ_e získanú z riešenia vzťahu (4.4). Napriek tomu, že aj vzťah (4.6) bol odvodnený za predpokladu homogénnego rozloženia prímesí v polovodiči, jeho použitie v spojení s riešením rovnice (4.4) dáva uspokojivé výsledky, ako ukážeme neskôr. Na obr. 4.1. sú znázornené priebehy $N(x)$ s použitím korekcie (4.2), prezentujúce rozdiel v použití

vzťahov (4.5) a (4.6). Tu je zrejmé, že použitím vzťahu (4.6) možno vypočítať priebeh koncentrácie dotujúcich prímesí bližšie k povrchu polovodiča, čo má význam pre ďalšie výpočty, ktoré predpokladajú znalosť priebehu $N(x)$.

Prvý stĺpec tab. 4.1 obsahuje hodnoty ρ_s určené riešením rovnice (4.4) a v druhom stĺpci sa nachádzajú hodnoty korekčného faktora (4.3). Ďalšie dva stĺpce umožňujú porovnanie nekorigovanej a korigovanej hodnoty $N(x)$ a v posledných dvoch stĺpcoch sú uvedené hodnoty $w(\rho_s)$ a $w(C_{sc})$ získané zo vzťahov (4.5) a (4.6).

POZNÁMKA.

Pomocou approximácie (4.6), ktorá predstavuje šírku OPN ako funkciu povrchového potenciálu polovodiča (koncentrácia je parameter), možno approximovať priebeh $\rho(x)$ pre danú šírku OPN aj v prípade, že substrát polovodiča je nehomogénne dotovaný. Vlastný postup určenia koncentrácie dotujúcich prímesí z kapacitného mérania predstavuje diskretizáciu spojitého priebehu $N(x)$, kde jednotlivé hodnoty N_i predstavujú approximáciu koncentrácie v oblasti hranice OPN [4.1] [4.2] [4.3]. Úbytok potenciálu $\Delta\rho_i$ na vrstve šírky $\Delta w_i = w_{i+1} - w_i$ s koncentráciou N_i možno určiť riešením vzťahu

$$\Delta w_i = \sqrt{2} L_{DE_i} \left[e^{-\beta \Delta \rho_i} + \beta \Delta \rho_i - 1 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4.8)$$

kde

$$L_{DE_i} = \left[\frac{e}{\beta q N_i} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4.9)$$

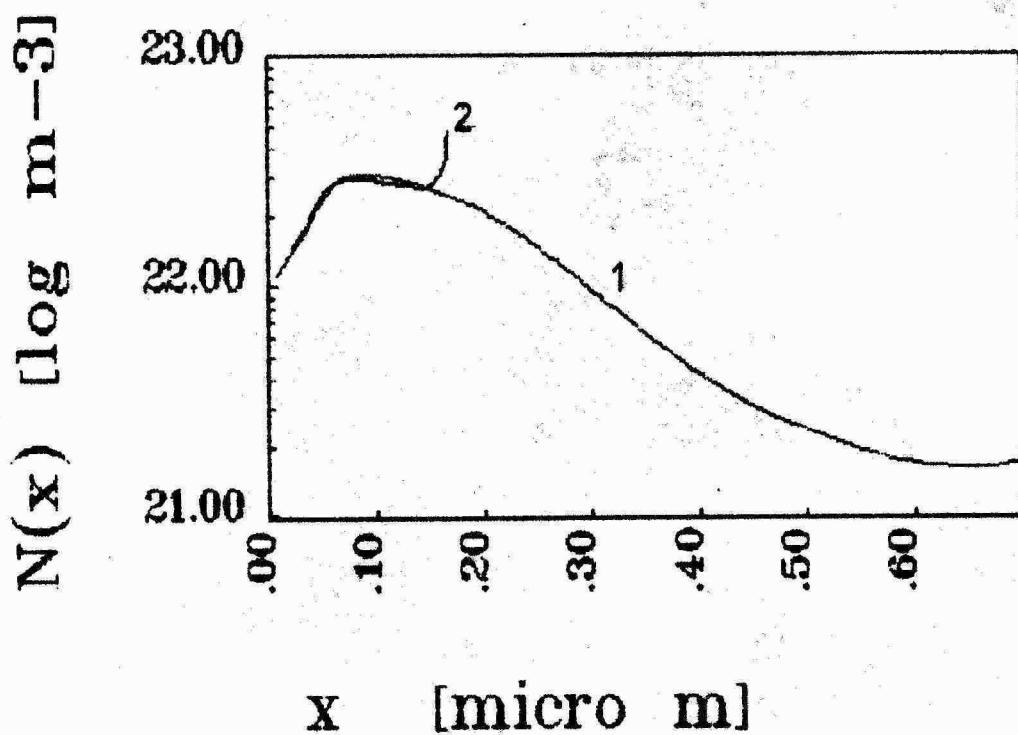
Potom priebeh $\rho(x)$ možno získať použitím vzťahov (4.8) a (4.9), ak s výpočtom začneme od hranice OPN, kde predpokladáme potenciál rovný nule, smerom k povrchu polovodiča.

ρ_e [V]	$f(\rho_e)$	N [m^{-3}]	$N_{kor.}$ [m^{-3}]	$w(\rho_e)$ [μm]	$w(C_{sc})$ [μm]
0.007	0.39	$0.35 \cdot 10^{23}$	$0.14 \cdot 10^{23}$	0.0102	0.0389
0.016	0.44	$0.33 \cdot 10^{23}$	$0.15 \cdot 10^{23}$	0.0190	0.0413
0.024	0.50	$0.31 \cdot 10^{23}$	$0.15 \cdot 10^{23}$	0.0265	0.0438
0.032	0.56	$0.29 \cdot 10^{23}$	$0.16 \cdot 10^{23}$	0.0333	0.0466
0.041	0.61	$0.28 \cdot 10^{23}$	$0.17 \cdot 10^{23}$	0.0391	0.0494
0.049	0.66	$0.27 \cdot 10^{23}$	$0.18 \cdot 10^{23}$	0.0444	0.0523
0.057	0.71	$0.26 \cdot 10^{23}$	$0.18 \cdot 10^{23}$	0.0493	0.0553
0.065	0.76	$0.25 \cdot 10^{23}$	$0.19 \cdot 10^{23}$	0.0538	0.0585
0.073	0.80	$0.24 \cdot 10^{23}$	$0.19 \cdot 10^{23}$	0.0581	0.0617
0.081	0.83	$0.23 \cdot 10^{23}$	$0.19 \cdot 10^{23}$	0.0623	0.0650
0.090	0.86	$0.22 \cdot 10^{23}$	$0.19 \cdot 10^{23}$	0.0664	0.0684
0.098	0.89	$0.22 \cdot 10^{23}$	$0.19 \cdot 10^{23}$	0.0704	0.0719
0.106	0.91	$0.21 \cdot 10^{23}$	$0.19 \cdot 10^{23}$	0.0743	0.0755
0.115	0.93	$0.21 \cdot 10^{23}$	$0.19 \cdot 10^{23}$	0.0783	0.0791
0.124	0.94	$0.20 \cdot 10^{23}$	$0.19 \cdot 10^{23}$	0.0822	0.0828
0.133	0.96	$0.20 \cdot 10^{23}$	$0.19 \cdot 10^{23}$	0.0861	0.0866
0.142	0.97	$0.19 \cdot 10^{23}$	$0.19 \cdot 10^{23}$	0.0900	0.0904
0.151	0.97	$0.19 \cdot 10^{23}$	$0.18 \cdot 10^{23}$	0.0939	0.0942
0.160	0.98	$0.19 \cdot 10^{23}$	$0.18 \cdot 10^{23}$	0.0978	0.0981
0.169	0.99	$0.18 \cdot 10^{23}$	$0.18 \cdot 10^{23}$	0.1018	0.1019
0.178	0.99	$0.18 \cdot 10^{23}$	$0.18 \cdot 10^{23}$	0.1058	0.1058
0.187	0.99	$0.18 \cdot 10^{23}$	$0.17 \cdot 10^{23}$	0.1098	0.1098
0.205	1.00	$0.17 \cdot 10^{23}$	$0.17 \cdot 10^{23}$	0.1179	0.1179

TAB. 4.1 Výpočet koncentračného profilu prímesí N(x)

4.1.3. Vplyv pascí rozhrania Si-SiO₂ a generácie minoritných nosičov náboja.

V oblasti inverzie dochádza v OPN k generácii minoritných nosičov náboja, ktoré vytvárajú inverznú vrstvu a ovplyvňujú veľkosť kapacity štruktúry MOS. Aby sme namerali C-V závislosť v oblasti hlbokého ochudobnenia, ktorá nie je ovplyvnená minoritnými nosičmi náboja, použijeme impulznú HF C-V metódu. Namerané hodnoty N(x) získané pomocou tejto metódy sú na obr. 4.2.



OBR. 4.2 Priebeh koncentračného profilu dotujúcich prímesí získaný z C-V závislosti v oblasti hlbokého ochudobnenia (krivka 1) a z rovnovážnej C-V závislosti (krivka 2). Pre výpočet závislostí N(x) boli použité C-V závislosti zobrazené na obr. 3.2.

Pri výpočte N(x) pomocou vzťahov (4.1), (4.2), (4.3), (4.4) a (4.6) sa používa approximácia

$$\frac{dC_{sc}^{-2}}{dp_g} \approx \frac{dC_{mos}^{-2}}{dV_g}, \quad (4.10)$$

kde rovnosť platí v prípade, že hustota pascí rozhrania $Si-SiO_2$ je rovná nule. Nameraná HF C-V závislosť je však vždy do určitej miery ovplyvnená pascami rozhrania, ktoré počas merania menia svoj stav [4.15]. Tento vplyv možno zmenšovať zvyšovaním frekvencie meracieho signálu a rýchlejším meraním kapacity po napäťovom skoku impulznej C-V metódy. Problému použitia aproximácie (4.10) sa vyhneme, ak použijeme na určenie $N(x)$ data namerané pomocou Q-C metódy, pri ktorej vieme určiť priebeh povrchového potenciálu $\phi_g(V)$.

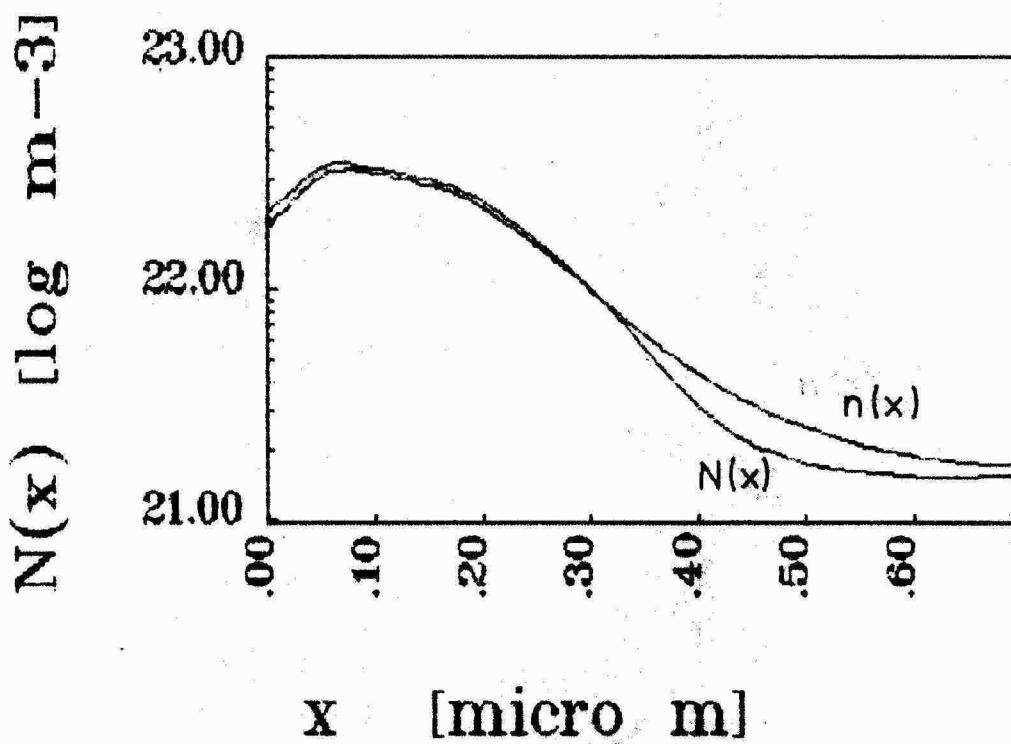
Ak určujeme koncentračný profil dotujúcich prímesí z HF C-V závislosti, môžeme vplyv pascí rozhrania $Si-SiO_2$ korigovať v oblasti ochudobnenia vzťahom uvedeným v [1]

$$N(x)_{korigované} = N(x) \frac{1 - \frac{C_{mos}^{HF}}{C_{ox}^{HF}}}{1 - \frac{C_{mos}}{C_{ox}}}, \quad (4.11)$$

za predpokladu, že poznáme priebeh nízkofrekvenčnej C-V závislosti.

4.1.4. Výpočet koncentračného profilu dotujúcich prímesí z priebehu majoritných nosičov náboja a overenie použitých modelov.

Ako vidieť z obr. 1.1, pre nehomogénny priebeh koncentrácie dotujúcich atómov dochádza v dôsledku difúzie majoritných nosičov náboja k rozdielu medzi uvedenými priebehmi [4.16]. Je známe [4.17], že pomocou vzťahu (4.1) určujeme priebeh koncentrácie majoritných nosičov náboja namiesto koncentrácie dotujúcich prímesí. V práci [4.18] je popísaná korekcia, pomocou ktorej možno určiť presný priebeh koncentrácie dotujúcich atómov z nameraného priebehu $n(x)$ (ak na-



OBR. 4.3 Priebeh koncentrácie majoritných nosičov náboja $n(x)$ určený z ochudobnenej HF C-V závislosti a priebeh dotu-júcich atómov $N(x)$ určený zo vzťahu (4.12).

meraný priebeh $n(x)$ skutočne predstavuje priebeh majoritných nosičov náboja)

$$N(x) = n(x) - \frac{kT\epsilon}{q^2} \frac{d}{dx} \left[\frac{1}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx} \right]. \quad (4.12)$$

Na obr. 4.3. sú znázornené priebehy $n(x)$ a $N(x)$. Vo vzťahu (4.12) vystupuje druhá derivácia $n(x)$, ktorú v prípade expe-riimentálnych hodnôt $n(x)$ musíme určiť numericky.

Určovanie derivácie empiricky získanej funkčnej závislosti je problém, s ktorým sa možno často stretnúť pri spracovaní nameraných dát. V základných kurzoch numerickej matematiky [4.19] sa dokazuje, že diferenciácia zosilňuje šum spracovávaných dát. Pritom šumom tu všeobecne označujeme od-chýlku spracovávaných dát od ich skutočnej hodnoty, ktorá môže vzninúť dôsledkom:

- fyzikálnych javov
- chyby meracieho prístroja
- zaokrúhľovania pri číslicovom spracovaní.

To znamená, že frekvenčné spektrum spracovávaného signálu, získané pomocou Fourierovej transformácie, bude obsahovať zložky, ktoré je potrebné odstrániť pred (alebo pri) výpočte derivácie. V ďalšom budeme hovoriť o aproximácii pomocou polynómov, ktorá sa používa najčastejšie, aj keď uvedené tvrdenia platia tiež pre iné triedy funkcií.

Ak pre výpočet derivácie použijeme polynomiálne aproximácie, je vhodné najprv funkčné hodnoty 'vyhľadiť' [4.20]. Pre potlačenie šumu sú potom dôležité frekvenčné vlastnosti použitých numerických metód, ktoré možno vyjadriť pomocou prenosovej charakteristiky. Týmto prístupom môžeme porovnávať frekvenčné vlastnosti polynomiálnych aproximácií a číslicových filtrov [4.21]. Základným rozdielom medzi výpočtom koeficientov číslicových filtrov a koeficientov polynomiálnych aproximácií je, že v prvom prípade vychádzame z požadovanej prenosovej charakteristiky a v druhom prípade sú koeficienty počítané z podmienky najmenších štvorcov vzdialenosť spracovávaných dát a polynómu daného stupňa. Z uvedeného vyplývajú nedostatky polynomiálnych aproximácií:

- spracovávaná funkčná závislosť nemusí byť polynom, aj keď existuje polynom, ktorý interpoluje namerané hodnoty
- frekvenčné vlastnosti metódy sú sekundárnym dôsledkom stupňa použitého polynómu a počtu bodov, cez ktoré sa tento polynom prekladá.

Pretože v našom prípade spracovávame funkčné závislosti, ktoré nie sú vo všeobecnosti polynómy, rozhodli sme sa pre použitie číslicových filtrov. Tu možno ešte spomenúť, že pre úspešnú aplikáciu číslicových filtrov je dôležité navrhnuť kritickú frekvenciu a veľkosť filtra tak, aby filter neovplyvňoval amplitúdu signálu v tej časti spektra, ktorá pred-

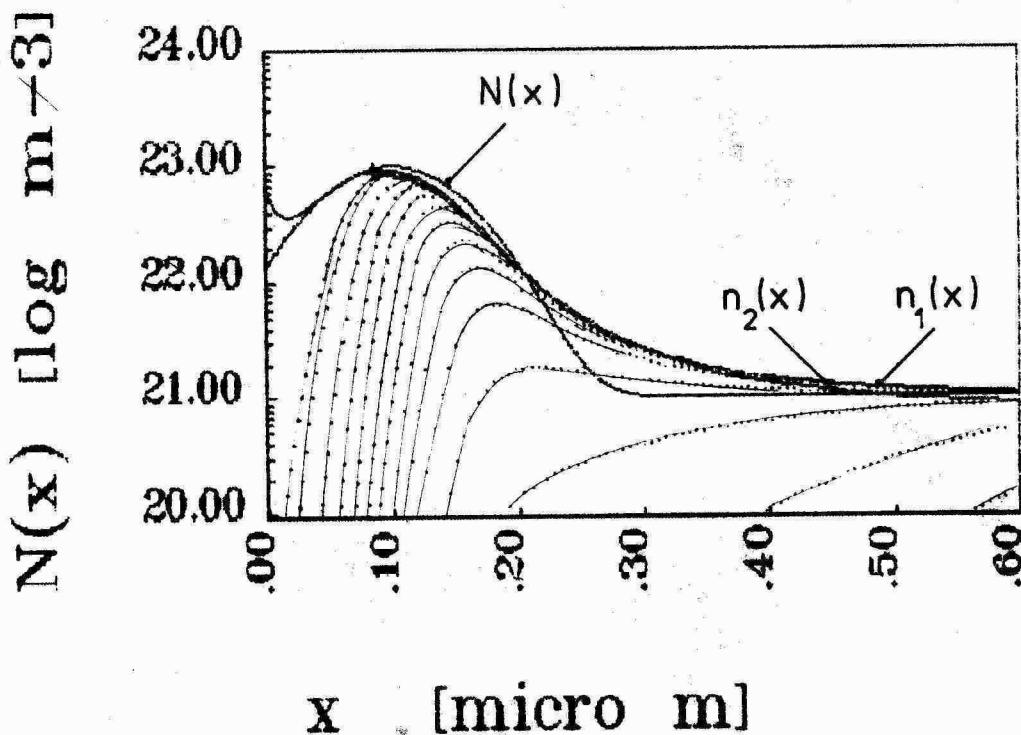
stavuje užitočný signál. Pre určenie derivácií vo vzorci (4.12) sme použili nerekurzívny diferencujúci dolnopriepustný číslicový filter, ktorého kritická frekvencia je $f_c = 0.1$ a jeho veľkosť je $2n+1=11$.

Je známe [4.18], že aj priebeh $n(x)$, určený z nameranej C-V závislosti, je zaťažený chybou, ak predstavuje nehomogénný koncentračný profil. Presnejšie možno tvrdiť [4.3], že zmeraná koncentrácia $n(x)$ predstavuje priemernú hodnotu koncentrácie majoritných nosičov v oblasti s dĺžkou rádove niekoľko L_{DE} . Potom je otázkou, kedy ešte možno použiť approximácie popísané v častiach 4.1., 4.2. a s akou chybou.

V práci [4.22] sú popísané výsledky výpočtového experimentu, kedy na základe experimentálne určeného profilu $N(x)$ bola vypočítaná teoretická ochudobnená C-V krivka a porovnaná s nameranou C-V krivkou. V prípade, že sa experimentálna a teoretická C-V závislosť zhoduje, možno tvrdiť, že $N(x)$ predstavuje skutočné rozdelenie dotujúcich prímesí v polovodiči.

Nezávisle na [4.22] sme uskutočnili experiment, ktorého výsledky uvedieme. Na obrázkoch 4.4. a 4.5 sú znázornené priebehy $N(x)$, ktoré boli použité pri výpočte teoretickej C-V závislosti. Pri riešení Poissonovej rovnice sme zároveň získali priebeh koncentrácie majoritných nosičov náboja $n_1(x)$ pre $V_g = 0$, ktorý sa v dôsledku difúzie líši od priebehu koncentrácie atómov $N(x)$. Z teoretických C-V závislostí boli pomocou approximácií (4.2) a (4.6) vypočítané priebehy $n_2(x)$. Porovnávali sme závislosti $n(x)$, pretože zhoda koncentrácie majoritných nosičov náboja znamená aj zhodu priebehu koncentrácie dotujúcich atómov.

Ako vidieť na obr. 4.4, pre tento koncentračný profil je použitie kapacitnej metódy vhodné, zatiaľ čo v prípade zobrazenom na obr. 4.5. je zrejmý veľký rozdiel medzi skutočným $n_1(x)$ a nameraným priebehom $n_2(x)$.

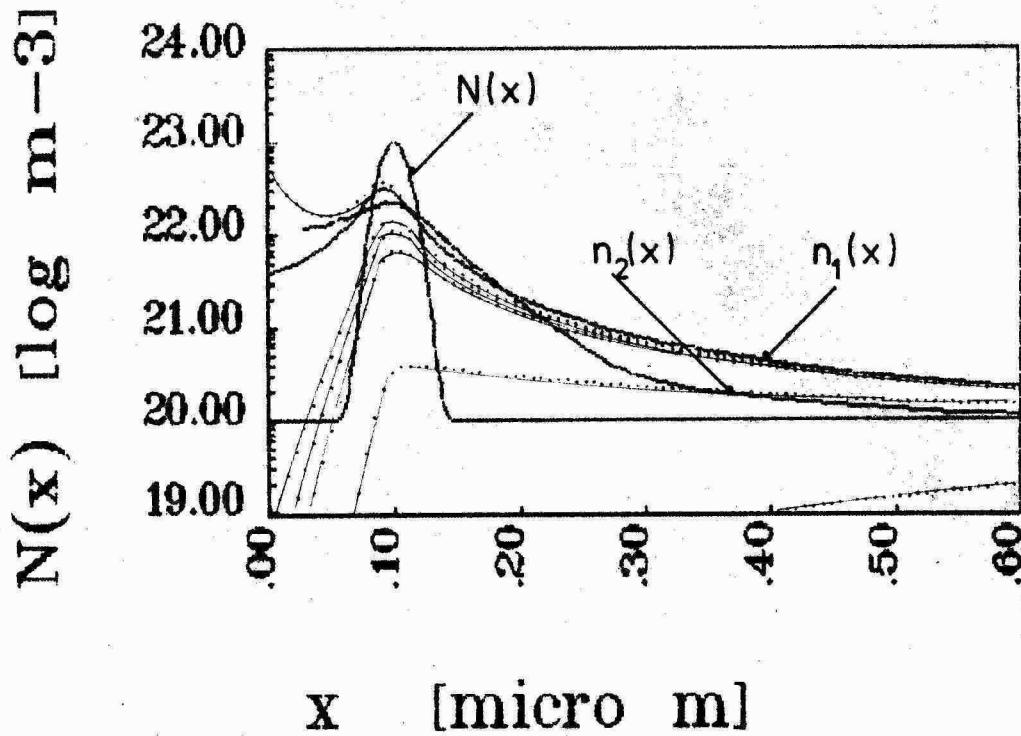


OBR. 4.4 Priebeh koncentrácie prímesí simulovaný Gaussovským rozložením s parametrami $R = 0.1 \mu\text{m}$, $\Delta R = 0.05 \mu\text{m}$, $N_{\max} = 1.0 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $N_{\text{bulk}} = 1.0 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3}$ (označený $N(x)$); priebeh majo-ritných nosičov náboja $n_1(x)$ a priebeh $n_2(x)$, získaný z teo-retickej C-V závislosti. Bodkovanými čiarami je znázornené ochudobňovanie štruktúry MOS.

Ďalšia analýza aproksimácií, použitých pri výpočte koncen-tráčnych profilov, by sa mohla zameriť na hľadanie exaktného obmedzenia platnosti týchto aproksimácií, avšak zo systema-tického hľadiska by bolo pre riešenie tejto problematiky efektívnejšie zvoliť prístup, ku ktorému sa vzťahuje nasle-dovná poznámka.

POZNÁMKA.

Pomocou kapacitných meraní by bolo možné určiť priebeh $N(x)$ presne bez použitia aproksimácií predchádzajúcich článkoch. V práci [4.4] dodatku A je naznačený postup výpočtu elektrického potenciálu v



OBR. 4.5. Priebeh koncentracie prímesí simulovaný Gaussovským rozložením s parametrami $R = 0.1\mu\text{m}$, $\Delta R = 0.01\mu\text{m}$, $N_{\max} = 1.0 \cdot 10^{23} \text{ m}^{-3}$, $N_{\text{bulk}} = 1.0 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ (označený $N(x)$); priebeh majo-ritných nosičov náboja $n_1(x)$ a priebeh $n_2(x)$, získaný z teo-retickej C-V závislosti. Bodkovanými čiarami je znázornené ochudobňovanie štruktúry MOS.

polovodiči, ktorý je funkciou vzdialenosťi (od povrchu polovodiča do hĺbky) a napäcia hradla. Deriváciou Poissonovej rovnice (1.2) podľa V_g dostávame parciálnu diferenciálnu rovnicu tretieho rádu, ktorá presne opisuje experiment mera-nia C-V závislosti

$$\frac{\partial^3 \rho}{\partial x^3 \partial V_g} = \frac{1}{L_D^2} e^{\beta \rho} \frac{\partial \rho}{\partial V_g} \quad (4.13)$$

Jej riešením použitím vhodných okrajových podmienok by bolo možné získať plochu $\phi(x, V_g)$, z ktorej pre výpočet $N(x)$ je potrebná len jedna priamka $\phi(x) \Big|_{V_g}$

$$N(x) = N_{\text{bulk}} e^{\beta p} - \frac{\epsilon}{q} \frac{d^2 p}{dx^2} . \quad (4.14)$$

Autori článku [4.4] túto metódu ďalej nerozvíjali, z dôvodov ťažkostí pri vyčíslovaní druhej derivácie vo vzorci (4.14).

4.2. Určenie hustoty pascí rozhrania Si-SiO₂.

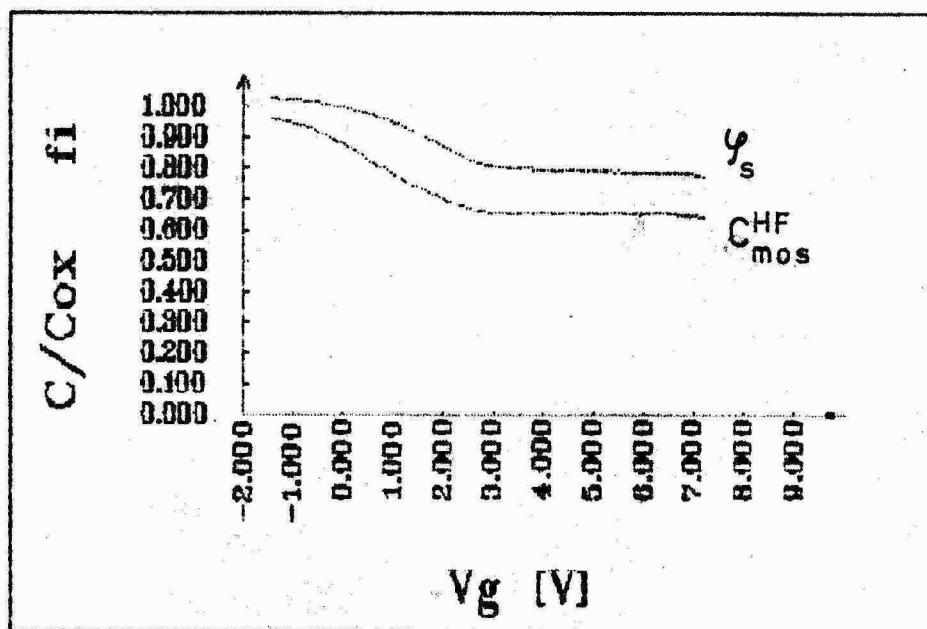
Kvalitu rozhrania Si-SiO₂ charakterizujeme hustotou pascí rozhrania (D_{it}), ktorá je dôsledkom mechanizmu termickej oxidácie kremíka, pri ktorej dochádza k vytvoreniu oblasti s nestochiometrickým zložením. Túto hustotu možno vyhodnotiť nasledujúcimi dvoma postupmi:

1. Porovnanie nameranej vysokofrekvenčnej C-V závislosti $C_{\text{mos}}^{\text{HF}}(V)$ a nameranej nízkofrekvečnej C-V závislosti $C_{\text{mos}}^{\text{LF}}(V)$. Vyhodnotenie D_{it} pomocou porovnania uvedených závislostí vychádza z predpokladu, že závislosť $C_{\text{mos}}^{\text{HF}}(V)$ je mieraná dostatočne vysokým VF signálom, čo spôsobí, že kapacita nie je ovplyvnená pascami rozhrania Si-SiO₂.
2. Porovnanie nameranej závislosti $C_{\text{mos}}^{\text{LF}}(V)$ a teoretickej nízkofrekvečnej C-V závislosti, ktorú označíme $C_{\text{mos}}^{\text{TLF}}(V)$. V tomto prípade je potrebné na základe známeho priebehu koncentračného profilu dotujúcich prímesí v pod povrchovej oblasti polovodiča vypočítať závislosť $C_{\text{mos}}^{\text{TLF}}(V)$ riešením Poissonovej rovnice.

Pre vyhodnotenie D_{it} sme použili obe metódy, ktorých reálizáciu v ďalšom podrobne uvedieme.

4.2.1. Porovnanie vysokofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej C-V závislosti.

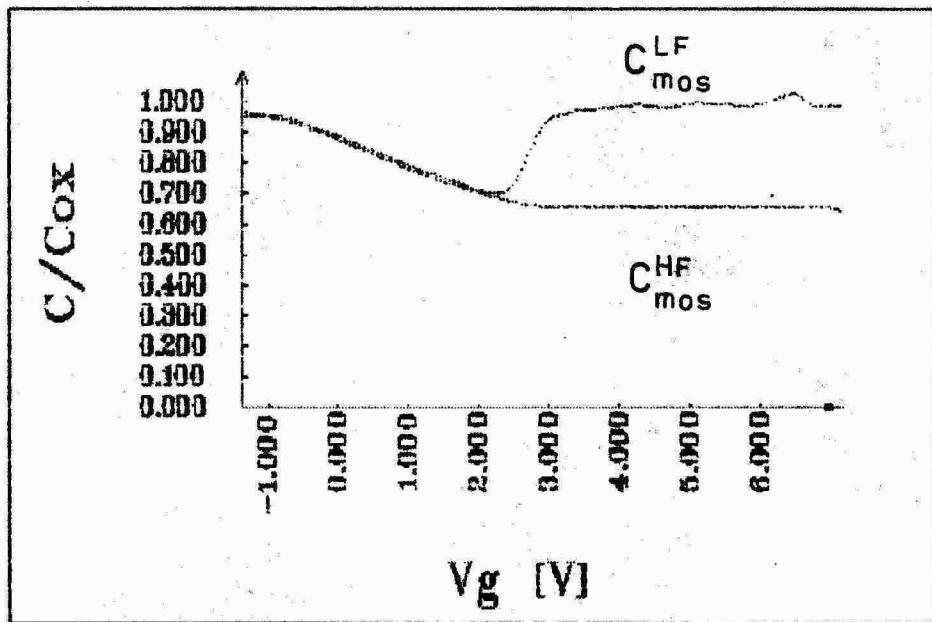
V tomto prípade využijeme frekvenčnú závislosť kapacity



OBR. 4.6 VF C-V závislosť $C_{mos}^{HF}(V_g)$ normovaná na kapacitu oxidu a normovaný priebeh povrchového potenciálu $\varphi_s(V_g)$ štruktúry MOS získané pomocou Q-C metódy. Priebeh povrchového potenciálu je normovaný vzťahom $1 - \varphi_s / \varphi_{norm}$, $\varphi_{norm} = 3.33$.

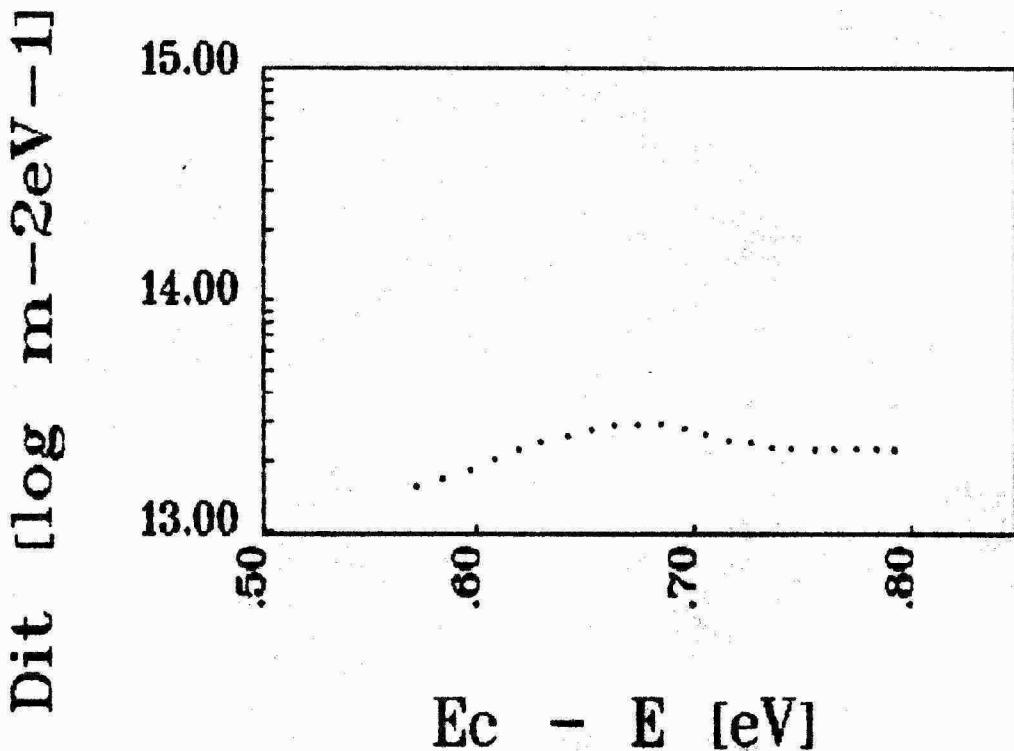
štruktúry MOS a D_{it} určíme z porovania C_{mos}^{HF} a C_{mos}^{LF} . Potrebny teoretický základ možno nájsť napríklad v [1]. Pre určenie C_{mos}^{HF} a C_{mos}^{LF} je vhodné použiť Q-C metódu [3.4] [3.6] [3.7] [3.8], ktorá umožňuje simultánne určenie oboch závislostí, avšak použitie štandardných metód určovania C_{mos}^{HF} a C_{mos}^{LF} je tiež možné. Na obr. 4.6. sú namerané hodnoty C_{mos}^{HF} a povrchového potenciálu φ_s štruktúry MOS, určené pomocou Q-C metódy. Na obr. 4.7. sa nachádzajú krivky C_{mos}^{HF} a C_{mos}^{LF} , ktoré použijeme pre výpočet D_{it} podľa nasledujúceho vzťahu [4.15].

$$D_{it} = \frac{1}{q} \left[\frac{\frac{C_{mos}^{LF}}{C_{ox}} - \frac{C_{mos}^{HF}}{C_{ox}}}{1 - \frac{C_{mos}^{LF}}{C_{ox}}} - \frac{1 - \frac{C_{mos}^{HF}}{C_{ox}}}{1 - \frac{C_{mos}^{LF}}{C_{ox}}} \right]. \quad (4.14)$$



OBR. 4.7 VF C-V závislosť $\frac{C_{mos}^{HF}(V)}{C_{ox}}$ a LF C-V závislosť $\frac{C_{mos}^{LF}(V)}{C_{ox}}$ štruktúry MOS normované na kapacitu oxidu, získané pomocou Q-C metódy. LF C-V závislosť je vypočítaná deriváciou povrchového potenciálu (zobrazeného na obr. 4.6.) podľa vzťahu (3.2).

Polohu Fermiho hladiny v zakázanom pásme pre vypočítané hodnoty D_{it} určíme pomocou hodnôt povrchového potenciálu φ_s a vzdialenosť Fermiho hladiny od intrinziekovej Fermiho hladiny φ_f . Priebeh povrchového potenciálu $\varphi_s(V)$ získame buď priamo pomocou Q-C metódy, alebo integráciou kvázistatickej C-V závislosti použitím Berglundovho integrálu. V oboch prípadoch dostávame priebehy $\varphi_s(V)$, ktoré sú posunuté v smere osi y. V prípade Q-C metódy sa jedná o konštantu φ_{se} , ktorá predstavuje povrchový potenciál, ak na hradle štruktúry MOS nie je pripojené napätie a v prípade kvázistatickej C-V metódy posunutie predstavuje integračnú konštantu. Pre obidva prípady môžeme posunutie závislosti $\varphi_s(V)$ vypočítať postupom uvedeným v dodatku 7.



$E_c - E$ [eV]

OBR. 4.8 Závislosť D_{it} od polohy v zakázanom pásme polovodiča typu P, určená z porovnania C_{mos}^{HF} a C_{mos}^{LF} , ktoré sú zobrazené na obr. 4.7.

Hodnotu potenciálu φ_f určíme pomocou vzťahu

$$\varphi_f = \pm \frac{kT}{q} \ln \frac{N_b}{n_i}, \quad (4.15)$$

kde predpokladáme znalosť koncentrácie substrátu N_b . Potenciál φ_f má kladné znamienko pre polovodič typu P. Ak pre povrchový potenciál φ_s zvolíme tú istú orientáciu ako pre potenciál φ_f , energetickú polohu pascí rozhrania v zakázanom pásme potom určíme pomocou nasledovného vzťahu

$$E_c - E = 0.56 + \varphi_s + \varphi_f, \quad (4.16)$$

kde číslo 0.56 predstavuje vzdialenosť dolného okraja vodičostného pásma (E_c) od intrinziekovej Fermiovej hladiny.

Pribeh D_{it} ako funkcie polohy v zakázanom pásme je znázornený na obr. 4.8.

4.2.2. Porovnanie experimentálnej a teoretickej kvázistatickej CV závislosti.

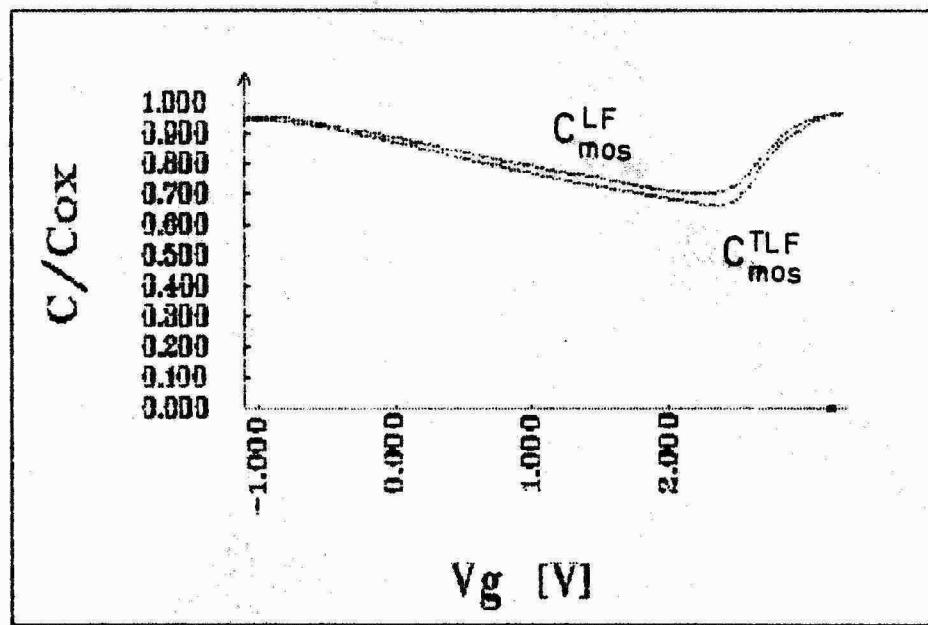
Pre výpočet D_{it} pomocou tejto metódy je potrebné poznáť priebeh koncentračného profilu dotujúcich prímesí v podpovrchovej oblasti polovodiča $N(x)$, aby sme mohli vypočítať $C_{mos}^{TLF}(V)$. Teoretickú závislosť $C_{mos}^{TLF}(V)$ štruktúry MOS vypočítame numerickým postupom popisaným v dodatku 1. Použitie numerických metód je v tomto prípade nevyhnutné, pretože analytické riešenie Poissonovej rovnice nie je možné pre všeobecný priebeh koncentrácie $N(x)$. Pri numerickom riešení Poissonovej rovnice zároveň vypočítame závislosť povrchového potenciálu od napäcia hradla $\phi_s(V)$, ktorú použijeme pre určenie pozície vypočítanej hustoty pascí rozhrania v zakázanom pásme polovodiča. Pretože počas numerického výpočtu neberieme do úvahy poruchové náboje v oxidovej vrstve a na rozhraní Si-SiO₂ obidve teoreticky určené závislosti $\phi_s(V)$ aj $C_{mos}^{TLF}(V)$ budú posunuté voči nameranej kvázistatickej C-V závislosti o hodnote V_{FB} . Pre posunutie uvedených závislostí musíme poznáť aj hodnotu V_{FB} .

Pre výpočet D_{it} teda použijeme C_{mos}^{TLF} , ktorá nie je zatažená kapacitou pascí rozhrania Si-SiO₂. Na obr. 4.9. sú zobrazené nameraná a teoretická LF C-V závislosť, ktoré ďalej použijeme na výhodnotenie D_{it} podľa vzťahu

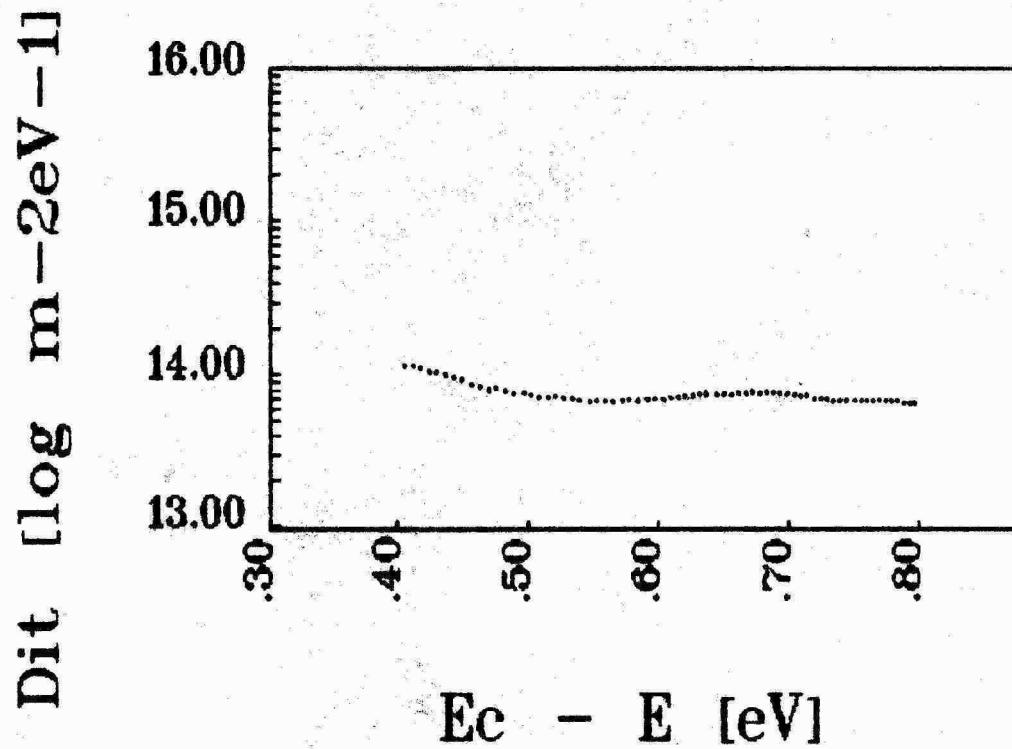
$$D_{it} = \frac{1}{q} \left[\frac{\frac{C_{mos}^{LF}}{C_{mos}^{TLF}} - \frac{C_{mos}^{TLF}}{C_{mos}^{LF}}}{1 - \frac{C_{mos}^{LF}}{C_{ox}}} - \frac{1 - \frac{C_{mos}^{TLF}}{C_{mos}^{LF}}}{1 - \frac{C_{mos}^{TLF}}{C_{ox}}} \right]. \quad (4.15)$$

Na obr. 4.10. je znázornený priebeh hustoty pascí rozhrania v závislosti od polohy v zakázanom pásme polovodiča určený uvedeným spôsobom. Nevýhoda popísanej metódy spočíva v časovej náročnosti výpočtu teoretickej nízkofrekvenčnej C-V závislosti.

Napriek tomu, že porovnanie teoretickej a experimentálnej



OBR. 4.9 Teoretická LF C-V závislosť a namenaná LF C-V závislosť štruktúry MOS normované na kapacitu oxidu.



OBR. 4.10 Závislosť D_{it} od polohy v zakázanom pásme polovodiča typu P, určená z porovania $C_{mos}^{TLF}(V_g)$ a $C_{mos}^{LF}(V_g)$, ktoré sú zobrazené na obr. 4.9.

nízkofrekvenčnej C-V závislosti poskytuje hodnoty D_{it} vo väčšej oblasti zakázaného pásma, pre výhodnocovanie plošného rozloženia D_{it} na kremíkovej doske sme z časových dôvodov použili postup popísaný v časti 4.2.1.

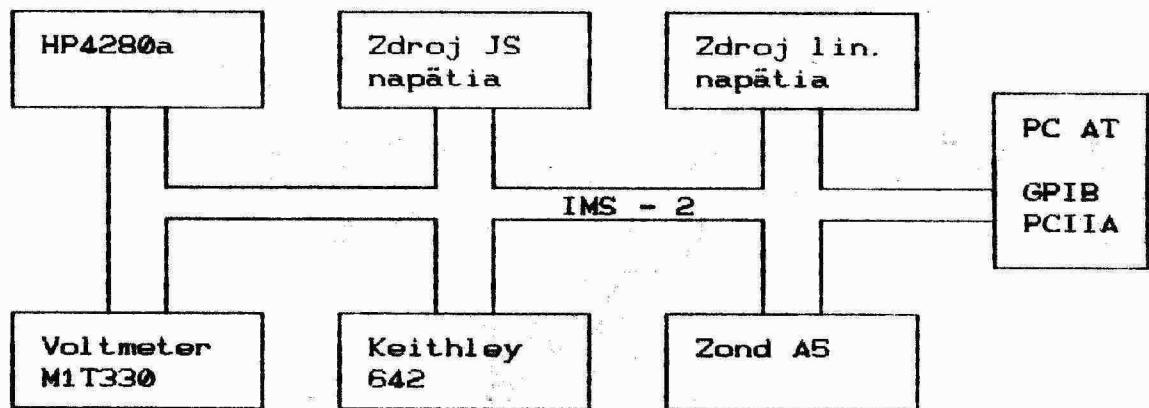
Literatúra

- [4.1] Lehovec K.: Solid St. Electron. 27 (1984), s. 1907.
- [4.2] Wu Chung P., Douglas E.C., Mueller C.W.: IEEE Trans. on elektron. dev. 22 (1975) s. 319.
- [4.3] Kroemer H., Chien W.: Solid St. Electron. 24 (1981) s. 655.
- [4.4] Baccarani G., Rudan M., Maes H., Vandervorst W., Van Overstraeten R.: Solid St. Electron. 23 (1980) s. 65.
- [4.5] Botka V., Csabay O., Artz P., Beyer A.: 3. vedecká konferencia EF SVŠT Elektrotechnika '90, EF SVŠT Bratislava, 1990 s. 73.
- [4.6] Kinder R.: Príspevok ku skúmaniu koncentračných profilov implantovaných vrstiev. Kandidátska dizertačná práca. EF SVŠT Bratislava 1984.
- [4.7] Lin S.T., Reuter J.: Solid St. Electron. 26 (1983), s. 343.
- [4.8] Ziegler K., Klausmann E.: Solid St. Electron. 18 (1975) s. 189.
- [4.9] Jindal R.P., Warner R.M. Jr.: IEEE Trans. on elektron. dev. 28 (1981) s. 348.
- [4.10] Jindal R.P.: Solid St. Electron. 26 (1983) s. 1005.
- [4.11] Warner R.M. Jr., Jindal R.P.: Solid St. Electron. 26 (1983) s. 335.
- [4.12] Balland B., Remaki B., Marchand J. J.: J. Phys. E: Sci. Instrum. 21 (1988) s. 559.

- [4.13] Csabay O., Botka V.: 5. celoštátna konferencia Mikroelektronika 1989, Dom techniky ČSVTS Bratislava, 1989 s. 58.
- [4.14] Zsalkovics G.: Určovanie koncentračného profilu implantovanej vrstvy z kapacitných meraní. Diplomová práca, Katedra mikroelektroniky, EF SVŠT, Bratislava 1988.
- [4.15] Zohta Y.: Solid St. Electron. 17 (1974), s. 1299.
- [4.16] Kennedy O.P., Murley P.C., Kleinfelder W.: IBM J. Res. Dev. 12 (1968) s. 399.
- [4.17] Nishida V.: IEEE Trans. Electron. Dev. ED-26 (1979) s. 1081.
- [4.18] Johnson W.C., Panousis P.T.: IEEE Trans. Electron. Dev. ED-18 (1971) s. 965.
- [4.19] Isaacson E., Keller H.B.: Analysis of numerical methods. John Wiley and Sons. New York.
- [4.20] Vitásek E.: Numerické metody. SNTL, Praha 1987.
- [4.21] Hamming R.W.: Digital filters. Prentice Hall.
- [4.22] Beyer A., Tolonics J.: Physik der Halbleiteroberfläche 17 (1986) s. 91.

5. Pracovisko pre automatizovaný zber dát.

Na popisovanom pracovisku možno automaticky merať vysokofrekvenčnú a nízkofrekvenčnú kapacitu štruktúry MOS. Na obr. 5.1. je zobrazené blokové zapojenie prístrojov, pomocou ktorých sú jednotlivé metódy realizované.



OBR. 5.1 Bloková schéma zapojenia prístrojov automatizovaného pracoviska pre určovanie plošného rozloženia parametrov štruktúr MOS s nehomogénnou dotáciou substrátu.

Riadiacim počítačom meraní je osobný počítač PC AT vybavený interfejsom IMS-2 (norma IEEE 488) firmy National Instruments model GPIB-PCIIA, ktorý pracuje ako riadič zbernice IMS-2. Všetky pripojené prístroje sú vybavené interfejsom IMS-2, pomocou ktorého ich možno diaľkovo ovládať a zberať namerané údaje. Okrem profesionálnych meracích prístrojov HP4280a a Keithley 642 boli v experimente použité zdroje jednosmerného napäcia a zdroj lineárne narastajúceho napäcia postavené na Katedre mikroelektroniky. Voltmeter M1T330 je výrobkom Metry Blansko a krovovacie hrotové zariadenie Zond A5 bolo dovezené zo Sovietskeho Zväzu. Posledne spomínané

zariadenie neobsahuje štandardne interfejs IMS-2 a bolo do dotočne vybavené modulom IMS-2 vlastnej konštrukcie [5.1]. Ďalším novým prvkom našej realizácie pracoviska pre meranie štruktúr MOS je možnosť automatického zberu dát po celej kremíkovej doske a ich uloženie do diskového súboru pre nasledovné spracovanie. Programové vybavenie pracoviska možno rozdeliť na programy (1) zberu dát (2) spracovania dát (3) zobrazenia výsledkov a (4) pomocné programy. Programy zberu dát umožňujú meranie C-V závislostí v ľubovoľnom počte bodov kremíkovej dosky, ktorých pozície sú voliteľné a sú definované operátorom.

Dôležitým momentom pri realizácii programov zberu dát bolo zabezpečenie proti strate namenaných dát v dôsledku výskytu ľubovoľnej chyby (napr. výpadku napäcia), alebo v prípade nutnosti prerušíť meranie. Pretože trvanie zberu dát na kremíkovej doske s 300 štruktúrami sa pohybuje od 0.5 do 12 hodín v závislosti od požadovaného druhu merania, bolo potrebné programovo zabezpečiť (1) možnosť prerušenia merania operátorom v ľubovoľnom bode (2) možnosť opäťovného reštartovania zberu dát v bode, kde bol zber dát prerušený. Zabezpečenie uchovania namenaných dát v prípade výskytu chyby bolo realizované nasledovným spôsobom. Namané dátá sú naraz zapisované do diskového súboru vždy po ukončení merania na každej štruktúre. Túto dátovú jednotku budeme v ďalšom označovať záznam. To znamená, že k poškodeniu štruktúry dát môže prísť len v prípade výskytu chyby v priebehu krátkeho časového úseku (rádovo desiatky ms), čím ale prichádza len k strate posledného záznamu. Pre tento prípad je k dispozícii pomocný program, ktorý zkráti datový súbor na požadované množstvo záznamov, čím obnoví kompaktnosť súboru a umožní reštartovanie zberu dát. Týmto spôsobom možno skratiť dátový súbor o chybne namenané dátu aj po prerušení zberu dát operátorom, ak bola zistená nejaká závada v priebehu merania. Zároveň je k dispozícii pomocný program, ktorý umožňuje

prepísanie ľubovoľného počtu záznamov dátového súboru. Užitočnosť tohto programu vysvetlíme v nasledovnom príklade. Predstavme si, že v priebehu zberu dát došlo (napr. dôsledkom vplyvov okolia) ku chybe, ktorá trvala krátky časový úsek, čo spôsobilo, že časť záznamov dátového súboru obsahuje chybné dátá. Príkladom môže byť nedokonalosť kontaktu hrotu s meranou vzorkou, spôsobená vibráciami. To sa často zistí až pri vyhodnocovaní merania, prípadne pri zobrazení výsledkov. Po určení pozícii štruktúr na testovanej kremíkovej doske, v ktorých sme namerali chybné údaje, môžeme v týchto bodech meranie zopakovať a pomocným programom prepísať záznamy v pôvodnom dátovom súbore.

Uvedeným spôsobom boli realizované programy zberu dát pre HF C-V, kvázistatickú C-V metódu, meranie kapacity oxidovej vrstvy a metódu konštantnej šírky oblasti priestorového náboja. Tako sme ale nemohli automatizovať Q-C metódu, pretože použitý interfejs prístroja Keithley 642 neumožňuje diaľkové ovládanie skratovania vstupných svoriek meracieho prístroja, čím nemožno automatizovať vynulovanie náboja v spoločnom bode zapojenia kondenzátorov, ktorý sa tam dostane vplyvom zvodových prúdov. Pre pohodlnú manipuláciu s dátovými súbormi bola zvolená nasledovná koncepcia pomenovania dátových súborov. Pomenovanie súboru v operačnom systéme MS DOS pozostáva z mena súboru a prípony. Meno súboru predstavuje v našom prípade názov meranej kremíkovej dosky a prípona označuje druh dát, ktoré súbor obsahuje. Principiálne možno rozdeliť uvedené dátové súbory na dva typy podľa dát, ktoré obsahujú jednotlivé záznamy. Môže to byť funkčná závislosť alebo parameter. Ak sa jedná o funkčnú závislosť, potom prvý záznam v dátovom súbore obsahuje počet bodov, v ktorých bola funkčná závislosť zosenámaná a hodnoty nezávislej premennej. Ďalšie záznamy obsahujú pozíciu štruktúry na kremíkovej doske, vyjadrenú dvoma celými číslami (X,Y), počet bodov a funkčné hodnoty. Opakujúca sa

informácia o počte bodov funkčnej závislosti nie je redundantná, pretože v prípade neúspešnosti merania (napr. priezražna štruktúre (X, Y)) obsahuje číslo -1, ktoré oznamuje neprítomnosť funkčných hodnôt v zázname. Príkladom môže byť HF C-V závislosť. Prvý záznam obsahuje počet meraní kapacity na jednej štruktúre a hodnoty napäťia hradla. Ďalšie záznamy obsahujú pozíciu štruktúry (X, Y) , počet bodov a hodnoty kapacity zodpovedajúce hradlovým napätiám z prvého záznamu. Súbory druhého typu pozostávajú len zo záznamov, ktoré obsahujú pozície štruktúry (X, Y) a hodnotu parametra. Ako príklad uvedieme dátový súbor, ktorý obsahuje kapacity oxidovej vrstvy štruktúr MOS. Pretože sa jedná o rozsiahle dátové súbory bola zvolená binárna forma záznamu. Celočíselné hodnoty majú dĺžku 2 bajty a čísla s pohyblivou desatinou čiarkou zaberajú 4 bajty.

Pre prípad, že by bol potrebný dátový súbor, obsahujúci dátá vo forme ASCII, je k dispozícii pomocný program, ktorý po zadaní pozície štruktúry (X, Y) vytvorí tento dátový súbor a zapíše do neho dátá, ktoré obsahujú záznam s pozíciou (X, Y) . Ak sa jedná o funkčnú závislosť, zapíše do výstupného súboru vo forme ASCII aj hodnoty nезávislej premennej.

5.1. Meranie HF C-V závislostí.

HF C-V závislosť štruktúry MOS meríame pomocou prístroja HP4280a, ktorý určuje zároveň kapacitu a vodivosť meranej vzorky na základe fázového posunu madzi HF napäťovým signálom (1MHz, 30mV) a meraným prúdom. Prístroj HP4280a je vybavený vlastným procesorom, ktorý riadi jeho vnútorné funkcie a operátorovi poskytuje komfortné ovládanie. Pre meranie HF C-V závislosti musíme nastaviť požadovaný interval napäťia, v ktorom sa má merať kapacita (Vstart, Vstop) a napäťový krok Vstep, ktorým sa bude jednosmerné napätie meniť. Časové pomery merania sa určujú ďalšími dvoma parametrami.

T_{hold} určuje čas, počas ktorého bude na meranej vzorku pripojené napätie. V_{start} pred začiatkom merania. Tento čas je potrebný na ustálenie prechodových javov, v prípade že ich nechceme merať. Parameter T_{delay} určuje dobu pozdržania merania po vykonaní napäťového kroku.

Pre automatizované meranie štruktúr sme zvolili najvýkonnejší mód prístroja HP4280a, v ktorom podľa vopred nastavených parametrov automaticky vykoná celé meranie a namerané data uloží do vnútornej pamäte. Prenos dát z prístroja HP4280a do riadiaceho počítača sa vykoná v binárnej forme, čím nestrácamo čas konverziou medzi binárnu formou a formou ASCII a zároveň binárna forma predstavuje menšie množstvo prenášaných bajtov. Ukončenie merania a pripravenosť na prenos dát signalizuje prístroj HP4280a nastavením signálu SRQ (Service Request) na zbernicu IMS-2, čím je synchronizovaná jeho činnosť s riadiacim počítačom. Tu možno spomenúť užitočnú vlastnosť interfejsu GPIB-PCIIA [5.2], ktorý po detektovaní signálu SRQ môže automaticky vykonať sériové hlásenie prístrojov (Serial Poll) a po nájdení prístroja, ktorý žiada o obsluhu uložiť jeho stavové slovo do internej pamäte. Tým je vodič SRQ zbernice IMS-2 uvoľnený a interfejs GPIB-PCIIA môže reagovať na žiadosť o obsluhu od ďalších prístrojov. Ak riadiaci program požaduje stavové slovo prístroja, ktorý žiadal o obsluhu, interfejs GPIB-PCIIA ho vydá zo svojej internej pamäte.

Použitím automatického riadenia merania a binárneho prenosu dát sa podarilo dosiahnuť minimálny čas HF C-V merania. Konkrétné hodnoty trvania meraní a časové diagramy sú v časti 5.4.

Ak potrebujeme určiť koncentračný profil dotujúcich prímesí vo väčšej hĺbke, ako je šírka OPN v stave inverzie, musíme zmerať C-V závislosť v stave hlbokého ochudobnenia. V tomto prípade sa vždy po napäťovom skoku do stavu hlbokého ochudobnenia (a zmerania kapacity) musíme vrátiť na určitý

čas do stavu akumulácie. Prístroj HP4280a nemá mód činnosti, ktorý by automaticky riadil tento druh merania. Preto musíme každé meranie kapacity riadiť samostatne. Merací cyklus riadiaceho programu potom obsahuje nastavenie požadovaného hradlového napäťa, prevedenie merania kapacity (spustenie merania a čakanie na jeho ukončenie) a prenos dát z meracieho prístroja do riadiaceho počítača, pričom všetky uvedené prenosy sa vykonávajú vo forme ASCII. Oproti štandardnej HF C-V metóde sa dĺžka merania jedného bodu C-V závislosti o rád zväčší.

Presnosť určenia koncentračného profilu dotujúcich prímesí silne závisí od presnosti určenia kapacity oxidovej vrstvy. Preto je kapacita oxidu určovaná pomocou samostatného programu, ktorý meria kapacitu štruktúry MOS pre zadané hradlové napätie daleko v akumulácii a namerané hodnoty uloží do samostatného dátového súboru.

5.2. Meranie kvázistatických C-V závislostí.

Kvázistatickú C-V závislosť štruktúry MOS meríame pomocou zdroja lineárne narastajúceho napäťa, elektromera Keithley 642 a voltmetra M1T330. Kapacitu štruktúry MOS určíme zo vzťahu

$$C_{\text{mos}}^{\text{LF}} = i \left[\frac{dV}{dt} \right]^{-1} \quad (5.1)$$

Presné meranie nabíjacieho prúdu štruktúry MOS je hlavným problémom kvázistatickej C-V metódy. Firma Keithley dodáva k svojmu meraciemu prístroju viac druhov interfejsov IMS-2. V našej meracej zostave je použitý model 1793/6423, ktorý okrem prenosu nameraných dát neplní žiadne ďalšie funkcie a činnosť prístroja musíme ovládať manuálne z predného panelu. Pred začiatkom merania je potrebné nastaviť meranú veličinu (okrem prúdu možno merať ešte napätie a náboj) a merací rozsah prístroja.

Meranie a prenos dát z elektrometra do riadiaceho počítača môže prebiehať v dvoch módoch, ktoré sa odlišujú adresou prístroja [5.3]. V kontinuálnom móde pracuje A/D prevodník prístroja nepretržite a na žiadosť o vyslanie dát do počítača interfejs vyšle posledné ukončené meranie (v tomto momente už môže byť začatý ďalší A/D prevod). V spúštanom móde A/D prevodník čaká na povel k začiatu merania z interfejsu, ktorý dostane po žiadosti riadiaceho počítača o vyslanie nameraných dát. Potom prebehne A/D prevod a namerané dátá sú odoslané do počítača. Doba merania prístroja Keithley 642 je 400 ms. Táto doba je potrebná na ustálenie dynamických javov, ktoré spôsobuje komunikácia po zbernicu IMS-2. Pretože interfejs prístroja nie je galvanicky oddelený od meracej časti, majú obvod merania prúdu a zberница IMS-2 spoločnú zem. Tým komunikácia zbernice IMS-2 počas A/D prevodu spôsobuje zašumenie meraného signálu. Tento problém možno odstrániť použitím spúštaného módu, v ktorom prístroj po prijatí žiadosti o vyslanie nameraných dát najprv počká na ustálenie dynamických javov a potom vykoná A/D prevod.

Okrem prúdu potrebujeme pre výpočet kapacity poznati rýchlosť nárastu napäťia na hradle štruktúry MOS, ktorú určíme nasledovným spôsobom. Meranie vykonáme vo väčšom napäťovom intervale, ako je požadované. V startovacom a koncovom úseku (mimo požadovaného intervalu napäťia) odmeriam hodnoty lineárne narastajúceho napäťia hradla a zároveň zmeríame čas pre každú hodnotu napäťia. Čas meríame vnútornými hodinami riadiaceho počítača s rozlíšením 1/12 s. Lineárnu regresiou spomemutých dát určíme smernicu závislosti $V_g(t)$, ktorú použijeme pri výpočte kapacity.

Ako sme už spomenuli meranie prúdu trvá 400 ms. V snahe získať čo najviac meraných bodov C-V závislosti sme zvolili nasledovný postup na určenie napäťia hradla zodpovedajúce meranému prúdu. Súčasne s meraním prúdu odčítame čas, ktorý uplynul od začiatku merania a napätie hradla vypočítame po-

macou smernice závislosti $V(t)$. Odčítanie a uloženie uplynutého času je rýchla operácia riadiaceho počítača, čím získame čas, ktorý by sme stratili meraním napätia pomocou voltmetra. Ďalšou výhodou uvedeného postupu je, že dostávame vyhľadené hodnoty priebehu napätia hradla v čase. V prípade, že by sme merali priamo prúd aj napäťie, dostali by sme chybami merania zaťažené tak funkčné hodnoty ako aj hodnoty nezávislej premennej, čo by mohlo prinášať problémy pri vyhľadzovaní nameraných dát.

Napriek tomu, že meranie prúdu a času prebieha automaticky v meracej slučke, nemusíme vždy získať C-V závislosť s ekvidistančným krokom v napäťovej ose a zároveň nemôžeme dopredu určiť pri akom hradlovom napäti odmeriame kapacitu. Predspracovanie nameraných dát pred zápisom do diskového súboru preto pozostáva z approximácie C-V závislosti pomocou kubických splajn-funkcií a výpočte kapacity štruktúry MOS pre zadané hodnoty napätia. Je potrebné voliť hodnoty napätia hradla v súlade s HF C-V meraním, čo uľahčí výpočet tých parametrov štruktúr MOS, ktoré sa určujú z HF a kvázistatickej C-V závislosti.

Dá sa ukázať [5.4], že kubické splajn-funkcie vznikajú minimalizáciou kvadratického funkcionálu

$$\int_a^b (y'(x))^2 dx ,$$

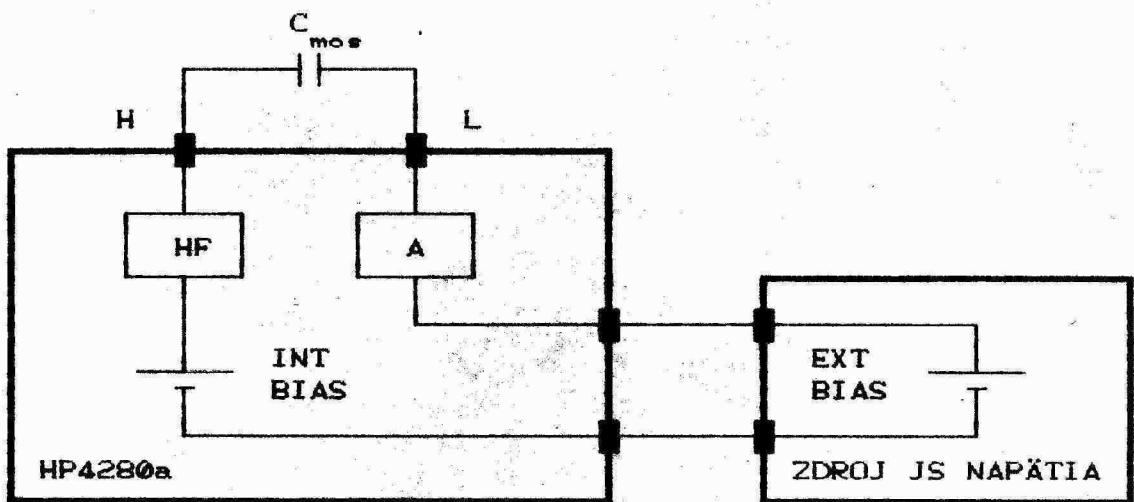
ktorý je analógom energie ohybu pružného nosníku. Ak doplníme podmienku minimalizácie uvedeného funkcionálu podmienkou najmenších štvorcov vzdialenosťí approximačných funkcií a nameraných bodov, vznikne approximácia pomocou kubických splajn-funkcií. V našom programe sme použili dvojicu podprogramov z numerickej knižnice NAG (Numerical Algorithm Group), ktorých označenie je E02BAF a E02BCF. Podprogram E02BAF na základe zadaných bodov vypočíta koeficienty approximačných B-splajn polynómov. Užívateľovi je daná možnosť zvoliť uzly, medzi ktorými sa nachádzajú jednotlivé

B-splajn polynómy. Numerická metóda tvorby koeficientov je stabilná dokonca aj pre viacnásobné (tzn. koincidenčné) uzly [5.5] [5.6] (citované v príručke NAG). Z teórie splajnových funkcií potom vyplýva, že pomocou viacnásobných uzlov môžeme approximovať funkcie s nespojitosťmi deriváciami. Túto vlastnosť sme použili pri approximácii kvázistatickej C-V závislosti, ktorá môže vykazovať nespojitosť derivácií v bode začiatku slabej inverzie. Pri prechode medzi ochudobnením a stavom slabej inverzie tu dochádza vlivom exponenciálnej závislosti koncentrácie minoritných nosičov od elektrického potenciálu k prudkej zmene kapacity. Do tohto bodu sme umiestnili tri koincidenčné uzly, čím sme umožnili nespojitosť derivácií 1., 2. a 3. rádu. Následne vypočítané hodnoty kapacity pomocou podprogramu E02BCF vykazujú dobré approximačné vlastnosti. Uvedeným postupom sme odstránili prekmity approximačných polynómov, ktoré často vznikajú pri approximácii funkcií s väčšou zmenou gradientu.

5.3. Meranie metódou konštantnej šírky OPN.

Pre meranie metódou konštantnej šírky OPN sme použili prístroje HP4280a a zdroj jednosmerného (JS) napäcia, ktorý bol postavený na Katedre mikroelektroniky. Merací obvod prístroja HP4280a pozostáva z vnútorného zdroja JS napäcia (INT BIAS), zdroja HF signálu a ampérmetra (označeného A) [5.7]. Vnútorný zdroj JS napäcia má rozsah (-100.0, +100.0) V s rozlíšením 0.1 V, avšak v rozsahu (-2.0, +2.0) V môžeme nastavovať napätie s rozlíšením 0.001 V. Ak meriame štruktúry MOS vytvorené na kvalitných kremíkových substrátoch, relaxácia nerovnovážnych nosičov náboja prebieha pomaly, čo spôsobuje aj pomalú zmenu kapacity štruktúry MOS. Aby sme mohli udržiavať konštantnú veľkosť nerovnovážnej kapacity štruktúry MOS potrebujeme meniť hradlové napätie podľa možnosti s čo najmenšími zmenami. Pre tento účel je vhodný

napäťový rozsah (-2.0, +2.0) V vnútorného JS zdroja prístroja HP4280a. Pre uvedenie štruktúry MOS do nerovnovážneho stavu hľadobnenia použijeme externý zdroj JS napäťia, ktorý môže nastavovať napätie v intervale (-40.0, +40.0) V s rozlišením 0.1 V. Prístroj HP4280a umožňuje veľkú flexibilitu konfigurácie elementov meracieho obvodu. K dispozícii je 14 módov. Pre náš experiment sme zvolili mód 11 (obr. 5.2.), ktorý umožňuje pripojenie externého zdroja JS napäťia.



OBR. 5.2 Zapojenie prístrojov pre metódu konštantnej šírky OPN.

Meranie závislosti $V_g(t)$ potom prebieha v nasledovných krokoch. Pomocou externého zdroja JS napäťia priviedieme štruktúru MOS do nerovnovážneho stavu. Zo zmeny kapacity ΔC , ktorú odmeriamme prístrojom HP4280a, vypočítame pomocou vzťahu (3.9) požadovanú zmenu napäťia hradla ΔV_g . Ak je jej veľkosť v absolútnej hodnote väčšia ako 0.001 V zmeníme hodnotu napäťia hradla o ΔV_g , čím udržiavame konštantnú hodnotu nerovnovážnej kapacity štruktúry MOS. Pri každej zmeni napäťia hradla odčítame čas, kedy táto zmena nastala. Mera-

nie závislosti $V_g(t)$ ukončíme, ak uplynul čas merania (označme ho T_{hold}), ktorý zadáva operátor, prípadne ak zmena hradlového napäťia presiahla hraničné hodnoty intervalu (-2.0, +2.0) V. Experimentálne sa ukázalo, že programová spätnoväzobná slučka zabezpečujúca konštantnú hodnotu kapacity pracuje dostatočne rýchlo a presne. Počas prevádzaných experimentov bolo kolísanie udržiavanej kapacity lepšie ako 1%.

Meranie opakujeme pre rôzne hodnoty kapacity štruktúry MOS v nerovnovážnom stave, aby sme mohli určiť generačnú dobu minoritných nosičov náboja podľa vzťahu (3.10).

Parametrami riadiaceho programu je interval, v ktorom sa má pohybovať hranica OPN (W_{start}, W_{stop}) s krokom W_{step} . Ďalším parametrom je hodnota T_{hold} , ktorá udáva maximálnu dobu merania jednej závislosti $V_g(t)$.

Riadiaci program vyžaduje pre svoju činnosť dátové súbory s nameranými C-U závislosťami hlbokého ochudobnenia a kapacitami oxidovej vrstvy testovaných štruktúr krémikovej dosky. Pomocou týchto, vopred nameraných dát a zo zadanej vzdialnosti hranice OPN potom určuje počiatočné hradlové napätie pre nastavenie externého zdroja JS napäťia. Pre svoju činnosť potrebuje riadiaci program ešte jeden dátový súbor, obsahujúci koncentračné profily dotujúcich prímesí meraných štruktúr MOS. Hodnoty koncentrácie sú potrebné pri vyčíslovaní zmeny napäťia hradla štruktúry MOS podľa vzťahu (3.9).

Po zmeraní závislosti $V_g(t)$ určíme lineárnu regresiou jej smernicu. Z uskutočnených experimentov sa ukazuje, že minimálna doba merania závislosti $V_g(t)$, kedy ešte možno očakávať akceptovateľné výsledky je pre substráty s hodnotami τ_g rádovo $10^3 \mu\text{s}$ približne $T_{hold} = 10 \text{ s}$. Počas tejto doby prichádzalo k zmene napäťia hradla v rozsahu 50 - 500 mV v závislosti od šírky OPN a v závislosti od prírastku minoritných nosičov z oblastí mimo OPN. Zároveň bolo z grafického

znázornenia závislostí $dV_g / dt = f(w)$ vidieť vplyv prírastku minoritných nosičov náboja z oblastí mimo OPN, čo sa prejavilo približne rovnakým sklonom závislostí $dV_g / dt = f(w)$, ale rôznu absolútnej hodnotou. Zo zobrazenia závislostí $dV_g / dt = f(w)$ na celej kremíkovej doske vyplýva, že akceptovateľné hodnoty τ_g možno počítať jedine z derivácie funkcie $dV_g / dt = f(w)$ podľa w (vzťah 3.10, príp. 3.7) a v žiadnom prípade nie z jej fukčných hodnôt (vzťah 3.5). Do výstupného dátového súboru sme ukladali funkčné závislosti $dV_g / dt = f(w)$.

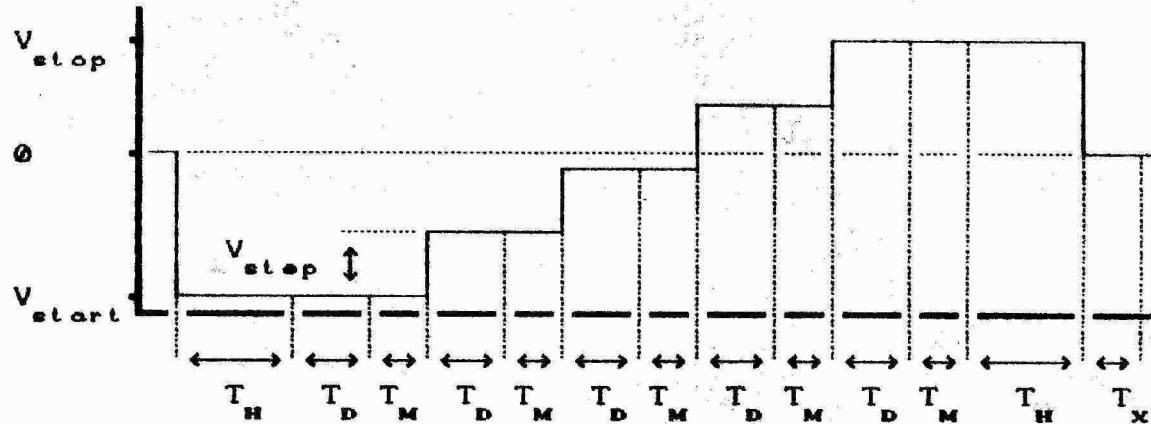
Z princípu metódy vyplýva minimálna vzdialenosť od povrchu polovodiča, v ktorej je možno určovať τ_g . Touto hranicou je šírka OPN zodpovedajúca počiatku slabej inverzie v polovodiči.

5.4. Časové diagramy použitých metód.

Aby sme mohli odhadnúť dobu merania pre jednotlivé metódy, znázorníme graficky časové závislosti hradlového napäťa štruktúry MOS. Okrem rovnovážnej HF C-V metódy, kde je celý priebeh merania riadený procesorom prístroja HP4280a a jeho časový diagram je prevzatý z manuálu [5.7], boli časové diagramy určené na základe experimentálne nameraných hodnôt. Tieto časové hodnoty sú závislé od druhu riadiaceho počítača a od optimalizácie riadiacich programov. V našom experimente sme použili osobný počítač PC AT, pracujúci na frekvencii 10 MHz s koprocessorom 80287 (6 MHz) a pevným diskom s dobu prístupu 28 ms. Riadiace programy boli kompilované bez optimalizácie na rýchlosť s použitím emulačnej knižnice podprogramov pre matematické operácie s plávajúcou čiarkou.

V spojení s časovými diagramami uviedieme aj rozsahy napäti použitých prístrojov.

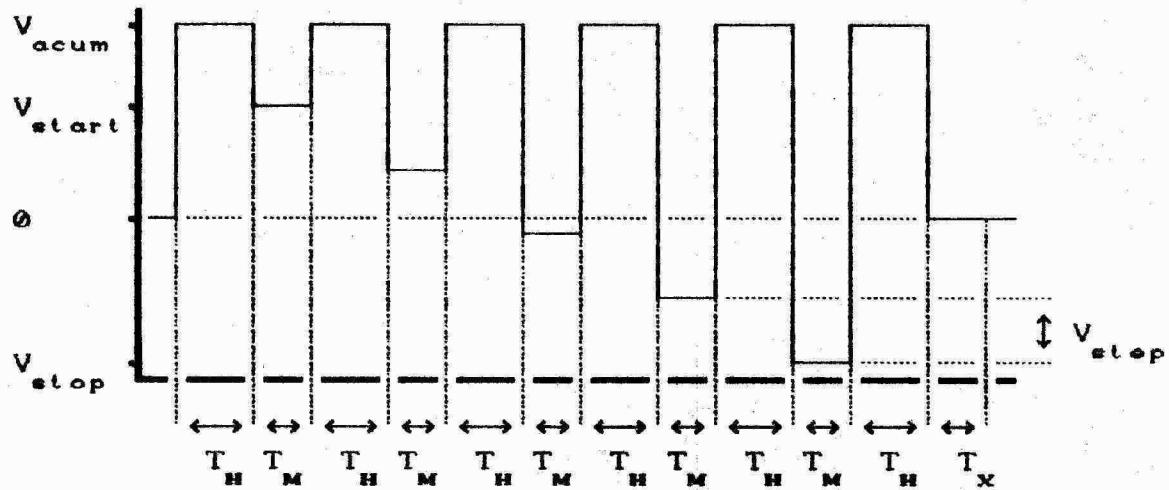
S. 4.1. Rovnovážna HF C-V závislosť.



OBR. 5.3 Časový diagram rovnovážnej HF C-V metódy.

popis parametra	min. - max. hodnota
T_H : Čas ustálenia.....	3 ms 650 s
T_D : Čas pozdržania merania.....	3 ms 650 s
T_M : Čas merania.....	40 ms
T_x : binárny prenos dát, predspracovanie dát, uloženie dát do súboru, posuv stolíka na ďalšiu štruktúru.....	~7 s
V_{start}	-100.0 +100.0 V
V_{stop}	-100.0 +100.0 V
V_{step}	±0.001 ±200.0 V

5.4.2. Nerovnovážna HF C-V závislosť.



OBR. 5.4 Časový diagram nerovnovážnej HF C-V metódy.

popis parametra

min. - max. hodnota

T_H : Čas relaxácie minoritných 0 s neohraničené nosičov náboja

T_M : Čas merania a prenos dát 330 ms

T_x : predspracovanie dát, uloženie dát do súboru, posuv stolíka na ďalšiu štruktúru. ~4 s

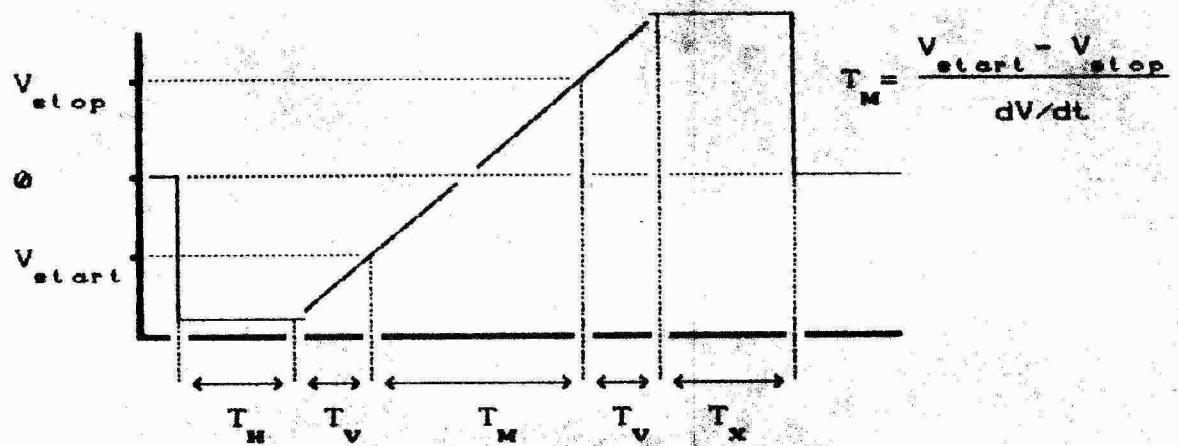
V_{start} -100.0 +100.0 V

V_{stop} -100.0 +100.0 V

V_{step} ±0.001 ±200.0 V

V_{acum} -100.0 +100.0 V

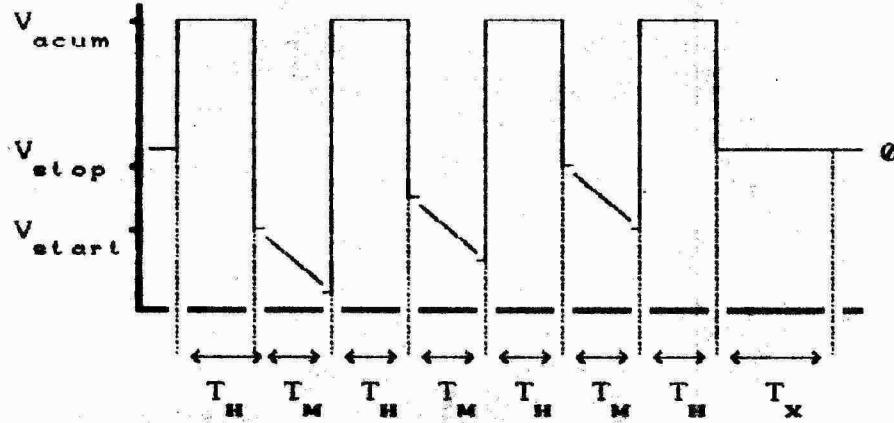
5.4.3. Kvázistatická C-V závislosť.



OBR. 5.5 Časový diagram kvázistatickej C-V metódy.

popis parametra	min. - max. hodnota
T_H : Čas ustálenia.....	0 s neohraničené
T_V : Čas merania napäťia hradla a času.....	5 s
T_M : Čas merania prúdu a času.....	neohraničené
T_X : predspracovanie dát, uloženie dát do súboru, posuv stolíka na ďalšiu štruktúru.....	~15 s
V_{start}	-20.0 +20.0 V
V_{stop}	-20.0 +20.0 V
dV/dt	$\pm 0.1mV/s$ $\pm 10.0V/s$

5.4.4. Metóda konštantnej šírky OPN.



OBR. 5.6 Časový diagram metódy konštantnej šírky OPN.

popis parametra

min. - max. hodnota

T_H : Čas relaxácie minoritných nosičov náboja..... 0 s neohraničené

T_M : Čas merania, výpočet dV/dt 10 s neohraničené

T_X : uloženie dát do súboru, posuv stolička
na ďalšiu štruktúru..... ~2 s

V_{start} -40.0 +40.0 V

V_{stop} -40.0 +40.0 V

V_{acum} -40.0 +40.0 V

Poznámka :

V prípade, ak je pri maximálnej hodnote časového údaju uvedený údaj 'neohraničené', znamená to, že jeho maximálna veľkosť závisí od dátového typu zodpovedajúcej premennej riadiaceho programu, prípadne od rozsahu prístroja.

Literatúra

- [5.1] Máriássy P. : Riadiaca jednotka prístroja typu talker/listener na spojenie so zbernicou IMS.
Diplomová práca. EF SVŠT Bratislava 1988.
- [5.2] National Instruments, IEEE-488 Instrumentation Interface. User guide.
- [5.3] Keithley model 642, Instruction manual.
- [5.4] Marčuk G. I. : Metody numerické matematiky. Academia Praha 1987.
- [5.5] Cox M. G. : J. Inst. Maths. Aplics. , 10 (1972) s. 134.
- [5.6] De Boor C. : J. Approx. Theory, 6 (1972) s. 50.
- [5.7] Hewlett-Packard, Operational and service manual,
Model HP4280a.

6. Spracovanie dát a zobrazenie získaných parametrov štruktúr MOS.

V tejto kapitole uvedieme stručne postup spracovania dát, namenaných pomocou programov zberu dát a zameriame sa na plošné zobrazenie získaných parametrov štruktúr MOS. Metodika výpočtu parametrov štruktúr MOS bola popísaná v kapitolach 3 a 4, na ktoré sa budeme odvolávať.

Väčšina parametrov je určovaná z namenaných dát pomocou samostatných programov a ukladaná do dátových súborov, ktorých štruktúra bola popísaná v časti 5. Plošné rozloženie vypočítaných parametrov štruktúr MOS možno potom zobraziť na displeji počítača. Pri zobrazení na displeji je k dispozícii 16 farieb, avšak pri zobrazení obrázkov na tlačiarni bolo kvôli lepšej rozlíšiteľnosti použitých len 6 farieb. Orientácia kremíkovej dosky na obrázkoch je smerom 'fazetou hore', pričom jeden štvorček zobrazenej plochy predstavuje hodnotu parametra štruktúry MOS. Farba štvorčeka závisí od intervalu, do ktorého daná hodnota spadá. Škála intervalov je zobrazená v pravej časti obrázku, pričom číslo uvedené pri jednotlivých farbách predstavuje dolnú hranicu intervalu. Pretože sa farby v škále intervalov viackrát opakujú, bolo potrebné označiť, v ktorých intervaloch sa zobrazené hodnoty nachádzajú. To je označené veľkým písmenom 'X' medzi dolnou hranicou intervalu a prislúchajúcou farbou. Možno ešte poznamenať, že náhodne odlišné výsledky v niektorých bodoch kremíkovej dosky spôsobia, že sa v škále intervalov objaví vyznačený interval, ktorý zjavne nesúvisí s ostatnými hodnotami, čo možno pripisať nefunkčnej štruktúre MOS. Treba ešte upozorniť, že orientácia škály sa môže pri zobrazení rôznych parametrov meniť.

6.1. Určenie koncentračného profilu dotujúcich prímesí, dávky implantácie a napäťia vyrovnaných pásov.

Určenie koncentračného profilu dotujúcich prímesí vykonáva samostatný program, ktorý ako vstupné dátá vyžaduje súbory (a) mameraných HF C-V závislostí a (b) mameraných kapacít oxidovej vrstvy štruktúry MOS. Výstupom programu je dátový súbor obsahujúci hľbkové priebehy koncentračných profilov skúmaných štruktúr MOS, ktoré sú počítané podľa vzťahov uvedených v časti 4.1. Ak boli v procese zberu dát zmerané aj kvázistatické C-V závislosti, program vykoná korekciu koncentračného profilu na hustotu pascí rozhrania Si-SiO₂. Povrchový potenciál určujeme podľa vzťahov (4.3) a (4.4) a používame ho pre korekciu aproksimácie hľbokého ochudobnenia pri povrchu polovodiča a pre výpočet hľbky (šírky OPN). Vedľajším produkтом je dátový súbor, obsahujúci napäťia vyrovnaných pásov V_{fb}, ktoré sa určujú v bode C-V závislosti, pre ktoré povrchový potenciál φ mení znamienko.

Obr. 6.1 predstavuje plošné rozloženie koncentrácie v rôznych hľbkach polovodiča a na obr. 6.2 je znázornené rozloženie V_{fb}. Koncentračný profil prímesí bol vytvorený implantáciou P³¹ s dávkou 4.0 10¹⁵ m⁻² pri energii 120 keV. Aktivácia prebiehala počas 40 minút pri teplote 1050 °C v atmosfere N₂. Stredná hodnota N (x) je spolu s ďalšími priebehami pre rôzne implantáčné dávky zobrazená na obr. 7.3.

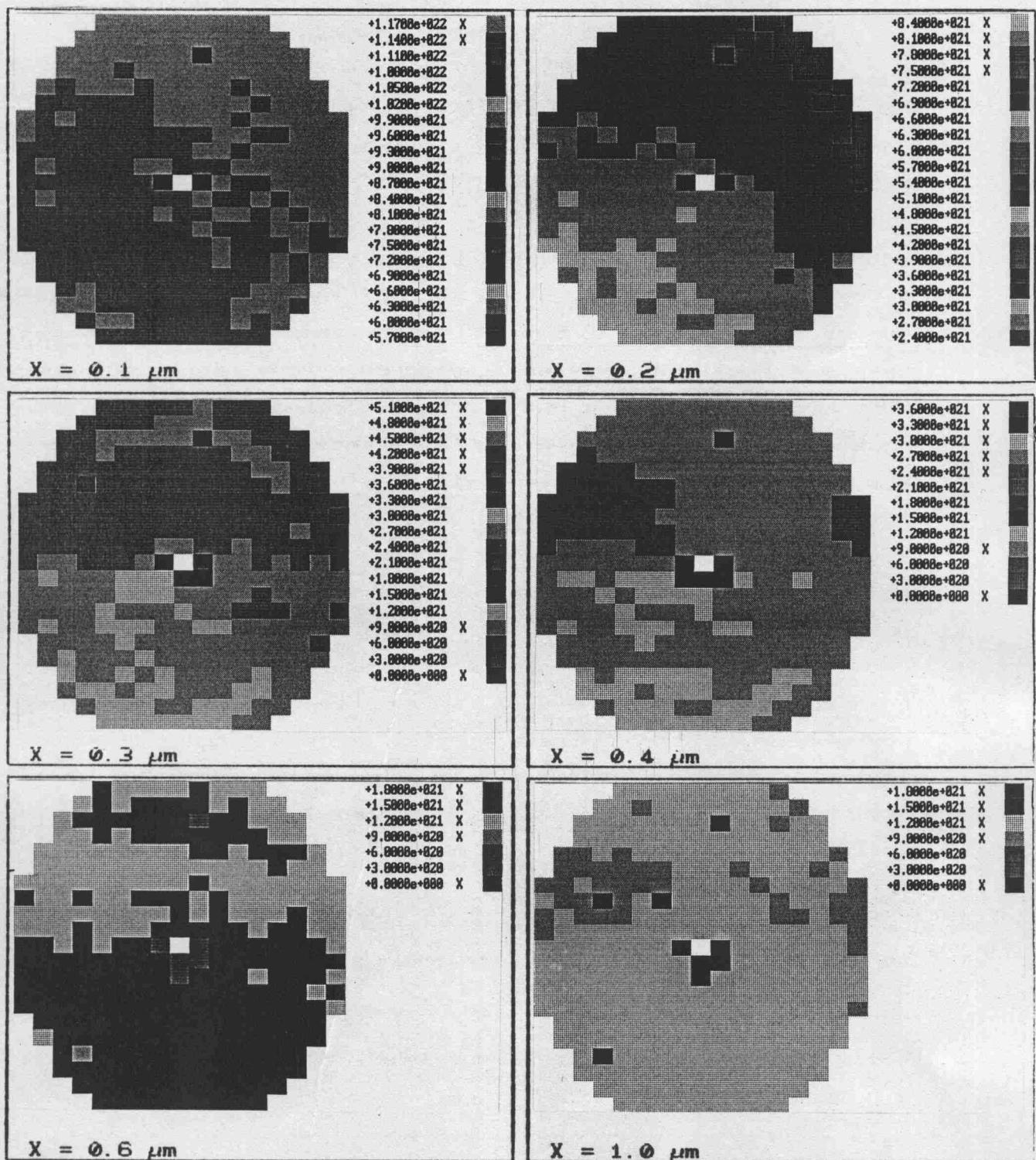
Pre známe priebehy koncentračných profilov môžeme vypočítať dávku implantácie podľa vzťahu

$$D = \int_{x_1}^{x_2} (N(x) - N_b) dx , \quad (6.1)$$

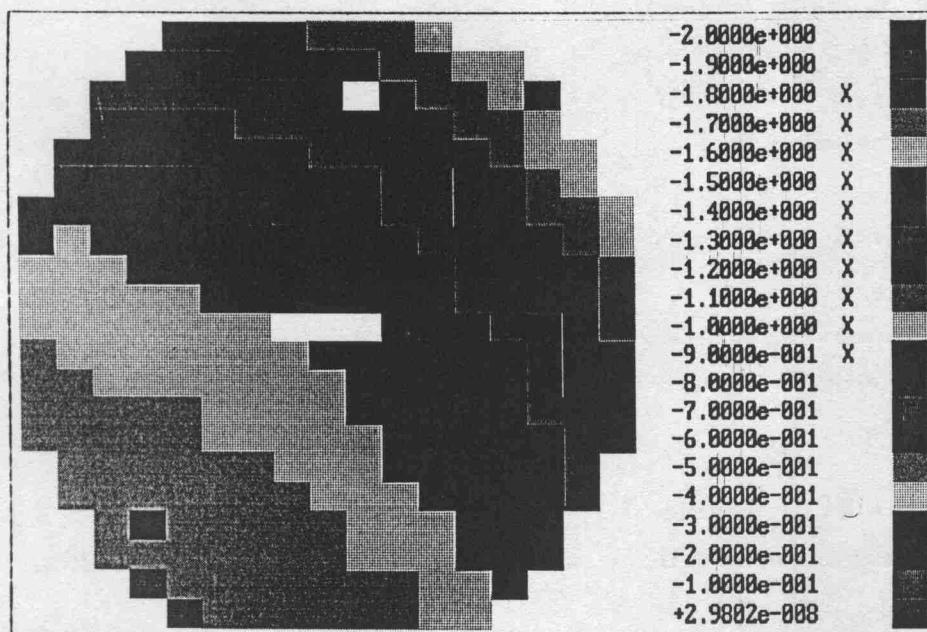
kde predpokladáme, že poznáme priebeh N(x) do vzdialenosťi x₂, pre ktorú platí

$$N(x) = N_b \quad x \geq x_1 . \quad (6.2)$$

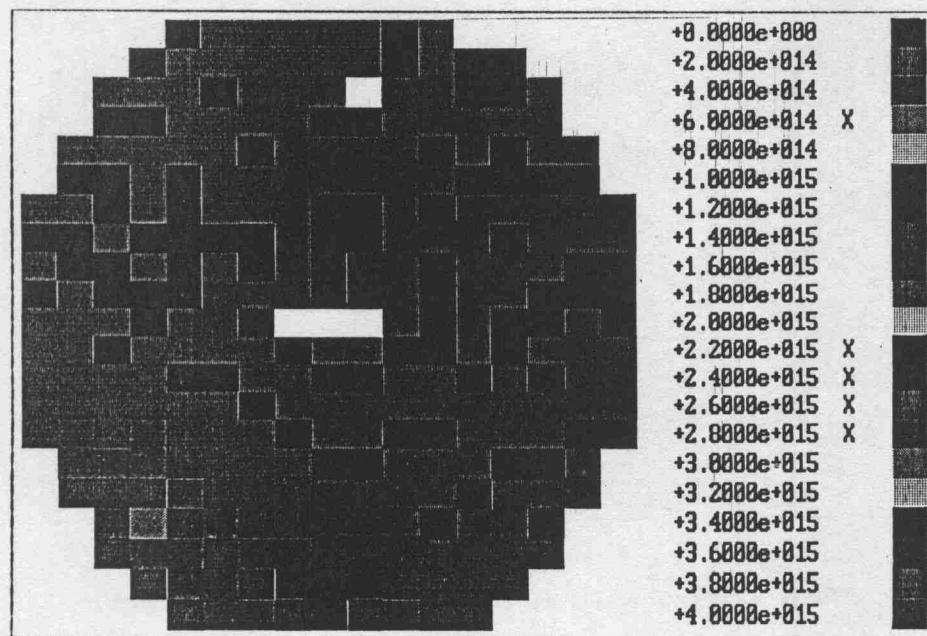
Dávka D vypočítaná týmto spôsobom predstavuje časť implantovaných iónov, ktoré sa dostali v priebehu implantácie do po-



OBR. 6.1 Rozloženie dotujúcich prímesí $N(x)$ v rôznej hĺbke x pod povrhom poovodiča pre dávku implantácie $4.0 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$.



OBR. 6.2 Plošné rozloženie V_{fb} určené pri výpočte $N(x)$ z obr. 6.1.



OBR. 6.3 Plošné rozloženie nameranej dávky implantácie pre profil $N(x)$ z obr. 6.1.

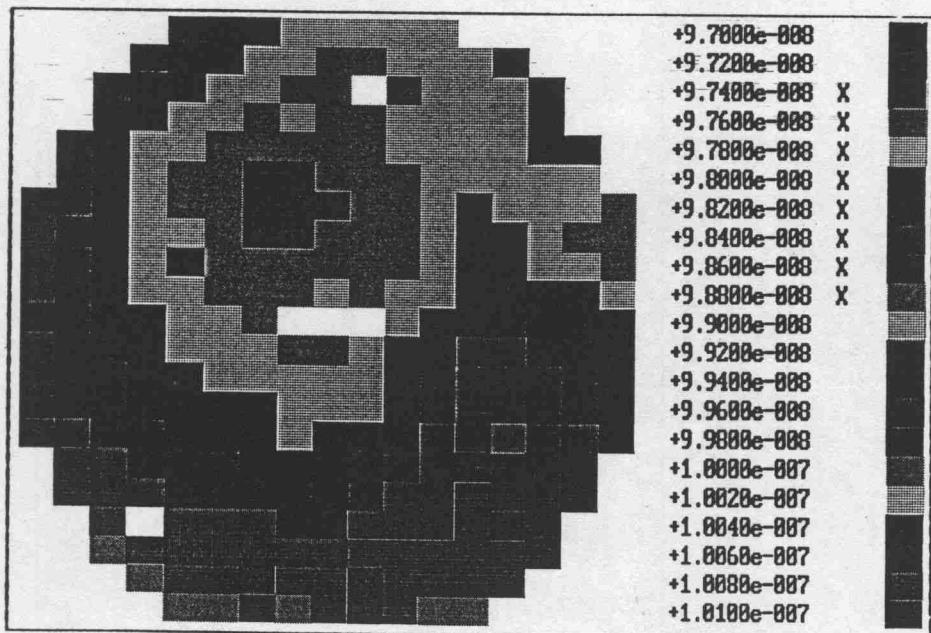
lovodiča a boli aktivované v poimplantačnom tepelnom spracovaní. Na obr. 6.3 je znázornené plošné rozloženie dávky na testovanej kremíkovej doske určenej zo závislostí $N(x)$ zobrazených na obr. 6.1.

6.2. Určenie hrúbky oxidovej vrstvy.

Ak poznáme kapacitu oxidovej vrstvy štruktúry MOS a jej plochu, potom môžeme vypočítať jej hrúbku podľa vzťahu

$$h_{ox} = A \frac{\epsilon}{C_{ox}} , \quad (6.3)$$

kde sme použili hodnotu relatívnej permitivity $\text{SiO}_2 \quad \epsilon_r = 3,9$. Plošné rozloženie hrúbky oxidovej vrstvy je potom zobrazené na obr. 6.4.



OBR. 6.4 Plošné rozloženie hrúbky hradlového oxidu h_{ox} .

6.3. Určenie hustoty pascí rozhrania Si-SiO₂.

Pre výpočet hustoty pascí rozhrania použijeme porovnanie HF a kvázistatickej C-V závislosti, kde použijeme postup popísaný v časti 4.2.1. Možno poznamenať, že pre určenie polohy Fermiho hladiny na povrchu polovodiča použijeme hodnoty povrchového potenciálu $\phi_{\text{sg}}(V_g)$, získané integráciou kvázistatickej C-V závislosti a hodnotu integračnej konštanty ρ_{sg} určíme postupom popísaným v dodatku 7.

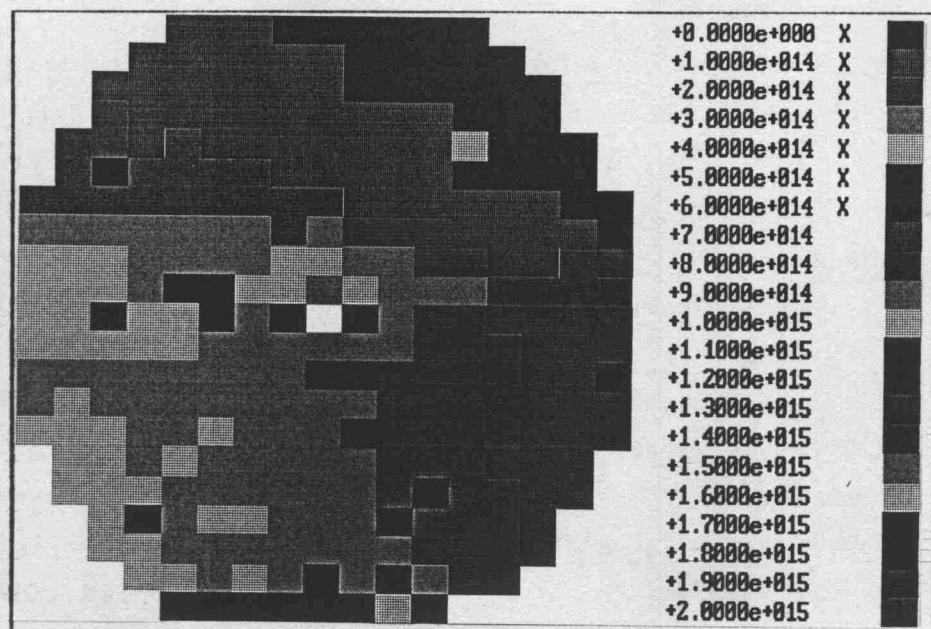
Celý postup výpočtu D_{it} je realizovaný dvoma programami. Prvý program na základe zmeraných kvázistatických C-V závislostí a známych hĺbkových priebehov $N(x)$ vypočíta závislosť $\phi_{\text{sg}}(V_g)$, ktoré uloží do dátového súboru. Druhý program pre svoju činnosť vyžaduje dátové súbory:

- HF C-V závislosť $C_{\text{mos}}^{\text{HF}}(V_g)$
- kvázistatické C-V závislosť $C_{\text{mos}}^{\text{LF}}(V_g)$
- závislosť povrchového potenciálu od napäcia hradla $\phi_{\text{sg}}(V_g)$.

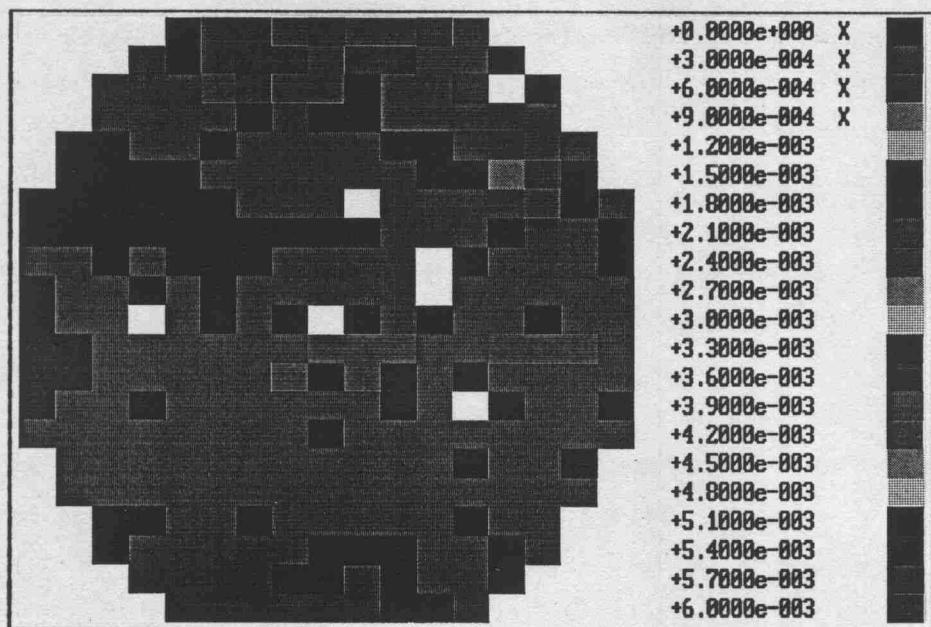
Vypočítané hodnoty D_{it} ako závislosť polohy Fermiho hladiny v zakázanom pásme polovodiča uloží do dátového súboru. Na obr. 6.5. je zobrazené plošné rozloženie D_{it} v strede zakázaného pásma.

6.4. Určenie generačného času života minoritných nosičov náboja.

V procese zberu dát metódou konštantnej šírky OPN bol vytvorený dátový súbor obsahujúci smernice závislostí $V_g(t)$ pre rôzne šírky OPN testovaných štruktúr MOS kremíkovej dosky. Pre určenie generačného času života minoritných nosičov náboja podľa vzťahu (3.10) je dôležité ako vypočítame deriváciu závislosti smerníc $V_g(t)$ podľa vzdialenosťi hránice OPN od povrchu polovodiča. Použitie číslicových filtrov v



OBR. 6.5 Plošné rozloženie hustoty pascí rozhrania Si-SiO₂ v strede zakázaného pásma.



OBR. 6.6 Plošné rozloženie generačného času života minoritných nosičov náboja pre oblasť polovodiča od 0.9 μm do 1.3 μm.

tomto prípade nie je vhodné, pretože máme k dispozícii mälo bodov závislosti $dV_g / dt = f(w)$. V tomto prípade možno pužiť approximáciu lokálnymi polynómami. Teoretický základ aj zdrojový text procedúry v jazyku Algol je uvedený napríklad v [6.1]. Na obr. 6.6 je zobrazené plošné rozloženie generáčnej doby minoritných nosičov náboja, ktorá predstavuje jej strednú hodnotu v oblasti od $0.9\mu\text{m}$ do $1.3\mu\text{m}$.

Literatúra

- [6.1] Ludwig R.: Methoden der Fehler- und Ausgleichsrechnung.
VEB Berlin 1969. s. 103.

7. Experimentálne výsledky.

Záverečný experiment bol uskutočnený na štruktúrach MOS s nehomogénnym hĺbkovým profilom dotujúcich prímesí, ktorý bol vytvorený procesom iónovej implantácie s rôznymi dávkami v monokryštále krémika typu N s orientáciou [100].

Pred technologickým spracovaním bola otestovaná homogenita špecifického odporu použitých krémikových dosiek pomocou zariadenia Prometrix OmniMap RS35, ktoré využíva štvorbodovú metódu pre určenie povrchového špecifického odporu. V tab. 7.1 sú uvedené stredné hodnoty špecifického odporu $\bar{\rho}$ a smerodajnej odchýlky $\sigma\rho$ vyjadrenej absolútou a relatívou hodnotou.

č.	$\bar{\rho}$ [Ωcm]	$\sigma\rho$ [Ωcm]	$\sigma\rho [\%]$
1	4.3319	0.1223	2.822
2	4.2733	0.1204	2.817
3	5.1040	0.3405	6.671
4	4.6276	0.2080	4.494
5	4.7697	0.1824	3.824
6	4.8007	0.2340	4.873
7	4.2500	0.1436	3.378
8	4.8259	0.3163	6.554
9	4.2853	0.1418	3.308
10	4.2954	0.1113	2.592
11	4.5706	0.1658	3.627
12	4.4762	0.1860	4.155
13	4.3332	0.1265	2.290
14	4.8422	0.3573	7.380
15	4.5917	0.1741	3.791
16	4.8134	0.2590	5.380
17	4.4025	0.1527	3.468
18	4.3591	0.1290	2.960
19	4.3877	0.1349	3.074
20	4.5416	0.1618	3.563

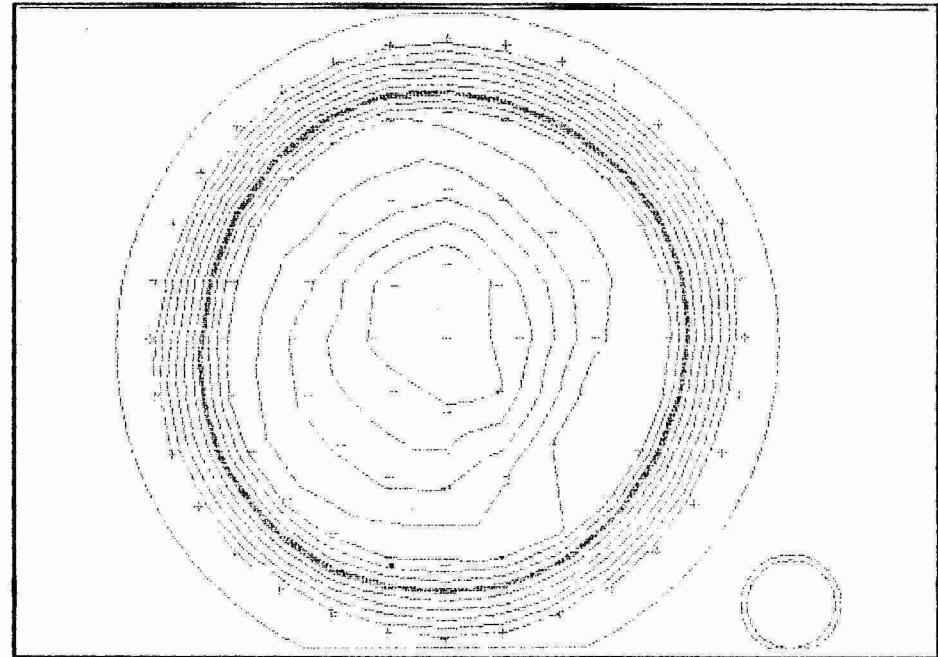
TAB. 7.1 Stredná hodnota a smerodajná odchýlka špecifického odporu testovaných krémikových dosiek pred technologickým spracovaním.

Zariadenie Prometrix OmniMap RS35 zmerala pomocou krokovacieho zariadenia hodnotu špecifického odporu v 81 bodoch každej dosky. Na obr. 7.1 a obr. 7.2 uvádzame grafické znázornenie rozloženia špecifického odporu, ktoré je taktiež výstupom merania uvedeného zariadenia. Body, v ktorých bol zmeraný špecifický odpor sú na obr. 7.1 vyznačené znakmi '+', alebo '-' podľa toho, či hodnota špecifického odporu v tomto bode ležala nad, alebo pod strednou hodnotou, ktorá je znázornená hrubšou čiarou. Predstavu o kvantitatívnom rozložení špecifického odporu si možno urobiť z trojdimenzionálneho obrázku 7.2.

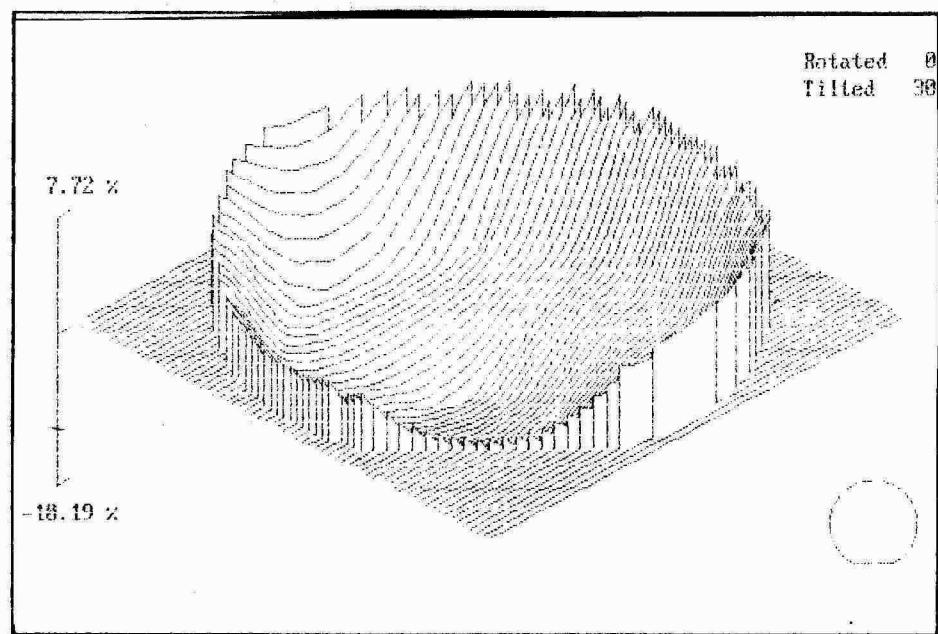
Postup hlavných technologických operácií vytvorenia štruktúr MOS na uvedených substrátoch bol nasledovný :

- vytvorenie hradlového oxidu s hrúbkou 100 nm
- implantácia P^{31} s energiou 120 keV a dávkami 0.6, 1.0, 2.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 20.0, $60.0 \cdot 10^{15} m^{-2}$ pod uhлом 7°
- aktivácia pri teplote $1050^{\circ}C$ s časovým priebehom : 15 min. nábeh, 30 min. aktivácia, 40 min. chladenie
- naparenie Al na obe strany kremíkovej dosky
- litografický proces vytvorenia CV masky
- sintrovanie Al FG pri teplote $460^{\circ}C$ počas 20 min.

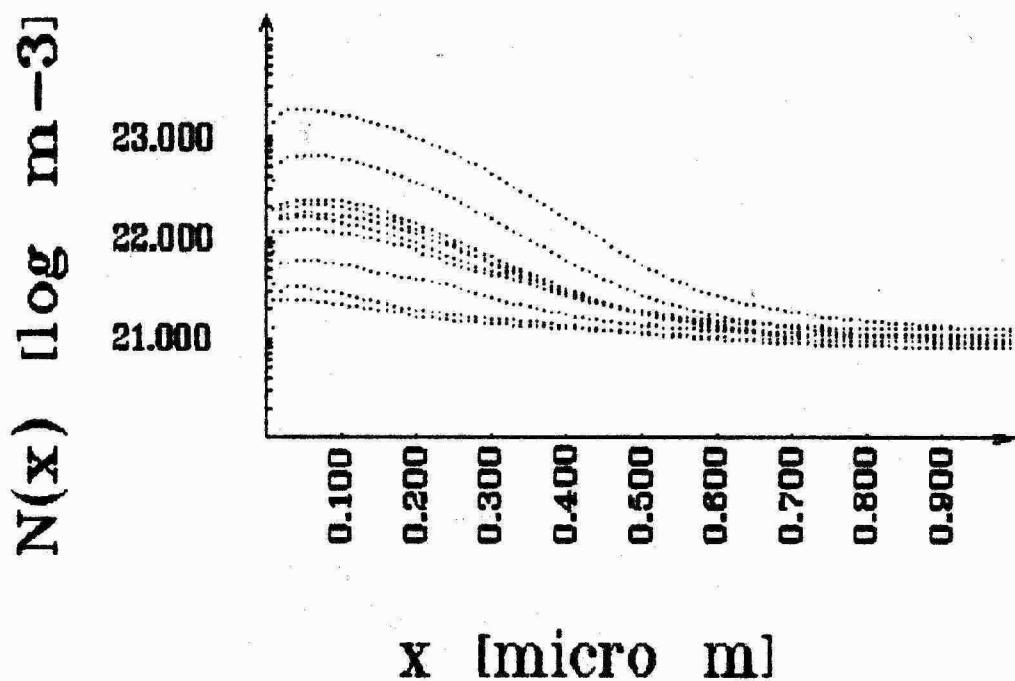
Uvedeným spôsobom bolo pripravených 20 kremíkových dosiek o priemere 4 palce, vždy dve s rovnakou dávkou implantácie. V procese zberu dát bolo na každej kremíkovej doske testovaných 304 štruktúr, pričom plocha jednej štruktúry bola $0.81 \cdot 10^{-6} m^{-2}$. Na obr. 7.3 sú znázornené priebehy koncentračných profilov dotujúcich prímesí pre jednotlivé dávky implantácie. Znázornené priebehy predstavujú strednú hodnotu cez všetky závislosti $N(x)$, ktoré boli určené na testovanej doske. Z každej dávky je na obr. 7.3 zobrazená len jedna kremíková doska.



OBR. 7.1 Plošné rozloženie povrchového špecifického odporu kremíkovej dosky č. 16.



OBR. 7.2 Plošné rozloženie povrchového špecifického odporu kremíkovej dosky č. 16.



OBR. 7.3 Hĺbkový profil dotujúcich prímesí v pod povrchovej oblasti polovodiča vytvorený iónovou implantáciou s dávkami $0.6, 1.0, 2.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 20.0, 60.0 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$. Zobrazené priebehy $N(x)$ predstavujú strednú hodnotu z priebehov, nameraných na 304 štruktúrach MOS každej kremíkovej dosky.

Tabuľka 7.2 obsahuje číselné hodnoty implantačnej dávky zadané v procese implantácie D_i , strednú hodnotu \bar{D} a smerodajnú odchýlku σ_D dávok vypočítaných postupom uvedeným v časti 6.1.

Pre kontrolu reprodukovateľnosti procesu implantácie boli zmerané koncentračné profily na ďalších 3 kremíkových doskách. V tabuľke 7.3 sa nachádzajú hodnoty dávok implantácie pre tri dvojice kremíkových dosiek, ktoré boli implantované s tou istou dávkou.

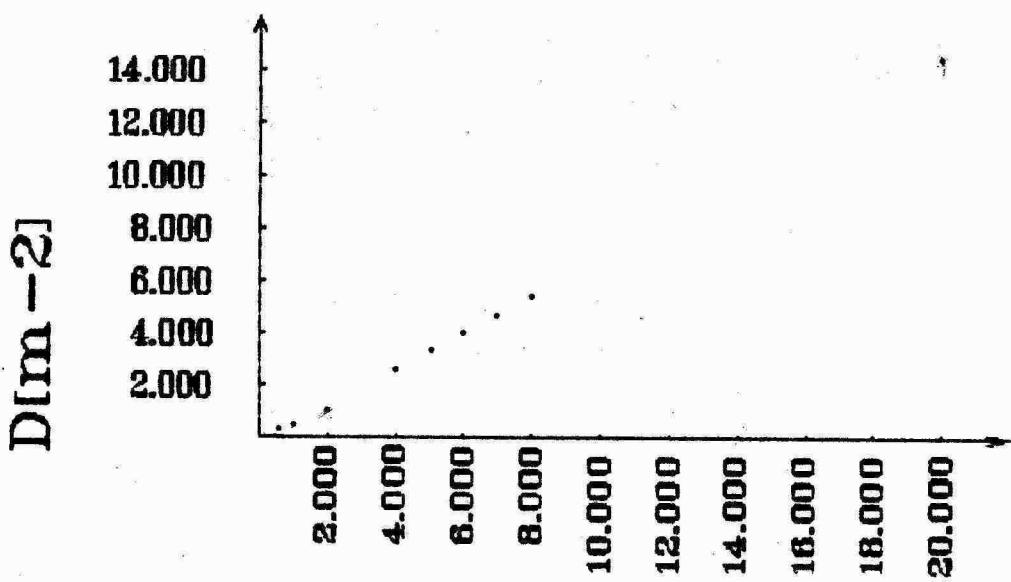
Ako je zrejmé z tab. 7.2 a tab. 7.3, vypočítaná implantačná dávka je vždy menšia ako dávka zadaná v procese implantácie. To je spôsobené jednako tým, že časť implantovaných iónov je

VZORKA Č.	$D_i \cdot 10^{15} [\text{m}^{-2}]$	$\bar{D} \cdot 10^{15} [\text{m}^{-2}]$	$\sigma D \cdot 10^{15} [\text{m}^{-2}]$
1	0.6	0.39	0.02
3	1.0	0.59	0.08
5	2.0	1.20	0.06
7	4.0	2.67	0.09
9	5.0	3.40	0.13
11	6.0	4.07	0.13
13	7.0	4.72	0.14
15	8.0	5.49	0.09
17	20.0	14.41	0.35
19	60.0	42.63	0.21

TAB. 7.2 Dávka implantácie D_i , vypočítaná stredná hodnota dávky implantovaných a aktivovaných iónov v polovodiči \bar{D} a jej smerodajná odchýlka σD na kremíkovej doske.

VZORKA Č.	$D_i \cdot 10^{15} [\text{m}^{-2}]$	$\bar{D} \cdot 10^{15} [\text{m}^{-2}]$	$\sigma D \cdot 10^{15} [\text{m}^{-2}]$
9	5.0	3.40	0.13
10	5.0	3.56	0.06
11	6.0	4.07	0.13
12	6.0	4.03	0.12
15	8.0	5.49	0.09
16	8.0	5.46	0.08

TAB. 7.3 Dávka implantácie D_i , vypočítaná stredná hodnota dávky implantovaných a aktivovaných iónov v polovodiči \bar{D} a jej smerodajná odchýlka σD na kremíkovej doske.



Dilm-2]

OBR. 7.4

Závislosť strednej hodnoty $\bar{D} = E(\int N(x) - N_0 dx)$ od dávky implantovaných iónov D_i . Zobrazené hodnoty sú rádu 10^{15} .

zachytená v oxidovej vrstve a jednako neúplňou aktiváciou implantovaných iónov v polovodiči. Aby sme určili závislosť medzi zadanou a vypočítanou dávkou, vypočítali sme lineárnu regresiu koeficient b vzťahu

$$\bar{D} = b D_i \quad (7.1)$$

ktorý mal hodnotu

$$b = 0.71$$

a zároveň sme zobrazili závislosť $\bar{D} = f(D_i)$ na obr. 7.4.

Tým sme zistili, že z pôvodnej dávky, ktorá bola implantovaná sa stalo elektricky aktívnymi 71 % implantovaných iónov.

Aby sme určili stupeň závislosti medzi implantovanou dávkou a množstvom elektricky aktívnych prímesí v polovodiči, ktoré boli implantované, vypočítali sme korelačný koeficient medzi týmito veličinami. Použili sme

vzťah

$$R(X, Y) = \frac{E[(X - E(X))(Y - E(Y))]}{D(X) D(Y)},$$

(7.2)

ktorý je uvedený napríklad v [7.1]. Vo vzťahu (7.2) X a Y predstavujú náhodné veličiny, E predstavuje strednú hodnotu a D označuje smerodajnú odchýlku. Uvedeným spôsobom sme získali hodnotu korelačného koeficientu

$$R(D_i, \bar{D}) = 0.99,$$

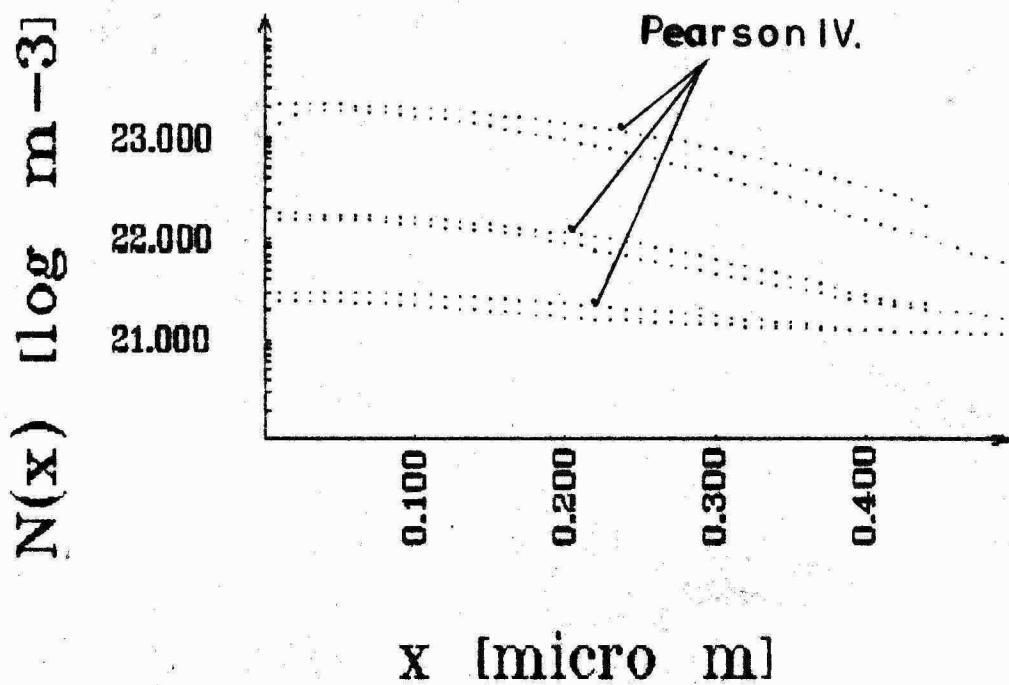
pričom sme považovali hodnoty D_i a \bar{D} za realizácie náhodnej veličiny a použili sme všetky hodnoty uvedené v tab. 7.2. a tab. 7.3. Možno poznamenať, že v teórii pravdepodobnosti je dokázaná veta, podľa ktorej $|R(X, Y)| = 1$ práve vtedy, keď s pravdepodobnosťou 1 platí

$$Y = a + b X.$$

Z uvedeného vyplýva, že závislosť medzi hodnotami D_i a \bar{D} je v tomto prípade lineárna.

Pomocou profesionálneho programu, zakúpeného Teslou Piešťany, na simuláciu procesu iónovej implantácie boli vypočítané priebehy koncentrácie prímesí pre dávky 0.6, 5.0 a $60.0 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$. Priebehy koncentračných profilov boli simulované na základe zadaných podmienok implantácie, pričom sa použila metóda Pearson IV. Porovnanie nameraných a simulovaných priebehov koncentrácie prímesí je zobrazené na obr. 7.5.

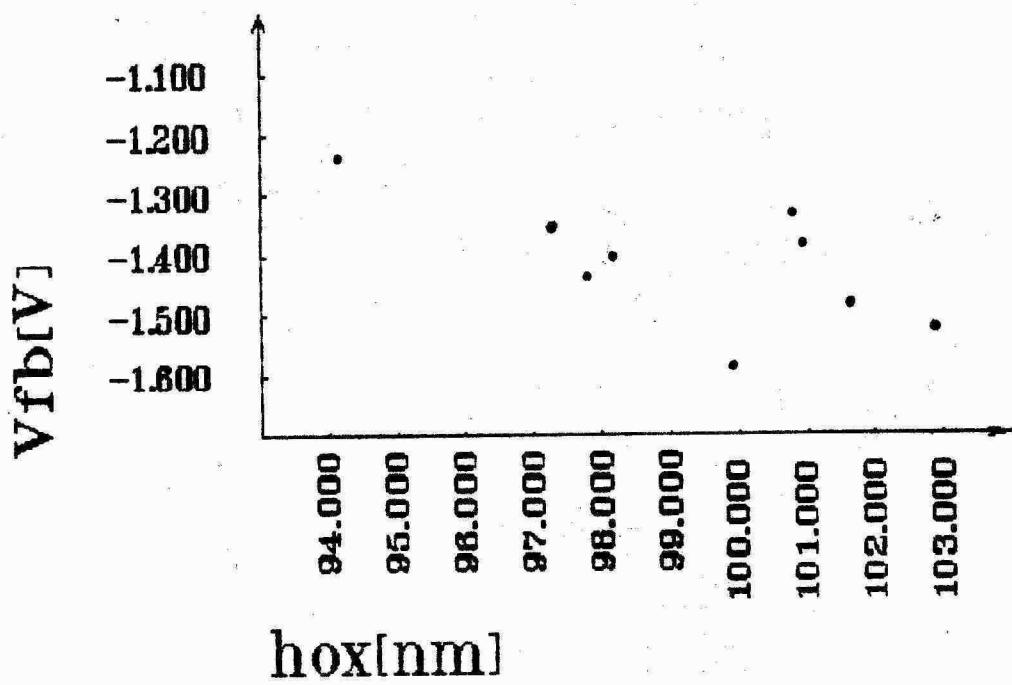
V procese výpočtu hĺbkových profilov dotujúcich prímesí sme zároveň určili aj hodnoty napäcia vyrovnaných pásov V_{fb} pre každú testovanú štruktúru MOS. Pomocou samostatného programu, ktorý určuje na základe dát, nachádzajúcich sa v zadanom dátovom súbore strednú hodnotu a smerodajnú odchýlku uložených parametrov, sme vypočítali strednú hodnotu \bar{V}_{fb} a smerodajnú odchýlku σV_{fb} . Zároveň sme pomocou tohto istého postupu určili hodnoty \bar{h}_{ox} a σh_{ox} , ktoré sú pre jednotlivé kremíkové dosky uvedené v tabuľke 7.4.



OBR. 7.5 Porovnanie stredných hodnôt nameraných priebehov $N(x)$ a simulovaných pomocou metódy Pearson IV pre dávky 0.6 , 5.0 , $60.0 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$.

VZORKA Č.	\bar{V}_{fb} [V]	σV_{fb} [V]	\bar{h}_{ox} [nm]	σh_{ox} [nm]
1	-1.24	0.07	94.14	0.89
3	-1.43	0.07	97.79	0.80
5	-1.35	0.08	97.26	0.28
7	-1.40	0.09	98.15	0.35
9	-1.52	0.09	102.85	0.53
11	-1.48	0.08	101.65	0.32
13	-1.38	0.08	100.94	0.41
15	-1.33	0.07	100.80	0.16
17	-1.59	0.08	99.93	0.22
19	-2.43	0.16	99.67	0.19

TAB. 7.4 Stredná hodnota a smerodajná odchýlka napäcia vyrovnaných pásov a hrúbky oxidu.



OBR. 7.6 Závislosť strednej hodnoty \bar{V}_{fb} od strednej hodnoty hrúbky oxidovej vrstvy \bar{h}_{ox} pre kremíkové dosky čísla 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 a 17.

Z tabuľky 7.4 je vidieť, že hodnoty \bar{V}_{fb} súvisia so strednými hodnotami hrúbky oxidovej vrstvy \bar{h}_{ox} , preto sme túto závislosť zobrazili na obr. 7.6.

Hodnota korelačného koeficientu

$$R(\bar{V}_{fb}, \bar{h}_{ox}) = -0.78$$

súhlasí s teoretickým vzťahom, určujúcim závislosť hodnoty V_{fb} od veľkosti poruchového náboja v oxidovej vrstve a na rozhraní Si-SiO₂ Q_{dc} a od veľkosti kapacity oxidovej vrstvy C_{ox}

$$C_{ox}$$

$$V_{fb} = \varphi_{me} + \frac{Q_{dc}}{C_{ox}}, \quad (7.3)$$

kde φ_{me} predstavuje rozdiel výstupných potenciálov medzi polovodičom a kovom.

Pre koeficienty lineárnej regresie

$$V_{fb} = a + b h_{ox}$$

sme dostali hodnoty

$$a = 5.48 \cdot 10^{-3} \quad b = -1.41 \cdot 10^7$$

Na štyroch kremíkových doskách bola určená hustota pascí rozhrania Si-SiO₂ D_{it}. Ako vidieť z tabuľky 7.5, stredné hodnoty D_{it} sa pohybujú v oblasti 2.0 ± 5.0 10¹⁴, čo hovorí o dobrej kvalite rozhrania Si-SiO₂.

O kvalite kryštálu podáva informáciu veľkosť generačného času minoritných nosičov náboja. Aby sme mohli porovnať kvalitu kryštálu pre jednotlivé dosky, určili sme na každej kremíkovej doske plošné rozloženie τ_g v hĺbke od

VZORKA Č.	D _{it} [m ⁻² eV ⁻¹]	σD _{it} [m ⁻² eV ⁻¹]
3	4.42 10 ¹⁴	0.25 10 ¹⁴
7	2.60 10 ¹⁴	0.15 10 ¹⁴
9	2.74 10 ¹⁴	0.15 10 ¹⁴
12	3.55 10 ¹⁴	0.16 10 ¹⁴

TAB. 7.5 Stredná hodnota a smerodajná odchýlka hustoty pascí rozhrania Si-SiO₂ v strede zakázaného pásma.

0.9 do 1.3 μm. Pre všetky dosky sme potom určili strednú hodnotu τ_g a smerodajnú odchýlku στ_g, ktorých hodnoty sú uvedené v tab. 7.6. Hodnoty τ_g sa pohybujú v rozmedzí 0.41 ± 2.25 ms, čo hovorí o vysokej kvalite substrátu. Zároveň z tab. 7.6 vidieť, že hodnoty τ_g sa pohybujú náhodne a nie je možné nájsť závislosť od ďalších, predtým spomenutých parametrov.

VZORKA č.	$\bar{\tau}_q$ [ms]	$\sigma\tau_q$ [ms]
1	1.93	0.12
3	1.48	0.09
5	1.84	0.09
7	1.67	0.10
10	1.95	0.09
12	0.41	0.02
15	1.74	0.09
17	2.25	0.14

TAB. 7.6 Stredná hodnota a smerodajná odchýlka generačnej doby života minoritných nosičov náboja.

Literatúra

[7.1] Rényi A.: Teorie pravdepodobnosti. Academia Praha 1972.

8. Súhrn výsledkov s uvedením nových poznatkov.

V dizertačnej práci sú uvedené výsledky získané pri skúmaní parametrov štruktúr MOS s nehomogénym rozložením prímesí v podpovrchovej oblasti polovodiča. Vzhľadom k tomu, že u nás nebola doposiaľ táto problematika komplexne riešená, bolo potrebné zhrnúť súčasné poznatky z tejto oblasti, zvládnúť metodiku merania a vyhodnotenia parametrov a prakticky ich realizovať. Praktická stránka pozostávala z realizácie jednotlivých kapacitných metód a vytvorenia komplexného pracoviska pre meranie a vyhodnotenie plošného rozloženia parametrov štruktúr MOS s perspektívou ďalšieho využitia pre skúmanie korelácií medzi jednotlivými parametrami, prípadne medzi parametrami iných testovacích štruktúr, alebo technologických postupov planárnej technológie.

Dizertačná práca priniesla nasledovné výsledky:

- 1. Vyriešili sme jednodimenzionálnu Poissonovu rovnicu pre nehomogénne dotovaný substrát polovodiča a vypočítali sme teoretické CV závislosti štruktúry MOS. Numerické riešenie Poissonovej rovnice umožnilo získať informácie o fyzikálnych dejoch v štruktúre MOS v procese merania CV závislostí a umožnilo overenie použitých aproximácií pri výpočte koncentračných profilov.**
- 2. Okrem štandardnej vysokofrekvenčnej a kvázistatickej CV metódy sme realizovali postup merania štruktúr MOS metódou QC, kde bolo potrebné:**
 - navrhnuť a realizovať prípravok pre umiestnenie meranej vzorky a vzduchového kondenzátora
 - minimalizovať zvodové prúdy a parazitné kapacity
 - zvoliť vhodné postupy určovania parazitných kapacít
 - vytvoriť programové vybavenie pre zber a spracovanie

dát.

Ako sa ukázalo počas zavádzania metódy, ako aj počas nasledovných experimentov, implementácia metódy QC vyžaduje vytvorenie dôkladného meracieho pracoviska s dôrazom na minimalizáciu zvodových prúdov a parazitných kapacít.

3. Pre meranie generačného času života minoritných nosičov náboja sme implementovali metódu konštantnej šírky OPN (CCT), ktorá umožňuje efektívne vyhodnocovanie kvality polovodičových substrátov pre vysoké hodnoty τ_g . Pri tvorbe riadiaceho programu sme navrhli a realizovali algoritmus pre udržanie konštantnej nerovnovážnej kapacity štruktúry MOS a merania závislosti $V_g(t)$.

4. Všetky použité metódy (HF, LF, QC a CCT) boli automatizované pomocou osobného počítača PC AT s interfejsom PCIIA, pričom bolo potrebné zvládnúť riadenie zbernice IMS-2 a efektívne využiť autonómne schopnosti použitých prístrojov. Pre skúmanie plošného rozloženia parametrov štruktúr MOS na kremíkovej doske sme vypracovali programový balík pozostávajúci z približne 40 programov, ktoré vykonávajú zber dát, ich spracovanie a určenie parametrov štruktúr MOS. Zároveň sú k dispozícii programy pre zobrazenie získaných výsledkov. Stručný prehľad vytvorených programov, ktoré slúžia pre zber, spracovanie a zobrazenie dát plošného rozloženia parametrov štruktúr MOS, je v dodatku 8.

5. Pri výpočte koncentračných profilov dotujúcich prímesí v podpovrchovej oblasti polovodiča sme aplikovali:

- korekciu approximácie hlbokého ochudobnenia pri povrchu polovodiča
- korekciu vzhladom na hustotu pasí rozhrania Si-SiO₂
- výpočet šírky oblasti OPN pomocou approximácie priebehu elektrického potenciálu v polovodiči

- výpočet priestorového rozloženia dotujúcich atómov z koncentračného profilu majoritných nosičov náboja.

6. Vhodnosť použitých aproximácií sme overili riešením Poissonovej rovnice a výpočtom koncentračného profilu majoritných nosičov náboja z teoretickej CV závislosti. Tu sa ukázalo, že pre určovanie koncentračných profilov implantovaných prímesí testovaných kremíkových dosiek v záverečnom experimente je použitie uvedených aproximácií vhodné.

7. Pre rôzne dávky implantácie v rozsahu od $0.6 \cdot 10^{15}$ do $60.0 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$ sme určili na 10 kremíkových doskách priebehy koncentračných profilov $N(x)$ na približne 300 štruktúrach MOS každej testovanej dosky a vypočítali sme ich stredné hodnoty. Zároveň sme určili strednú hodnotu časti dávky implantovaných iónov, ktoré sa stali elektricky aktívnymi v polovodiči D_a . Ukázalo sa, že závislosť medzi dávkou implantácie D_i a množstvom elektricky aktívnych, implantovaných prímesí $D_a = f(D_i)$ je lineárna, čo usudzujeme z hodnoty korelačného koeficientu $R(D_i, D_a) = 0.99$. Lineárnu regresiou závislosti $D_a = f(D_i)$ sme zistili, že z pôvodnej implantovanej dávky sa do polovodiča dostalo a stalo sa elektricky aktívnymi 71% iónov.

Uvedenú metodiku možno využiť pri kontrole procesu implantácie a bola vypracovaná na základe požiadavky Tesly Piešťany.

8. Vypočítané koncentračné profily sme overili simuláciou technologického procesu implantácie pomocou funkcie Pearson IV. Z porovnania výsledkov zistených pomocou kapacitných meraní a simulácie vidieť malý rozdiel, ktorý môže byť spôsobený tým, že v procese poimplantačného tepelného spracovania neboli všetky implantované ióny aktivované. Zistené rozdiely sú však minimálne.

Bola vypracovaná metodika na sledovanie plošného rozloženia hlbkových profilov dotujúcich prímesí v rámci hraníc použiteľnosti kapacitnej metódy s možnosťou sledovať plošné rozloženie v ľubovoľnej hĺbke pod povrchom polovodiča.

Na základe experimentálnych výsledkov možno konštatovať, že proces implantácie prebiehal na 4 palcových kremíkových substrátoch reprodukovateľne s vysokou homogenitou rozloženia prímesí, čím sme overili kvalitu implantačného zariadenia.

9. Predchádzajúce výsledky, získané pri určovaní hlbkových koncentračných profilov, sa využili pri skúmaní vlastnosti rozhrania Si-SiO₂ štruktúr MOS s implantovaným substrátom. Pre analýzu týchto štruktúr bola použitá:

a, diferenciálna kapacitná metóda, porovnávajúca HF a LF CV závislosť štruktúry MOS, pričom výpočet $\phi_e(V_g)$ zohľadňuje hlbkový profil prímesí

b, kvázistatická CV metóda, založená na porovnaní experimentálnej a teoretickej CV závislosti.

Z porovnania výsledkov získaných oboma metodami vyplýva, že hustota pascí rozhrania Si-SiO₂ v strede zakázaného pásu sa prakticky nelíši. Obe metodiky možno aplikovať na CV závislosť určené pomocou HF a kvázistatickej metódy, alebo na CV závislosť štruktúry MOS určené pomocou QC metódy.

Zároveň sme zvládli postup určenia priebehu povrchového potenciálu $\phi_e(V_g)$ pomocou QC metódy, alebo integráciou LF CV závislosti. Pre výpočet hustoty pascí z porovnania experimentálnej a teoretickej CV závislosti sme použili teoretickú LF CV závislosť určenú pomocou numerického riešenia Poissonovej rovnice pre nehomogénne rozloženie dotujúcich prímesí v polovodiči.

10. Z porovnania HF a LF CV závislosti sme určili plošné rozloženie hustoty pascí rozhrania Si-SiO₂. Stredná hodnota hustoty pascí rozhrania v strede zakázaného pásu testovaných dosiek sa pohybovala v intervale od $2.6 \cdot 10^{14}$ do $4.4 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-2} \text{ eV}^{-1}$. Tieto hodnoty sú na dolnej hranici rozlišovacej schopnosti použitej metódy a hovoria oobrej kvalite rozhrania Si-SiO₂ testovaných vzoriek a súčasne o kvalite opracovania polovodičových substrátov.

11. V záverečnom experimente sme metódou CCT určili plošné rozloženie strednej hodnoty τ_g na 8 kremíkových doskách v hĺbke od 0.9 do 1.3 μm , ktoré sa pohybujú od 0.41 do 2.25 ms, čo hovorí o vysokej kvalite substrátu.

Výhodou použitej metódy je, že vyhodnocuje τ_g z generačného prúdu minoritných nosičov náboja len z oblasti OPN a eliminuje vplyv generácie minoritných nosičov náboja mimo túto oblasť, čo sa prejavilo na reprodukovateľnosti hodnôt tohto parametra.

Bola zistená vzájomná súvislosť medzi hĺbkovým profilom doby života a koncentračným profilom implantovaných prímesí. Dosiahnuté výsledky poukazujú, že u skúmaných vzoriek dominantný mechanizmus, ktorý určuje dobu života je rozptyl na ionizovaných prímesiach. To taktiež potvrdzuje, že skúmané polovodičové substráty sú vysoko kvalitné z hľadiska defektov a preto je rozptyl na nich vzhľadom na rozptyl na ionizovaných prímesiach zanedbateľný.

12. Určili sme plošné rozloženie hrúbky oxidovej vrstvy vypočítanej z kapacity štruktúry MOS v akumulácii na 10 kremíkových doskách, z ktorého vidieť nehomogenity hrúbky SiO₂ spôsobené nerovnomerným rozložením teploty a turbulenčiami oxidačnej atmosféry v trubici oxidačnej pece. Stredné hodnoty hrúbky SiO₂ na jednotlivých doskách sa pohybujú v intervale od 94.14 do 102.85 nm, pričom v technologickom

procese výroby štruktúr MOS bola požadovaná hodnota 100 nm. Zároveň je z tabuľky stredných hodnôt vidieť, že hrúbka oxidu je najnižšia pre kremíkové dosky, ktoré sa nachádzali na prednom a zadnom konci oxidačnej lodičky a najhrubší oxid sa vytvoril v strede, čo bolo spôsobené rozdelením teploty v oxidačnej trubici. Tieto poznatky sú v súlade s Bernmannovým modelom mechanizmu termickej oxidácie.

13. Skúmali sme plošné rozloženie napäťia vyrovnaných pásov V_{fb} pre 10 kremíkových dosiek. Stredné hodnoty V_{fb} na jednotlivých kremíkových doskách sa pohybujú v rozsahu od -1.24 do -2.43 V. Vzhľadom k tomu, že náboj pascí rozhrania je pre skúmané dosky malý, rozptyl stredných hodnôt V_{fb} môže byť spôsobený nábojom alkalických iónov v oxide.
14. Pre riešenie rovníc matematickej fyziky sme použili metódy numerickej matematiky. Riešili sme diferenciálnu rovnicu druhého rádu s počiatočnými podmienkami pomocou metódy prediktör-korektor so štartovacím úsekom Runge-Kutta, hľadali sme korene nelineárnej rovnice metódou dotyčníc, použili sme číslicové filtre pre vyhladenie a určenie derivácií experimentálne získaných dát. Použili sme funkcie knižnice NAG pre aproximáciu kubickými splajn-funkciami.
15. Vypracovali sme systém a štruktúry dátových súborov, ktoré uchovávajú namerané dáta a určené parametre štruktúry MOS, pričom sme zohľadnili vzťahy medzi jednotlivými metodami merania a určovania parametrov, čo prispieva k väčšej efektívnosti programov a umožňuje ďalšie použitie získaných výsledkov.

9. Závery pre prax a rozvoj vednej disciplíny.

Z hľadiska zvolených cieľov bolo dosiahnutých viacero poznatkov, ktoré sa uplatnili v praxi pri kontrole technologických postupov vytvárania polovodičových štruktúr planárnej technológiou. Záverom môžeme prínosy práce zhrnúť do nasledovných bodov:

1. Realizácia komplexného automatizovaného pracoviska pre skúmanie elektro-fyzikálnych vlastností štruktúr MOS s nehomogénym rozložením prímesí s možnosťou sledovania plošného rozloženia:
 - koncentračného profilu dotujúcich prímesí $N(x)$ pre rôzne hĺbky x
 - hĺbkového profilu času života $\tau_g(x)$ pre rôzne hĺbky x
 - hustoty pásčí rozhrania $Si-SiO_2-D_{it}(E_c-E_b)$ pre rôzne energie v zakázanom pásme polovodiča
 - napäťia vyrovnaných pásov V_{fb}
 - hrúbky oxidovej vrstvy h_{ox} .
2. Výber vhodných numerických metód a ich použitie pre riešenie:
 - jednodimenzionálnej Poissonovej rovnice
 - nelineárnej rovnice pre určenie povrchového potenciálu z kapacity OPN C_{sc}
 - vyhľadenia a interpolácie experimentálne určených dát
 - výpočet derivácie experimentálne určených dát.
3. Vytvorenie programového vybavenia pre riadenie experimentálnych méranií, spracovanie a zobrazenie výsledkov vybraných parametrov štruktúr MOS s nehomogénym rozložením prímesí v podpovrchovej oblasti polovodiča a ich plošného rozloženia.
4. Skúmanie homogenity procesu implantácie na 4 palcových

kremíkových doskách s rozsahom dávok od $0.6 \cdot 10^{14}$ do $60.0 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-2}$ vzhľadom na:

- hĺbkový profil aktívnych prímesí
- vlastnosti rozhrania Si-SiO₂
- hĺbkový profil generačného času života minoritných nosičov náboja.

5. Navrhla a realizovala sa metodika pre určenie implantovanej dávky prímesí. Experimentálne výsledky boli overené simuláciou technologického procesu pomocou funkcie Pearson IV. Porovnanie experimentálnych a teoretických výsledkov vykazujú minimálny rozdiel. Navrhnutá metodika kontroly implantovanej dávky je aplikovateľná v praxi.

6. Zistila sa vzájomná súvislosť medzi koncentračným profílom dotujúcich prímesí a hĺbkovým profílom generačného času života minoritných nosičov náboja. Profil času života kvalitných kremíkových substrátov nie je určený mechanizmom rozptylu na náhodných defektoch substrátu, ale len na implantovaných prímesiach.

Dodatok 1. Numerické riešenie Poissonovej rovnice

Poissonovu rovnicu možno napísť v normalizovanom tvare
(dodatok 2)

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = e^{-x} - e^{x_1} + \alpha(x) - 1 \quad x \geq 0 \quad (d1.1)$$

Koncentrácie majoritných a minoritných nosičov náboja predstavujú prvé dva členy na pravej strane rovnice. Koncentráciu substrátu a prímesí predstavuje člen $\alpha(x) - 1$. Uvedenú rovnicu budeme riešiť ako diferenciálnu rovnicu druhého rádu s počiatočnými podmienkami, ktoré získame nasledujúcou úvahou [D.1]. Vo väčšine prípadov nehomogénnej koncentrácie polovodiča možno nájsť hĺbku v polovodiči, za ktorou môžeme považovať koncentráciu prímesí za konštantnú. Označme túto hĺbku x_1 a určíme ju z podmienky

$$\alpha(x_1) = 0.01 \quad (d1.2)$$

Potom pre $x \geq x_1$ možeme zanedbať člen $\alpha(x)$

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = e^{-x} - e^{x_1} - 1 \quad x \geq x_1 \quad (d1.3)$$

Vzťah (d1.3) predstavuje Poissonovu rovnicu pre homogénny polovodič, ktorú možno riešiť analyticky s okrajovými podmienkami

$$u(\infty) = 0 \quad \left. \frac{du}{dx} \right|_{x=\infty} = 0 \quad (d1.4)$$

aby sme dostali vzťah pre prvú deriváciu potenciálu

$$\frac{du}{dx} = - \frac{u}{|u|} \sqrt{2} \left[e^{-x} - e^{x_1} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (d1.5)$$

pre $x \geq x_1$. Počiatočné podmienky pre riešenie rovnice (d1.1) v oblasti $0 \leq x \leq x_1$ potom tvorí volne zvolený potenciál v bode x_1 a prvá derivácia potenciálu v bode x_1 vyjadrená vzťahom (d1.5). Vhodnou voľbou potenciálu v bode x_1 a opakoványm numerickým riešením rovnice (d1.1) z objemu po povrch

Dodatok 1 Numerické riešenie Poissonovej rovnice

polovodiča dostaneme súbor priebehov potenciálu v polovodiči od akumulácie po inverziu. Potrebujeme ešte poznať napäťie hradla pre každý priebeh potenciálu v polovodiči pri známej kapacite oxidovej vrstvy. Pre normálkové zložky intenzity elektrického poľa na rozhraní oxidu a polovodiča platí vzťah

$$\epsilon_{ox} \frac{E}{dx} = \epsilon_s \frac{E}{ds} . \quad (d1.6)$$

Ak označíme hrúbku oxidovej vrstvy h_{ox} , pre napäťie hradla dostaneme vzťahy

$$v_g = u_s + h_{ox} \frac{E}{\epsilon_{ox}} . \quad (d1.7)$$

$$v_g = u_s - k u_s' , \quad k = h_{ox} \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} , \quad (d1.8)$$

kde u_s je hodnota potenciálu na povrchu polovodiča a u_s' jej priestorová derivácia. Po odnormalovaní sme tým získali priebeh povrchového potenciálu ako funkciu napäťia hradla (obr. 1.2). Pre výpočet kapacity štruktúry MOS nasledovným vzťahom (dodatok 3)

$$\frac{C_{MOS}}{C_{ox}} = 1 - \frac{du}{dv_g} \quad (d1.9)$$

potrebujeme poznať hodnotu derivácie povrchového potenciálu podľa napäťia hradla. Derivovaním rovnice (d1.1) podľa v_g dostaneme vzťah

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = w \left[\frac{u}{\epsilon} + e^{-\frac{2u_f - u}{\epsilon}} \right] \quad x \geq 0 \quad (d1.10a)$$

kde

$$w = \frac{du}{dv_g}$$

a tým istým postupom pre (d1.5) a (d1.8)

$$\frac{dw}{dx} \frac{du}{dx} = w \left[\frac{u}{\epsilon} - e^{-\frac{2u_f - u}{\epsilon}} - 1 \right] \quad x \geq x_1 \quad (d1.10b)$$

Dodatok 1. Numerické riešenie Poissonovej rovnice.

$$w_s - k w_s' = 1 \quad . \quad (\text{d1.10c})$$

Pre voľne zvolenú hodnotu w v bode x_1 vypočítame prvú deriváciu podľa vzťahu (d1.10b) a s oboma počiatocnými podmienkami riešime rovnicu (d1.10a) z bodu x_1 smerom k povrchu, čím získame hodnoty β a γ pre veličiny w_s a w_s' . Pretože hodnota w v bode x_1 bola voľne zvolená, nemusia hodnoty β a γ splňať podmienku (d1.10c). Pretože rovnice (d1.10a-c) sú lineárne, platia vzťahy

$$1 = w_s - k w_s' = \frac{\beta - k\gamma}{\beta - k\gamma} = \frac{\beta}{\beta - k\gamma} - k \frac{\gamma}{\beta - k\gamma} \quad (\text{d1.11a})$$

$$w_s = \frac{\beta}{\beta - k\gamma} \quad w_s' = \frac{\gamma}{\beta - k\gamma} \quad . \quad (\text{d1.11b})$$

Ako výsledok možno vypočítať kapacitu štruktúry MOS

$$\frac{C_{\text{mos}}}{C_{\text{ox}}} = 1 - \frac{du}{dv_g} = 1 - w_s = -k w_s' = -k \frac{\gamma}{\beta - k\gamma} \quad . \quad (\text{d1.12})$$

Treba poznamenať, že kapacita vypočítaná podľa vzťahov (d1.10) a (d1.12) je nízkofrekvenčná kapacita štruktúry MOS, pretože vo vzťahoch (d1.10) je započítaný príspevok minoritných nosičov náboja. Vysokofrekvenčnú kapacitnú závislosť dostaneme elimináciou členov predstavujúcich príspevok minoritných nosičov náboja zo vzťahov (d1.10). Dostaneme

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = w e^u \quad x \geq x_1 \quad (\text{d1.13a})$$

$$\frac{dw}{dx} \frac{du}{dx} = w \left[e^u - 1 \right] \quad x \geq x_1 \quad (\text{d1.13b})$$

$$w_s - k w_s' = 1 \quad . \quad (\text{d1.13c})$$

Pre výpočet kapacitnej závislosti štruktúry MOS v stave hlbokého ochudobnenia treba eliminovať príspevky minoritných nosičov náboja aj zo vzťahov pre výpočet potenciálu. Úpravou (d1.1) a (d1.5) dostaneme

Dodatok 1. Numerické riešenie Poissonovej rovnice.

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{u}{\epsilon} + \alpha(x) - 1 \quad x \geq 0 \quad (\text{d1.14a})$$

$$\frac{du}{dx} = - \frac{u}{|u|} \sqrt{2} \left[\frac{u}{\epsilon} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad x \geq x_1 \quad (\text{d1.14b})$$

Na obr. 1.3 sú znázornené nízkofrekvenčná, vysokofrekvenčná CV krvka a CV krvka hlbokého ochudobnenia, vypočítané uvedeným postupom. Pre riešenie diferenciálnej rovnice bola použitá metóda prediktor-korektor so štartovacím úsekom Runge-Kutta. Program bol napísaný v jazyku Fortran a výpočet jednej CV závislosti s približne 100 bodmi trval na počítačoch ADT 4500 resp. IBM PC AT s matematickým koprocessorom 1 až 2 minúty v dvojnásobnej presnosti operácií s plávajúcou čiarkou.

Dodatok 2. Úprava Poissonovej rovnice do normalizovaného tvaru.

Poissonova rovnica má tvar

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = - \frac{p(x)}{\epsilon} \quad (\text{d2.1})$$

Ak uvažujeme, že v polovodiči s koncentráciou substrátu N_b (predpokladajme donory) je vytvorený nehomogénny koncentračný profil $N(x)$ (predpokladajme akceptor), môžeme pre hustotu náboja napísat vzťah

$$p(x) = -q(n(x) - p(x) + N(x) - N_b) \quad (\text{d2.2})$$

Členy $n(x)$ a $p(x)$, ktoré predstavujú voľné nosiče náboja, vyjadrieme pomocou normalizovaných potenciálov u a u_f

$$u(x) = \frac{E_i(\infty) - E_i(x)}{kT} = \frac{qp(x)}{kT} \quad (\text{d2.3b})$$

$$u_f = \frac{E_i(\infty) - E_f}{kT} \quad (\text{d2.3a})$$

a pomocou koncentrácie substrátu

Dodatok z. Úprava Poissonovej rovnice do norm. tvaru.

$$n(x) = N_b e^{u(x)} \quad (d2.4a)$$

$$p(x) = n_i e^{\frac{E_i(x) - E_f}{kT}} = n_i e^{\frac{u_f - u(x)}{kT}} = N_b e^{\frac{2u_f - u(x)}{kT}} \quad (d2.4b)$$

ked sme použili vzťah pre koncentráciu elektrónov v substráte

$$n(\infty) = N_b = n_i e^{\frac{E_f - E_i(\infty)}{kT}} = n_i e^{-u_f} \quad (d2.4c)$$

Potom hustotu náboja môžeme napísť v tvare

$$p(x) = -q N_b (e^{\frac{u(x)}{kT}} - e^{\frac{2u_f - u(x)}{kT}} + \alpha(x) - 1) \quad (d2.5)$$

$$\text{kde } \alpha(x) = \frac{N(x)}{N_b}$$

Dosadením hustoty náboja (d2.5) a substitúcie (d2.3) do rovnice (d2.1) dostaneme

$$\frac{d^2 u(x)}{dx^2} = \frac{q^2 N_b}{kT\epsilon} (e^{\frac{u(x)}{kT}} - e^{\frac{2u_f - u(x)}{kT}} + \alpha(x) - 1) \quad (d2.6)$$

Zavedieme efektívnu Debayovu dĺžku

$$L_D = \left[\frac{kT\epsilon}{q^2 N_b} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (d2.7)$$

na ktorú vzdialenosť x normujeme

$$\xi = \frac{x}{L_D} \quad (d2.8)$$

Môžeme písť Poissonovu rovnicu v normovanom tvaru

$$\frac{d^2 u(\xi)}{d\xi^2} = e^{\frac{u(\xi)}{kT}} - e^{\frac{2u_f - u(\xi)}{kT}} + \alpha(\xi) - 1 \quad (d2.9)$$

Dodatok 3. Výpočet kapacity štruktúry MOS .

Zmenu náboja na hradlovej elektróde štruktúry MOS môžeme vyjadriť pomocou kapacity štruktúry MOS a kapacity oxidovej vrstvy

Dodatok 3. výpočet kapacity štruktury MOS.

$$dQ = C_{\text{mos}} \frac{dV_g}{g} \quad (\text{d3. 1a})$$

$$dQ = C_{\text{ox}} (dV_g - d\varphi_e) \quad (\text{d3. 1b})$$

Porovnaním vzťahov (d3. 1a) a (d3. 1b) dostaneme vzťah

$$\frac{C_{\text{mos}}}{C_{\text{ox}}} = 1 - \frac{d\varphi_e}{dV_g} \quad (\text{d3. 2})$$

Dodatok 4. Termodynamická rovnováha v nehomogénne dotovanom substráte.

V prípade termodynamickej rovnováhy platí pre elektrónovú zložku prúdu vzťah

$$I_n = q D_n \frac{dn(x)}{dx} - q \mu_n n(x) \frac{d\varphi(x)}{dx} = 0 \quad (\text{d4. 1})$$

Z tohto vzťahu, použitím Einsteinovho vzťahu, možno vyjadriť intenzitu elektrického pola

$$E(x) = - \frac{kT}{q} \frac{1}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx} \quad (\text{d4. 2})$$

Kedže priestorový náboj je v tomto prípade určený ionizovanými donormi N_D a majoritnými elektrónmi, Poissonova rovnica nadobúda tvar

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{q}{\epsilon} [N_D(x) - n(x)] \quad (\text{d4. 3})$$

Deriváciou rovnice d4. 2 a porovnaním s rovnicou d4. 3 dostaneme výraz pre výpočet koncentračného profilu dotujúcich atómov z profilu majoritných nosičov náboja

$$N_D(x) = n(x) + \frac{kTe}{q^2} \frac{d}{dx} \left[\frac{1}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx} \right] \quad (\text{d4. 4})$$

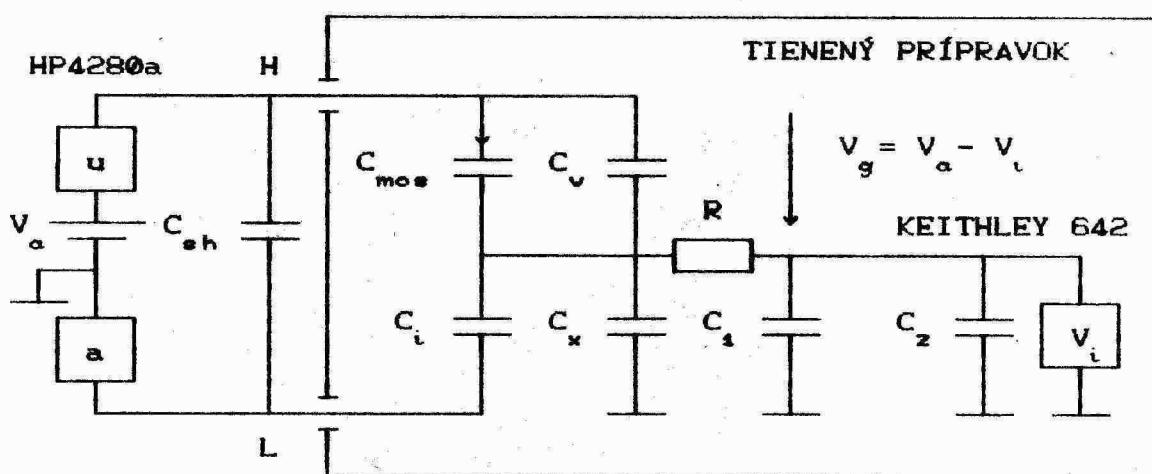
Dodatok 5. Zapojenie Q - C metódy a metodika merania parazitných kapacít.

Autori metódy uvádzajú v [D.2] [D.3] [D.4] podrobny popis analógovej aj digitálnej implementácie Q-C metódy. V oboch implementáciach na meranie kapacity používajú prístroj PAR

Poznámka 5. Zapojenie Q-C metódy a meranie parazit. kapacít.

410. namiesto ktorého sme v našom prípade použili prístroj HP4280a. Okrem potrebných detailov týkajúcich sa zapojenia metódy autori popisujú metodiku merania parazitných kapacít, prípadne ich elimináciu. Treba spomenúť, že pri meraní a eliminácii parazitných kapacít možno postupovať viacerými postupmi. V ďalšom popíšeme zapojenie, ktoré sme použili, ako aj zvolený postup merania parazitných kapacít. Avšak pre dokonalé zvládnutie tejto komplexnej metódy je potrebné zoznamenie sa s podrobnejším popisom v [D.2] [D.3] [D.4].

Na obr. D1 je znázornené detailné zapojenie pracovného stolička a meracích prístrojov Q-C metódy.



OBR. D1 Zapojenie Q-C metódy implementované na KME EF SVŠT.

V ľavej časti obrázku je znázornený merací prístroj HP4280a, ktorý na našej schéme pozostáva zo zdroja jednosmerného napäcia V_a , ktorým je meraná štruktúra privedená do požadovaného stavu, zdroja vysokofrekvenčného signálu (označeného u) a ampérmetra (označeného a). Kapacita C_{sh} predstavuje parazitnú kapacitu prívodných vodičov, ktorú možno eliminovať priamo pomocou meracieho prístroja HP4280a a preto ju ďalej nebudeme uvažovať. C_{mos} je kapacita meranej

Dodatok 5. Zapojenie Q-C metódy a meranie parazitnej kapacit.

štruktúry a C_t predstavuje napäťovo nezávislý kondenzátor. Kapacita C_v znázorňuje parazitnú kapacitu medzi stoličkou, na ktorom sa nachádza meraná štruktúra a zdvihnutým hrotom sondy. C_x označuje parazitnú kapacitu medzi spoločným bodom zapojenia kondenzátorov (ďalej len spoločný bod) a zemou. C_1 predstavuje parazitnú kapacitu prívodného vodiča k voltmetru a C_2 označuje vstupnú kapacitu voltmetra. Uvedené kapacity C_1 a C_2 tvoria spolu s odporom R dolnopriepustný filter, ktorý odizoluje voltmeter od vysokofrekvenčného signálu, generovaného prístrojom HP4280a. Problémom vysokofrekvenčného merania je skutočnosť, že ampérmetr prístroja HP4280a nemerie zložku prúdu tečúcu zo spoločného bodu cez kondenzátory C_v , C_1 a C_2 na zem. Uvedenú skutočnosť treba zohľadniť pri vyhodnotení vysokofrekvenčného merania. Pre konečné vyhodnotenie nameraných údajov je potrebné vyriešiť nasledovné úlohy :

- určenie kapacity C_t
- určenie parazitnej kapacity C_v
- určenie parazitnej kapacity C_x
- určenie kapacity $C_{LF} = C_t + C_1 + C_2$
- korekcia mieranej vysokofrekvenčnej kapacity C_m vzhľadom na prúd tečúci cez $C_x + C_1 + C_2$ na zem.

Dodatok 5.1. Určenie parazitnej kapacity C_v .

Podrobnejší popis metodiky merania parazitnej kapacity C_v je v dodatku 2. literatúry [D.2]. V našom experimente sme spomenutú metodiku modifikovali spôsobom, ktorý viedol k väčšej reprodukovateľnosti výsledkov. Tento postup popíšeme.

(1) pripojíme štruktúru MOS a pri $V_a = 0$ na okamih uzemníme spoločný bod, aby sme zaistili nulový vonkajší náboj na kondenzátoroch.

(2) napäťom V_a priviedieme štruktúru MOS do akumulácie a odčítame hodnoty $V_a = V_{ao}$, $V_i = V_{io}$.

Dodatok 5. Zapojenie Q-C metody a meranie parazitnej kapacity

(3) priviedieme štruktúru MOS vyšším napäťom V_a do akumulácie a odčítame hodnoty $V_g = V_{g1}$, $V_i = V_{i1}$. Zo zákona zachovania náboja vyplýva

$$(C_{ox} + C_v)(V_{g1} - V_{g0}) = (C_{LF} + C_x)(V_{i1} - V_{i0}) \quad (d5.1)$$

(4) nastavíme $V_a = 0$, na okamih uzemníme spoločný bod a zdvihнемe hrot sondy práve tak, aby sme prerušili kontakt.

(5) nastavíme $V_a \neq 0$ a odčítame hodnoty $V_a = V_{az}$, $V_i = V_{iz}$.

(6) zvýšime napätie V_a a odčítame hodnoty $V_a = V_{az}$, $V_i = V_{iz}$. Zo zákona zachovania náboja vyplýva

$$C_v(V_{g2} - V_{g1}) = (C_{LF} + C_x)(V_{iz} - V_{i2}) \quad (d5.2)$$

(7) porovnaním vzťahov (d5.1) a (d5.2) dostaneme výraz pre výpočet kapacity C_v , ktorú môžeme vyhodnotiť za predpokladu, že poznáme kapacitu oxidovej vrstvy štruktúry MOS.

$$C_v = C_{ox} \frac{1}{\frac{V_{g2} - V_{g1}}{V_{g1} - V_{g0}} - \frac{V_{iz} - V_{i2}}{V_{iz} - V_{i0}}} \quad (d5.3)$$

Dodatok 5.2. Určenie parazitnej kapacity C_x .

V dodatku 10 literatúry [D.4]] sa nachádza popis priameho merania parazitnej kapacity C_x . Avšak experimentálne výsledky ukazujú, že toto meranie je začažené veľkou chybou a jeho reproducibilnosť je malá. Preto sme zvolili v našom experimente postup, ktorého princíp je načrtnutý v dodatku 5 literatúry [D.4]. Ako možno vidieť v dodatku 5.4., vysokofrekvenčná kapacita štruktúry MOS C_{mos} je funkciou parazitnej kapacity C_x , ktorú chceme určiť. V akumulácii musí platiť $C_{mos} = C_{ox}$, čo môžeme dosiahnuť vhodnou variáciou hodnoty C_x . V našom vyhodnotení dát namenaných Q-C metódou sme na variáciu hodnoty C_x použili metódu delenia intervalov.

Dodatok 5. Zapojenie Q-C metódy a meranie paraz. kapacit.

Dodatok 5.3. Určenie kapacity C_{iLF} .

V dodatku 10 literatúry [D.4] sa nachádza popis prameho merania parazitnej kapacity C_{iLF} . Avšak podobne ako pri meraní C_x experimentálne výsledky ukazujú, že toto meranie je zaťažené veľkou chybou. Preto sme zvolili postup, ktorý vychádza z podmienky, že nízkofrekvenčná a vysokofrekvenčná kapacita štruktúry MOS musia mať tú istú hodnotu v akumulácii. Určenie C_{iLF} potom vychádza z nasledujúceho vzťahu

$$\frac{\delta}{\delta C_{iLF}} \sum_j \left[C_{mos}^{LF}(j) - C_{mos}^{HF}(j) \right]^2 = 0 \quad (d5.4)$$

kde horeuvedenú sumáciu vykonávame pre body namerané v akumulácii. Popis odvodenia vzťahu pre výpočet C_{iLF} je v dodatku 4 literatúry [D.4] a tu uvedieme len jeho konečnú podobu.

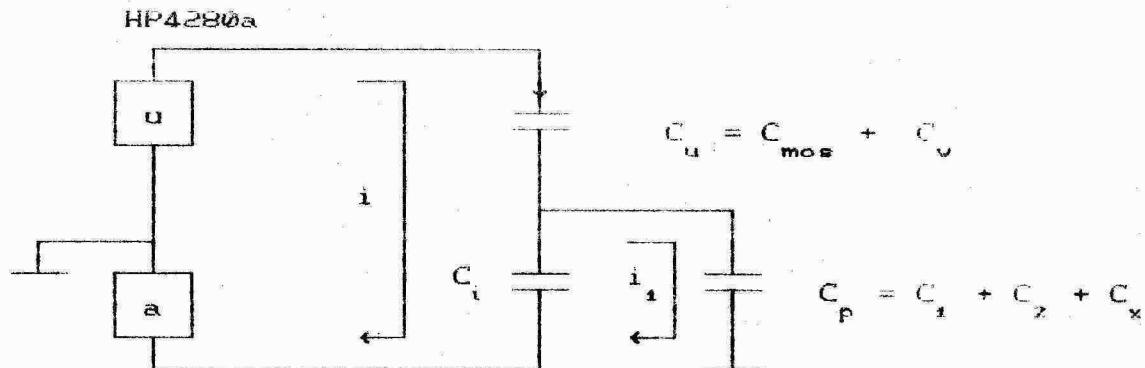
$$C_{iLF} = \frac{\sum_j \left[C_{mos}^{HF}(j) + C_v \right] \left[\frac{dV_i}{dV_g} \right]_j}{\sum_j \left[\frac{dV_i}{dV_g} \right]_j} \quad (d5.5)$$

Treba upozorniť, že uvedený postup má tú výhodu, že jeho použitie zaručuje koincidenciu nízkofrekvenčnej a vysoko-frekvenčnej kapacitnej závislosti štruktúry MOS v akumulácii, čo predstavuje dobrý základ pre výpočet pascí rozhrania z uvedených dvoch kapacitných závislostí.

Dodatok 5.4. Korekcia vysoko-frekvenčnej kapacity C_x .

V dodatku 1 literatúry [D.2] je uvedená analýza zapojenia Q-C metódy z pohľadu vysoko-frekvenčného merania. Tu uvedieme jej hlavnú myšlienku.

Dodatok 5. Zapojenie Q-C metódy a meranie paraz. kapacit.



OBR. D2 Ekvivalentné zapojenie Q-C metódy pre vysokofrekvenčné meranie.

Ako vidieť z obr. D2 ampérmetr prístroja HP4280a nemeria prúd i_1 tečúci cez kondenzátor C_i . Kapacitu C_m , ktorú pomocou tohto prístroja nameríame, môžeme vyjadriť vzťahom

$$C_m = \frac{C_u C_{i_{HF}}}{C_{i_{HF}} + C_u + C_p} \quad (\text{dS. 6})$$

V kapitole 3.3 sú uvedené vzťahy pre výpočet vysokofrekvenčnej kapacity štruktúry MOS. Aby výsledky, získané zo vzťahov (3.3a-d) neboli ovplyvnené uvedenou skutočnosťou treba urobiť nasledujúce korekcie (podľa dodatku 1 literatúry [D.4])

$$C_{i_{HF}} = C_{i_{HF}} k, \quad G_m = G_m k, \quad C_m = C_m k \quad (\text{dS. 7})$$

kde

$$k = 1 + \frac{C_x}{C_{i_{HF}}} \quad (\text{dS. 8})$$

Dodatok 6. Určenie povrchového potenciálu φ_s z Q-C metódy.

Spôsob určenia povrchového potenciálu štruktúry MOS je popsany v článku [D.3]. Tu uvedieme jeho hlavnú myšlienku. Pre zmenu nábojov na sériovo-paralelnom zapojení

Dodatok 6. Určenie povrchového potenciálu φ_s a φ_{so} metodou kondenzátorov Q-C.

Kondenzátorov Q-C metódy môžeme písť (pozri dodatok 5)

$$\Delta Q_x + \Delta Q_i = \Delta Q_v + \Delta Q_{mos} . \quad (d6.1)$$

Ak vyjadrieme zmenu náboja na napäťovo-nezávislých kondenzátoroch pomocou ich kapacity a napätia za predpokladu, že vychádzame zo stavu kedy $V_i = 0$ a $V_g = 0$, môžeme písť

$$\Delta Q_{mos} = (C_{i_LF} + C_x) V_i - C_v V_g . \quad (d6.2)$$

Zmenu náboja na štruktúre MOS môžeme vyjadriť aj pomocou jej vlastných parametrov

$$\Delta Q_{mos} = C_{ox} (V_g - \varphi_s + \varphi_{so}) \quad (d6.3)$$

A kombináciou (d6.2) a (d6.3) môžeme písť výsledný vzťah

$$\varphi_s = \varphi_{so} - \frac{C_{i_LF} + C_x}{C_{ox}} V_i + \left[1 + \frac{C_v}{C_{ox}} \right] V_g . \quad (d6.4)$$

Dodatok 7. Určenie povrchového potenciálu φ_{so} pri nulovom napäti hradla.

Vo vzťahu (d6.4) vystupuje výraz φ_{so} , ktorý predstavuje povrchový potenciál polovodiča, štruktúry MOS v prípade, že na štruktúru MOS nepôsobí žiadne vonkajšie napätie. Tento potenciál je spôsobený rozdielom výstupných prác kovu a polovodiča a nábojmi nachádzajúcimi sa v izolante a na jeho rozhraní s polovodičom. Na určenie tejto konštanty použijeme porovnanie nameranej a teoretickej závislosti φ_s od šírky OPN, ako je uvedené v [D.3]. Šírku OPN pre experimentálnu závislosť $\varphi_s(w)$ určíme zo vzťahu.

$$w = \epsilon \left[\frac{1}{C_{mos}^{HF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right] \quad (d7.1)$$

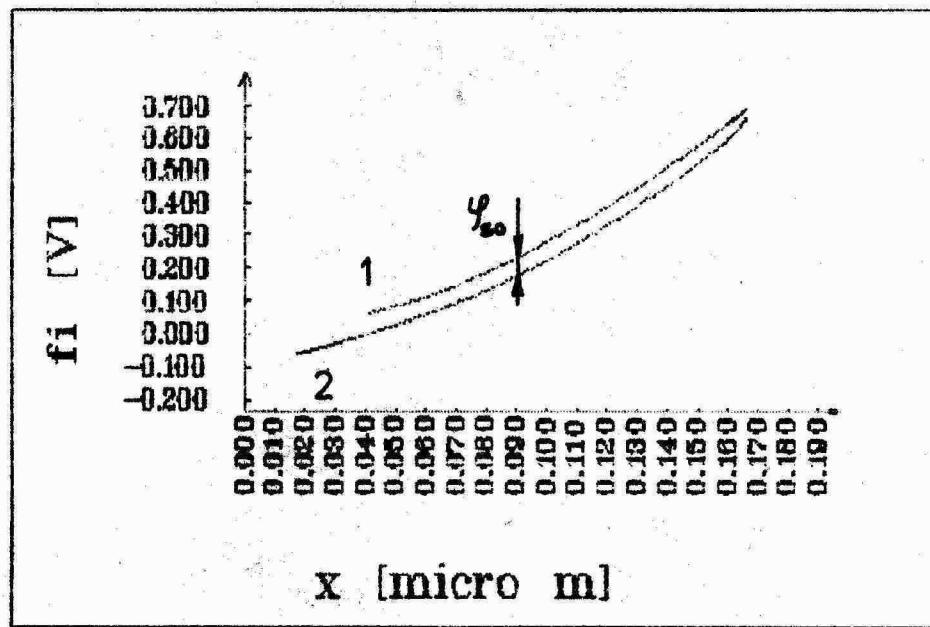
Pre určenie teoretickej závislosti $\varphi_s(w)$ použijeme approximáciu popísanú v [D.5]

Dodatek z: Určenie povrchového potenciálu φ_{so}

$$\beta\varphi_{so} = \frac{1}{2} \left[\frac{w}{L_{DE}} \right]^2 + \frac{1}{N_s L_{DE}^2} \int x [N(x) - N_s] dx + 1 \quad (d7.2)$$

kde L_{DE} je extrinznická Debayova dĺžka, N_s koncentrácia substrátu a $N(x)$ priebeh koncentrácie dotujúcich prímesí v pod-povrchovej oblasti polovodiča. Na obr. D3 je znázornený priebeh uvedených závislostí pre namerané dátá Q-C metódy z obr. 3.4. Hodnotu φ_{so} potom určíme z rozdielu experimentálnej a teoretickej závislosti $\varphi_s(w)$ v hĺbke w , ktorá zodpovedá stavu ochudobnenia štruktúry MOS. Ako je uvedené v (D.3) aproksimácia (d7.2) ignoruje voľné nosiče náboja, z čoho vyplýva jej obmedzenie platnosti len pre stav ochudobnenia.

Uvedeným spôsobom možno vypočítať aj integračnú konštantu pri výpočte závislosti $\varphi_s(V_g)$ pomocou Berglundovho integrálu.



OBR. D3

Priebeh povrchového potenciálu ako závislosť šírky OPN pre štruktúru MOS priviedenú do stavu hlbokého ochudobnenia. Krivka 1 predstavuje priebeh $\varphi(x)$ vypočítaný podľa vzťahu (d7.2) a krivka 2 znázorňuje závislosť určenú z experimentálnych dát pomocou vzťahu (d6.4).

Literatura

- [D. 1] El-Sissi H., Cobbold P. S. C. : Electronics Letters, 20, C19730 s. 594.
- [D. 2] Nicollian E.H., Brews J.R. : Solid St. Electron. 27, C19840 s. 953.
- [D. 3] Brews J.R., Nicollian E.H. : Solid St. Electron. 27, C19840 s. 963.
- [D. 4] Boulin D.M., Brews J.R., Nicollian E.H. : Solid St. Electron. 27, C19840 s. 977.
- [D. 5] Brews J.R. : Solid St. Electron. 28 (1982) s. 375.

**Dodatek 8. Programy zberu, spracovania a zobrazenia dát
pre plošné rozloženie parametrov článku IMS.**

I. PROGRAMY ZBERU DÁT.

Všetky programy zberu dát používajú pre riadenie krokovacieho zariadenia programy:

ZONDUP.EXE - zdvih stolička

ZONDDN.EXE - spustenie stolička

ZONDST.EXE - posuv stolička

Informácie o pohybe krokovacieho zariadenia čítajú zo súboru

2. XY

1. ZCT.EXE - hlavný program metódy CCT

segmenty:

ZCT1.EXE - inicializácia zbernice IMS-2 a prístrojov

ZCT2.EXE - meranie závislostí $V(t)$ a ukladanie dV/dt
do výstupného súboru

ZCT9.EXE - uvedenie zbernice IMS-2 do pôvodného stavu

2. ZHF.EXE - hlavný program rovnovažnej a nerovnovážnej HF
CV metódy

segmenty:

ZHF1.EXE - inicializácia zbernice IMS-2 a prístrojov

ZHF2.EXE - meranie závislostí $C_{\text{mas}}^{\text{HF}}(V)$

ZHF3.EXE - vyhľadenie nameraných dát a uloženie do
výstupného súboru

ZHF9.EXE - uvedenie zbernice IMS-2 do pôvodného stavu

3. ZLF.EXE - hlavný program kvázistatickej CV metódy

segmenty:

ZLF1.EXE - inicializácia zbernice IMS-2 a prístrojov

ZLF2.EXE - meranie závislostí $C_{\text{mas}}^{\text{LF}}(V)$

ZLF3.EXE - vyhľadenie nameraných dát, interpolácia a
uloženie do výstupného súboru

ZLF9.EXE - uvedenie zbernice IMS-2 do pôvodného stavu

učebník s. programy zberu, spracovania a zobrazenia dát

4. ZOXHF. EXE - hlavný program merania kapacity oxidu pomocou HF-CV metódy

segmenty:

ZOXHF1. EXE - inicializácia zbernice IMS-2 a prístrojov

ZOXHF2. EXE - meranie kapacity oxidovej vrstvy a ukladanie do výstupného súboru

ZOXHF9. EXE - uvedenie zbernice IMS-2 do pôvodného stavu

5. ZOXLF. EXE - hlavný program merania kapacity oxidu pomocou kvázistatickej CV metódy

segmenty:

ZLF1. EXE - inicializácia zbernice IMS-2 a prístrojov

ZOXLF2. EXE - meranie kapacity oxidovej vrstvy a ukladanie do výstupného súboru

ZLF9. EXE - uvedenie zbernice IMS-2 do pôvodného stavu

II. PROGRAMY SPRACOVANIA DÁT.

6. ZNX. EXE - výpočet koncentračného profilu $N(x)$

7. ZNB. EXE - výpočet koncentrácie substrátu N_b

8. ZFV. EXE - výpočet povrchového potenciálu ako funkcie napäťia hradia $\phi(V)$

9. ZDF. EXE - výpočet hustoty pascí rozhrania D_{tt}

10. ZTX. EXE - výpočet generačného času života minoritných nosičov náboja $\tau_g(x)$

11. ZWOX. EXE - výpočet hrúbky oxidu h_{ox}

12. ZYXI. EXE - výpočet integrálnej hodnoty $Y(x)$

13. ZYXM. EXE - výpočet strednej hodnoty, smerodajnej odchýlky a lineárnej regresie

14. ZKORFF. EXE - výpočet korelačného koeficientu medzi parametrami zo súborov Subor1 < Subor2

15. ZKORYX. EXE - výpočet korelačného koeficientu závislosti $Y(x)$

Bodatok B. Programy zberu, spracovania a zobrazenia dát.

III. PROGRAMY GRAFICKÉHO ZOBRAZENIA DÁT.

16. ZGF.EXE - zobrazenie závislosti $Y(x)$ s popisom osí
17. ZSURF.EXE - plošné zobrazenie rozloženia parametrov a funkčných závislostí $Y(x)$, pre rôzne x
18. ZVIEW.EXE - zobrazenie jednotlivých závislostí $Y(x)$
19. ZVIEWD.EXE - zobrazenie jednotlivých závislostí $Y_1(x)$ a $Y_2(x)$

IV. POMOCNÉ PROGRAMY.

20. BELL.EXE - alarm
21. ZASCII.EXE - konverzia binárneho formátu na ASCII
22. ZERR.EXE - výpis pozícií na doske s chybne nameranými dátami
23. ZREPLC.EXE - výmena záznamov v dátovom súbore
24. ZTRUNC.EXE - skrátenie dátového súboru

Podčakovanie

Ďakujem svojmu školiteľovi Prof. Ing. Ottovi Csabayovi DrSc. za usmerňovanie, cenné rady a kritické pripomienky pri spracovaní predloženej kandidátskej práce.

Ďakujem ďalej vedeniu Katedry mikroelektroniky a kolegom z Oddelenia elektronických prvkov a integrovaných obvodov za vytvorené pracovné podmienky a podnetné konzultácie.

Ďakujem tiež pracovníkom Tesly Piešťany, najmä RNDr. Ľ. Bolečkovi za otestovanie homogenity špecifického odporu kremíkových dosiek pred technologickým spracovaním a za prípravu vzoriek pre záverečný experiment.

Ďakujem bývalým pracovníkom Katedry mikroelektroniky Ing. I. Považanovi a Ing. T. Hružovi za cenné rady a pripomienky v oblasti automatizácie experimentu a spracovania dát. Ing. I. Považanovi ďakujem aj za prečítanie práce a pripomienky k nej.