

SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN
BRATISLAVA

DOCTORAL THESIS

**Electrophysical properties of the MOS
structure with implanted bulk**

2nd unchanged edition in English

Author:

ING. VLADIMÍR BOTKA

Supervisor:

PROF. ING. OTTO CSABAY, DRSc.

*A thesis submitted in fulfilment of the requirements
for the degree of Doctor of Philosophy*

in the

Group of Electronic Components and Integrated Circuits
Department of Microelektronics

April 2016

(1st ed. April 1991)

Declaration of Authorship

I, ING. VLADIMÍR BOTKA, declare that this thesis titled, 'Electrophysical properties of the MOS structure with implanted bulk' and the work presented in it are my own. I confirm that:

- This work was done wholly or mainly while in candidature for a research degree at this University.
- Where any part of this thesis has previously been submitted for a degree or any other qualification at this University or any other institution, this has been clearly stated.
- Where I have consulted the published work of others, this is always clearly attributed.
- Where I have quoted from the work of others, the source is always given. With the exception of such quotations, this thesis is entirely my own work.
- I have acknowledged all main sources of help.
- Where the thesis is based on work done by myself jointly with others, I have made clear exactly what was done by others and what I have contributed myself.

Signed:

Date:

SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN BRATISLAVA

Abstract

Faculty of electrical engineering and information technology
Department of Microelectronics

Doctor of Philosophy

Electrophysical properties of the MOS structure with implanted bulk
by ING. VLADIMÍR BOTKA

This thesis is devoted to the description of automated working set-up features for MOS structure evaluation. Using automated HF, LF, QC and CCT methods the homogeneity of doping profile, lifetime profile, density of interface states, flatband voltage and oxide thickness was investigated, with special attention given to the study of MOS structures with ion-implanted impurity distribution. The homogeneity of investigated parameters can be depicted by means of two-dimensional color pictures providing the operator with fast overview of the parameter's distribution and fluctuations.

Acknowledgements

I thank my tutor Prof.Ing.Otto Csabay,PhD. for guidance, valuable advice and critical comments in processing submitted thesis.

Further I thank the Department of Microelectronics and colleagues from the Group of electronic components and integrated circuits for appropriate working conditions and stimulating consultations.

I also thank the staff of Tesla Piešťany, especially RNDr.Boleček for testing the homogeneity of specific resistance of silicon wafers before technological processing and for preparation of samples for the final experiment.

I thank former colleagues from the Department of Microelectronics Ing.Považan and Ing.Hrúz for valuable advice and comments in Automation of the experiment and data processing. I Thank also Ing.Považan for reading the manuscript and for comments on it.

Contents

Declaration of Authorship	i
Abstract	ii
Acknowledgements	iii
Contents	iv
List of Figures	vii
List of Tables	ix
Abbreviations	x
Physical Constants	xi
Symbols	xii
 Introduction.	xvi
 1 The current state of the subject.	1
1.1 Basics of the MOS structure.	2
1.2 Ideal MOS structure.	2
1.3 Capacitor characteristics of ideal MOS structure.	3
1.4 Reálna štruktúra MOS.	4
2 Ciele dizertačnej práce.	9
3 Použité metódy merania štruktúry MOS.	10
3.1 Vysokofrekvenčná C-V metóda.	11
3.2 Kvázistatická C-V metóda.	12
3.3 Q-C metóda.	12
3.4 Metóda konštantnej šírky OPN a určenie generačného času života mi-noritných nosičov náboja.	16

4 Metódy určenia ďalších parametrov štruktúry MOS.	24
4.1 Určenie koncentračného profilu prímesí	25
4.1.1 Korekcia koncentrácie dotujúcich prímesí	25
4.1.2 Určenie hĺbky koncentračného profilu.	26
4.1.3 Vplyv pascí rozhrania $Si - SiO_2$ a generácie minoritných nosičov náboja.	29
4.1.4 Výpočet koncentračného profilu dotujúcich prímesí z priebehu majoritných nosičov náboja a overenie použitých modelov.	30
4.2 Určenie hustoty pascí rozhrania $Si - SiO_2$	34
4.2.1 Porovnanie vysokofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej C-V závislosti. .	35
4.2.2 Porovnanie experimentálnej a teoretickej kvázistatickej CV závislosti.	37
5 Pracovisko pre automatizovaný zber dát.	42
5.1 Meranie HF C-V závislostí.	44
5.2 Meranie kvázistatických C-V závislostí.	46
5.3 Meranie metódou konštantnej šírky OPN.	48
5.4 Časové diagramy použitých metód.	50
5.4.1 Rovnovážna HF C-V závislosť.	51
5.4.2 Nerovnovážna HF C-V závislosť.	52
5.4.3 Kvázistatická C-V závislosť.	53
5.4.4 Metóda konštantnej šírky OPN.	54
6 Spracovanie dát a zobrazenie získanych parametrov štruktúr MOS.	56
6.1 Určenie koncentračného profilu dotujúcich prímesí, dávky implantácie a napäťia vyrovnaných pásov.	57
6.2 Určenie hrúbky oxidovej vrstvy.	59
6.3 Určenie hustoty pascí rozhrania $Si - SiO_2$	60
6.4 Určenie generačného času života minoritných nosičov náboja.	61
7 Experimentálne výsledky.	64
8 Súhrn výsledkov s uvedením nových poznatkov.	74
9 Závery pre prax a rozvoj vednej disciplíny.	79
A Numerické riešenie Poissonovej rovnice.	81
B Úprava Poissonovej rovnice do normalizovaného tvaru.	85
C Výpočet kapacity štruktúry MOS.	87
D Termodynamická rovnováha v nehomogénne dotovanom substráte.	88
E Zapojenie Q-C metódy a metodika merania parazitných kapacít.	89
E.1 Určenie parazitnej kapacity C_w	90
E.2 Určenie parazitnej kapacity C_x	91
E.3 Určenie kapacity C_{iLF}	91
E.4 Korekcia vysokofrekvenčnej kapacity C_m	92

F Určenie povrchového potenciálu φ_s z Q-C metódy.	94
G Určenie povrchového potenciálu φ_{s0} pri nulovom napäti hradla.	95
H Programy zberu, spracovania a zobrazenia dát pre plošné rozloženie parametrov štruktúr MOS.	97
Index	101

List of Figures

1.1	Concentration of dopant in the subsurface of the semiconductor	4
1.2	Surface potential $\varphi_s(V_g)$ as a function of the gate voltage	5
1.3	Profile of the capacity of the MOS structure depending on the gate voltage	5
3.1	Schématické znázornenie zapojenia kondenzátorov Q-C metódy	13
3.2	Normované priebehy HF C-V závislosti štruktúry MOS a priebehu povrchového potenciálu od napäťa hradla určené pomocou Q-C metódy pre meranie v stave termodynamickej rovnováhy a v stave hlbokého ochudobnenia	15
3.3	Normované priebehy kapacity štruktúry MOS so substrátom typu N ako funkcie napäťa hradla pre rovnovážne vysokofrekvenčné a kvázistatické meranie	16
3.4	Normované priebehy kapacity štruktúry MOS so substrátom typu P ako funkcie napäťa hradla pre rovnovážne vysokofrekvenčné a kvázistatické meranie	17
3.5	Závislosť $\frac{dV_g}{dt}$ od šírky OPN získaná pomocou metódy konštantnej šírky OPN	21
3.6	Hlbkový profil generačného času života minoritných nosičov náboja	21
3.7	Hlbkový profil koncentrácie dotujúcich prímesí $N(x)$	22
4.1	Priebeh koncentrácie dotujúcich prímesí v polovodiči vypočítaný zo vzťahu 4.2	27
4.2	Priebeh koncentračného profilu dotujúcich prímesí získaný z C-V závislosti v oblasti hlbokého ochudobnenia a z rovnovážnej C-V závislosti	29
4.3	Priebeh koncentrácie majoritných nosičov náboja $n(x)$ určený z ochudobenej HF C-V závislosti a priebeh dotujúcich atómov $N(x)$ určený zo vzťahu 4.12	31
4.4	Priebeh koncentrácie prímesí simulovaný Gaussovským rozložením	33
4.5	Priebeh koncentrácie prímesí simulovaný Gaussovským rozložením	34
4.6	VF C-V závislosť $C_{mos}^{HF}(V_g)$ a priebeh povrchového potenciálu $\varphi_s(V_g)$ štruktúry MOS získané pomocou Q-C metódy	35
4.7	VF C-V závislosť $C_{mos}^{HF}(V_g)$ a LF C-V závislosť $C_{mos}^{LF}(V_g)$ štruktúry MOS normované na kapacitu oxidu, získané pomocou Q-C metódy	36
4.8	Závislosť D_{it} od polohy v zakázanom pásme polovodiča typu P, určená z porovnania $C_{mos}^{HF}(V_g)$ a $C_{mos}^{LF}(V_g)$	37
4.9	Teoretická LF C-V závislosť a nameraná LF C-V závislosť	38
4.10	Závislosť D_{it} od polohy v zakázanom pásme polovodiča určená z porovnania $C_{mos}^{TLP}(V_g)$ a $C_{mos}^{LF}(V_g)$	39

5.1	Bloková schéma zapojenia prístrojov automatizovaného pracoviska	42
5.2	Zapojenie prístrojov pre metódu konštantnej šírky OPN	48
5.3	Časový diagram rovnovážnej HF C-V metódy	51
5.4	Časový diagram nerovnovážnej HF C-V metódy	52
5.5	Časový diagram kvázistatickej C-V metódy	53
5.6	Časový diagram metódy konštantnej šírky OPN	54
6.1	Rozloženie dotujúcich prímesí $N(x)$ v rôznej hĺbke x	58
6.2	Plošné rozloženie V_{fb}	59
6.3	Plošné rozloženie nameranej dávky implantácie	59
6.4	Plošné rozloženie hrúbky hradlového oxidu h_{ox}	60
6.5	Plošné rozloženie hustoty pascí rozhrania $Si - SiO_2$ v strede zakázaného pásma	61
6.6	Plošné rozloženie generačného času života minoritných nosičov náboja .	62
7.1	Plošné rozloženie povrchového špecifického odporu kremíkovej dosky č.16	66
7.2	Plošné rozloženie povrchového špecifického odporu kremíkovej dosky č.16	66
7.3	Hĺbkový profil dotujúcich prímesí	67
7.4	Závislosť strednej hodnoty $\bar{D} = E(\int(N(x) - N_b)dx)$ od dávky implantovaných iónov D_i	68
7.5	Porovnanie stredných hodnôt nameraných priebehov $N(x)$ a simulovanych pomocou metódy Pearson IV	69
7.6	Závislosť strednej hodnoty \bar{V}_{fb} od strednej hodnoty hrúbky oxidovej vrstvy \bar{h}_{ox}	70
E.1	Zapojenie Q-C metódy implementované na KME EF SVŠT.	89
E.2	Ekvivalentné zapojenie Q-C metódy pre vysokofrekvenčné meranie	92
G.1	Priebeh povrchového potenciálu ako závislosť šírky OPN pre štruktúru MOS privezenú do stavu hlbokého ochudobnenia	96

List of Tables

3.1	Porovnanie normovanej vyskofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej kapacity štruktúry MOS (obrázok 3.3) pre metódy HF, LF a Q-C	17
3.2	Porovnanie normovanej vyskofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej kapacity štruktúry MOS (obrázok 3.4) pre metódy HF, LF a Q-C	18
4.1	Výpočet koncentračného profilu prímesí $N(x)$	28
5.1	Časový diagram rovnovážnej HF C-V metódy	51
5.2	Časový diagram nerovnovážnej HF C-V metódy	52
5.3	Časový diagram kvázistatickej C-V metódy	53
5.4	Časový diagram metódy konštantnej šírky OPN	54
7.1	Stredná hodnota a smerodajná odchýlka špecifického odporu testovaných kremíkových dosiek pred technologickým spracovaním	64
7.2	Dávky implantácie D_i	67
7.3	Dávka implantácie D_i	68
7.4	Stredná hodnota a smerodajná odchýlka napäťia vyrovnaných pásov a hrúbky oxidu	70
7.5	Stredná hodnota a smerodajná odchýlka hustoty pascí rozhrania $Si-SiO_2$ v strede zakázaného pásma.	71
7.6	Stredná hodnota a smerodajná odchýlka generačnej doby života minoritných nosičov náboja	72

Abbreviations

CCT	Constant Capacity Time
CV	Capacity Voltage
DLTS	Deep Level Transient Spectroscopy
HF	High Frequency
LF	Low Frequency
MOS	Metal Oxid Semiconductor
SIMS	Secondary Ion Mass Spectrometry

Physical Constants

Boltzmannova konštanta	$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$
Intrínzická koncentrácia nosičov náboja v kremíku	$n_i = 1.45 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$
Náboj elektrónu	$q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
β	$\beta = q/kT$

Symbols

A	plocha štruktúry MOS	m^2
C	kapacita	F
C_i	kapacita napäťovo-nezávislého kondenzátora Q-C metódy	F
C_{iHF}	HF kapacita napäťovo-nezávislého kondenzátora Q-C metódy	F
C_{iLF}	LF kapacita napäťovo-nezávislého kondenzátora Q-C metódy	F
C_m	LF kapacita sériovo-paralelného zapojenia Q-C metódy	F
C_{mos}	diferenciálna kapacita štruktúry MOS	F
C_{mos}^{HF}	vysokofrekvenčná kapacita štruktúry MOS	F
C_{mos}^{LF}	nízkofrekvenčná kapacita štruktúry MOS	F
C_{mos}^{TLF}	teoretická nízkofrekvenčná kapacita štruktúry MOS	F
C_{ox}	kapacita oxidovej vrstvy štruktúry MOS	F
C_{sc}	kapacita oblasti priestorového náboja	F
C_w	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 pascí 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 intrinziek Fermiho hladiny v polovodiči	eV
E_v	energia horného okraja valenčného pásma	eV
G_m	vodivosť sériovo-paralelného zapojenia kondenzátorov Q-C metódy	F
h_{ox}	hrúbka oxidovej vrstvy štruktúry MOS	m

I, i	elektrický prúd	A
I_g	generačný prúd minoritných nosičov náboja	A
L_D	Debayova dĺžka	m
L_{DE}	extrinziecká Debayova dĺžka	m
N	koncentrácia dotojúcich 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}
P	koncentrácia dier v polovodiči	m^{-3}
Q	elektrický náboj	C
Q_{dc}	poruchový náboj v SiO_2 a na rozhraní s polovodičom a kovom	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 kondenzátorov Q-C metódy	V
V_{fb}	napätie vyrovnaných pásov štruktúry MOS	V
V_g	napätie na hradlovej elektróde štruktúry MOS	V
V_i	napätie v spoločnom bode sériovo-paralelného zapojenia Q-C metódy	V
V_{ox}	úbytok napäťia na oxidovej vrstve štruktúry MOS	V
w	šírka oblasti priestorového náboja	m
x	vzdialenosť	m
\bar{z}	stredná hodnota náhodnej premennej z	
δz	rozptyl náhodnej premennej z	
z'	priestorová derivácia náhodnej premennej z	
ϵ	permitivita	Fm^{-1}

ϵ_s	permitivita <i>Si</i>	Fm^{-1}
ϵ_{ox}	permitivita <i>SiO₂</i>	Fm^{-1}
φ	elektrický potenciál	V
φ_{ms}	rozdiel výstupných potenciálov kovu a polovodiča	V
φ_s	úbytok napäťa na vrstve polovodiča (povrchový potenciál)	V
μ_n	pohyblivosť elektrónov v polovodiči	$m^2V^{-1}s^{-1}$
μ_p	pohyblivosť dier v polovodiči	$m^2V^{-1}s^{-1}$
ω	uhlová frekvencia	s^{-1}
τ_g	generačná doba minoritných nosičov náboja	s

For/Dedicated to/To my. . .

Introduction.

Diagnostics of MOS structure has been subject of extensive research in recent decades and now is at the stage-routine use. At present many methods of determining the parameters of MOS structure can be considered as closed as evidenced by the extensive monographies published in this area, [I.1] [I.2] [I.3] [I.4]. At the same time the professional instrumentation for the determination of the parameters of MOS structure is available, which is used for rapid diagnostics of the technology of semiconductor devices and integrated circuits. Many technological processes currently used in the production of discrete semiconductor devices and integrated circuits based on silicon are well investigated, and high reproducibility of parameters is achieved, however, there are still areas where improvements in diagnostics of semiconductor devices using MOS structures is not completed.

Aiming at enhancing the production efficiency there is still a tendency to use silicon wafers of larger diameters. In connection with the issue of yield it brings the requirement of statistical approach to evaluation of tested parameters of individual structures. Measured parameters of test structures are closely related to values of technological parameters achieved in the production and the functionality of finished devices depends on a number of individual technological steps that vary in certain tolerance limits. Tolerance intervals of technology parameters become important issue with increasing density of the integration and related decreasing of the size of individual integrated elements. Automation of production is typically related to high volume of the production, efficiency of which is ensured in its greatest extent by the technology. A detailed analysis of technological operations is far from simple and requires large volume of experiments and attempts. It is necessary to efficiently record the results of these experiments and use computers for calculations, where the volume of recorded and calculated data requires the use of database systems. There are number of mathematical methods which are suitable for this purpose and available program packages that address the analysis of technological processes [I.5]. Heuristic approach to addressing functionality of the products probably prevails in the production of integrated circuits. Clarification

of dependencies of some parameters may lead to more exact management decisions by controlling the technology devices.

In this work, we tried to make available the information on spatial distribution of some parameters of MOS structures on silicon wafer focusing on the ion implantation, that by creating inhomogeneous depth distribution of the dopant atoms in the semiconductor requires adapting the measurement methods to this condition. Planar display of the MOS structure parameters is based on a large number of measurements and data processing, and the application of the capacitance methods for testing the entire silicon wafer requires building adequate means for collecting, processing and displaying of data. Some of the examined parameters exhibit geometrical symmetry and other randomly moving in a certain range of values. Thus planar display of the examined parameters provides rapid and transparent information about the quality of individual technological steps, the value of which examined parameter depends. At the same time it is possible, by means of this visual information, to create an overview of the fluctuations of the parameters examined on silicon wafer and disregard randomly measured extreme values.

The further continuation of this study should be searching relationships between the parameters of the test structures of different types (e.g. MOS structure, transistor structures) with a focus on improving the yield of the production of integrated circuits. Probably it would possible, in the light of knowledge of the degree of dependence between parameters, to determine what change of a technological parameter affects the functionality of the produced devices.

This work comprises a number of areas of scientific research that can be listed as follows:

- basics of used physical methods and interpretation of results
- automation of the experiment
- use of numerical mathematics for solving physical equations and data processing
- programming.

Chapter 1 provides an overview of the current state of research problems and deals with the ideal and real MOS structure. To obtain information on the physical processes in an ideal MOS structure we numerically solved the one-dimensional Poisson's equation for inhomogeneous distribution of impurities in semiconductor and at the same time we have gained the theoretical capacity-voltage curves of MOS structure. Chapter 2 comprises objectives of this thesis. Measurement methods and procedures to determine certain parameters of MOS structures are described in Chapter 3 and 4. In doing so,

the method used in the past on Department of semiconductor integrated circuits and structures were developed, and new methods, yet not used on Department, introduced (Q-C method, method CCT constant width of space charge). Chapter 5 contains some idea of implementation of automated data collection and pre-processing. Problems of that data structures, data files, protection of measured data against loss and manipulation of individual records are solved. At the same time some solutions of the problems related to the automation of the experiment are also mentioned in this section. Despite the fact that this range of issues is not directly related to the physical aspect of the measurements, it must be emphasized that without systematic solution it would be practically impossible to implement efficient automated workplace tracking spatial distribution of electro-physical parameters of MOS structures. Processing of measured data and displaying the results of the spatial distribution of the parameters is in Chapter 6 and Chapter 7 contains a table with the results of the experiment. At the same time the results of the examination of cross-correlation of certain parameters of the MOS structure are also shown.

Programs are written mainly in C, and only some subroutines, to process data and to solve physical equations numerically, use the programming language Fortran. The whole system of programs was developed under the operating system MS DOS. Transfer of the programs to other operating system would require solution of the following problems:

- IMS-2 (IEEE-488) bus control
- porting of the file processing
- handling of graphical images .

To improve clarity of the text some sub-sections were moved to the amendments. The work contains a large number of images which help to complete the text and themselves provide large amount of information.

Bibliography

- [I.1] Nicollian E.H., Brews J.R. : MOS Physics and Technology. John Wiley and Sons. New York 1982.
- [I.2] Grove A.S. : Physics and Technology of Semiconductor devices. John Wiley and Sons. New York 1967.
- [I.3] Sze S.M. : Physics of semiconductor devices. John Wiley and Sons. New York 1969.
- [I.4] Runyan W.R., Bean K.E. : Semiconductor integrated circuit processing technology. Addison-Wesley 1990.
- [I.5] AIP ve vývoji technologie pro automatizovanou výrobu. Zborník zo seminara. Dom techniky CSVTS Pardubice 1990.

Chapter 1

The current state of the subject.

Up to now, the methods used for analysis of electrophysical properties of MOS structures are based on the assumption that the distribution of impurities in the substrate is homogeneous. This issue was addressed by the Department of Microelectronics within the government research projects [1.1, 1.2] and PhD thesis [1.5, 1.6, 1.7, 1.8]. These works provide the necessary overview of the solutions for the problems globally and also in our department. Whereas at present in the manufacture of unipolar integrated circuits using ion implantation for control the electrical properties of integrated components, it is desirable to control the properties of semiconductor structures to know the parameters of MOS structures with inhomogeneous subsidy substrate. For this purpose was research task *Electrophysical properties of microelectronic structures* [1.3, 1.4] focused on the development of diagnostic methods for study of the properties of technological processes using MOS structures with inhomogeneous subsidy impurities and their application to solving problems of Czech-Slovak semiconductor industry. From this target of the government research project resulted the focus of the presented thesis. The need to address this issue is also based on the fact that up till now this issue, as far as we known, has never been studied here. Additionally, the issue was extended to the research of electro-physical parameters' homogeneity of MOS structures on silicon substrate, which is particularly serious in the light of the process quality improvement of forming a semiconductor structures and integrated circuits by planar technology. Based on the foregoing, we list later in this chapter only the most necessary knowledge needed to deal with the issues.

1.1 Basics of the MOS structure.

MOS structure forms a simple test structure. Almost all of its electrical properties can be examined by measurements of this structure. Convenience of the MOS structure lies in the ease of preparation and analysis of its features. The simplicity of analysis follows that analyzed system is in thermal equilibrium and one-dimensionall approach is sufficiently accurate in most cases. Properties of the SiO_2 volume, its interfaces with semiconductor and metal, as well as properties of the subsurface area of semiconductor can be examined by electrical measurements of MOS structure.

1.2 Ideal MOS structure.

MOS structure can be considered a dipole, which equivalent scheme can be thought of as a serial connection of voltage-independent capacity of the oxid C_{ox} and space charge capacity $C_{sc}(\varphi_s)$, which is a function of the surface potential of the semiconductor. Then for the capacity of MOS structure is valid [I.1]

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

Following simplistic assumptions, that define ideal MOS structure, can be used when analyzing the MOS structure:

- the density of interface traps $Si - SiO_2$ is equal zero
- there are no charges in the insulator SiO_2
- the difference in the output potential of the metal and semiconduvtor is equal zero
- equation $V_g = V_{ox} + \varphi_s$ is valid.

Depending on the gate voltage operating modes of MOS structure can be distinguished:

- enhancement mode
- flat band mode
- depletion mode and inversion (deep depletion).

1.3 Capacitor characteristics of ideal MOS structure.

For all of these cases one-dimensional Poisson equation is valid in the semiconductor,

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

which determines the course of the electrical potential φ as a function of the distance from the surface of the semiconductor x . Equation 1.2 can be solved analytically only for certain special cases of the impurities concentration profile, and, in general, numerical methods must be used [1.9, 1.10]. Then, for known profile of the concentration impurities in semiconductor an electric potential in the semiconductor can be obtained, where potential on the gate is the parameter which defines the state of the MOS structure. For further clarification of physical processes in the MOS structure in the transition from accumulation to inversion, or deep depletion, we solved the equation 1.2, where by appropriate variation of the parameter V_g both surface potential $\varphi_s(V_g)$ and capacity of MOS structure $C_{MOS}(V_g)$ can be calculated as a function of the gate voltage (Appendix A).

Picture 1.1 shows the profile of the dopant concentration in semiconductor (simulated by Gaussian function) and profiles of majority charge carriers for states of the structure varying from enrichment to inversion, depicting the process of depletion of the semiconductor subsurface. It can be seen, that the profile of the concentration of majority carriers in implanted field enter the maximum and then decreases toward the concentration of the substrate, which is reached at a ground potential point. Also obvious is the difference between the concentrations of dopant and the concentration of majority charge carriers in the state of thermodynamic equilibrium for zero gate voltage, which results in due to diffusion of majority charge carriers.

Picture 1.2 shows surface potential for various measurements of the MOS structure. In the enhancement and depletion both curves are identical. From the beginning of the inversion the surface potential stabilizes for LF and HF measurements as a result of the creation of the inversion layer. The curve of deep depletion further declines. This state will be terminated by the breakdown in a real structure.

Picture 1.3 shows Capacitance-Voltage profiles of the MOS structure. All three curves are identical in enhancement and depletion (profiles of the surface potential are also identical). In this section the capacity declines slowly, because the space charge region expands to the region with high concentration of the dopant 1.1. From the beginning of the inversion the the curves depart. Low frequency curve, which detects the inversion

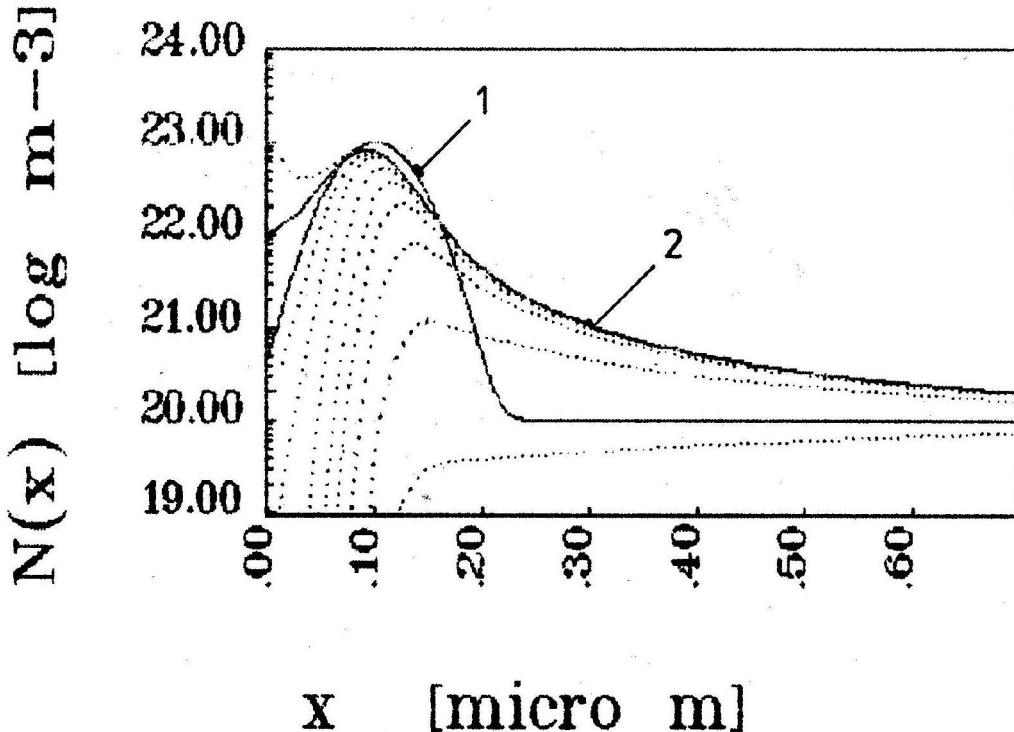


FIGURE 1.1: Concentration of dopant in the subsurface of the semiconductor simulated by Gaussian distribution [1.11] with the following parameters $R_p = 0.1\mu\text{m}$; $\Delta R_p = 0.03\mu\text{m}$; $N_{max} = 10^{23}\text{m}^{-3}$; $N_{bulk} = 10^{20}\text{m}^{-3}$ (indicated by a solid line 1). The profile of the majority charge carriers for $V_g = 0$ (indicated by a solid line 2). The dotted line shows profiles of the concentrations of majority carriers for various gate voltages different from zero. State of thermodynamic equilibrium between the distribution of dopant and charge carriers is described in Appendix D.

layer rises toward the capacity of the silica. High frequency curve doesn't detect the inversion layer, because the minority charge carriers are not able to follow the high frequency measurement signal. However the capacity doesn't decline any further, because with the increasing of the gate voltage increases mostly the concentration of the minority charge carriers in the inversion layer and the space charge region doesn't expand any further.

No inversion layer is created in deep depletion and with the increasing gate voltage the space charge region expands and capacity declines. Picture 1.3 shows, that after having passed the section with the high concentration of dopant the curve of deep depletion starts to decline faster.

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

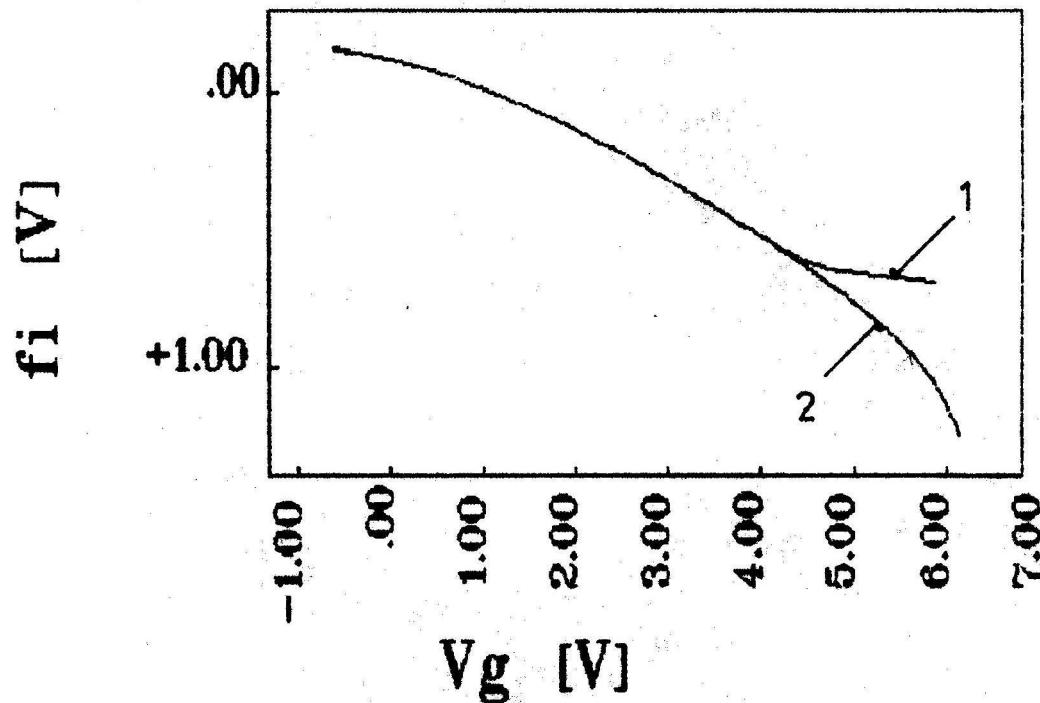


FIGURE 1.2: Surface potential $\varphi_s(V_g)$ as a function of the gate voltage for low frequency (LF) and high frequency (HF) measurement (depicted 1) and measurement in deep depletion (depicted 2).

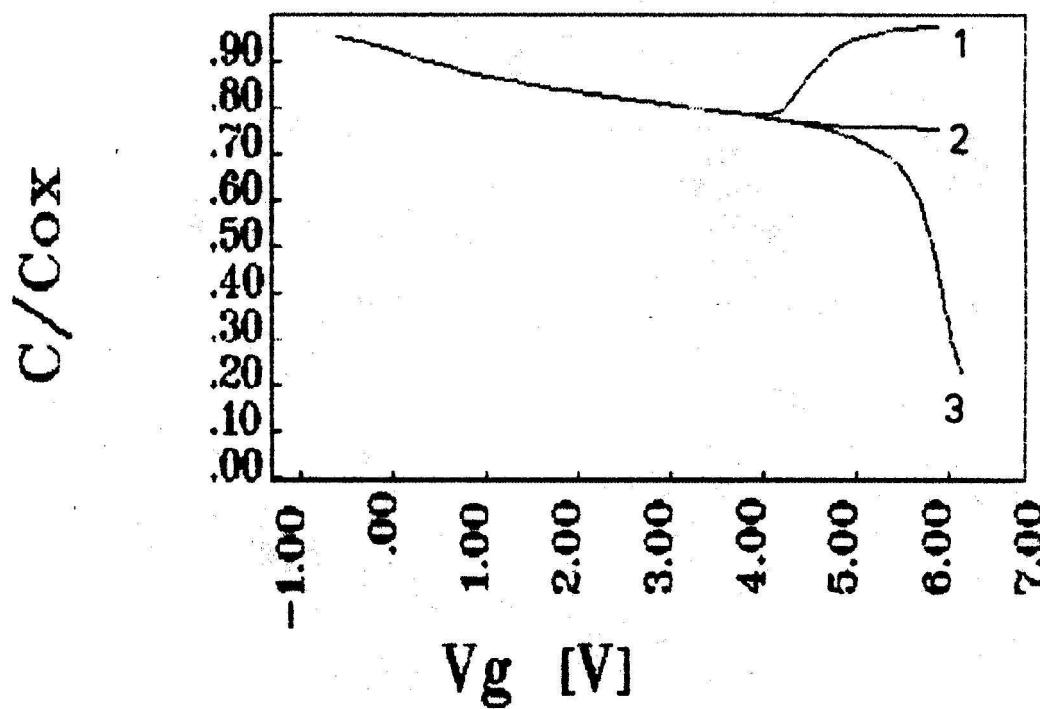


FIGURE 1.3: Profile of the capacity of the MOS structure depending on the gate voltage for low frequency measurement (depicted 1), high frequency measurement (depicted 2) and measurement in deep depletion (depicted 3).

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 $Si - SiO_2$, spôsobený nestechiometrickým zložením v oblasti fázového prechodu - Q_f
- náboj pascí na rozhraní $Si - SiO_2$ - Q_{it}

Zároveň na elektrické vlastnosti štruktúry MOS vplýva aj rozdiel výstupných potenciálov elektrónov z kovu a polovodiča, $\varphi_{ms} \neq 0$. Okrem uvedených poruchových nábojov na elektrické vlastnosti štruktúry MOS vplývajú aj geometrické nedokonalosti štruktúry, ako aj zmena hrúbky izolačnej vrstvy a nerovinnosť plochy rozhrania $Si - SiO_2$. Pri prechode k 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 laserovej rastrovacej tomografie denudovanú zónu pri povrchu kremíka, vytvorenú getračnými efektami mikroprecipitátov SiO_x . Zároveň je z obrázkov viديť mikroprecipitáty v objeme polovodiča, vytvorené pomocou kyslíka a patričného tepelného spracovania.

Bibliography

- [1.1] Csabay O. et al: Výskum štruktúr MIS a pasivácie. 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] Žiska 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.: Príspevok 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., Kogler R. : Electronics Letters Vol.25 (1989) s.1898.

[1.14] Gall P. at al. : Electronics Letters Vol.25 (1989) s.429

Chapter 2

Ciele dizertačnej práce.

1. Vybudovanie automatizovaného experimentálneho pracoviska pre analýzu elektrofyzikálnych vlastností štruktúr MOS s nehomogénym 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.
2. Metódy uvedené v bode 1. automatizovať s využitím riadiaceho počítača PC AT pod operačným systémom MS DOS. Pre realizáciu metód využiť interfejs GPIB PCIIA, meracie prístroje HP4280a, Keithley 642 a hrotové krovovacie zariadenie Zond A5.
3. Realizované metódy použiť pre určenie hĺbkových koncentračných profilov implantovaných prímesí, hrúbky oxidovej vrstvy, napäcia vyrovnaných pásov, hustoty pascí rozhrania Si-SiO a hĺbkového profilu generáčného času života minoritných nosičov náboja. Analyzovať problémy vznikajúce pri určovaní parametrov štruktúr MOS v spojení s nehomogénnou dotáciou substrátu.
4. Zistiť hĺbkové koncentračné profily aktívnych prímesí a ich rozloženia na kremíkovom substráte pre rôzne dávky implantácie v rozsahu od 0.6 10 do 60.0 10 m (doplniť exponenty). Zistiť ako vplýva implantáčná dávka na vlastnosti rozhrania Si-SiO a hĺbkový profil času života minoritných nosičov náboja. Navrhnúť metodiku pre identifikáciu množstva implantovaných iónov v polovodičovom substráte pomocou kapacitnej metódy.

Chapter 3

Použité metódy merania štruktúry MOS.

Kapacitne-napäťové (C-V) metódy, ktorými sa v tejto práci budeme zaoberať, poskytujú komplexné informácie o elektro-fyzikálnych 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 závislosti ideálnej štruktúry MOS demonstrovali rozdiely medzi napäťovými závislosťami kapacity štruktúry MOS, meranými rozličnými metódami:

- 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 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. Následujúca schéma znázorňuje ich vztah ku skúmaným parametrom, ktoré boli predmetom tejto práce a zároveň poukazuje na okruhy problémov, ktoré bolo potrebné riešiť.

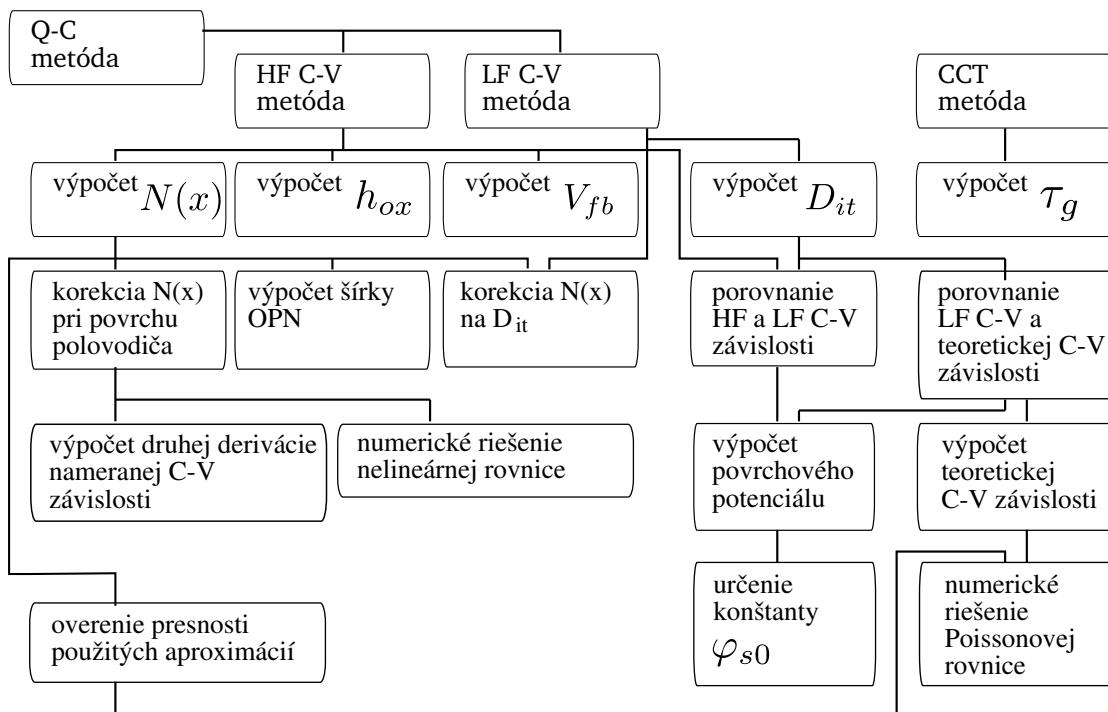


Diagram 1

3.1 Vysokofrekvenčná C-V metóda.

Pri meraní vysokofrekvenčnou kapacitnou metódou je MOS štruktúra jednosmerným hradlovým napätiám privedená do požadovaného stavu a jej kapacita sa určí z prídovej odozvy na vysokofrekvenčný signál malej amplitúdy, ktorý je nasuperponovaný na jednosmerné hradlove napätie. Meraním fázového posuvu 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 $Si-SiO_2$ a

technickými možnosťami štandardných meracích prístrojov. V našom experimente sme použili prístroj HP4280a, ktorého merací 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 pocitacom 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 napäťia. Z uvedeného vyplýva, že na realizáciu metódy je potrebný zdroj kontinuálne narastajúceho napäťia a ampérmetr. Rýchlosť narastania napäťia 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 využívala rýchlosť rádovo $10^{-2} V/s$, čo predstavuje pre kapacitu $100 pF$ nabíjací prud $10^{-12} A$. V našom experimente sme použili na meranie 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 $8 \times 10^{-17} A$. Zdroj narastajúceho napäťia, ktorý bol postavený na našej katedre, umožňuje nastavenie rýchlosťi nárastu napäťia v rozsahoch od $10V/s$ 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 potrebné 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 následovný. 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 obrázku 3.1, pripojíme jednosmerné napätie V_a a meriame napätie V_i v spoločnom bode zapojenia kondenzátorov, ktoré predstavujú kapacitný delič. Kondenzátory označené C_w a C_x znázorňujú parazitné kapacity. C_w je kapacita medzi stolíkom a zdvihnutým hrotom sondy a C_x je kapacita spoločného bodu zapojenia kondenzátorov voči zemi. Zároveň s meraním napäcia V_i zmeriame aj kapacitu C_m a vodivosť G_m pomocou vysokofrekvenčného signálu nasuperponovaného na napäť V_a .

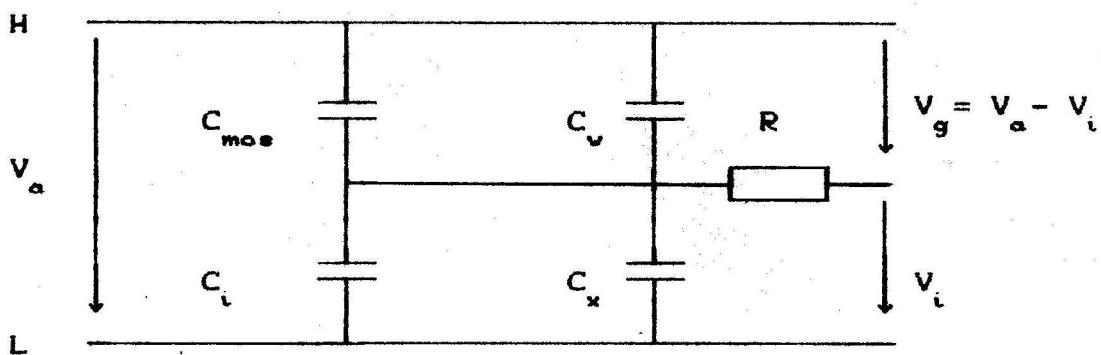


FIGURE 3.1: Schématické znázornenie zapojenia kondenzátorov Q-C metódy

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_{iLF} a pre vysokofrekvenčné meranie C_{iHF} . Spomenutý odpor spolu so vstupným odporom voltmetra tvorí napäťový delič. Aby tým nebolo ovplyvnené meranie napäťia, treba použiť voltmeter s vysokým vstupným odporom. Tu treba spomenúť vhodnosť použitia elektromeru Keithley 642, ktorého vstupný odpor v režime merania napäťia je približne $10^{16}\Omega$ a jeho parazitná vstupná kapacita sú $2pF$. Detailný popis zapojenia Q-C metódy, eliminácia parazitných kapacít, prípadne metodika ich merania je popísaná v dodatku E. Ak poznáme kapacitu oxi-dovej vrstvy štruktúry MOS C_{ox} a veľkosť kapacity C_{iLF} , môžeme vypočítať hodnotu povrchového potenciálu φ_s z následovného vzťahu, odvodeného v dodatku F.

$$\varphi_s = \varphi_{s0} + V_g \left(1 + \frac{C_w}{C_{ox}}\right) - V_i \frac{C_{iLF} + C_x}{C_{ox}} \quad (3.1)$$

Zároveň môžeme určiť nízkofrekvenčnú kapacitu štruktúry MOS

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

Poruchové náboje nachádzajúce sa v meranej štruktúre MOS spôsobujú, že povrchový potenciál polovodiča nadobúda hodnotu φ_{s0} aj pri nulovom napäti hradla. Veľkosť tejto konštanty možno určiť z porovnania nameranej a teoretickej závislosti povrchového potenciálu od šírky OPN $\varphi(x)$. Metóda určenia φ_{s0} je popísaná v dodatku G. Tu možno poznamenať, že pre výpočet C_{mos}^{LF} hodnotu tejto konštanty 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 následovných 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

$$C_{mos}^{HF} = -\frac{R_m^2 + (X_m + \frac{1}{\omega C_{iHF}} + \omega C_w D^2)^2}{\omega D^2 (X_m + \frac{1}{\omega C_{iHF}} + \omega C_w D^2)^2} \quad (3.3c)$$

, kde

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

Podrobnejší popis a odvodenie uvedených vzťahov je popísané v dodatku 1. literatúry [3.6]. Q-C metóda poskytuje celý rad výhod. Umožňuje simultánne meranie vysokofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej C-V závislosti, čo zaručuje rovnaké podmienky merania pre obe závislosti a vylučuje možnosť ich vzájomného napäťového posuvu, ktorý sa môže objaviť ak by boli závislosti snímané sekvenčne. Zároveň meranie níkofrekvenčnej C-V závislosti je statické a nie je závisle od dynamiky hradlového napäcia.

Pre určenie koncentračného profilu prímesí v podpovrchovej oblasti polovodiča je výhodné poznať priebeh povrchového potenciálu, čo umožňuje výpočet nezatiažený pascami rozhrania $Si - SiO_2$. Uvedené výhody sú vykompenzované náročnosťou metódy na použité prístroje. 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 meranie v stave termodynamickej rovnováhy, ako uvádzajú autori metódy [3.7], je potrebné aby sa napätie V_i nemenilo najmenej počas 10 sekúnd o veľkosť rádove 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 obrázku 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 meranie 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 napätií V_a , V_i , kapacity C_m a vodivosti G_m uložiť do diskového súboru pre ďalšie spracovanie.

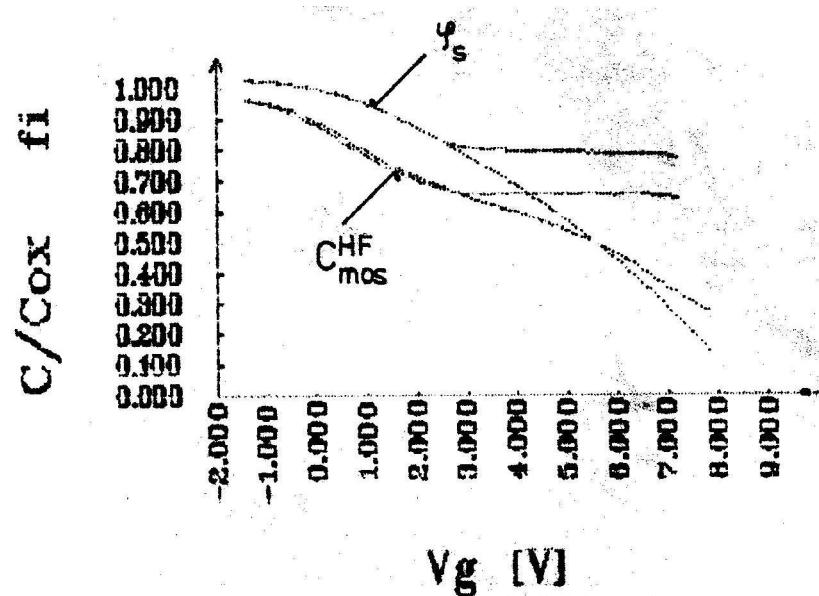


FIGURE 3.2: Normované priebehy HF C-V závislosti štruktúry MOS a priebehu povrchového potenciálu od napäťia hradla určené pomocou Q-C metódy pre meranie v stave termodynamickej rovnováhy a v stave hlbokého ochudobnenia. Priebehy $\varphi_s(V_g)$ sú zobrazené s použitím normovania $1 - \frac{\varphi_s}{\varphi_{norm}}$,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

Pre overenie presnosti Q-C metódy sme na tej istej štruktúre MOS urobili samostatné

vysokofrekvenčné a nízkofrekvenčné meranie a zároveň vypočítali tie isté kapacitné závislosti z nameraných hodnôt Q-C metódy. Výsledné krivky sú na obrázkoch 3.3 a 3.4.

Pre kvantitatívne porovnanie výsledkov znázornených na obrázku 3.3 a 3.4 uvádzame v tabuľke 3.1 a 3.2 číselné hodnoty normovaných kapacít C_{mos}^{HF} a C_{mos}^{LF} pre metódy HF, LF a Q-C a ich rozdiel vyjadrený relatívou 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 vlhkosť prostredia, použiť vzduchový kondenzátor C_i a na meranú vzorku usmerniť v priebehu merania prúd dusíka, ktorý zabráni kondenzovaniu vodných párov z okolia.

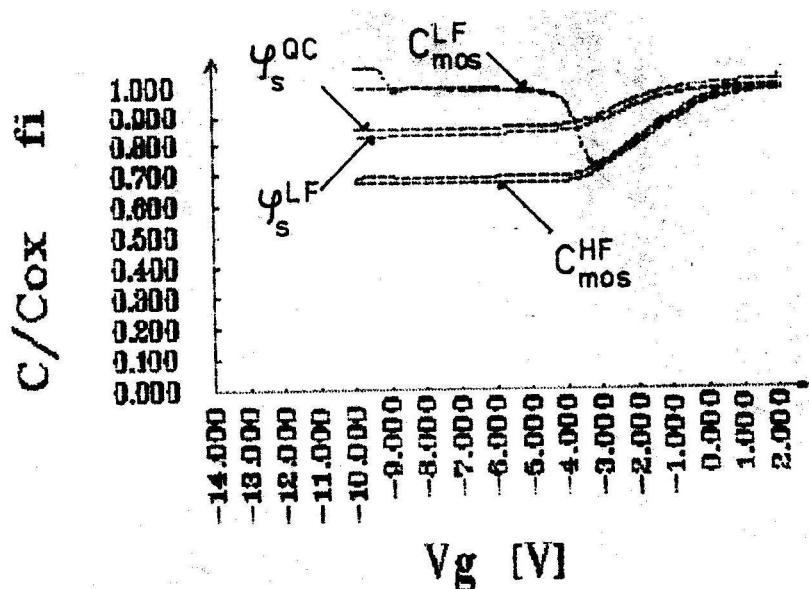


FIGURE 3.3: Normované priebehy kapacity štruktúry MOS so substrátom typu N ako funkcie napäcia hradla pre rovnovážne vysokofrekvenčné a kvázistatické meranie. Zároveň sú znázornené tie isté charakteristiky získané pomocou Q-C metódy. Pre úplnosť je na obrázku znázornená závislosť povrchového potenciálu $\varphi_s(V_g)^{QC}$ 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 $1 - \frac{\varphi_s}{\varphi_{norm}}$, kde $\varphi_{norm} = -3.33V$.

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 štruktury

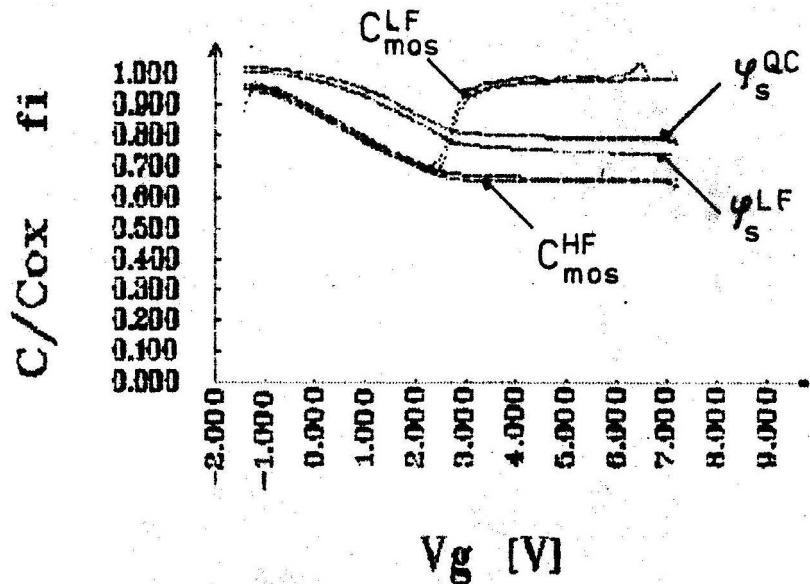


FIGURE 3.4: Normované priebehy kapacity štruktúry MOS so substrátom typu P ako funkcie napäťia hradla pre rovnovážne vysokofrekvenčné a kvázistatické meranie. Zároveň sú znázornené tie isté charakteristiky získané pomocou Q-C metódy. Pre úplnosť je na obrázku znázornená závislosť povrchového potenciálu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

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
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

TABLE 3.1: Porovnanie normovanej vyskofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej kapacity štruktúry MOS (obrázok 3.3) pre metódy HF, LF a Q-C. Rozdiel kriviek je vyjadrený relatívnu chybou.

MOS z nerovnovážneho stavu do rovnovážneho. V súčasnej dobe polovodičový priemysel pracuje s kremíkovymi 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

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

TABLE 3.2: Porovnanie normovanej vyskofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej kapacity štruktúry MOS (obrázok 3.4) pre metódy HF, LF a Q-C. Rozdiel kriviek je vyjadrený relatívou chybou.

princíp je následovný. Štruktúru MOS priviedieme napäťovým impulzom na hradle do nerovnovážneho 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 následovným vzťahom [3.3]

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

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]

$$\tau_g = \frac{qxn_i}{2I_g} \quad (3.5)$$

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 nastať hlavne vtedy, ak priestor, v ktorom sa nachádza meraná vzorka, nie je dokonale uzavretý, čo spôsobí, že dovnútra vniká svetlo. Dvojice elektrón-diera, generované záchytenými fotónmi na povrchu 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

$$I_g = C_{ox} \left[\frac{dV_g}{dt} \Big|_{C_1} - \frac{dV_g}{dt} \Big|_{C_2} \right] \quad (3.6)$$

a generačný čas τ_g

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

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

$$\frac{dV_g}{dC_{mos}} = \frac{q\epsilon N}{C_{mos}^3} \quad (3.9)$$

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

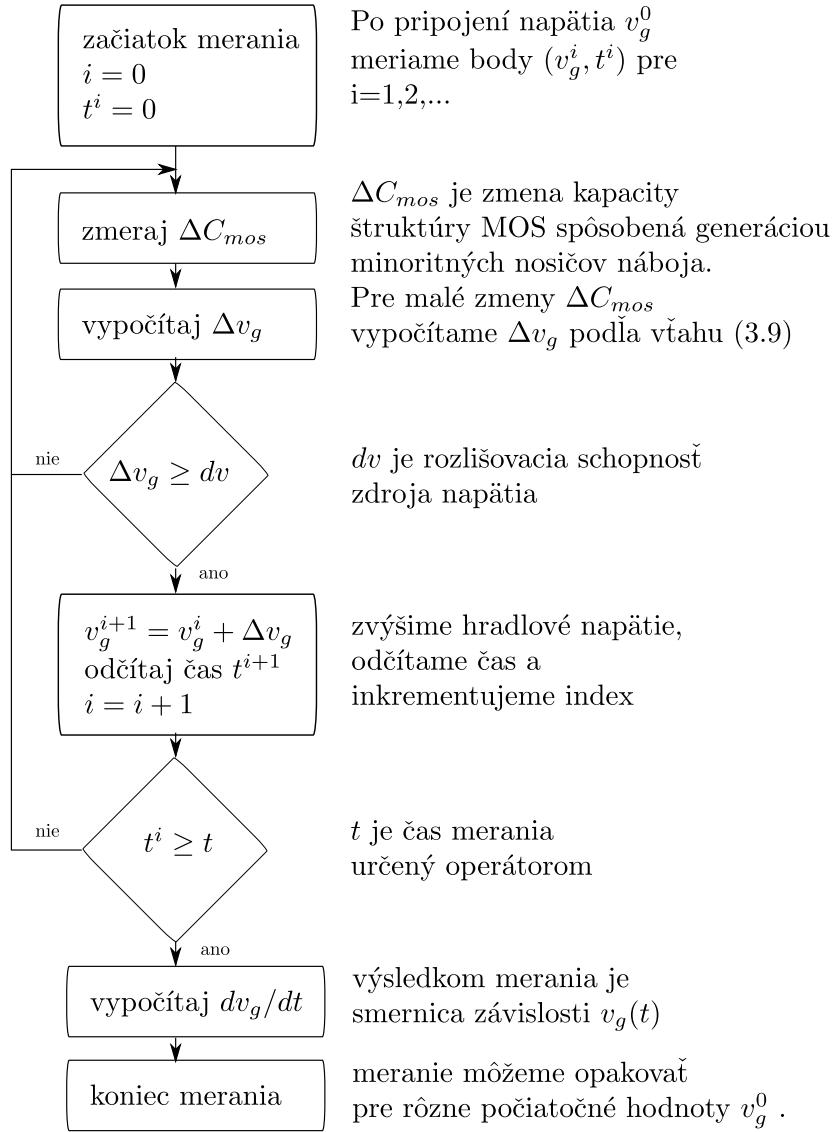


Diagram 2

Na obrázku 3.5 je znázornená závislosť $\frac{dV_g}{dt}$ 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 $\frac{dV_g}{dt}$ potom možno určiť lineárnu 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 $\frac{dV_g}{dt} = f(x)$ approximujeme spojitou funkciou, môžeme vyjadriť hĺbkový profil $\tau_g(x)$ vzťahom

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

Na obrázku 3.6 je znázornený priebeh $\tau_g(x)$, vypočítaný z nameraných dát zobrazených na obrázku 3.5 a na obrázku 3.7 je hĺbkový koncentračný profil $N(x)$ skúmanej štruktúry.

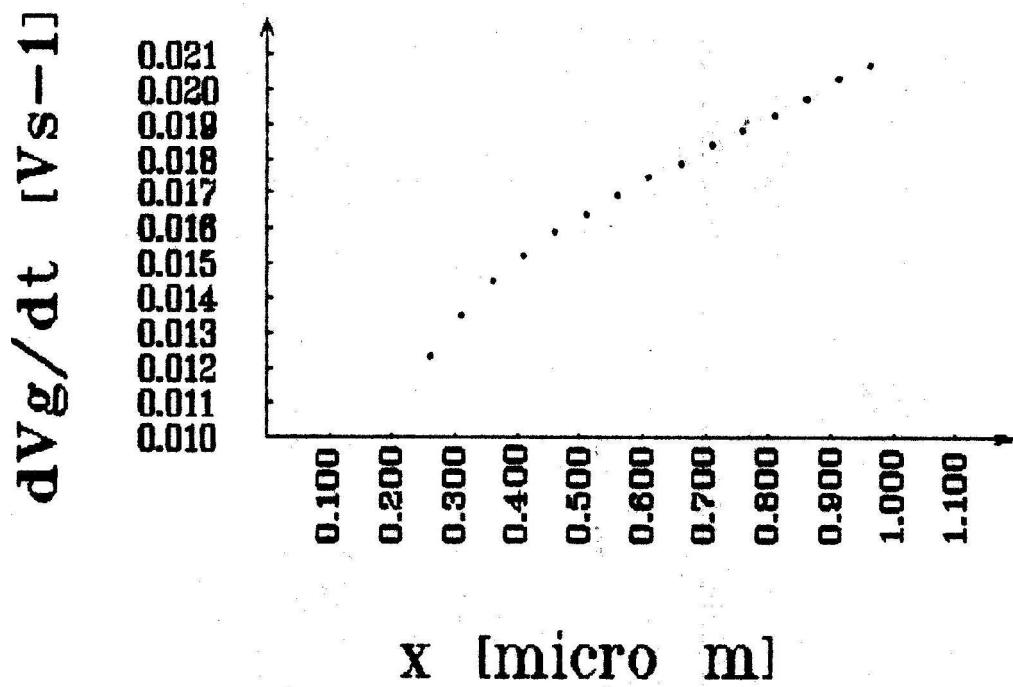


FIGURE 3.5: Závislosť $\frac{dV_g}{dt}$ od šírky OPN získaná pomocou metódy konštantnej šírky OPN.

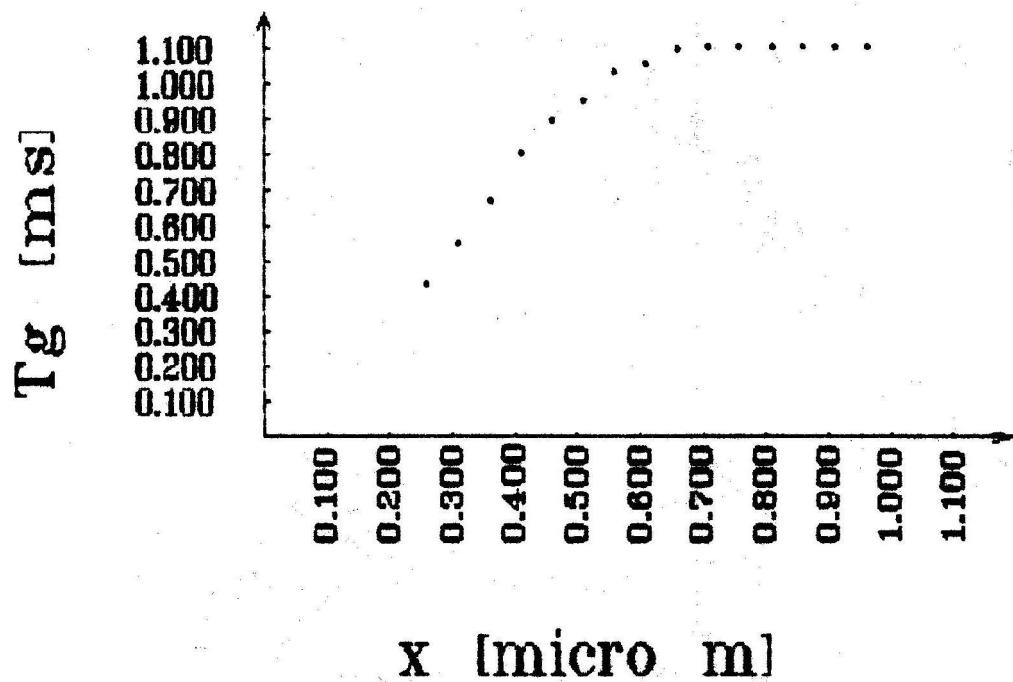


FIGURE 3.6: Hĺbkový profil generačného času života minoritných nosičov náboja.

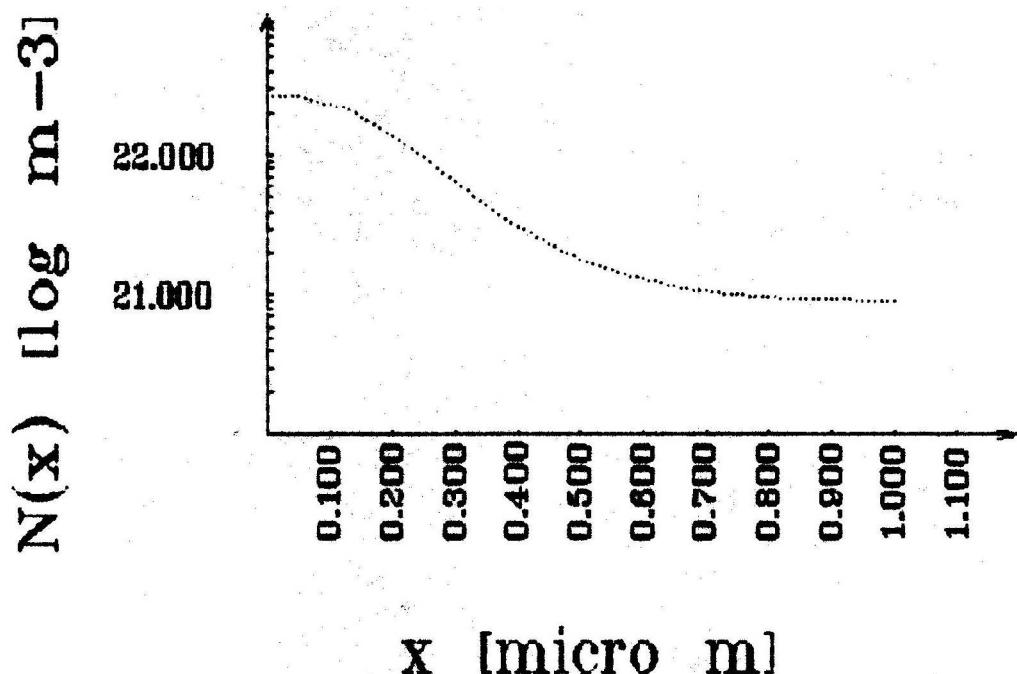


FIGURE 3.7: Hĺbkový profil koncentrácie dotujúcich prímesí $N(x)$. Koncentračný profil prímesí bol vytvorený implantáciou P^{31} s dávkou $8.0 \cdot 10^{15} m^{-2}$ pri energii $120 keV$. Aktivácia prebiehala počas 40 minút pri teplote $1050^\circ C$ v atmosféri N_2 .

Bibliography

- [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] Botka V., Csabay O., Jamrich M.: 5.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, Morthers, Roenker: Solid St. Electron. 31 (1988) s.937.
- [3.13] Pilka K.: Nerovnovážna kapacitná metóda s konštantnou šírkou OPN, Katedra mikroelektroniky, EF SVŠT, Bratislava 1989.

Chapter 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 podpovrchovej 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 aproximácií, 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 $Si - SiO_2$. Tu prichádzajú do úvahy dva postupy. Porovnanie vysokofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej C-V závislosti, alebo porovnanie experimentálnej a teoretickej C-V závislosti. Ich aplikácia je popísana 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 podpovrchovej 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 polovodiči.

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 $Si - SiO_2$ [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 $N(x)$ [I.2]

$$N(x) = \frac{2}{q\epsilon} \left[\frac{dC_{sc}^{-2}}{d\varphi_s} \right]^{-1} \quad (4.1)$$

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

$$N(x)_{korigovane} = N(x)f(\varphi_s) \quad (4.2)$$

, kde

$$f(\varphi_s) = \frac{1}{1 - e^{-\beta\varphi_s}} - \frac{2e^{-\beta\varphi_s} \left[e^{-\beta\varphi_s} + \beta\varphi_s - 1 \right]}{\left[1 - e^{-\beta\varphi_s} \right]} \quad , kde \quad \beta = \frac{q}{kT} \quad (4.3)$$

Povrchový potenciál, použitý vo vzťahu 4.3 možno určiť podla [4.7] numerickým riešením rovnice

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

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 koncentráции na hranici OPN (ktorú určujeme podľa 4.1). Z uvedeného vyplýva, že pre nehomogénne dotované substráty pomocou vzťahu 4.4 nemožno získať skutočný priebeh $\varphi_s(V_g)$, 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)

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

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

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

, kde

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

je extrinická Debayova dĺžka, pri výpočte ktorej sme použili koncentráciu získanú zo vzťahu 4.2. Vo vzťahu 4.6 použijeme hodnotu φ_s získanú z riešenia vzťahu 4.4. Napriek tomu, že aj vzťah 4.6 bol odvodený za predpokladu homogénneho rozloženia prímesí v polovodiči, jeho použitie v spojení s riešením rovnice 4.4 dáva uspokojivé výsledky, ako ukážeme neskôr.

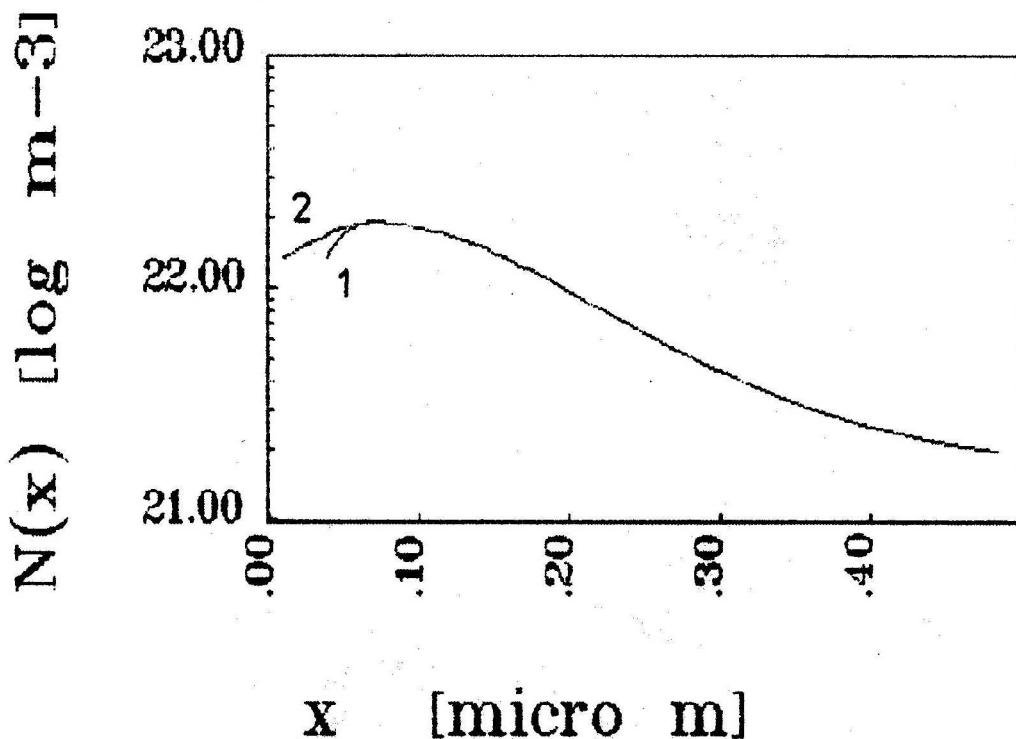


FIGURE 4.1: Priebeh koncentrácie dotujúcich prímesí v polovodiči vypočítaný zo vzťahu 4.2. Vzdialenosť od povrchu bola určená zo vzťahov 4.5 (krivka 1) a 4.6 (krivka 2).

Na obrázku 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 tabuľky 4.1 obsahuje hodnoty φ_s určené riešením rovnice 4.4 a v druhom stĺpco sa nachádzajú hodnoty korekčného faktora 4.3. Ďalšie dva stĺpce umožňujú porovnanie nekorigovanej a korigovanej hodnoty $N(x)$ a v posledných dvoch stĺpcach sú uvedené hodnoty $w(\varphi_s)$ a $w(C_{sc})$ získané zo vzťahov 4.5 a 4.6.

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

TABLE 4.1: Výpočet koncentračného profilu prímesí $N(x)$.**POZNÁMKA.**

Pomocou approximácie 4.6, ktorá predstavuje šírku OPN ako funkciu povrchového potenciaálu polovodiča (koncentrácia je parameter), možno approximovať priebeh $\varphi(x)$ pre danú šírku OPN aj v prípade, že substrát polovodiča je nehomogénne dotovaný. Vlastný postup určenia koncentrácie dotujúcich prímesí z kapacitného merania 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 $\Delta\varphi_i$ na vrstve šírky $\Delta w_i = w_{i+1} - w_i$ s koncentráciou N_i možno určiť riešením vzťahu

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

, kde

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

Potom priebeh $\varphi(x)$ 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.

4.1.3 Vplyv pascí rozhrania $Si - SiO_2$ a generácie minoritných nosičov náboja

V oblasti inverzie dochádza v OPN ku 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 obrázku 4.2.

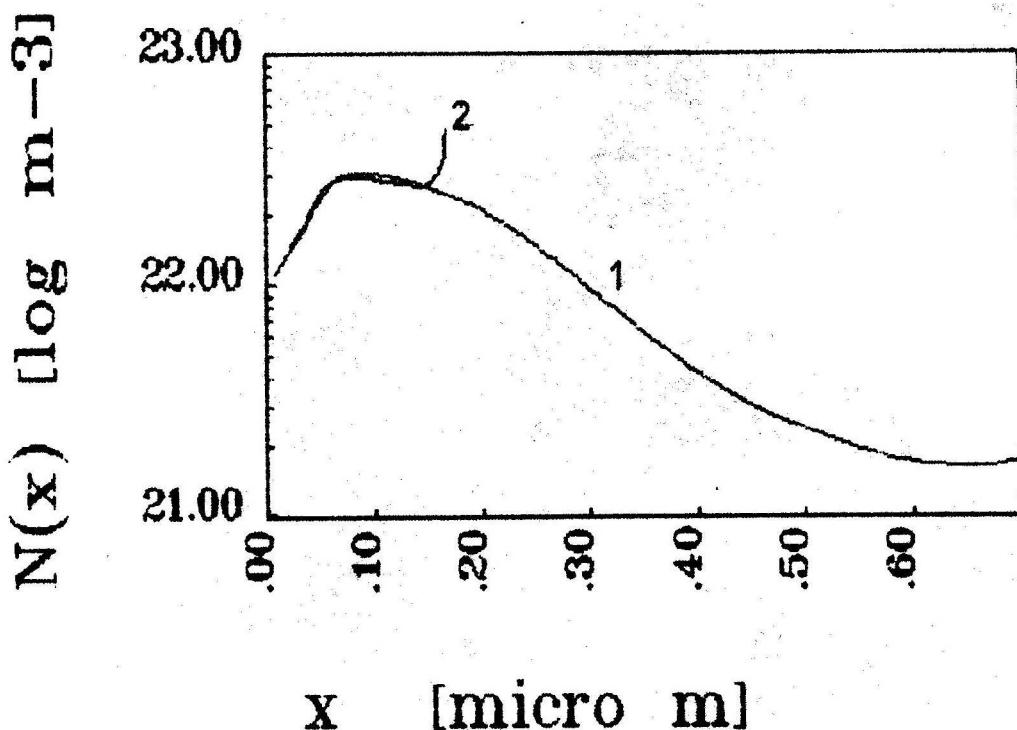


FIGURE 4.2: Priebeh koncentračného profilu dotujúcich prímesí získaný z C-V závislosti v oblasti hlbokého ochudobnenia (krivka 1) a z rovnovážnej C-V závislosti (krivka 2). Pre výpočet závislosti $N(x)$ boli použité C-V závislosti zobrazené na obrázku 3.2

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

$$\frac{dC_{sc}^{-2}}{d\varphi_s} \cong \frac{dC_{mos}^{-2}}{dV_g} \quad (4.10)$$

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 approximácie 4.10 sa vyhneme, ak použijeme

na určenie $N(x)$ dátá namerané pomocou Q-C metódy, pri ktorej vieme určiť priebeh povrchového potenciálu $\varphi_s(V_g)$.

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 [I.1]

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

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 obrázku 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 nameraný 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 obrázku 4.3 sú znázornené priebehy $n(x)$ a $N(x)$. Vo vzťahu 4.12 vystupuje druhá derivácia $n(x)$, ktorú v prípade experimentálnych 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 odchýlku spracovávaných dát od ich skutočnej hodnoty, ktorá môže vzniknúť dôsledkom:

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

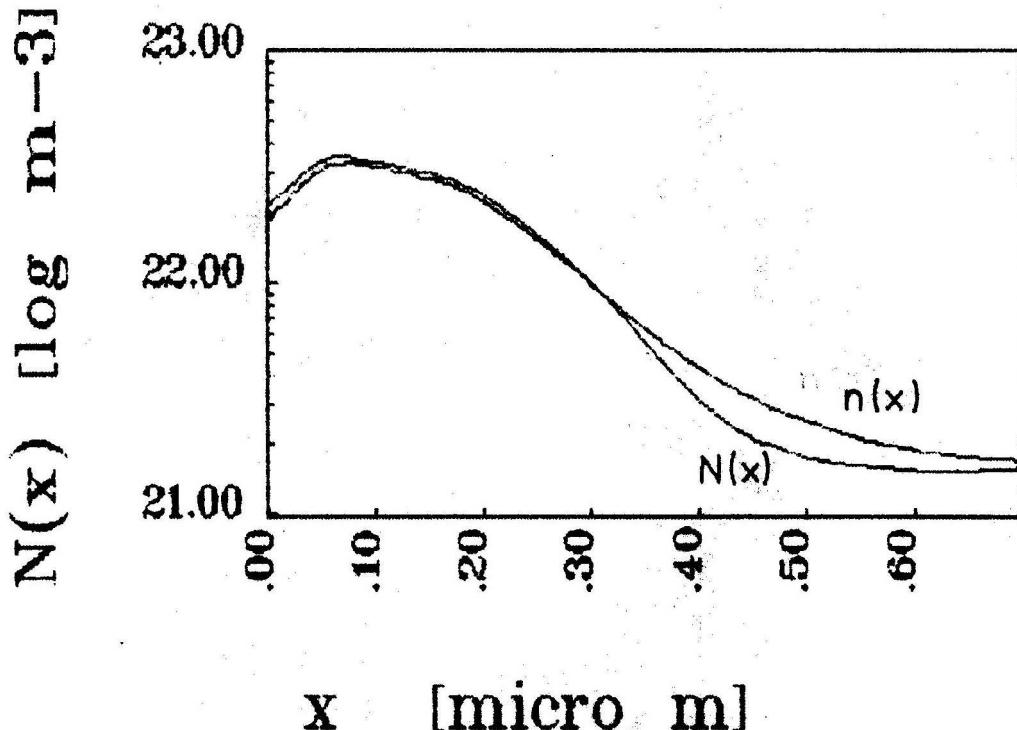


FIGURE 4.3: Priebeh koncentrácie majoritných nosičov náboja $n(x)$ určený z ochudobnejenej HF C-V závislosti a priebeh dotujúcich atómov $N(x)$ určený zo vzťahu 4.12.

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 'vyhladiť' [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 polynóm, aj keď existuje polynóm, ktorý interpoluje namerané hodnoty
- frekvenčné vlastnosti metódy sú sekundárnym dôsledkom stupňa použitého polynómu a počtu bodov, cez ktoré sa tento polynóm prekladá.

Pretože v našom prípade spracovávame funkčné závislosti, ktoré nie su vo všeobecnosti polynómy, rozhodli sme sa pre použitie číslicových filtrov. Tu možno ešte spomenúť, že pre úspešnú aplikáciu číslicových filtrov je dôležité navrhnúť kritickú frekvenciu a veľkosť filtra tak, aby filter neovplyvňoval amplitúdu signálu v tej časti spektra, ktorá predstavuje 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 zaťazený chybou, ak predstavuje nehomogénny koncentračný profil. Presnejšie možno tvrdiť [4.3], že zmeraná koncentrácia $n(x)$ predstavuje priemernú hodnotu koncentrácie majoritných nosičov v oblasti s dĺžkou rádove niekolko L_{DE} . Potom je otázkou, kedy ešte možno použiť aproximácie 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 lísi 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 obrázku 4.4, pre tento koncentračný profil je použitie kapacitnej metódy vhodné, zatiaľ čo v prípade zobrazenom na obrázku 4.5 je zrejmý veľký rozdiel medzi skutočným $n_1(x)$ a nameraným priebehom $n_2(x)$.

Ďalšia analýza approximácií, použitých pri výpočte koncentračných profilov, by sa mohla zamerať na hľadanie exaktného obmedzenia platnosti týchto approximácií, avšak zo systematického hľadiska by bolo pre riešenie tejto problematiky efektívnejšie zvoliť prístup, ku ktorému sa vzťahuje následovná poznámka.

POZNÁMKA. Pomocou kapacitných meraní by bolo možné určiť priebeh $N(x)$ presne bez použitia approximácií uvedených v predchádzajúcich článkoch. V práci [4.4] dodatku A je naznačený postup výpočtu elektrického potenciálu v polovodiči, ktorý je funkciou vzdialenosť (od povrchu polovodiča do hĺbky) a napäťia hradla. Deriváciou Poissonovej

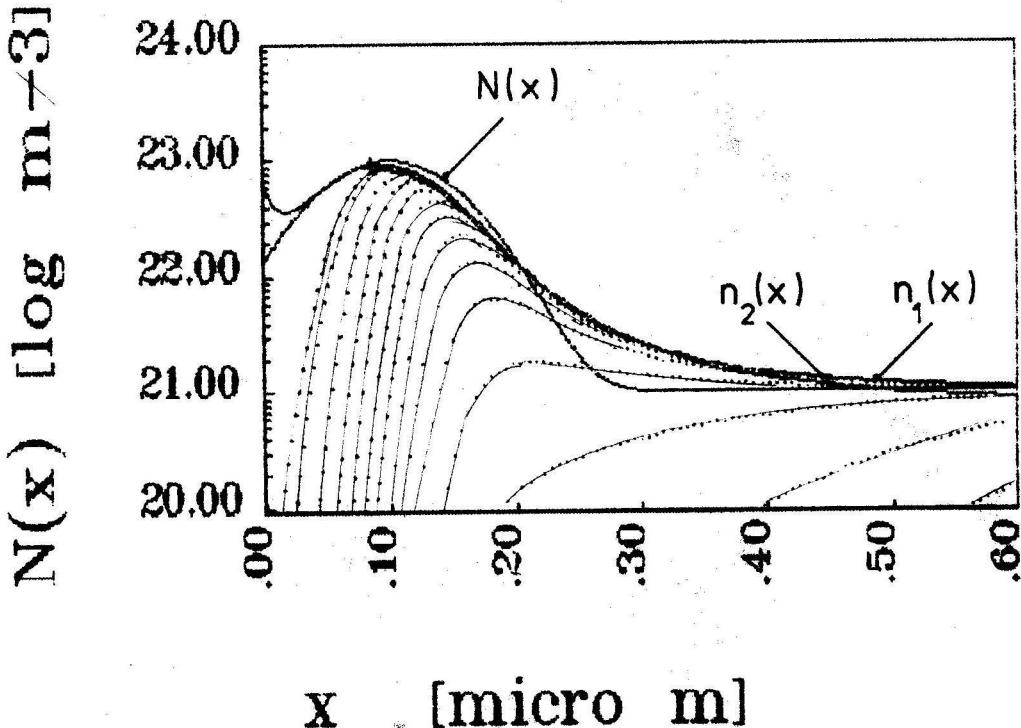


FIGURE 4.4: Priebeh koncentrácie prímesí $N(x)$ simulovaný Gaussovským rozložením s parametrami $R_p = 0.1\mu m$, $\Delta R_p = 0.05\mu m$, $N_{max} = 1.0 \times 10^{23} m^{-3}$, $N_{bulk} = 1.0 \times 10^{21} m^{-3}$; priebeh majoritných nosičov náboja $n_1(x)$ a priebeh $n_2(x)$, získaný z teoretickej C-V závislosti. Bodkovanými čiarami je znázornené ochudobnenie štruktúry MOS.

rovnice 1.2 podľa V_g dostávame parciálnu diferenciálnu rovnicu tretieho rádu, ktorá presne opisuje experiment merania C-V závislosti

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

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

$$N(x) = N_{bulk} e^{\beta \varphi} - \frac{\epsilon}{q} \frac{\delta^2 \varphi}{\delta x^2} \quad (4.14)$$

(todo: check equation 4.14 in ref 4.4)

Autori článku [4.4] túto metódu ďalej nerozvíjali, z dôvodov ťažkosti pri vyčíslovani druhej derivácie vo vzorci 4.14.

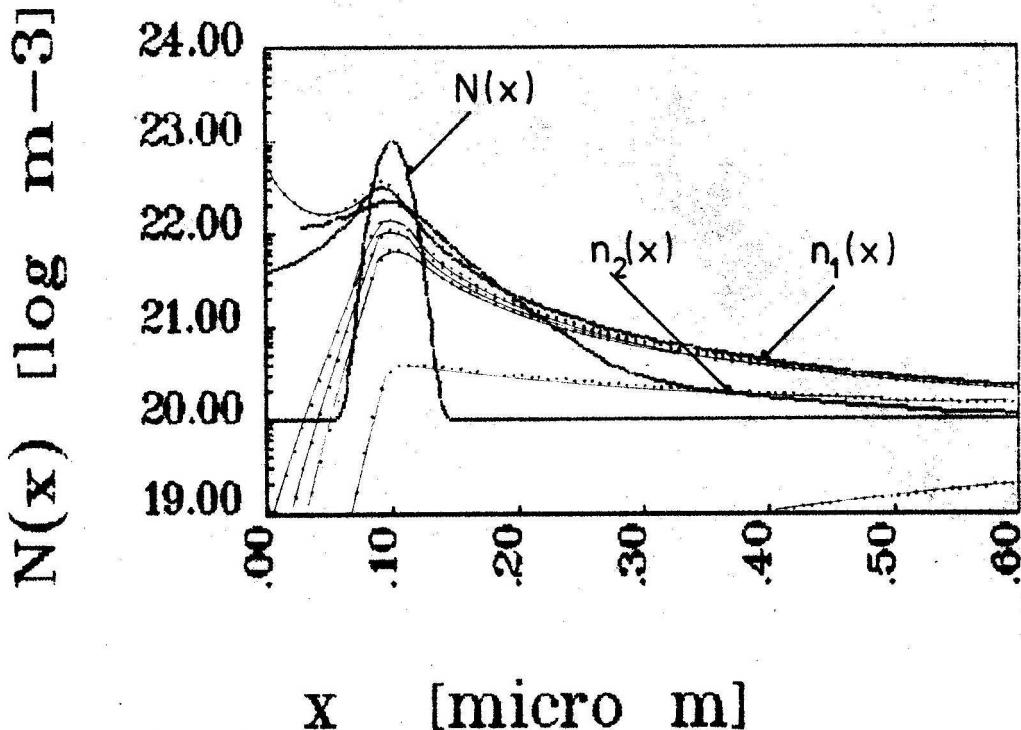


FIGURE 4.5: Priebeh koncentrácie prímesí $N(x)$ simulovaný Gaussovským rozložením s parametrami $R_p = 0.1\mu m$, $\Delta R_p = 0.01\mu m$, $N_{max} = 1.0 \times 10^{23} m^{-3}$, $N_{bulk} = 1.0 \times 10^{21} m^{-3}$; priebeh majoritných nosičov náboja $n_1(x)$ a priebeh $n_2(x)$, získaný z teoretickej C-V závislosti. Bodkovanými čiarami je znázornené ochudobnenie štruktúry MOS.

4.2 Určenie hustoty pascí rozhrania $Si - SiO_2$.

Kvalitu rozhrania $Si - SiO_2$ charakterizujeme hustotou pascí rozhrania (D_{it}), ktorá je dôsledkom mechanizmu termickej oxidácie kremíka, pri ktorej dochádza k vytvoreniu oblasti s nestechiometrickým zložením. Túto hustotu možno vyhodnotiť následujúcimi dvoma postupmi:

1. Porovnanie nameranej vysokofrekvenčnej C-V závislosti $C_{mos}^{HF}(V_g)$ a nameranej nízkofrekvečnej C-V závislosti $C_{mos}^{LF}(V_g)$. Vyhodnotenie D_{it} pomocou porovnania uvedených závislostí vychádza z predpokladu, že závislosť $C_{mos}^{HF}(V_g)$ je meraná dostatočne vysokým VF signálom, čo spôsobí, že kapacita nie je ovplyvnená pascami rozhrania $Si - SiO_2$.
2. Porovnanie nameranej závislosti $C_{mos}^{LF}(V_g)$ a teoretickej nízkofrekvečnej C-V závislosti, ktorú označíme $C_{mos}^{TLP}(V_g)$. V tomto prípade je potrebné na základe známeho priebehu koncentračného profilu dotujúcich prímesí v podpovrchovej oblasti polovodiča vypočítať závislosť $C_{mos}^{TLP}(V_g)$ riešením Poissonovej rovnice.

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

4.2.1 Porovnanie vysokofrekvenčnej a nízkofrekvenčnej C-V závislosti.

V tomto prípade využijeme frekvenčnú závislosť kapacity štruktúry MOS a D_{it} určíme z porovnania $C_{mos}^{HF}(V_g)$ a $C_{mos}^{LF}(V_g)$. Potrebný teoretický základ možno nájsť napríklad v [I.1]. Pre určenie $C_{mos}^{HF}(V_g)$ a $C_{mos}^{LF}(V_g)$ 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 $C_{mos}^{HF}(V_g)$ a $C_{mos}^{LF}(V_g)$ je tiež možné.

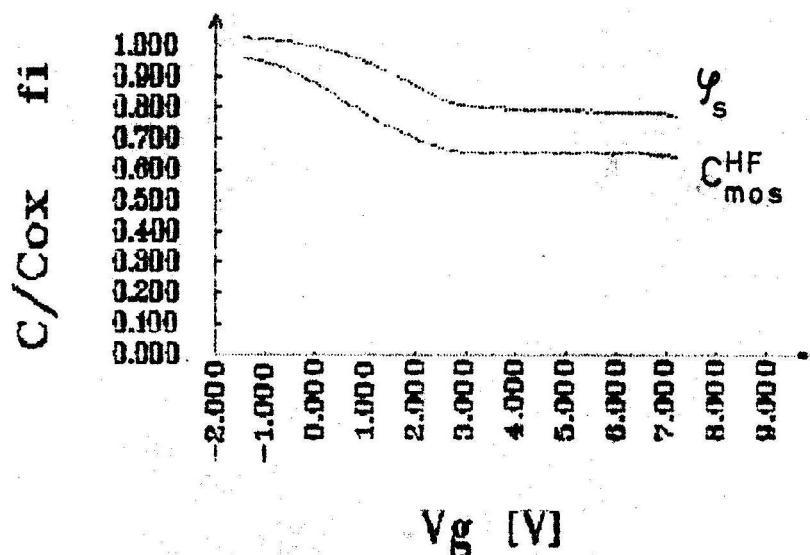


FIGURE 4.6: VF C-V závislosť $C_{mos}^{HF}(V_g)$ normovaná na kapacitu oxidu a normovaný priebeh povrchového potenciálu $\varphi_s(V_g)$ štruktúry MOS získané pomocou Q-C metódy. Priebeh povrchového potenciálu je normovaný vzťahom $1 - \frac{\varphi_s}{\varphi_{norm}}$, kde $\varphi_{norm} = 3.33$.

Na obrázku 4.6 sú namerané hodnoty $C_{mos}^{HF}(V_g)$ a povrchového potenciálu φ_s štruktúry MOS, určené pomocou Q-C metódy. Na obrázku 4.7 sa nachádzajú krivky $C_{mos}^{HF}(V_g)$ a $C_{mos}^{LF}(V_g)$, ktoré použijeme pre výpočet D_{it} podľa následujúceho vzťahu [4.15]

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

Polohu Fermiho hladiny v zakázanom pásme pre vypočítané hodnoty D_{it} určíme pomocou hodnôt povrchového potenciálu φ_s a vzdialosti Fermiho hladiny od intrinziekej Fermiho hladiny φ_f . Priebeh povrchového potenciálu $\varphi_s(V_g)$ získame buď priamo pomocou Q-C metódy, alebo integráciou kvázistatickej C-V závislosti použitím Berglundovho integrálu. V oboch prípadoch dostávame priebehy $\varphi_s(V_g)$, ktoré sú posunuté v smere osi

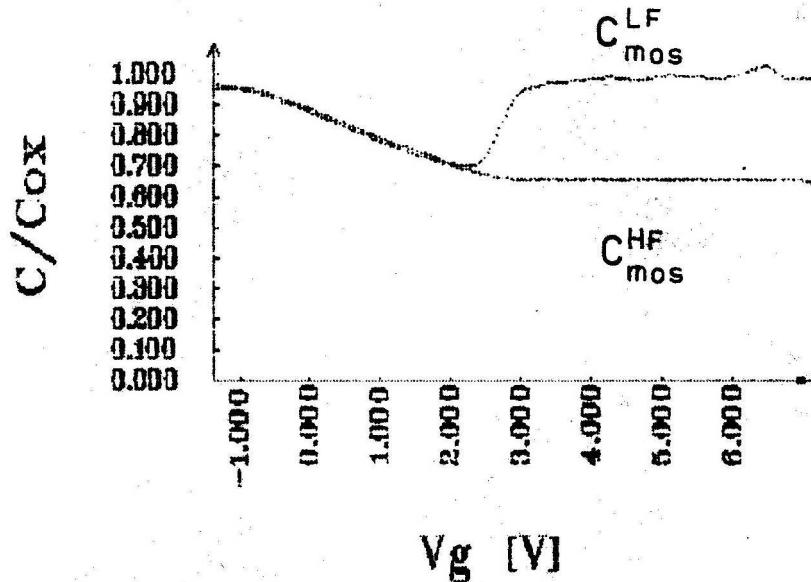


FIGURE 4.7: VF C-V závislosť $C_{mos}^{HF}(V_g)$ a LF C-V závislosť $C_{mos}^{LF}(V_g)$ štruktúry MOS normované na kapacitu oxidu, získané pomocou Q-C metódy. LF C-V závislosť je vypočítaná deriváciou povrchového potenciálu (zobrazeného na obrázku 4.6) podľa vzťahu 3.2.

y. V prípade Q-C metódy sa jedná o konštantu φ_{s0} , 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 $\varphi_s(V_g)$ vypočítať postupom uvedeným v dodatku G.

Hodnotu potenciálu φ_f určíme pomocou vzťahu

$$\varphi_f = \pm \frac{kT}{g} \ln \frac{N_b}{n_i} \quad (4.16)$$

, kde predokladáme 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 následovného vzťahu

$$E_c - E = 0.56 + \varphi_s + \varphi_f \quad (4.17)$$

, kde číslo 0.56 predstavuje vzdialenosť dolného okraja vodivostného pásma (E_c) od intrinziek Fermiho hladiny. Priebeh D_{it} ako funkcie polohy v zakázanom pásme je znázornený na obrázku 4.8.

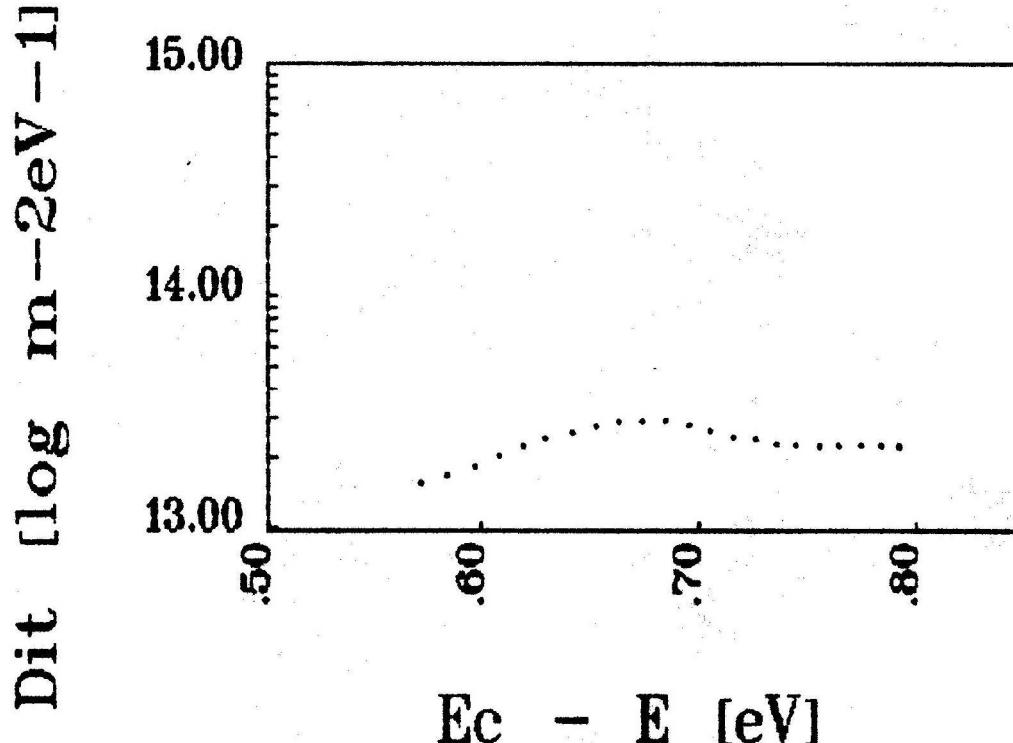


FIGURE 4.8: Závislosť D_{it} od polohy v zakázanom pásme polovodiča typu P, určená z porovnania $C_{mos}^{HF}(V_g)$ a $C_{mos}^{LF}(V_g)$, ktoré sú zobrazené na obrázku 4.7.

4.2.2 Porovnanie experimentálnej a teoretickej kvázistatickej CV závislosti.

Pre výpočet D_{it} pomocou tejto metódy je potrebné poznať priebeh koncentračného profilu dotujúcich prímesí v podpovrchovej oblasti polovodiča $N(x)$, aby sme mohli vypočítať $C_{mos}^{TLF}(V_g)$. Teoretickú závislosť $C_{mos}^{TLF}(V_g)$ štruktúry MOS vypočítame numerickým postupom popísaným v dodatku A. 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 $\varphi_s(V_g)$, ktorú použijeme pre určenie pozicie vypočítanej hustoty pascí rozhrania v zakázanom pásme polovodiča. Pretože počas numerického výpočtu neberieme do úvahy poruchové náboje v oxidovej vrstve a na rozhraní $Si - SiO_2$ obidve teoreticky určené závislosti $\varphi_s(V_g)$ aj $C_{mos}^{TLF}(V_g)$ budú posunuté voči nameranej kvázistatickej C-V závislosti o hodnotu V_{FB} . Pre posunutie uvedených závislostí musíme poznať aj hodnotu V_{FB} .

Pre výpočet D_{it} teda použijeme $C_{mos}^{TLF}(V_g)$, ktorá nie je zaťažená kapacitou pascí rozhrania $Si - SiO_2$. Na obrázku 4.9 sú zobrazené nameraná a teoretická LF C-V závislosť, ktoré ďalej použijeme na vyhodnotenie D_{it} podľa vzťahu

$$D_{it} = \frac{1}{q} \left[\frac{C_{mos}^{LF}}{1 - \frac{C_{mos}^{LF}}{C_{ox}}} - \frac{C_{mos}^{TLF}}{1 - \frac{C_{mos}^{TLF}}{C_{ox}}} \right] \quad (4.18)$$

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

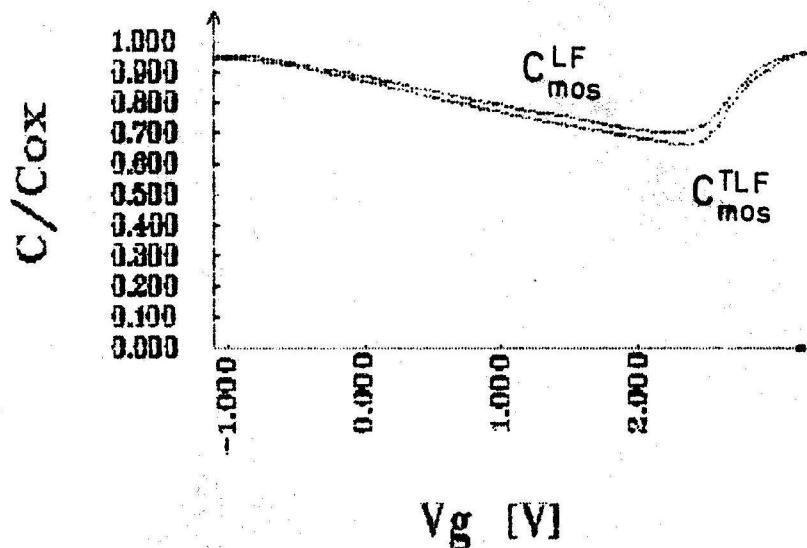


FIGURE 4.9: Teoretická LF C-V závislosť a nameraná LF C-V závislosť štruktúry MOS normované na kapacitu oxidu.

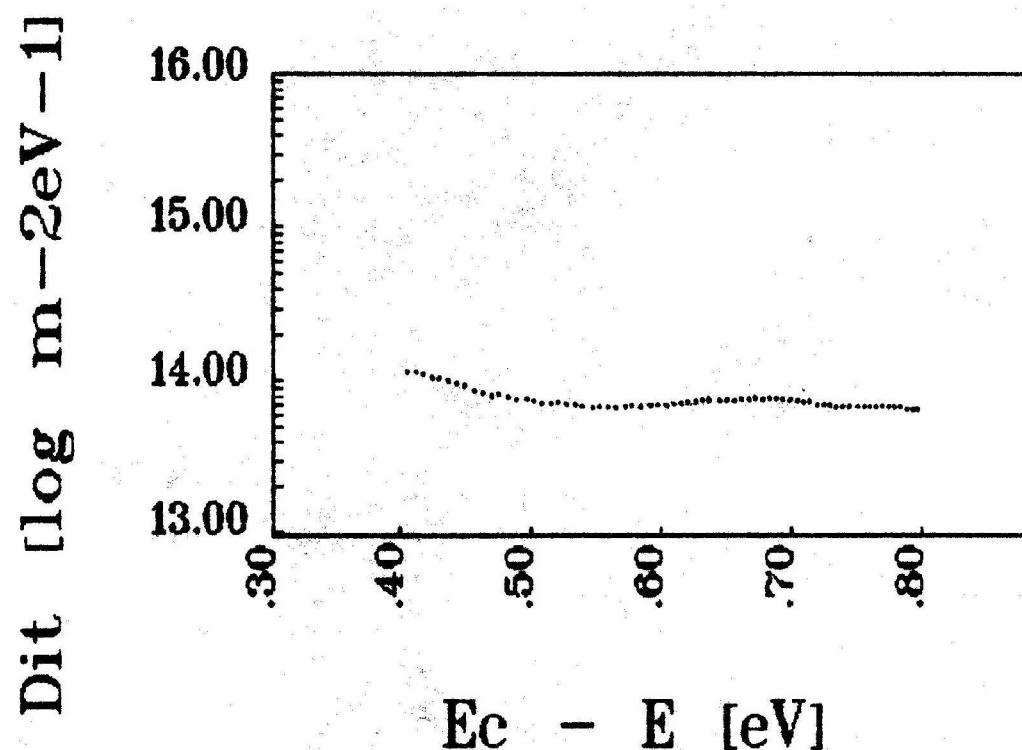


FIGURE 4.10: Závislosť D_{it} od polohy v zakázanom pásme polovodiča typu P, určená z porovnania $C_{mos}^{TLP}(V_g)$ a $C_{mos}^{LF}(V_g)$, ktoré sú zobrazené na obrázku 4.9.

Bibliography

- [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 Halbleiteroberflächen 17 (1986) s.91.

Chapter 5

Pracovisko pre automatizovaný zber dát.

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

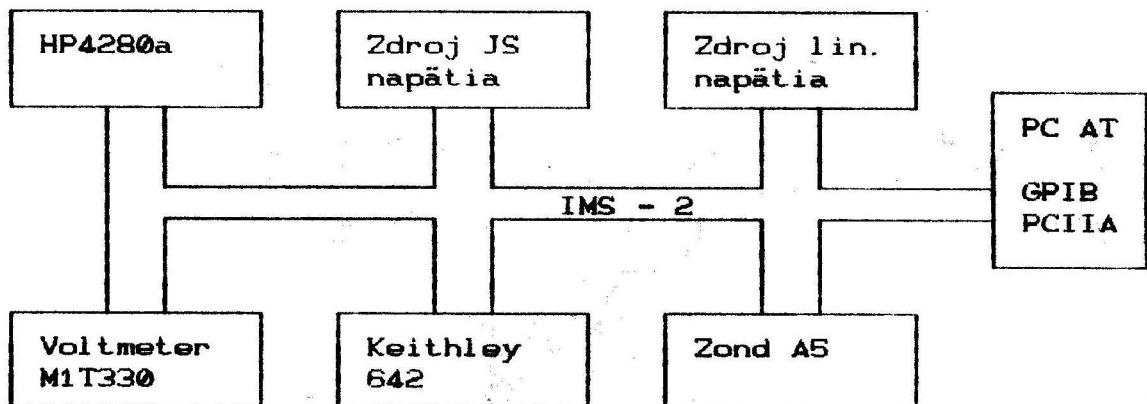


FIGURE 5.1: Bloková schéma zapojenia prístrojov automatizovaného pracoviska pre určovanie plošného rozloženia parametrov štruktúr MOS s nehomogénnou dotáciou substrátu.

Riadiacim počítacom 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 napäťia a zdroj lineárne narastajúceho napäťia postavené na Katedre mikroelektroniky. Voltmeter M1T330 je výrobkom Metry Blansko a krovacie hrotové

zariadenie Zond A5 bolo dovezené zo Sovietskeho Zväzu. Posledne spomínané zariadenie neobsahuje štandardne interfejs IMS-2 a bolo dodatočne 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 následovné spracovanie. Programové vybavenie pracoviska možno rozdeliť na programy (1) zberu dát (2) spracovania dát (3) zobrazenia vysledkov a (4) pomocné programy. Programy zberu dát umožňujú meranie C-V závislosti 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 nameraných dát v dôsledku výskytu ľubovolnej chyby (napr. výpadku napäťia), 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 nameraných dát v prípade výskytu chyby bolo realizované následovným spôsobom. Namerané dáta sú naraz zapisované do diskového súboru vždy po ukončení merania na každej štruktúre. Túto dátovu jednotku budeme v ďalsom označovať záznam. To znamená, že k poškodeniu štruktúry dát môže prísť len v prípade výskytu chyby v priebehu krátkeho časového úseku (rádove desiatky ms), čím ale prichádza len k strate posledného záznamu. Pre tento prípad je k dispozícii pomocný program, ktorý zkráti dátový súbor na požadované množstvo záznamov, čím obnoví kompaktnosť súboru a umožní reštartovanie zberu dát. Týmto spôsobom možno skrátiť dátovy súbor o chybne namerané dáta 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 následovnom 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 chybne dáta. 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 pozícií štruktúr na testovanej kremíkovej doske, v ktorých sme namerali chybne 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 sírky oblasti priestorového náboja. Takto sme ale nemohli automatizovať Q-C metódu, pretože použitý interfejs

pristroja 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 následovná koncepcia pomenovania dátovych 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 zosnímaná 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.prieraž) na 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. Celocíselné hodnoty majú dĺžku 2 bajty a čísla s pohyblivou desatinou čiarkou zaberajú 4 bajty.

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

5.1 Meranie HF C-V závislostí.

HF C-V závislosť štruktúry MOS meriame 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. Thold určuje čas, počas ktorého bude na meranej vzorke pripojené napätie Vstart pred začiatkom merania. Tento čas je potrebný na ustálenie prechodových javov, v prípade že ich nechceme merať. Parameter Tdelay 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 dátá uloží do vnútornej pamäte. Prenos dát z prístroja HP4280a do riadiaceho počítača sa vykoná v binárnej forme, čím nestrácamo čas konverziou medzi binárhou 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 detekovaní 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 uvolnený 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. Konkrétnie 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 napäťia, 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 ďaleko v akumulácii a namerané hodnoty uloží do samostatného dátového súboru.

5.2 Meranie kvázistatických C-V závislostí.

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

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

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 začatiu merania z interfejsu, ktorý dostane po žiadosti riadiaceho počítača o vyslanie nameraných dát. Potom prebehne A/D prevod a namerané dáta 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 pristroj 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 poznáť rýchlosť nárastu napäťa na hradle štruktúry MOS, ktorú určíme následovným spôsobom. Meranie vykonáme vo väčšom napäťovom intervale, ako je požadované. V štartovacom a koncovom úseku (mimo požadovaného intervalu napäťí) odmeriame hodnoty lineárne narastajúceho napäťa hradla a zároveň zmeriame čas pre každú hodnotu napäťa. Čas meriame 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 následovný postup na určenie napäťa hradla zodpovedajúce meranému prúdu. Súčasne s meraním prúdu odčítame čas, ktorý uplynul od začiatku merania a napätie hradla vypočítame pomocou smernice závislosti $V_g(t)$. Odčítanie a uloženie uplynutého času je rýchla operácia riadiaceho počítača, čím získame čas, ktorý by sme stratili meraním napäťa pomocou voltmetra. Ďalšou výhodou uvedeného postupu je, že dostávame vyhľadené hodnoty priebehu napäťa hradla v čase. V prípade, že by sme merali priamo prúd aj napätie, 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 ekvidistantným 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 aproximácie C-V závislosti pomocou kubických splajn-funkcií a výpočte kapacity štruktúry MOS pre zadané hodnoty napäťa. Je potrebné voliť hodnoty napäťa hradla v súlade s HF C-V meraním, čo ulahčí výpočet tých parametrov štruktúr MOS, ktore 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 vzdialenosťi approximačných funkcií a nameraných bodov, vznikne aproximácia pomocou kubických splajn-funkcií. V našom programe sme použili dvojicu podprogramov z numerickej knižnice NAG (Numerical Algorythm 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 nespojitými 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

vplyvom exponenciálnej závislosti koncentrácie minoritných nosičov od elektrického potenciálu k prudkej zmene kapacity. Do tohto bodu sme umiestnili tri koincidenčné uzly, čím sme umožnili nespojitost derivácií 1., 2. a 3. rádu. Následne vypočítané hodnoty kapacity pomocou podprogramu E02BCF vykazujú dobré aproximačné vlastnosti. Uvedeným postupom sme odstránili prekmity aproximačných polynómov, ktoré často vznikajú pri aproximácii 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) napäťia, ktorý bol postavený na Katedre mikroelektroniky. Merací obvod prístroja HP4280a pozostáva z vnútorného zdroja JS napäťia (INT BIAS), zdroja HF signálu a ampérmetra (označeného A) [5.7]. Vnútorný zdroj JS napäťia má rozsah $(-100.0, +100.0)V$ s rozlíšením $0.1V$, avšak v rozsahu $(-2.0, +2.0)V$ môžeme nastavovať napätie s rozlíšením $0.001V$. 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 hlbokého ochudobnenia použijeme externý zdroj JS napäťia, ktorý môže nastavovať napätie v intervale $(-40.0, +40.0)$ V s rozlíšením 0.1 V. Prístroj HP4280a umožňuje veľkú flexibilitu konfigurácie elementov meracieho obvodu. K dispozícii je 14 módov. Pre náš experiment sme zvolili mod 11 [5.2], ktorý umožňuje pripojenie externého zdroja JS napäťia.

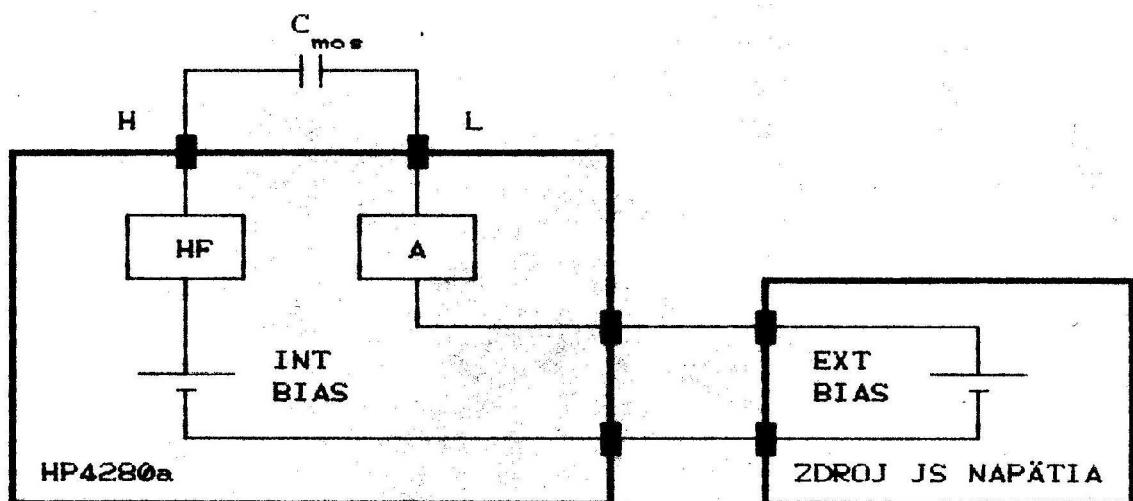


FIGURE 5.2: Zapojenie prístrojov pre metódou konštantnej šírky OPN.

Meranie zavislosti $V_g(t)$ potom prebieha v následovných krokoch. Pomocou externého zdroja JS napäťia priviedieme štruktúru MOS do nerovnovážneho stavu. Zo zmeny kapacity ΔC , ktorú odmeriame prístrojom HP4280a, vypočítame pomocou vzťahu 3.9 požadovanú zmenu napäťia hradla ΔV_g . Ak je jej veľkosť v absolútnej hodnote väčšia ako $0.001V$ zmeníme hodnotu napäťia hradla o ΔV_g , čím udržiavame konštantnú hodnotu nerovnovážnej kapacity štruktúry MOS. Pri každej zmene napäťia hradla odčítame čas, kedy táto zmena nastala. Meranie 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 pohybovat 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-V závislosťami hlbokého ochudobnenia a kapacitami oxidovej vrstvy testovaných štruktúr kremíkovej dosky. Pomocou týchto vopred nameraných dát a zo zadanej vzdialenosťi hranice OPN potom určuje počiatocné hradlové napätie pre nastavenie externého zdroja JS napäťia. Pre svoju činnosť potrebuje riadiaci program ešte jeden dátovy 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 regresiu 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 $10^3 \mu s$ približne $T_{hold} = 10s$. Počas tejto doby prichádzalo k zmene napäťia hradla v rozsahu $50 - 500mV$ v závislosti od šírky OPN a v závislosti od prírastku minoritných nosičov z oblasti mimo OPN. Zároveň bolo z grafického znázornenia závislosti $\frac{dV_g}{dt} = f(w)$ vidieť vplyv prírastku minoritných nosičov náboja z oblasti mimo OPN, čo sa prejavilo približne rovnakým sklonom závislostí $\frac{dV_g}{dt} = f(w)$, ale rôznou absolútnej hodnotou. Zo zobrazenia závislostí $\frac{dV_g}{dt} = f(w)$ na celej kremíkovej doske vyplýva, že akceptovateľné hodnoty τ_g možno počítať jedine z derivácie funkcie $\frac{dV_g}{dt} = f(w)$ 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 $\frac{dV_g}{dt} = f(w)$.

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 napäťia 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 dobou 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 uvedieme aj rozsahy napäťí použitých prístrojov.

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.

5.4.1 Rovnovážna HF C-V závislosť.

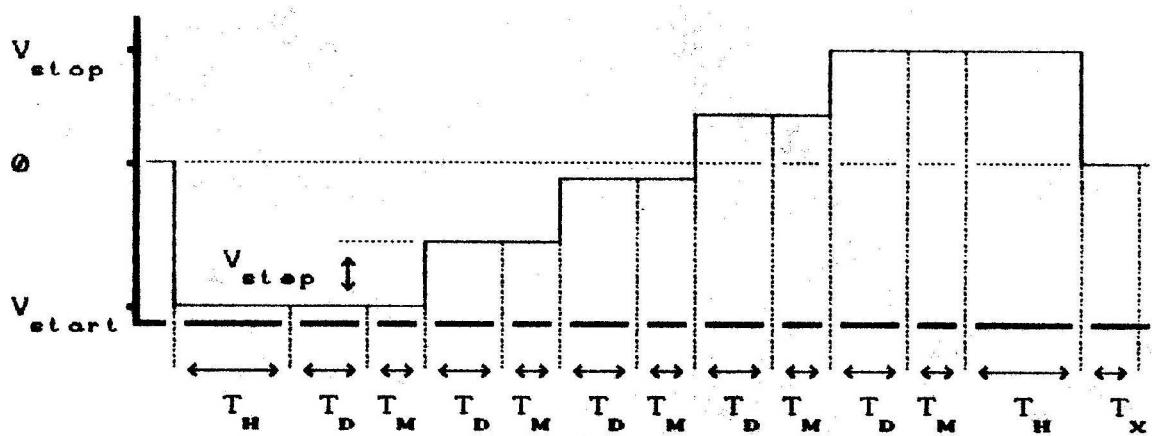


FIGURE 5.3: Časový diagram rovnovážnej HF C-V metódy.

parameter	popis parametra	min.	max.hodnota
T_H	čas ustálenia	3ms	650s
T_D	čas pozdržania merania	3ms	650s
T_M	čas merania	40ms	
T_X	binárny prenos dát, predspracovanie dát, uloženie dát do súboru, posuv stolíka na ďalšiu štruktúru	$\sim 7s$	
V_{start}	-100.0V	+100.0V
V_{stop}	-100.0V	+100.0V
V_{step}	$\pm 0.001V$	$\pm 200.0V$

TABLE 5.1: Časový diagram rovnovážnej HF C-V metódy.

5.4.2 Nerovnovážna HF C-V závislosť.

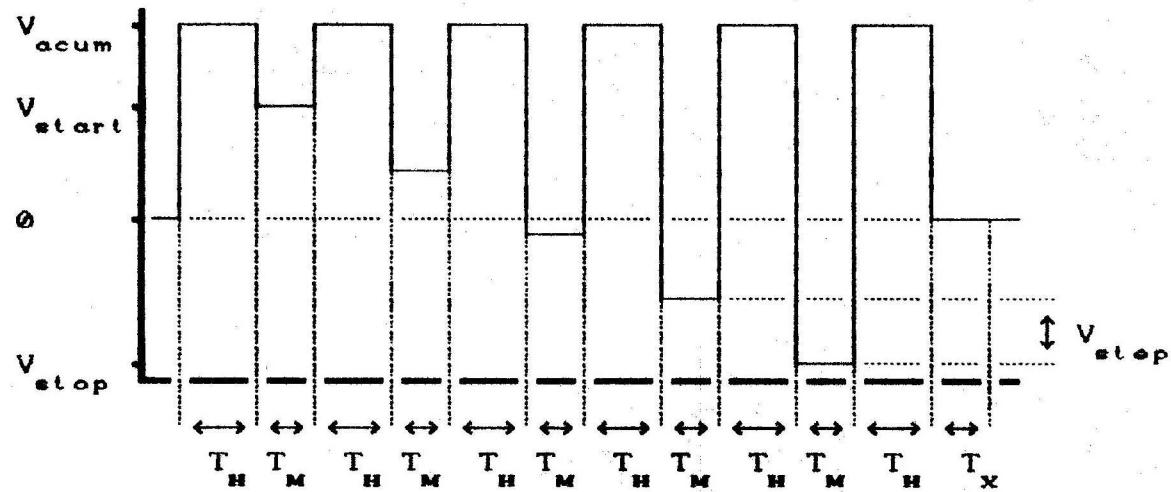


FIGURE 5.4: Časový diagram nerovnovážnej HF C-V metódy.

parameter	popis parametra	min.	max.hodnota
T_H	čas relaxácie minoritných nosičov náboja	0s	neohraničené
T_M	čas merania a prenosu dát	330ms	
T_X	predspracovanie dát, uloženie dát do súboru, posuv stolíka na ďalšiu štruktúru	$\sim 4s$	
V_{start}	-100.0	+100.0V
V_{stop}	-100.0	+100.0V
V_{step}	± 0.001	$\pm 200.0V$
V_{acum}	-100.0	+100.0V

TABLE 5.2: Časový diagram nerovnovážnej HF C-V metódy.

5.4.3 Kvázistatická C-V závislosť.

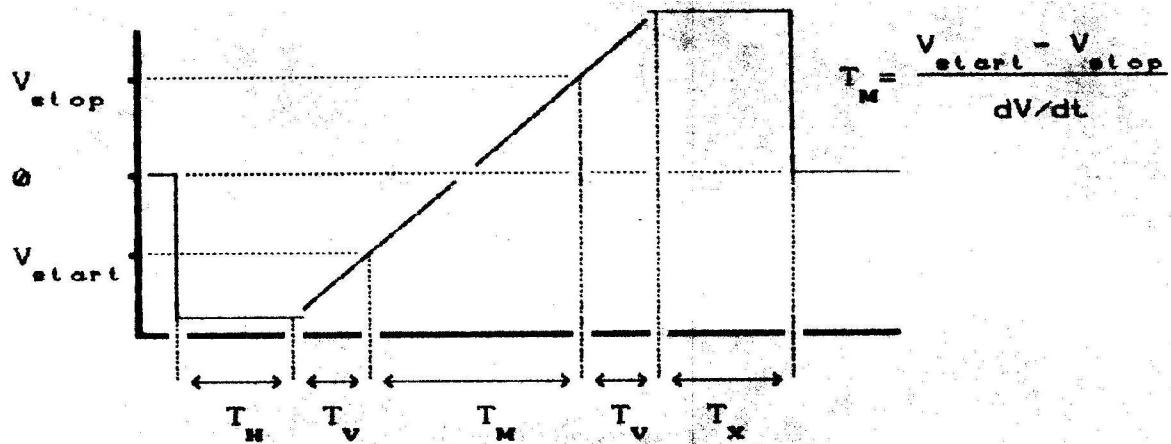


FIGURE 5.5: Časový diagram kvázistatickej C-V metódy.

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

TABLE 5.3: Časový diagram kvázistatickej C-V metódy.

5.4.4 Metóda konštantnej šírky OPN.

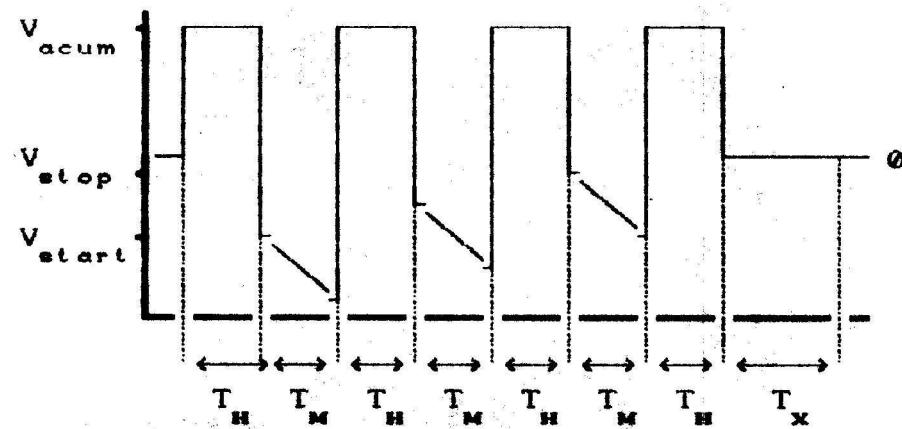


FIGURE 5.6: Časový diagram metódy konštantnej šírky OPN

parameter	popis parametra	min.	max.hodnota
T_H	čas relaxácie minoritných nosičov náboja ..	0s	neohraničené
T_M	čas merania, výpočet dV/dt	10s	neohraničené
T_X	uloženie dát do súboru, posuv stolíka na ďalšiu štruktúru	$\sim 2s$	
V_{start}	-40.0	+40.0V
V_{stop}	-40.0	+40.0V
V_{acum}	-40.0	+40.0V

TABLE 5.4: Časový diagram metódy konštantnej šírky OPN.

Bibliography

- [5.1] Mariassy 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.: Metódy 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.

Chapter 6

Spracovanie dát a zobrazenie získanych parametrov štruktúr MOS.

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

Väčšina parametrov je určovaná z nameraných 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 rozlišiteľnosti 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 pripísat 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 napäťa vyrovnaných pásov.

Určenie koncentračného profilu dotujúcich prímesí vykonáva samostatný program, ktorý ako vstupné dáta vyžaduje súbory (a) nameraných HF C-V závislostí a (b) nameraných kapacít oxidovej vrstvy štruktúry MOS. Výstupom programu je dátový súbor obsahujúci hĺbkové 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 $Si - SiO_2$. Povrchový potenciál určujeme podľa vzťahov 4.3 a 4.4 a používame ho pre korekciu aproximácie hlbokého ochudobnenia pri povrchu polovodiča a pre výpočet hĺbky (šírky OPN). Vedľajším produkтом je dátovy súbor obsahujúci napäťa vyrovnaných pásov V_{fb} , ktoré sa určujú v bode C-V závislosti, pre ktoré povrchový potenciál φ_s mení znamienko. Obrázok 6.1 predstavuje plošné rozloženie koncentrácie v rôznych hĺbkach polovodiča a na obrázku 6.2 je znázornené rozloženie V_{fb} . Koncentračný profil prímesí bol vytvorený implantáciou P^{31} s dávkou $4.0 \times 10^{15} m^{-2}$ pri energii $120 keV$. Aktivácia prebiehala počas 40 minút pri teplote $1050^\circ C$ v atmosfére N_2 . Stredná hodnota $N(x)$ je spolu s ďalšími priebehmi pre rôzne implantačné dávky zobrazená na obrázku 7.3.

Pre známe priebehy koncentračných profilov môžeme vypočítať dávku implantácie podľa vzťahu

$$D = \int_0^{x_1} (N(x) - N_b) dx \quad (6.1)$$

kde predpokladame, že poznáme priebeh $N(x)$ do vzdialenosťi x_1 , 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 polovodiča a boli aktivované v poimplantačnom teplnom spracovaní. Na obrázku 6.3 je znázornené plošné rozloženie dávky na testovanej kremíkovej doske určenej zo závislosti $N(x)$ zobrazených na obrázku 6.1.

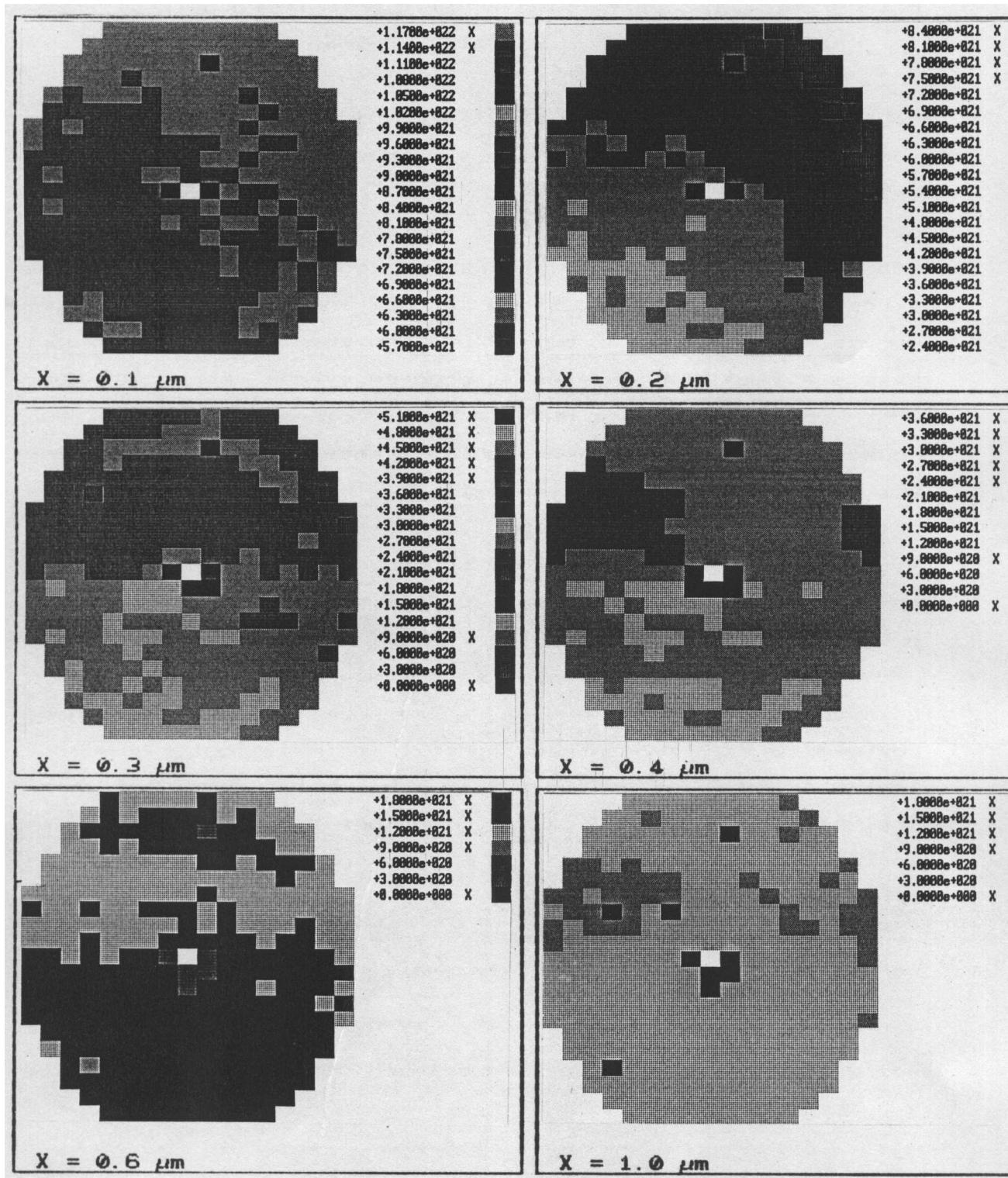
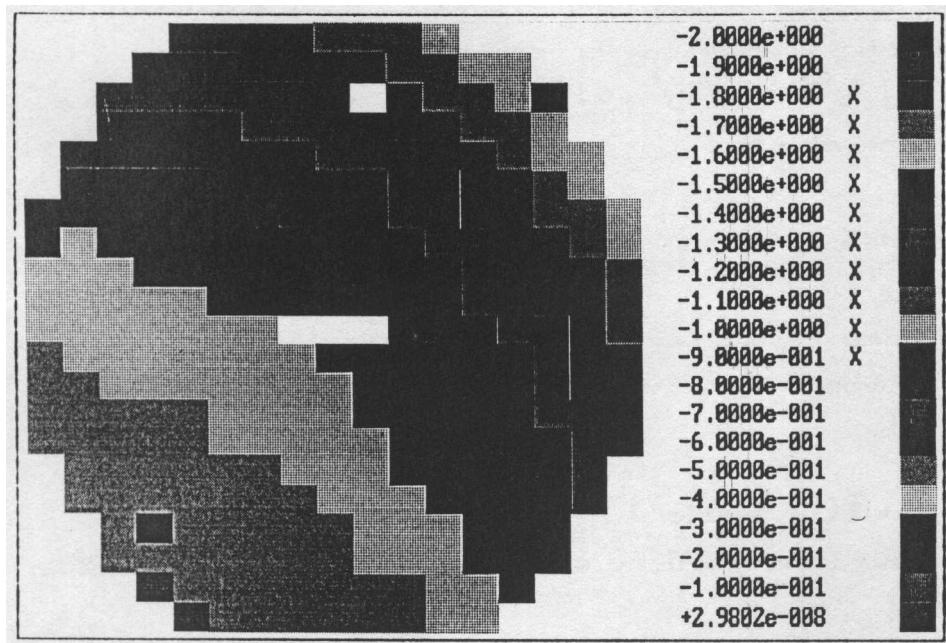
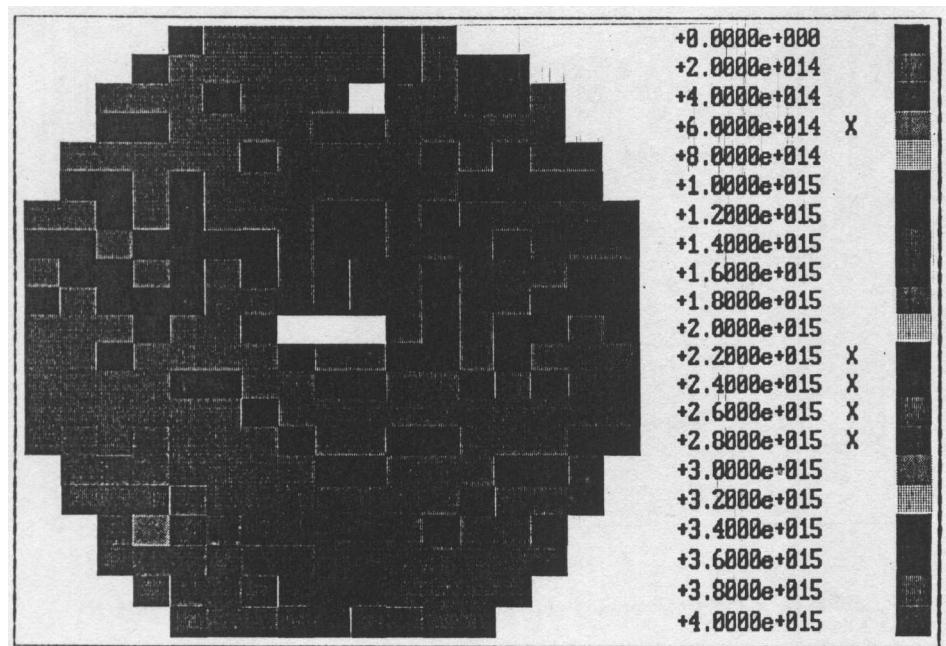


FIGURE 6.1: Rozloženie dotujúcich prímesí $N(x)$ v rôznej hĺbke x pod povrchom polovodiča pre dávku implantácie $4.0 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$.

FIGURE 6.2: Plošné rozloženie V_{fb} určené pri výpočte $N(x)$ z obrázka 6.1.FIGURE 6.3: Plošné rozloženie nameranej dávky implantácie pre profil $N(x)$ z obrázka 6.1.

6.2 Určenie hrúbky oxidovej vrstvy.

Ak poznáme kapacitu oxidovej vrstvy 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 $SiO_2 \epsilon_r = 3.9$. Plošné rozloženie hrúbky oxidovej vrstvy je potom zobrazené na obrázku 6.4.

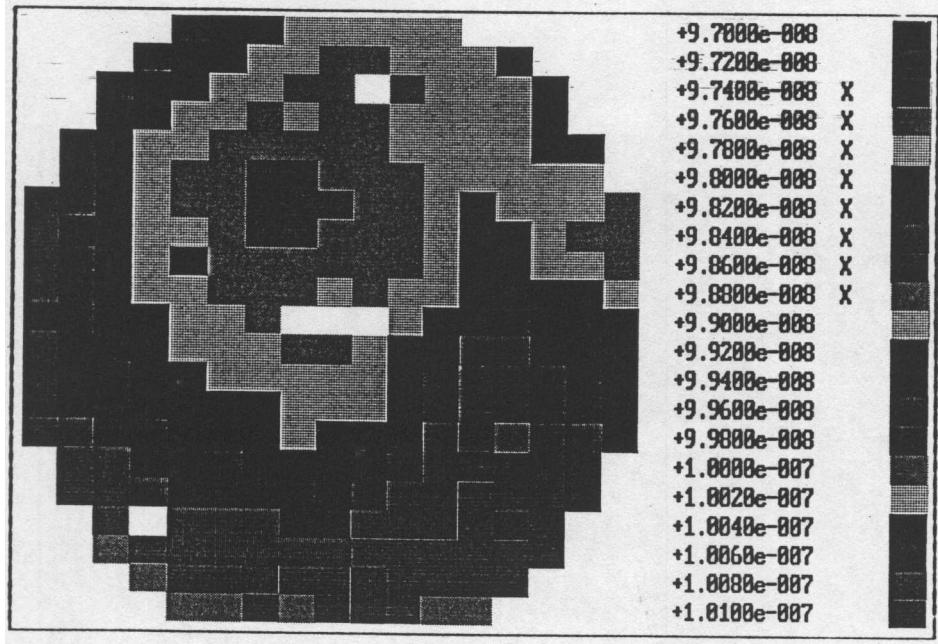


FIGURE 6.4: Plošné rozloženie hrúbky hradlového oxidu h_{ox} .

6.3 Určenie hustoty pascí rozhrania $Si - SiO_2$.

Pre výpočet hustoty pascí rozhrania použijeme porovnanie HF a kvázistatickej C-V závislosti, kde použijeme postup popísany v časti 4.2.1. Možno poznamenať, že pre určenie polohy Fermiho hladiny na povrchu polovodiča použijeme hodnoty povrchového potenciálu $\varphi_s(V_g)$, získané integráciou kvázistatickej C-V závislosti a hodnotu integračnej konštanty φ_{s0} určíme postupom popísaným v dodatku G.

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 závislosti $\varphi_s(V_g)$, ktoré uloží do dátového súboru. Druhý program pre svoju činnosť vyžaduje dátové súbory

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

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

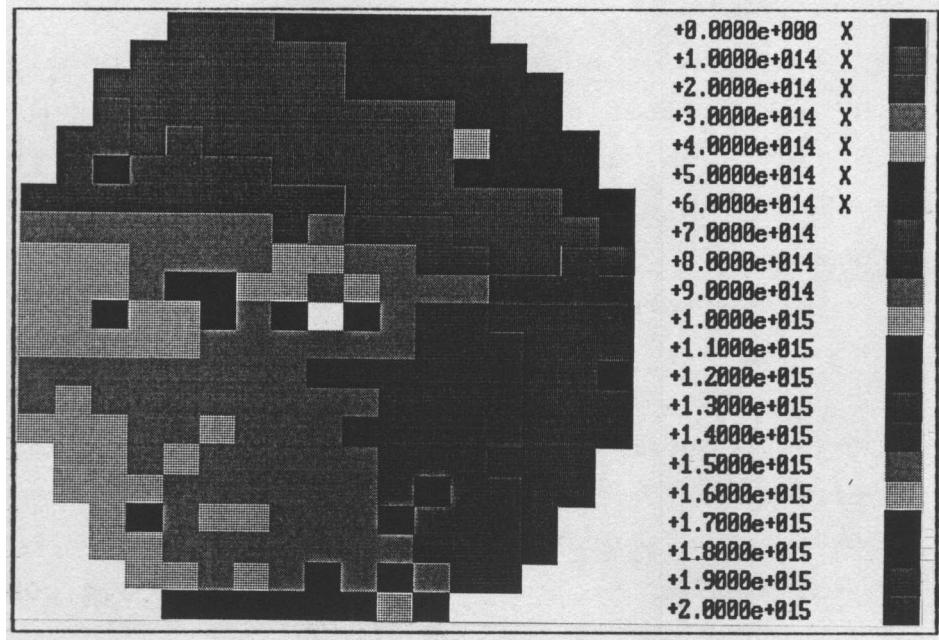


FIGURE 6.5: Plošné rozloženie hustoty pascí rozhrania $Si - SiO_2$ v strede zakázaného pásma.

6.4 Určenie generačného času života minoritných nosičov náboja.

V procese zberu dát metódou konštantnej šírky OPN bol vytvorený dátovy 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 hranice OPN od povrchu polovodiča. Použitie číslicových filtrov v tomto prípade nie je vhodné, pretože máme k dispozícii málo bodov závislosti $dV_g/dt = f(w)$. V tomto prípade možno pužiť aproximáciu lokálnymi polynómami. Teoretický základ aj zdrojový text procedúry v jazyku Algol je uvedený napríklad v [6.1]. Na obrázku 6.6 je zobrazené plošné rozloženie generačnej doby minoritných nosičov náboja, ktorá predstavuje jej strednú hodnotu v oblasti od $0.9\mu m$ do $1.3\mu m$.

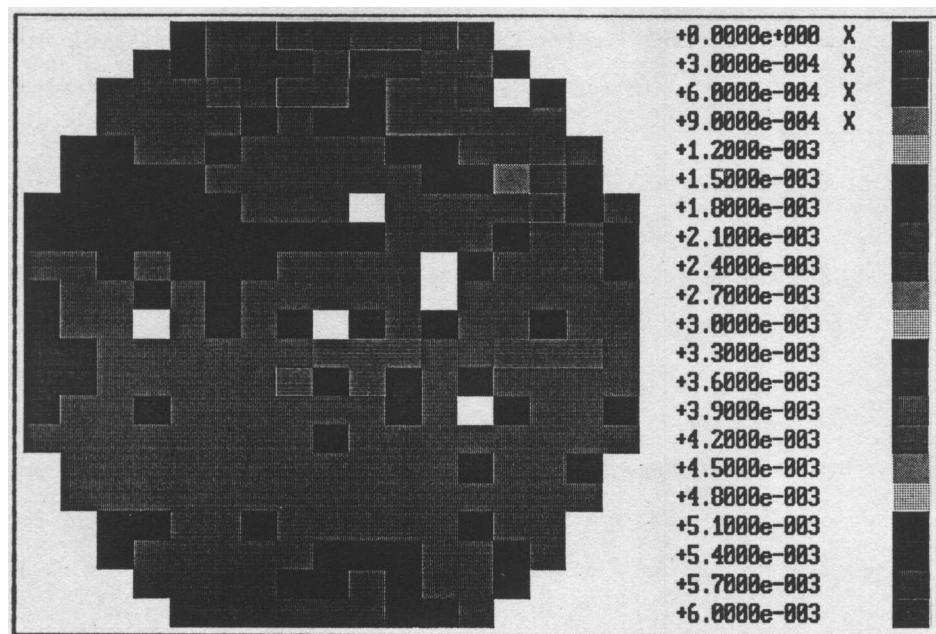


FIGURE 6.6: Plošné rozloženie generačného času života minoritných nosičov náboja pre oblasť polovodiča od $0.9\mu m$ do $1.3\mu m$.

Bibliography

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

Chapter 7

Experimentálne výsledky.

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

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

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

TABLE 7.1: Stredná hodnota a smerodajná odchýlka špecifického odporu testovaných kremíkových dosiek pred technologickým spracovaním.

Zariadenie Prometrix OmniMap RS35 zmeralo pomocou krokovacieho zariadenia hodnotu špecifického odporu v 81 bodoch každej dosky. Na obrázku 7.1 a obrázku 7.2 uvádzame grafické znázornenie rozloženia špecifického odporu, ktoré je taktiež výstupom merania uvedeného zariadenia. Body, v ktorých bol zmeraný špecifický odpor sú na obrázku 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 následovný

- vytvorenie hradloveho oxidu s hrúbkou 100nm
- implantácia P^{31} s energiou 120keV a dávkami $0.6, 1.0, 2.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 20.0, 60.0 \times 10^{15}\text{m}^{-2}$ pod uhlom 7°
- aktivácia pri teplote 1050°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°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 $0.81 \times 10^{-6}\text{m}^{-2}$. Na obrázku 7.3 sú znázornené priebehy koncentračných profilov dotujúcich prímesi 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 obrázku 7.3 zobrazená len jedna kremíková doska.

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

Pre kontrolu reprodukovateľnosti procesu implantácie boli zmerané koncentračné profile 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 tabuľky 7.2 a 7.3, vypočítaná implantačná dávka je vždy menšia ako dávka zadaná v procese implantácie. To je spôsobené jednako tým, že čas implantovalých iónov je zachytená v oxidovej vrstve a jednako neúplnou aktiváciou implantovaných iónov v polovodiči. Aby sme určili závislosť medzi zadanou a vypočítanou dávkou, vypočítali sme lineárnu regresiu koeficient b vzťahu

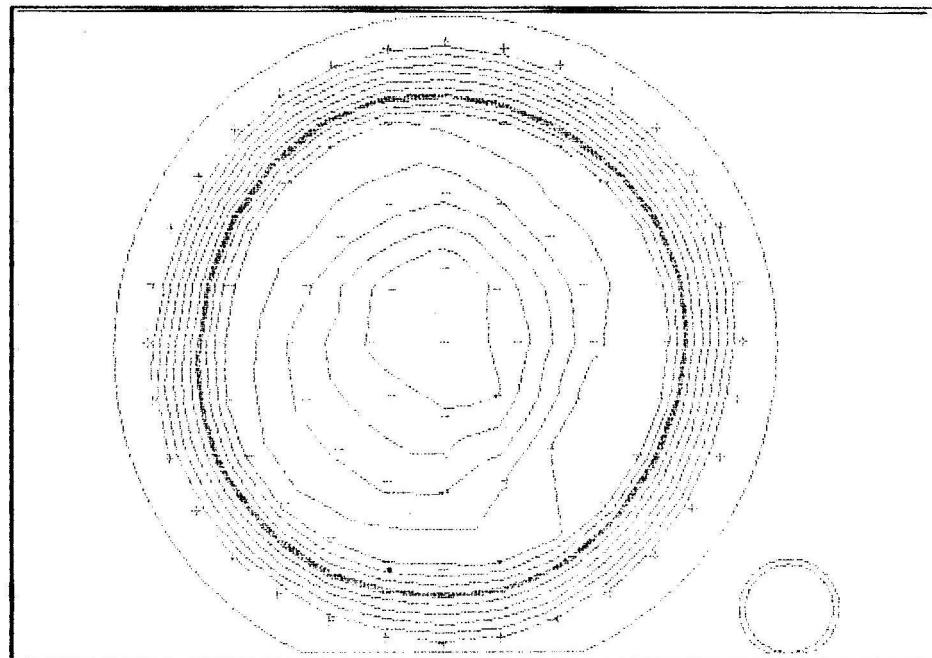


FIGURE 7.1: Plošné rozloženie povrchového špecifického odporu kremíkovej dosky č.16.

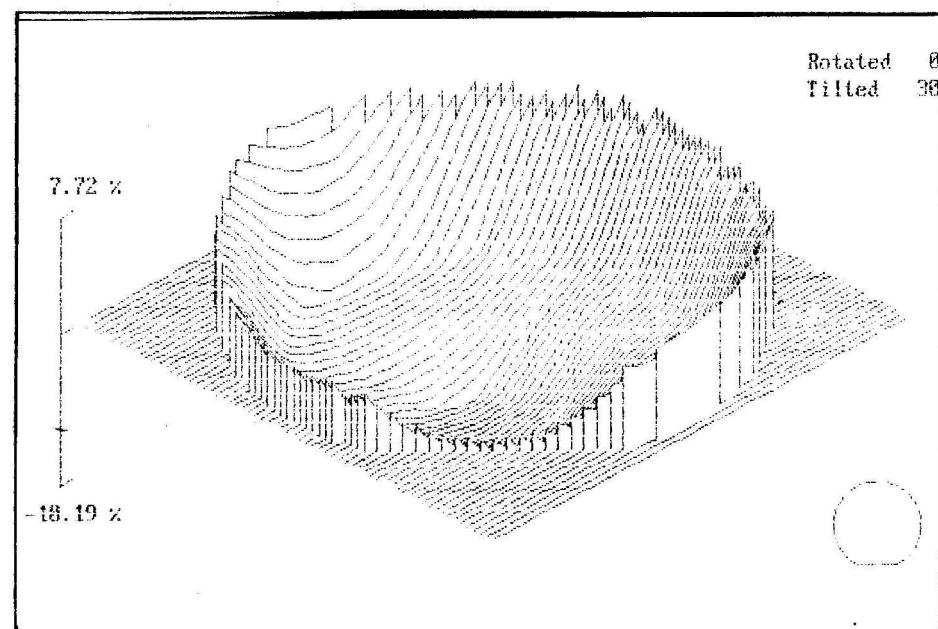


FIGURE 7.2: Plošné rozloženie povrchového špecifického odporu kremíkovej dosky č.16.

$$\bar{D} = bD_i \quad (7.1)$$

ktorý mal hodnotu $b = 0.71$ a zároveň sme zobrazili závislosť $\bar{D} = f(D_i)$ na obrázku 7.4.

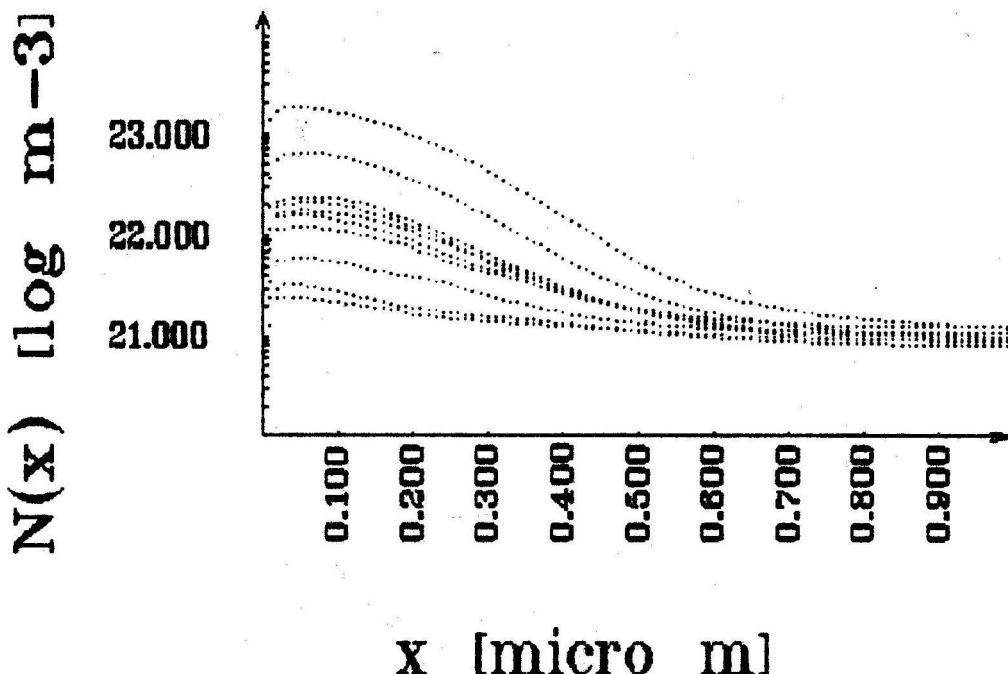


FIGURE 7.3: Hĺbkový profil dotujúcich prímesí v pod povrchovej oblasti polovodiča vytvorený iónovou implantáciou s dávkami $0.6, 1.0, 2.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 20.0, 60.0 \times 10^{15} m^{-2}$. Zobrazené priebehy $N(x)$ predstavujú strednú hodnotu z priebehov, nameraných na 304 štruktúrach MOS každej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

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

č.	$D_i 10^{15} [m^{-2}]$	$\bar{D} 10^{15} [m^{-2}]$	$\delta D 10^{15} [m^{-2}]$
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

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

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

č.	$D_i 10^{15} [m^{-2}]$	$\bar{D} 10^{15} [m^{-2}]$	$\delta D 10^{15} [m^{-2}]$
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

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

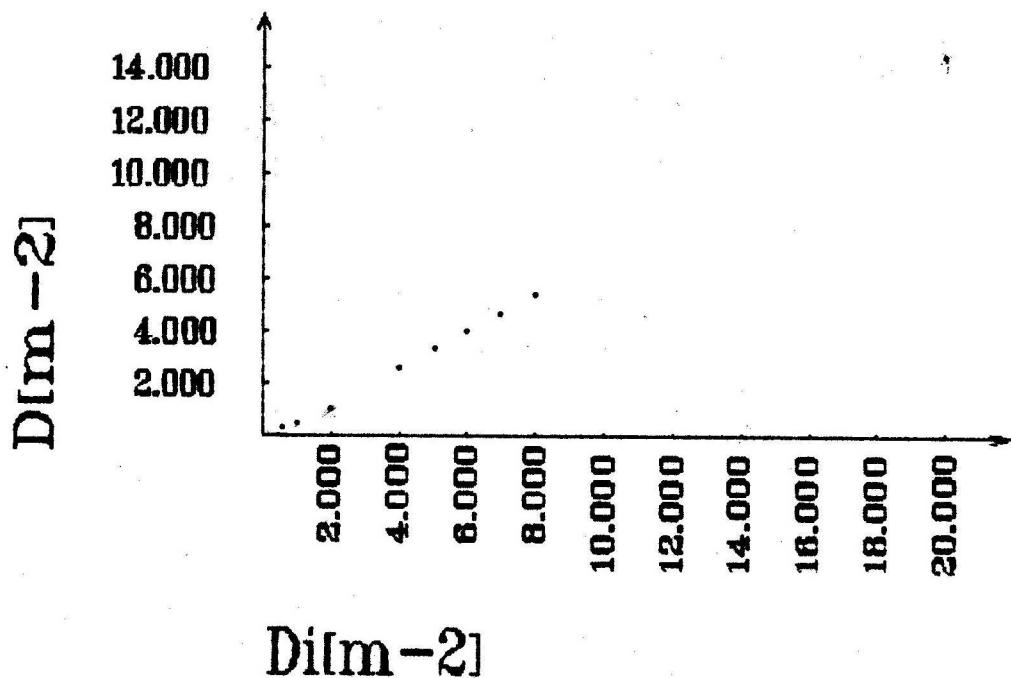


FIGURE 7.4: Závislosť strednej hodnoty $\bar{D} = E(\int(N(x) - N_b)dx)$ od dávky implantovaných iónov D_i . Zobrazené hodnoty sú rádu 10^{15} .

$$R(X, Y) = \frac{E([X - E(X)][Y - E(Y)])}{D(X)D(Y)} \quad (7.2)$$

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 tabuľke 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

$$Y = a + bX$$

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

Pomocou profesionálneho programu, zakúpeného Teslou Pieštany, na simuláciu procesu iónovej implantácie boli vypočítané priebehy koncentrácie prímesi pre dávky 0.6, 5.0 a $60.0 \times 10^{15} m^{-2}$. 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 obrázku 7.5.

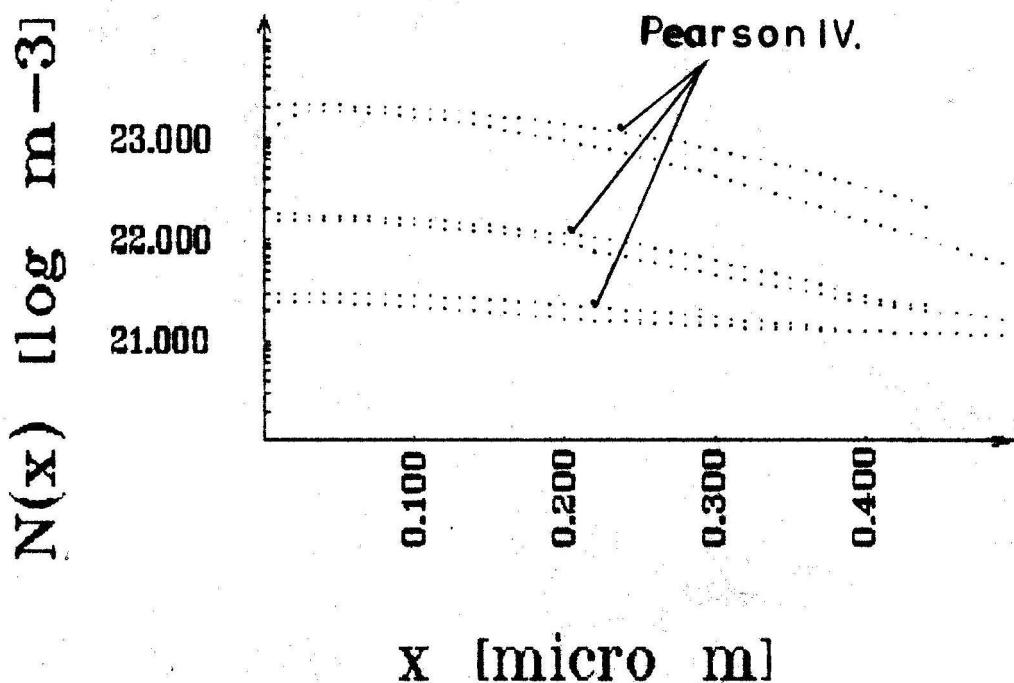


FIGURE 7.5: Porovnanie stredných hodnôt nameraných priebehov $N(x)$ a simulovaných pomocou metódy Pearson IV pre dávky $0.6, 5.0, 60.0 \times 10^{15} m^{-2}$.

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 δV_{fb} . Zároveň sme pomocou tohto istého postupu určili hodnoty \bar{h}_{ox} a δh_{ox} , ktoré sú pre jednotlivé kremíkové dosky uvedené v tabuľke 7.4.

č.	$\bar{V}_{fb}[V]$	$\delta V_{fb}[V]$	$\bar{h}_{ox}[nm]$	$\delta h_{ox}[nm]$
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

TABLE 7.4: Stredná hodnota a smerodajná odchýlka napäťia vyrovnaných pásov a hrúbky oxidu.

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 obrázku 7.6.

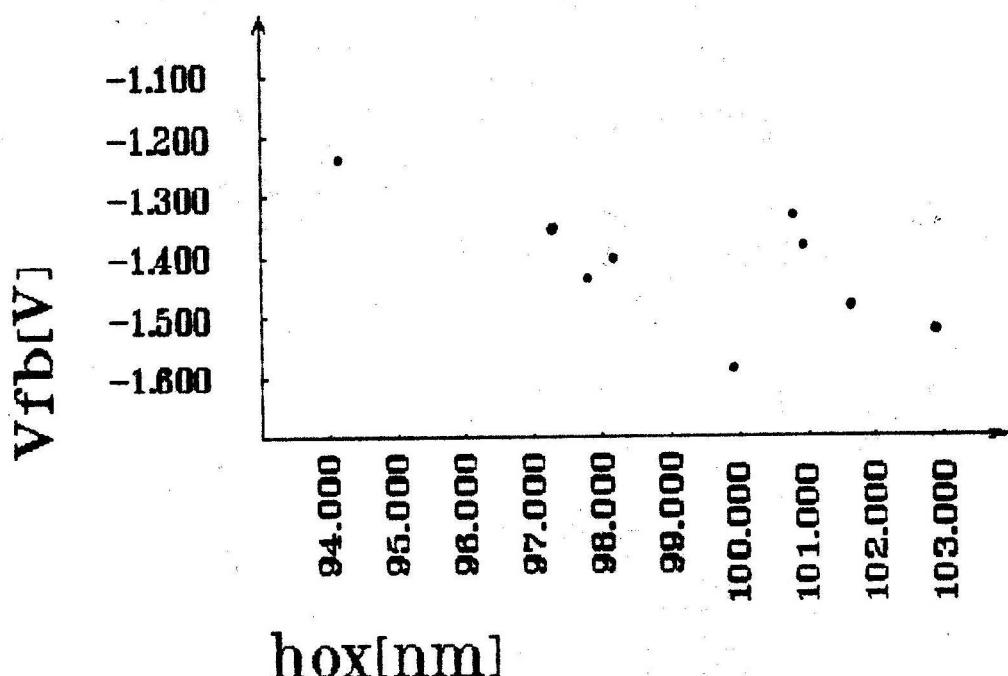


FIGURE 7.6: Závislosť strednej hodnoty \bar{V}_{fb} od strednej hodnoty hrúbky oxidovej vrstvy \bar{h}_{ox} pre kremíkové dosky číslo 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 a 17.

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 $Si - SiO_2$ Q_{dc} a od veľkosti kapacity oxidovej vrstvy C_{ox}

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

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

Pre koeficienty lineárnej regresie

$$V_{fb} = a + bh_{ox}$$

sme dostali hodnoty

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

Na štyroch kremíkových doskách bola určená hustota pascí rozhrania $Si - SiO_2$ D_{it} . Ako vidiet ď z tabuľky 7.5, stredné hodnoty \bar{D}_{it} sa pohybujú v oblasti $2.0 - 5.0 \times 10^{14}$, čo hovorí o dobrej kvalite rozhrania $Si - SiO_2$.

O kvalite kryštálu podáva informáciu veľkosť generáčného 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 0.9 do $1.3\mu m$. Pre všetky dosky sme potom určili strednú hodnotu $\bar{\tau}_g$ a smerodajnú odchýlku $\delta\tau_g$, ktorých hodnoty sú uvedené v tabuľke 7.6. Hodnoty $\bar{\tau}_g$ sa pohybujú v rozmedzí $0.41 - 2.25 ms$, čo hovorí o vysokej kvalite substrátu. Zároveň z tabuľky 7.6 vidieť, že hodnoty $\bar{\tau}_g$ sa pohybujú náhodne a nie je možné nájsť závislosť od ďalších, predtým spomenutých parametrov.

č.	$D_{it}[m^{-2}eV^{-1}]$	$\delta D_{it}[m^{-2}eV^{-1}]$
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}

TABLE 7.5: Stredná hodnota a smerodajná odchýlka hustoty pascí rozhrania $Si - SiO_2$ v strede zakázaného pásma.

č.	$\bar{\tau}_g[ms]$	$\delta\tau_g[ms]$
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

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

Bibliography

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

Chapter 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, zvládnuť 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 následovné výsledky:

1. Vyriešili sme jedno-dimenzionálnu 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:
 - navrhnúť 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 následovných experimentov, implementácia metódy QC vyžaduje vytvorenie dôkladného meracieho pracoviska s dôrazom na minimalizáciu zvodových prúdov a parazitných kapacít.

- Pre meranie generačného času života minoritných nosičov sme implemenovali metódu konštantnej šírky OPN (CCT), ktorá umožňuje efektívne vyhodnocovanie kvality polovodičových substrátorov pre vysoké hodnoty τ_g . Pri tvorbe riadiaceho programu sme navrhli a realizovali algoritmus pre udržanie konštantnej nerovnovážnej kapacity štruktúry MOS a merania závislosti $V_g(t)$.
- 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 [H](#).
- Pri výpočte koncentračných profilov dotujúcich prímesí v podpovrchovej oblasti polovodiča sme aplikovali:
 - korekciu approximácie hlbokého ochudobnenia pri povrchu polovodiča
 - korekciu vzhládom na hustotu pascí rozhrania $Si - SiO_2$
 - výpočet šírky oblasti OPN pomocou approximácie priebehu elektrického potenciálu v polovodiči
 - výpočet priestorového rozloženia dotujúcich atómov z koncentračného profilu majoritných nosičov náboja.
- Vhodnosť použitých approximácií 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 approximácií vhodné.
- Pre rôzne dávky implantácie v rozsahu od 0.6×10^{15} do $60.0 \times 10^{15} m^{-2}$ 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 regresiu 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 hľbkových profilov dotujúcich prímesí v rámci hraníc použiteľnosti kapacitnej metódy s možnosťou sledovať plošné rozloženie v ľubovolnej hĺbke pod povrhom polovodiča. Na základe experimentálnych výsledkov možno konštatovať, že proces implantácie prebiehal na 4 palcových kremíkových substratoch reprodukovateľne s vysokou homogenitou rozloženia prímesí, čím sme overili kvalitu implantačného zariadenia.
9. Predchádzajúce výsledky, získané pri určovaní hľbkových koncentračných profilov, sa využili pri skúmaní vlastností rozhrania $Si - SiO_2$ 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 $\varphi_s(V_g)$ zohľadňuje hľbkový profil prímesí
 - (b) kvázistatická CV metóda, založená na porovnaní experimentálnej a teoretickej CV závislosti.

Z porovnania výsledkov získaných oboma metódami vyplýva, že hustota pascí rozhrania $Si - SiO_2$ v strede zakázaného pásu sa prakticky nelísi. Obe metodiky možno aplikovať na CV závislosti určené pomocou HF a kvázistatickej metódy, alebo na CV závislosť štruktúry MOS určené pomocou QC metódy. Zároveň sme zvládli postup určenia priebehu povrchového potenciálu $\varphi_s(V_g)$ 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 $Si - SiO_2$. Stredná hodnota hustoty pascí rozhrania v strede zakázaného

pásu testovaných dosiek sa pohybovala v intervale od 2.6×10^{14} do $4.4 \times 10^{14} m^{-2} eV^{-1}$.

Tieto hodnoty sú na dolnej hranici rozlišovacej schopnosti použitej metódy a hovoria o dobrej kvalite rozhrania $Si - SiO_2$ 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 $1.3mm$, ktoré sa pohybujú od 0.41 do $2.25ms$, čo hovorí o vysokej kvalite substrátu.

Výhodou použitej metódy je, že vyhodnocuje τ_g z generičného 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 ktoreho vidieť nehomogenitu hrúbky SiO_2 spôsobené nerovnomerným rozložením teploty a turbulenciemi oxidačnej atmosféry v trubici oxidačnej pece.

Stredné hodnoty hrúbky SiO_2 na jednotlivých doskách sa pohybujú v intervale od 94.14 do $102.85nm$, pričom v technologickom procese výroby štruktúr MOS bola požadovaná hodnota $100nm$.

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 Bermannovým modelom mechanizmu termickej oxidácie.

13. Skúmali sme plošné rozloženie napäcia vyrovnaných pásov V_{fb} pre 10 kremíkových dosiek. Stredné hodnoty V_{fb} na jednotlivých kremíkových doskách sa pohybujú v rozsahu od -1.24 do $-2.43V$. 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 počiatocnými podmienkami pomocou metódy prediktor-korektor so štartovacím úsekom Runge-Kutta, hľadali

sme korene nelineárnej rovnice metódou dotyčníc, použili sme číslicové filtre pre vyhľadenie 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 dátu a určené parametre štruktúry MOS, pričom sme zohľadnili vzťahy medzi jednotlivými metodikami merania a určovania parametrov, čo prispieva k väčšej efektívnosti programov a umožňuje ďalšie použitie získaných výsledkov.

Chapter 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 následovných 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 prímesi $N(x)$ pre rôzne hĺbky x
 - hĺbkového profilu času života $\tau_g(x)$ pre rôzne hĺbky x
 - hustoty pascí rozhrania $Si - SiO_2 D_{it}(E_c - E)$ pre rôzne energie v zakázanom páse 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 meraní, spracovanie a zobrazenie výsledkov vybraných parametrov štruktúr MOS s nehomogénym rozložením prímesí v podpovrchovej oblasti polovodiča a ich plošného rozloženia.

4. Skúmanie homogeneity procesu implantácie na 4-palcových kremíkových doskách s rozsahom dávok od 0.6×10^{14} do $60.0 \times 10^{14} m^{-2}$ vzhľadom na:
 - hĺbkový profil aktívnych prímesí
 - vlastnosti rozhrania $Si - SiO_2$
 - 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 profilom dotujúcich prímesí a hĺbkovým profilom 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.

Appendix A

Numerické riešenie Poissonovej rovnice.

Poissonovu rovnicu možno napísať v normalizovanom tvare (Dodatok B)

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

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 následujúcou úvahou [App.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 určime ju z podmienky

$$\alpha(x_1) = 0.01 \quad (\text{A.2})$$

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

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

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

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

aby sme dostali vzťah pre prvú deriváciu potenciálu

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

Počiatočné podmienky pre riešenie rovnice [A.1](#) v oblasti $0 \leq x \leq x_1$ potom tvorí voľne zvolený potenciál v bode x_1 a prvá derivácia potenciálu v bode x_1 vyjadrená vzťahom [A.5](#). Vhodnou volbou potenciálu v bode x_1 a opakovaným numerickým riešením rovnice [A.1](#) z objemu po povrch polovodiča dostaneme súbor priebehov potenciálu v polovodiči od akumulácie po inverziu. Potrebujeme ešte poznáť napätie hradla pre každý priebeh potenciálu v polovodiči pri známej kapacite oxidovej vrstvy. Pre normálové zložky intenzity elektrického poľa na rozhraní oxidu a polovodiča platí vzťah

$$\varepsilon_{ox}E_{ox} = \varepsilon_s E_s \quad (\text{A.6})$$

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

$$v_g = u_s + h_{ox}E_{ox} \quad (\text{A.7})$$

$$v_g = u_s - ku'_s \quad k = h_{ox} \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{ox}} \quad (\text{A.8})$$

kde u_s je hodnota potenciálu na povrchu polovodiča a u'_s jej priestorová derivácia. Po odnormovaní sme tým získali priebeh povrchového potenciálu ako funkciu napäťia hradla (obrázok [1.2](#)). Pre výpočet kapacity štruktúry MOS následovným vzťahom (Dodatok [C](#))

$$\frac{C_{mos}}{C_{ox}} = 1 - \frac{du_s}{dv_g} \quad (\text{A.9})$$

potrebujeme poznáť hodnotu derivácie povrchového potenciálu podľa napäťia hradla. Derivovaním rovnice [A.1](#) podľa v_g dostaneme vzťah

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

kde

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

a tým istým postupom pre A.5 a A.8 dostaneme vzťahy

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

$$w_s - kw'_s = 1 \quad (\text{A.10c})$$

Pre volne zvolenú hodnotu w v bode x_1 vypočítame prvú deriváciu podľa vzťahu A.10b a s oboma počiatočnými podmienkami riešime rovnicu A.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 A.10c. Pretože rovnice A.10a, A.10b a A.10c sú lineárne, platia vzťahy

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

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

Ako výsledok možno vypočítať kapacitu štruktúry MOS

$$\frac{C_{mos}}{C_{ox}} = 1 - \frac{du_s}{dv_g} = 1 - w_s = -kw'_s = -k \frac{\gamma}{\beta - k\gamma} \quad (\text{A.12})$$

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

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

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

$$w_s - kw'_s = 1 \quad (\text{A.13c})$$

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

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

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

Na obrázku 1.3 sú znázornené nízkofrekvenčná, vysokofrekvenčná CV krivka a CV krivka 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 koprocesorom 1 až 2 minúty v dvojnásobnej presnosti operácií s plávajucou čiarkou.

Appendix B

Úprava Poissonovej rovnice do normalizovaného tvaru.

Poissonova rovnica má tvar

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon} \quad (\text{B.1})$$

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

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

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

$$u(x) = \frac{E_i(\infty) - E_i(x)}{kT} = \frac{q\varphi(x)}{kT} \quad (\text{B.3a})$$

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

a pomocou koncentrácie substrátu

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

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

kedž sme použili vzťah pre koncentráciu elektrónov v substráte

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

Potom hustotu náboja môžeme napísť v tvare

$$\rho(x) = -qN_b(e^{u(x)} - e^{2u_f - u(x)} + \alpha(x) - 1) \quad (\text{B.5})$$

kde

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

Dosadením hustoty náboja B.5 a substitúcie B.3 do rovnice B.1 dostaneme

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

Zavedieme efektívnu Debayovu dĺžku

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

na ktorú vzdialenosť x normujeme

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

Môžeme písať Poissonovu rovnicu v normovanom tvaru

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

Appendix C

Výpočet kapacity štruktúry MOS.

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

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

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

Porovnaním vzťahov [C.1a](#) a [C.1b](#) dostaneme vzťah

$$\frac{C_{mos}}{C_{ox}} = 1 - \frac{d\varphi_s}{dV_g} \quad (\text{C.1c})$$

Appendix D

Termodynamická rovnováha v nehomogénne dotovanom substráte.

V prípade termodynamickej rovnováhy platí pre elektrónovú zložku prúdu vzťah

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

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

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

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

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

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

$$N_D(x) = n(x) - \frac{kT\varepsilon}{q^2} \frac{d}{dx} \left[\frac{1}{n(x)} \frac{dn(x)}{dx} \right] \quad (\text{D.4})$$

Appendix E

Zapojenie Q-C metódy a metodika merania parazitných kapacít.

Autori metódy uvádzajú v [App.2, App.3, App.4] podrobny popis analógovej aj digitálnej implementácie Q-C metódy. V oboch implementáciách na meranie kapacity používajú prístroj PAR 410, namiesto ktorého sme v našom prípade použili prístroj HP4280a. Okrem potrebných detailov týkajúcich sa zapojenia metódy autorí 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 zoznámenie sa s podrobným popisom v [App.2, App.3, App.4].

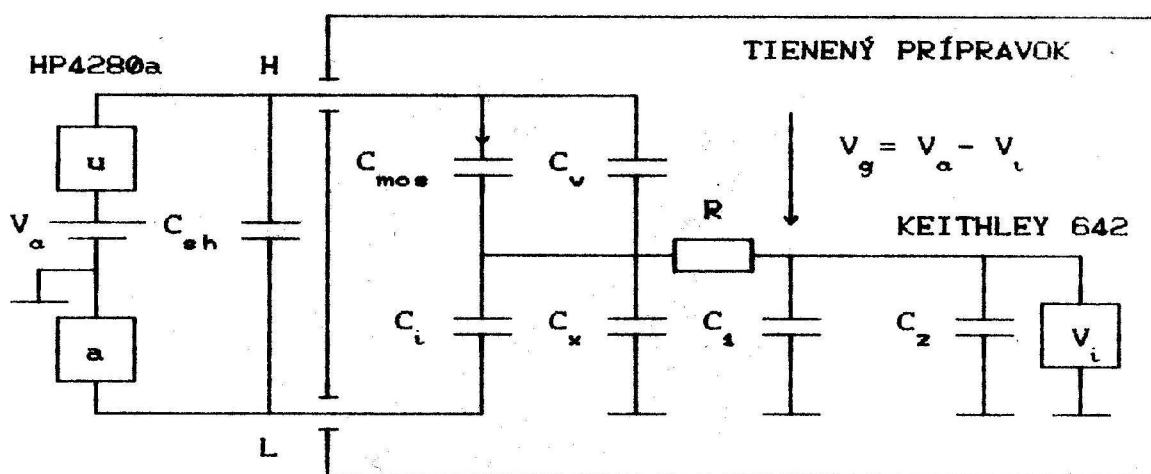


FIGURE E.1: Zapojenie Q-C metódy implementované na KME EF SVŠT.

Na obrázku E.1 je znázornené detailné zapojenie pracovného stolíka a meracích prístrojov Q-C metódy. V ľavej časti obrázku je znázornený merací prístroj HP4280a, ktorý na našej schéme pozostáva zo zdroja jednosmerného napäťa 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 štruktúry a C_i predstavuje napäťovo nezávislý kondenzátor. Kapacita C_w znázorňuje parazitnú kapacitu medzi stolíkom, 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 voltmetriu 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 nemeria zložku prúdu tečúcu zo spoločného bodu cez kondenzátory C_x , C_1 a C_2 na zem. Uvedenú skutočnosť treba zohľadniť pri vyhodnotení vysokofrekvenčného merania. Pre konečné vyhodnotenie nameraných údajov je potrebné vyriešiť následovné úlohy:

- určenie kapacity C_i
- určenie parazitnej kapacity C_w
- určenie parazitnej kapacity C_x
- určenie kapacity $C_{iLF} = C_i + C_1 + C_2$
- korekcia meranej vysokofrekvenčnej kapacity C_m vzhľadom na prúd tečúci cez $C_x + C_1 + C_2$ na zem.

E.1 Určenie parazitnej kapacity C_w .

Podrobnejší popis metodiky merania parazitnej kapacity C_w je v dodatku 2. literatúry [App.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. napäťím V_a prividieme štruktúru MOS do akumulácie a odčítame hodnoty $V_a = V_{a0}$ a $V_i = V_{i0}$.

3. priviedieme štruktúru MOS vyšším napäťom V_a do akumulácie a odčítame hodnoty $V_a = V_{a1}$ $V_i = V_{i1}$. Zo zákona zachovania náboja vyplýva

$$(C_{ox} + C_w)(V_{g1} - V_{g0}) = (C_{iLF} + C_x)(V_{i1} - V_{i0}) \quad (\text{E.1})$$

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 $V_a = V_{a2}$ $V_i = V_{i2}$.
6. zvýšime napätie V_a a odčítame hodnoty $V_a = V_{a3}$ $V_i = V_{i3}$. Zo zákona zachovania náboja vyplýva

$$C_w(V_{g3} - V_{g2}) = (C_{iLF} + C_x)(V_{i3} - V_{i2}) \quad (\text{E.2})$$

7. porovnaním vzťahov [E.1](#) a [E.2](#) dostaneme výraz pre výpočet kapacity C_w , ktorú môžeme vyhodnotiť za predpokladu, že poznáme kapacitu oxidovej vrstvy štruktúry MOS.

$$C_w = C_{ox} \frac{1}{\frac{\frac{V_{g3}-V_{g2}}{V_{g1}-V_{g0}}}{\frac{V_{i3}-V_{i2}}{V_{i1}-V_{i0}}} - 1} \quad (\text{E.3})$$

E.2 Určenie parazitnej kapacity C_x .

V dodatku 10 literatúry [[App.4](#)] sa nachádza popis priameho merania parazitnej kapacity C_x . Avšak experimentálne výsledky ukazujú, že toto meranie je zaťazené veľkou chybou a jeho reprodukovateľnosť je malá. Preto sme zvolili v našom experimente postup, ktorého princíp je načernutý v dodatku 5 literatúry [[App.4](#)]. Ako možno vidieť v dodatku [E.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 vyhodnenení dát nameraných Q-C metódou sme na variáciu hodnoty C_x použili metódu delenia intervalov.

E.3 Určenie kapacity C_{iLF} .

V dodatku 10 literatúry [[App.4](#)] sa nachádza popis priameho merania parazitnej kapacity C_{iLF} . Avšak podobne ako pri meraní C_x experimentálne výsledky ukazujú, že toto meranie je zaťazené 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

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

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

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

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

E.4 Korekcia vysokofrekvenčnej kapacity C_m .

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

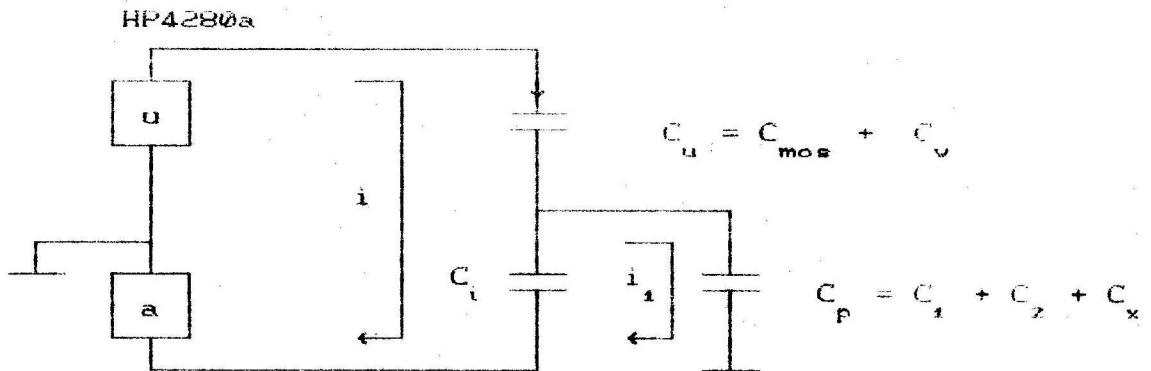


FIGURE E.2: Ekvivalentné zapojenie Q-C metódy pre vysokofrekvenčné meranie.

Ako vidieť z obrázku E.2 ampérmetr prístroja HP4280a nemeria prúd i_1 tečúci cez kondenzátor C_p . Kapacitu C_m , ktorú pomocou tohto prístroja nameriame, môžeme vyjadriť vzťahom

$$C_m = \frac{C_u C_{iHF}}{C_{iHF} + C_u + C_p} \quad (\text{E.6})$$

V kapitole 3.3 sú uvedené vzťahy pre výpočet vyskofrekvenčnej kapacity štruktúry MOS. Aby výsledky, získané zo vzťahov 3.3 neboli ovplyvnené uvedenou skutočnosťou, treba urobiť následujúce korekcie (podľa dodatku 1 literatúry [App.4])

$$C_{iHF} = C_{iHF}k, \quad G_m = G_mk, \quad C_m = C_mk \quad (\text{E.7})$$

, kde

$$k = 1 + \frac{C_x}{C_{iHF}} \quad (\text{E.8})$$

Appendix F

Určenie povrchového potenciálu φ_s z Q-C metódy.

Spôsob určenia povrchového potenciálu štruktúry MOS je popísany v článku [App.3]. Tu uvedieme jeho hlavnú myšlienku.

Pre zmenu nábojov na sériovo-paralelnom zapojení kondenzátorov Q-C metódy môžeme písať (pozri dodatok E).

$$\Delta Q_x + \Delta Q_i = \Delta Q_w + \Delta Q_{mos} \quad (\text{F.1})$$

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

$$\Delta Q_{mos} = (C_{iLF} + C_x)V_i - C_wV_g \quad (\text{F.2})$$

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

$$\Delta Q_{mos} = C_{ox}(V_g - \varphi_s + \varphi_{s0}) \quad (\text{F.3})$$

a kombináciou F.2 a F.3 môžeme písať výsledný vzťah

$$\varphi_s = \varphi_{s0} - \frac{C_{iLF} + C_x}{C_{ox}}V_i + \left[1 + \frac{C_w}{C_{ox}}\right]V_g \quad (\text{F.4})$$

Appendix G

Určenie povrchového potenciálu φ_{s0} pri nulovom napäti hradla.

Vo vzťahu F.4 vystupuje výraz φ_{s0} , 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 nachadzajúcimi 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 [App.3]. Šírku OPN pre experimentálnu závislosť $\varphi_s(w)$ určíme zo vzťahu

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

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

$$\beta\varphi_s = \frac{1}{2} \left[\frac{w}{L_{DE}} \right]^2 + \frac{1}{N_B L_{DE}^2} \int_0^w x[N(x) - N_B] dx + 1 \quad (\text{G.2})$$

kde L_{DE} je extrinická Debayova dĺžka, N_B koncentrácia substrátu a $N(x)$ priebeh koncentrácie dotujúcich prímesí v podpovrchovej oblasti polovodiča. Na obrázku G.1 je znázornený priebeh uvedených závisostí pre namerané dátá Q-C metódy z obrázku 3.4. Hodnotu φ_{s0} potom určíme z rozdielu experimentálnej a teoretickej závislosti $\varphi_s(w)$ v hĺbke w , ktorá zodpovedá stavu ochudobnenia štruktúry MOS. Ako je uvedené v [App.3] approximácia G.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.

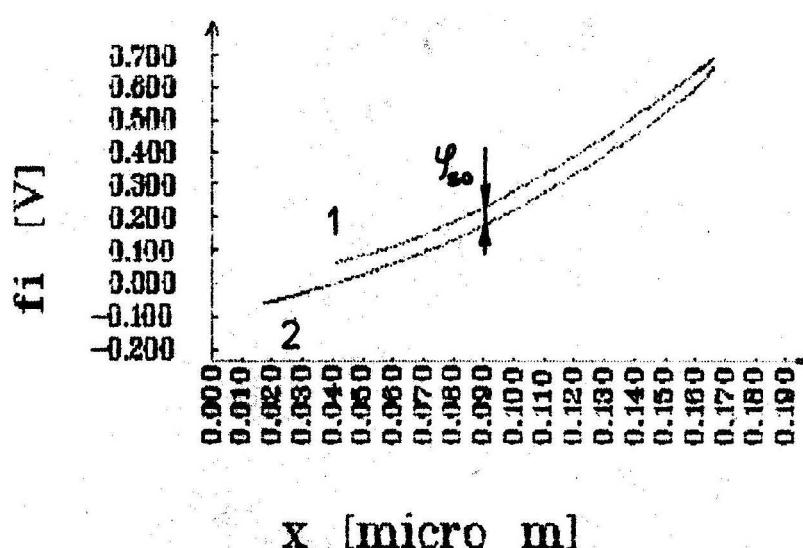


FIGURE G.1: Priebeh povrchového potenciálu ako závislosť šírky OPN pre štruktúru MOS privedenú do stavu hlbokého ochudobnenia. Krivka 1 predstavuje priebeh $\varphi(x)$ vypočítaný podľa vzťahu G.2 a krivka 2 znázorňuje závislosť určenú z experimentálnych dát pomocou vzťahu F.4.

Appendix H

Programy zberu, spracovania a zobrazenia dát pre plošné rozloženie parametrov štruktúr MOS.

I. PROGRAMY ZBERU DAT.

Vsetky programy zberu dat pouzívajú pre riadenie krokovacieho zariadenia programy:

- * ZONDUP.EXE - zdvih stolika
- * ZONDDN.EXE - spustenie stolika
- * ZONDST.EXE - posuv stolika

Informacie o pohybe krokovacieho zariadenia citaju zo suboru Z.XY

1. ZCT.EXE - hlavný program metody CCT

segmenty:

- * ZCT1.EXE - inicializácia zbernice IMS-2 a prístrojov
- * ZCT2.EXE - meranie zavislosti V (t) a ukladanie dV /dt do výstupného suboru
- * ZCT9.EXE - uvedenie zbernice IMS-2 do pôvodného stavu

2. ZHF.EXE - hlavný program rovnovaznej a nerovnovaznej HF CV metody
segmenty:

- * ZHF1.EXE - inicializácia zbernice IMS-2 a prístrojov
- * ZHF2.EXE - meranie zavislosti C (V)

- * ZHF3.EXE - vyhľadenie nameraných dat a uloženie do výstupného súboru
- * ZHF9.EXE - uvedenie zbernice IMS-2 do pôvodného stavu

3. ZLF.EXE - hlavný program kvazistatickej CV metody segmenty:

- * ZLF1.EXE - inicializácia zbernice IMS-2 a prístrojov
- * ZLF2.EXE - meranie zavislosti C (V)
- * ZLF3.EXE - vyhľadenie nameraných dat, interpolácia a uloženie do výstupného súboru
- * ZLF9.EXE - uvedenie zbernice IMS-2 do pôvodného stavu

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

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 kvazistatickej CV metody

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 DAT.

6. ZNX.EXE - výpočet koncentracioného profilu N(x)
7. ZNB.EXE - výpočet koncentrácie substrátu N
8. ZFV.EXE - výpočet povrchového potenciálu ako funkcie napäťia hradla f (V)
9. ZDF.EXE - výpočet hustoty pasci rozhrania D
10. ZTX.EXE - výpočet generacioného času života minoritných nosičov náboja t (x)
11. ZWOX.EXE - výpočet hrubky oxidu h

12. ZYXI.EXE - vypocet integralnej hodnoty $Y(x)$
13. ZYXM.EXE - vypocet strednej hodnoty, smerodajnej odchylky a linearnej regresie
14. ZKORFF.EXE - vypocet korelacneho koeficientu medzi parametrami zo suborov Subor1 <> Subor2
15. ZKORYX.EXE - vypocet korelacneho koeficientu zavislosti $Y(x)$

III. PROGRAMY GRAFICKEHO ZOBRAZENIA DAT.

16. ZGF.EXE - zobrazenie zavislosti $Y(x)$ s popisom osi
17. ZSURF.EXE - plosne zobrazenie rozlozenia parametrov a funkcnych zavislosti $Y(x)$, pre ruzne x
18. ZVIEW.EXE - zobrazenie jednotlivych zavislosti $Y(x)$
19. ZVIEWD.EXE - zobrazenie jednotlivych zavislosti $Y_1(x)$ a $Y_2(x)$

IV. POMOCNE PROGRAMY.

20. BELL.EXE - alarm
21. ZASCII.EXE - konverzia binarneho formatu na ASCII
22. ZERR.EXE - vypis pozicii na doske s chybne nameranymi datami
23. ZREPLC.EXE - vymena zaznamov v datovom subore
24. ZTRUNC.EXE - skratenie datoveho suboru

Bibliography

- [App.1] El- Sissi H., Cobbold R.S.C. : Electronic Letters 25 (1973) s.594.
- [App.2] Nicollian E.H., Brews J.R. : Solid St. Electron. 27 (1984) s.953.
- [App.3] Brews J.R., Nicollian E.H. : Solid St. Electron. 27 (1984) s.963.
- [App.4] Boulin D.M., Brews J.R., Nicollian E.H. : Solid St. Electron. 27 (1984) s.977.
- [App.5] Brews J.R. : Solid St. Electron. 25 (1982) s.375.

Index

MOS

ideal structure, 2, 3

Poisson equation, 3

surface potential, 3