

Numerische Simulation und
Messung der Mikrowellenreflexion an
kristallinem Silizium

im Fachbereich Physik
der Freien Universität Berlin
eingereichte Dissertation

von
Olaf Hahneiser

1998

Disputation: 30.06.1998

1. Gutachter: Prof. Dr. W. Brewer (FU Berlin)

2. Gutachter: Prof. Dr. D. Bräunig (TU Berlin)

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Mikrowellenmeßtechnik.....	3
2.1 Ausbreitung der Mikrowellen	3
2.2 Mikrowellenreflexion.....	4
2.3 TRMC-Methode	9
2.4 FRMC-Methode	11
3. Siliziumoberfläche.....	17
3.1 Passivierung.....	17
3.2 Modell der Grenzfläche.....	18
3.3 Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit	19
4. Simulationsmodell	29
4.1 Halbleiter-Grundgleichungen.....	29
4.2 Modellierung des Volumens	31
4.2.1 Optische Generation	31
4.2.2 Volumenrekombination.....	32
4.3 Modellierung der Oberfläche	36
4.3.1 Oberflächenrekombination	36
4.3.2 Ladung der Grenzfläche	38
4.4 Randbedingungen.....	40
4.5 Lösen der Grundgleichungen.....	41
4.5.1 Existenz und Eindeutigkeit.....	41
4.5.2 Skalierung.....	42
4.5.3 Methode der finiten Differenzen	43
4.5.4 Lösungsalgorithmus.....	45
4.6 Wahl der Parameter	46

5.	Meßergebnisse und Diskussion	53
5.1	n-dotiertes Silizium	53
5.1.1	TRMC-Messungen	53
5.1.2	FRMC-Messungen	57
5.1.3	Echte Lebensdauer	63
5.1.4	Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit	69
5.2	p-dotiertes Silizium	70
5.2.1	TRMC-Messungen	70
5.2.2	FRMC-Messungen	77
6.	Zusammenfassung	83
7.	Anhang	85
7.1	Literaturverzeichnis.....	85
7.2	Symbolverzeichnis	89
7.3	Danksagung.....	93
7.4	Lebenslauf	94

7.2 Symbolverzeichnis

Hier sind die meisten der verwendeten Symbole tabelliert. Ihre Dimension kann von den gebräuchlichen Einheiten abweichen. So wird z.B. die Dicke L des Siliziums in μm und nicht in m angegeben.

Symbol	Beschreibung	Dimension
a	Hohlleiterinnenmaß	m
A	Fresnel-Koeffizient	1
a_1, a_3	Parameter der Zustandsdichte (Oberfläche)	$\text{m}^{-2} \cdot \text{J}^{-1}$
a_2	Parameter der Zustandsdichte (Oberfläche)	J
b	Hohlleiterinnenmaß	m
c_0	Vakuum-Lichtgeschwindigkeit	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
c_n	SRH-Ratenparameter für Elektronen (Volumen)	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
c_p	SRH-Ratenparameter für Löcher (Volumen)	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
c_{SRH}	SRH- Ratenparameter (Volumen)	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
d	Länge der Raumladungszone	m
d	Durchmesser des Laserspots auf der Probe	m
D_n	Diffusionskonstante der Elektronen	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
D_p	Diffusionskonstante der Löcher	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
E	Energie eines Trap-Niveaus	J
\vec{E}	elektrisches Feld	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$
E_C	Energie des Leitungsbandes	J
E_F	Fermi-Energie im thermodynamischen Gleichgewicht	J
E_{gap}	Energielücke	J
E_n	Quasi-Ferminiveau der Elektronen	J
E_p	Quasi-Ferminiveau der Löcher	J
E_{Ph}	Photonenenergie	J
E_V	Energie des Valenzbandes	J
f	Korrekturfaktor	1
f_0	Fermi-Funktion im thermodynamischen Gleichgewicht	1
f_A	Besetzungsfunktion der Akzeptor-Traps (Oberfläche)	1

f_D	Besetzungsfunktion der Donator-Traps (Oberfläche)	1
f_T	Besetzungsfunktion der Volumen-Traps	1
G	optische Generationsrate	$m^{-3} \cdot s^{-1}$
h	Plancksche Wirkungsquantum	$J \cdot s$
\bar{H}	magnetisches Feld	$A \cdot m^{-1}$
j	(Gesamt-) Strom	$A \cdot m^{-2}$
j_n	Elektronenstrom	$A \cdot m^{-2}$
j_p	Löcherstrom	$A \cdot m^{-2}$
kT	Boltzmann-Faktor	J
L	Dicke des Siliziums	m
m	FRMC-Modulationswert	1
n	Elektronenkonzentration im Leitungsband	m^{-3}
N	Zustandsdichte (Oberfläche)	$m^{-2} \cdot J^{-1}$
N	Anzahl der Rasterpunkte	1
n_0	n im thermodynamischen Gleichgewicht	m^{-3}
n_1	SRH-Abkürzung	m^{-3}
N_A	Akzeptor-Zustandsdichte (Oberfläche)	$m^{-2} \cdot J^{-1}$
N_C	effektive Zustandsdichte im Leitungsband	m^{-3}
N_D	Donator-Zustandsdichte (Oberfläche)	$m^{-2} \cdot J^{-1}$
N_{dot}	Konzentration der ionisierten Dotieratome	m^{-3}
n_i	intrinsische Ladungsträgerkonzentration	m^{-3}
N_T	Zustandsdichte der Volumentraps	m^{-3}
n_{trap}	getrapte Elektronendichte (Oberfläche)	m^{-2}
N_V	effektive Zustandsdichte im Valenzband	m^{-3}
p	Löcherkonzentration im Valenzband	m^{-3}
P	Lichtintensität	$W \cdot m^{-2}$
p_0	p im thermodynamischen Gleichgewicht	m^{-3}
p_1	SRH-Abkürzung	m^{-3}
P_{abs}	absorbierte Mikrowellenleistung	W
P_{in}	eingestrahle Mikrowellenleistung	W
P_{max}	Lichtintensität im Maximum des TRMC-Pulses	$W \cdot m^{-2}$

P_{ref}	reflektierte Mikrowellenleistung	W
P_{trap}	getrappte Löcherdichte (Oberfläche)	m^{-2}
q	Elementarladung	C
Q_{fix}	Dichte der festen Oxid- bzw. Nitridladungen	m^{-2}
\vec{r}	Ortsvektor	m
r	Reflexion	1
R	Reflexionsfaktor	1
R	stationäre Rekombinationsrate (Volumen)	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
$r_1 \dots r_4$	SRH-Übergangsraten	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
R_n	Rekombinationsrate der Elektronen (Volumen)	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
R_p	Rekombinationsrate der Löcher (Volumen)	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
R^S	stationäre Rekombinationsrate (Oberfläche)	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
R^{vol}	Volumenrekombinationsrate (räumlich gemittelt)	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
R_n^S	Rekombinationsrate der Elektronen (Oberfläche)	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
R_p^S	Rekombinationsrate der Löcher (Oberfläche)	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
s	Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
s^*	effektive Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
\tilde{s}	differentielle Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
t	Zeit	s
U	gesamte Rekombinationsrate (räumlich gemittelt)	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
U	Spannung	V
U_{Ph}	Photospannung	V
U^S	virtuelle Oberflächenrekombinationsrate	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
x, y, z	Komponenten des Ortsvektors \vec{r}	m
α	Absorptionskoeffizient	m^{-1}
α	Iterationsindex	1
δ_c	SRH-Ratenparameter geladener Übergänge (Oberfläche)	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
δ_n	SRH-Ratenparameter neutraler Übergänge (Oberfläche)	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Δn	Überschußkonzentration der freien Elektronen	m^{-3}
Δp	Überschußkonzentration der freien Löcher	m^{-3}
$\Delta\sigma$	Photoleitfähigkeit	$(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$

Δt	Zeitintervall	s
ϵ_0	elektrische Feldkonstante	C / (V · m)
ϵ_r	relative Dielektrizitätskonstante	1
ϕ	Photonenflußdichte	m ⁻² · s ⁻¹
γ	Ausbreitungskonstante	m ⁻¹
Γ	Reflexionskoeffizient	1
λ	Lichtwellenlänge	m
λ	Hohlleiterwellenlänge	m
μ_0	magnetische Feldkonstante	V · s / (A · m)
μ_n	Beweglichkeit der Elektronen	m ² / (V · s)
μ_p	Beweglichkeit der Löcher	m ² / (V · s)
ν	Mikrowellenfrequenz	s ⁻¹
ν	FRMC-Modulationsfrequenz	s ⁻¹
ρ	Ladungsdichte	C · m ⁻³
ρ	spezifischer Widerstand	$\Omega \cdot m$
σ	Grenzflächenladung	C · m ⁻²
σ	Leitfähigkeit	($\Omega \cdot m$) ⁻¹
τ	echte Lebensdauer	s
τ_{eff}	effektive Lebensdauer	s
τ_n	SRH-Lebensdauer der Elektronen (Volumen)	s
τ_p	SRH-Lebensdauer der Löcher (Volumen)	s
τ_S	Oberflächenlebensdauer	s
τ_{SRH}	SRH-Lebensdauer (Volumen)	s
τ_{vol}	Volumenlebensdauer	s
τ^*	differentielle Lebensdauer	s
Ψ	elektrisches Potential	V
Ψ_S	Oberflächenbandverbiegung	V

7.3 Danksagung

Zum Gelingen der Dissertation, die für den Verfasser ein großer, für die Menschheit jedoch nur ein kleiner Schritt ist, haben mehrere Personen beigetragen. Ihnen sei an dieser Stelle gedankt.

Die Betreuung dieser Arbeit wurde in der Endphase von Dr. Marinus Kunst übernommen. Die wissenschaftlichen Diskussionen in entspannter Atmosphäre waren unentbehrlich. Marinus, vielen Dank!

Dr. L. Elstner stand mir für Fragen, die im Rahmen der Programmentwicklung auftraten, stets zur Seite.

Prof. Dr. W. Brewer und Prof. Dr. D. Bräunig sei für die Bereitschaft gedankt, sich als Gutachter und Ansprechpartner zur Verfügung zu stellen, noch bevor von dieser Arbeit auch nur eine einzige Zeile geschrieben war.

Die Präparation der Proben wurde von G. Keiler, R. Boelke, B. Rabe, D. Patzek und J. Krause übernommen. Die CV- und SPV- Charakterisierungen führten B. Steudel und Dr. K. Kliefoth aus der Arbeitsgruppe von Dr. W. Füssel durch.

Dr. Rainer Eichberger und Herbert Moegelin waren mir beim Verändern des FRMC-Meßplatzes behilflich.

Das inhaltliche Korrekturlesen des vierten Kapitels übernahm Dr. Rudi Brüggemann.

Auf die Suche nach Rechtschreibfehlern begaben sich Silke Uhlmann, Torsten Rentel und Christian Meißner. Dies gibt dem Verfasser die Möglichkeit, auf sie zu verweisen, falls nicht alle Fehler beseitigt sein sollten.

Zwei Sätze werden mir sicherlich in Erinnerung bleiben. Der eine stammt von Prof. Dr. W. Brewer, als mich wissenschaftliche Zweifel überkamen: „Herr Hahneiser, dort ist etwas, wir müssen es nur finden.“ Der andere stammt von Dr. Hubert Vogler beim Genuß eines Traubensaftes (hell und vergoren): „Es gibt ein Leben nach der Promotion.“

7.4 Lebenslauf

- 07.07.1968 geboren in Krefeld-Uerdingen
- 09/1974 - 06/1987 Schulzeit in Berlin (Abschluß: Abitur)
- 10/1987 Beginn des Physikstudiums an der FU Berlin
- 01/1993 - 12/1993 Diplomarbeit bei Siemens (Medizintechnik) in Erlangen
Thema: Entwicklung und Erprobung einer SQUID-Sensor-
anordnung zur Messung biomagnetischer Felder
- 04/1994 Beendigung des Studiums an der FU Berlin (Abschluß: Diplom)
- 10/1994 - 03/1998 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Hahn-Meitner-Institut
in Berlin-Adlershof und Berlin-Wannsee