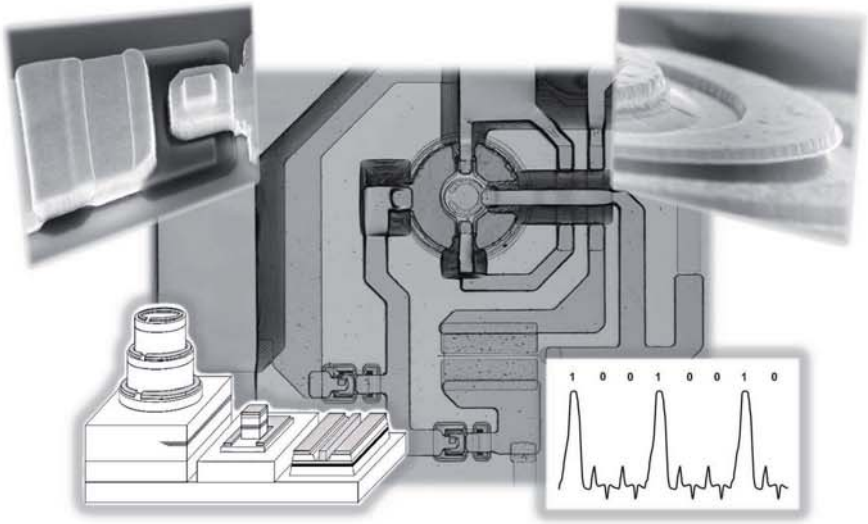
Artur Poloczek

Gestapelte PIN-Dioden und Resonanztunneldioden in opto-elektronischen Empfängerschaltungen hoher Funktionsdichte



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Gestapelte PIN-Dioden und Resonanztunneldioden in optoelektronischen Empfängerschaltungen hoher Funktionsdichte

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der
Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigte Dissertation

von

Diplom-Ingenieur
Artur Christoph Poloczek

aus Wadowitz

Referent: Prof. Dr. rer. nat. F.-J. Tegude
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. D. Jäger

Tag der mündlichen Prüfung: 06.07.2011

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.
1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2011
Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2011

978-3-86955-908-7

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2011
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.
1. Auflage 2011
Gedruckt auf säurefreiem Papier.

978-3-86955-908-7

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

für meinen Vater

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Symbole, Konstanten, chemische Formeln und Abkürzungen IV

1 Einleitung und Aufbau der Arbeit 1

1.1 Motivation und Aufgabenstellung 1

1.2 Gliederung der Arbeit 4

2 Relevante Bauelemente und Grundschaltungen 6

2.1 PIN-Diode 6

2.1.1 Aufbau 7

2.1.2 Absorption von Licht und Photostrom 8

2.1.3 Empfindlichkeit 9

2.1.4 Reduzierung der Reflektivität 11

2.1.5 Gleichstromverhalten 12

2.1.6 Hochfrequenzbetrachtung 14

2.1.7 Zusammenfassung und Diskussion 18

2.2 Resonanztunneldiode 20

2.2.1 Aufbau und Funktionsprinzip 20

2.2.2 Großsignaldynamik 24

2.3 Monostabiles-Bistabiles Logik Element (MoBiLE) 26

2.3.1 Aufbau und Funktion 26

2.3.2 Optischer Steuereingang 28

2.3.3 Einfluss der RTD-Hysterese auf das Schaltverhalten 29

2.4 Heterostruktur-Feldeffekttransistor (HFET) 31

2.4.1 Funktionsprinzip 31

2.4.2 Schichtaufbau und Technologie 32

3 Technologieverfahren 34

3.1 Vertikale Strukturierung (Ätztechnik) 34

3.1.1 ICP-RIE Trockenätzsystem 36

3.2 Laterale Strukturierung durch die Abhebetechnik (Lift-Off) 40

3.3 SiN_x-Abscheidung durch das ECR-PECDV System 43

3.4 Elektronenstrahllithografie 45

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

4 Messtechnik **48**
4.1 Streuparametermesstechnik 48
4.2 Optoelektronische Messtechnik 51
4.2.1 Messung der Responsivity von PIN-Dioden 51
4.2.2 Messung des Amplituden-Frequenzgangs von PIN-Dioden 53
4.3 Messung der Bitfehlerrate (BFR) 56

5 Untersuchungen von Einzelbauelementen **58**
5.1 PIN-Diode 58
5.1.1 Prozesstechnologie 58
5.1.2 Masken für trockenchemische Ätzprozesse 65
5.2 PIN-Diode auf (001) Siliziumsubstrat 74
5.2.1 Untersuchtes Integrationskonzept für III/V auf Silizium 75
5.2.2 Experimentelle Bauelementergebnisse 78
5.2.3 Diskussion zur monolithischen Integration mit Siliziumprozessen . . 82
5.3 Gestapelter Photodetektor für Mikrowellenanwendungen 85
5.3.1 Aufbau und Funktion 86
5.3.2 Einflüsse des Schichtdesigns auf die Bauelementeigenschaften 88
5.3.3 Wachstum tief vergrabener p-InGaAs Kontaktschichten 92
5.3.4 Untersuchte Bauelementlayouts 95
5.3.4.1 Teststruktur zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten $\alpha_{InGaAsP}$ 97
5.3.5 Erweiterung der Prozesstechnologie für den gestapelten Photodetektor 99
5.3.5.1 Nasschemische Ätzung von InGaAsP 99
5.3.5.2 Nasschemische Strukturierung von runden InP-Mesen . . . 101
5.3.6 Untersuchung des Kanalübersprechens (Crosstalk) 103
5.3.6.1 Optisch hervorgerufenes Kanalübersprechen 103
5.3.6.2 Elektrisch hervorgerufenes Kanalübersprechen 109
5.3.7 Messung des Frequenzgangs am gestapelten Photodetektor 114
5.3.8 Modellierung des gestapelten Photodetektors 115
5.3.8.1 Bestimmung der Ersatzschaltbildelemente 117
5.3.8.2 Verifizierung des Modells 120

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.4 Direkt kontaktierte sub-µm Resonanztunneldiode mit hoher Strukturtreue 124
5.4.1 Prozesstechnologie direkt kontaktierter RTDs 125
5.4.2 MoBiLE-Gatter mit minimiertem Steuerstrom I_d 130

6 Optoelektronische Empfängerschaltungen 132
6.1 Integrationskonzepte unter Berücksichtigung der Transistortechnologie . . . 132
6.1.1 Integration mit Heterostruktur-Biplolartransistoren 132
6.1.2 Integration mit Heterostruktur-Feldeffekttransistoren 135
6.2 Optischer Maskensatz und Prozesstechnologie für die optoelektronischen Empfängerschaltungen 138
6.3 Vollständig optisch gesteuertes MoBiLE-Gatter 142
6.3.1 Simulationsergebnisse zum optisch gesteuerten MoBiLE-Gatter . . . 144
6.3.2 Schaltungsrealisierung und Messergebnisse 149
6.4 MoBiLE-basierter Demultiplexer für den Wellenlängen- und Zeitbereich (λt-DEMUX) 157
6.4.1 Schaltungskonzept 158
6.4.2 Simulationsergebnisse zum λt-DEMUX 161
6.4.3 Schaltungsrealisierung und Messergebnisse 163

7 Zusammenfassung und Ausblick 167

Literaturverzeichnis 170

Danksagung 180

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Verwendete Symbole, Konstanten, chemische Formeln und Abkürzungen

Die hier den Symbolen zugeordneten Einheiten sind nicht in ihrer Basisform angegeben, sondern den typischerweise verwendeten Größenordnungen angepasst.

Symbol	Bezeichnung	Einheit
a	Gitterkonstante	nm
Δa	Gitterverspannung	%
A_{PIN}	(aktive) Einkoppelfläche eines (gestapelten) Photodetektors	μm^2
A_{RTD}	aktive Fläche einer Resonanztunneldiode	μm^2
A_S	Strahlquerschnitt bei der Elektronenstrahllithografie	μm^2
A_{US}	überstehende Fläche der unteren PIN-Diode beim gestapelten Photodetektor	μm^2
C_{RTD}	Kapazität einer RTD	fF
C_j	Sperrschichtkapazität einer PIN-Diode	fF
C_{opt}	optisches Kanalübersprechen (Crosstalk) relativ zum Nutzsignal	%
C_S	Belichtungsdosis bei der Elektronenstrahllithografie	$\frac{\mu C}{cm^2}$
d	Schichtdicke allg.	nm
d_i	Schichtdicke der nominell undotierten Halbleiterschicht einer PIN-Diode	nm
d_{opt}	optimale Schichtdicke des Absorbermaterials für eine maximale 3dB-Eckfrequenz einer PIN-Diode	nm
d_p	Schichtdicke der p-dotierten Halbleiterschicht einer PIN-Diode	nm
d_{PIN}	aktiver Durchmesser einer PIN-Diode	µm
d_{spot}	Durchmesser des optisch angeregten Bereiches bei Faserbestrahlung	µm
D(T)	Diffusionskoeffizient (abhängig von Temperatur)	$\frac{cm^2}{s}$ bei T
d_z	Topfbreite einer Quantenbrunnenstruktur	nm
$\vec{E}$	elektrische Feldstärke	$\frac{V}{m}$
f_{3dB}	3dB-Eckfrequenz; auch elektr. Bandbreite	GHz
f_{takt}	Taktfrequenz	Hz

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Symbol	Bezeichnung	Einheit
G	Übertragungsleitwert einer spannungsgesteuerten Stromquelle	S
I_0	eingestrahlte optische Intensität	$\frac{mW}{\mu m^2}$
I_{ct}	Photostrom auf Grund eines optischen Kanalübersprechens (Crosstalk)	mA
I_D	Drainstrom	mA
I_d	Dunkelstrom	nA
I_G	Gatestrom	nA
I_P	Peak-Strom einer RTD	mA
I_{ph}	Photostrom	mA
I_s	Strahlstrom bei der Elektronenstrahllithografie	ps
I_{steuer}	(Eingangs-)Steuerstrom eines MoBiLE-Gatters	µA
I_{takt}	Modulierter (Photo-)Strom zur Taktung eines MoBiLE-Gatters	µA
I_V	Valley-Strom einer RTD	mA
J_P	Peakstromdichte einer RTD	$\frac{kA}{cm^2}$
l_n bzw. l_p	n- bzw. p-seitige Ausdehnung der Raumladungszone in einem pn-Übergang	nm
m_e^*	Effektive Masse eines Elektrons	kg
n	optischer Brechungsindex bzw. Brechzahl	1
N_A	Akzeptorkonzentration in einem Festkörper	cm^{-3}
N_D	Donatorkonzentration in einem Festkörper	cm^{-3}
$p_{prozess}$	Prozessdruck einer ICP-RIE Anlage	mTorr
p_{strike}	Kammerzünddruck einer ICP-RIE Anlage	mTorr
P_0	eingestrahlte optische Leistung	dBm
P_{ICP}	ICP-Leistung	W
P_r	reflektierte optische Leistung	dBm
P_{RF}	Tischleistung einer ICP-RIE Anlage	W
r	Ätz- bzw. Abtragsrate	$\frac{nm}{s}$
r_{ph}	Photonenrate	s^{-1}
R	Empfindlichkeit einer PIN-Diode (engl.: Responsivity)	$\frac{A}{W}$
R'	reflektierter Anteil beim Übergang zwischen zwei opt. Medien	1
R_j	Sperrschichtwiderstand einer PIN-Diode	kΩ
R_L	Lastwiderstand	Ω
R_{max}	maximale Amplitude der Rauigkeit	nm

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

VI Register verwendeter Symbole, Konstanten, Formeln und Abkürzungen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
R_{RTD}	differentieller Widerstand einer RTD	Ω
R_S	Serienwiderstand bestehend aus Kontakt- und Zuleitungswiderständen	Ω
$S_{X/Y}$	Ätzselektivität von Materlial X zu Material Y	1
t	Zeit allg.	s
t_s	Belichtungszeit bei der Elektronenstrahllithografie	µs
T	Temperatur	K / °C
$T(W_{e,bar})$	Tunnelwahrscheinlichkeit eines Elektrons durch eine elektrische Potentialbarriere in Abhängigkeit von der Aufprallenergie	1
T_{Epi}	Wachstumstemperatur einer Epitaxieschicht	°C
U_{acc}	Beschleunigungsspannung	kV
U_A	Ausgangsspannung bzw. Ausgangssignal	V
U_{bias}	angelegte Vorspannung	V
U_D	Diffusionsspannung	V
u_{int}	intrinsische, über dem Quantenbrunnen einer RTD abfallende Spannung	V
U_{NDR}	Ausdehnung des NDR-Bereiches einer RTD	V
U_P	Peak-Spannung einer RTD	V
U_{ref}	DC-Referenzspannung	V
U_{takt}	Taktspannung bzw. Taktsignal	V
U_T	threshold Voltage (Schwellspannung eines Feldeffekttransistors)	V
U_V	Valley-Spannung einer RTD	V
v_p	Driftgeschwindigkeit der Löcher	$\frac{cm}{s}$
v_n	Drittgeschwindigkeit der Elektronen	$\frac{cm}{s}$
x_E	Eindringtiefe	µm
$W_{e,bar}$	Energie der Elektronen beim Auftreffen auf eine Barierre	eV
W_F	Fermienergie	eV
W_G	Bandlückenenergie eines Halbleitermaterials	eV
ΔW_G	Bandlückendifferenz an einem Heteroübergang	eV
W_L	Energie der Leitungsbandunterkante	eV
ΔW_L	Leitungsbanddiskontinuität eines Heteroübergangs	eV
W_{ph}	Photonenenergie	eV
W_V	Energie der Valenzbandoberkante	eV
ΔW_V	Valenzbanddiskontinuität eines Heteroübergangs	eV

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Symbol	Bezeichnung	Einheit
W_{vak}	Vakuumniveau (Bezugspunkt im Bändermodell)	eV
α	Absorptionskoeffizient	cm^{-1}
ε_r	relative Permittivität, Dielektrizitätszahl	1
η	Quanteneffizienz	1
η_i	Idealitätsfaktor	1
λ	Wellenlänge einer elektromagnetischen Welle	nm
μ_n bzw. μ_p	Elektronen- bzw. Löcherbeweglichkeit	$\frac{cm^2}{Vs}$
ν	Frequenz einer elektromagnetischen Welle	GHz
τ_{RC}	RC-Zeitkonstante	ps
τ_t	Transitzeit der Ladungsträger	ps
φ_{sig}	Phasenwinkel eines periodischen Signals	$^\circ$
ω	Kreisfrequenz	Hz

Konstante	Bezeichnung	Wert
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$2{,}998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$
h	Planck´sches Wirkungsquantum	$4{,}14 \cdot 10^{-15}$eVs
k	Boltzmann-Konstante	$8{,}61734 \cdot 10^{-5} \frac{eV}{K}$
q	Elementarladung	$1{,}602 \cdot 10^{-19}$As
ε_0	Dielektrizitätskonstante	$8{,}854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$
π	Kreiszahl	3,14159

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

VIII Register verwendeter Symbole, Konstanten, Formeln und Abkürzungen

chemisches Symbol bzw. Formel	Bedeutung
Au	Gold
C	Kohlenstoff
Cl_2	Chlor
Ge	Germanium
H_2	molekularer Wasserstoff
H^*	Wasserstoffradikal
HCl	Salzsäure
HF_{aq}	Flusssäure
H_2O	Wasser
H_2O_2	Wasserstoffperoxid
H_2SO_4	Schwefelsäure
H_3PO_4	Phosphorsäure
KOH	Kaliumhydroxid
N_2	Stickstoff
NaOH	Natriumhydroxid
Ni	Nickel
Pt	Platin
Si	Silizium
Si_3N_4	Siliziumnitrid
Ti	Titan
Zn	Zink

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Abkürzung	Bedeutung
2DEG	zweidimensionales Elektronengas
Ac/Pr	Lösemittel Reinigungsschritt mit Hilfe von Aceton und Isopropanol
AlGaAs	Aluminiumgalliumarsenid
antiRX	Antireflexbeschichtung
AP	Arbeitspunkt
BCB	Benzocyclobutene - photosensitives Polymer für dielektrische Dünnfilmbeschichtung
BFR	Bitfehlerrate
BiCMOS	Bipolar-CMOS; monolithische Integration von Bipolartransistoren mit CMOS-Technologie
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CVD	Chemische Gasphasenabscheidung (engl.: Chemical Vapor Deposition)
DUT	Messobjekt (engl.: device under test)
cw-Laser	Dauerstrich-Laser (engl.: continuous-wave Laser)
EAM	Elektro-Absorptions-Modulator
ECR	Elektronen Zyklotron Resonanz (engl.: Electron Cyclotron Resonance)
e/h-Paar	Elektron-Loch-Paar
GaAs	Galliumarsenid
GND	Massepotential
HBT	Heterostruktur-Bipolartransistor
HF	Hochfrequenz
HFET	Heterostruktur-Feldeffekttransistor
ICP	Indiktiv gekoppeltes Plasma (engl.: Inductively Coupled Plasma)
InP	Indiumphosphid
InGaAs	Indiumgalliumarsenid
InGaAsP	Indiumgalliumarsenidphosphid
LPG	Flüssigphasenepitaxie (engl.: Liquid-Phase Epitaxy)
MBE	Molekularstrahlepitaxie (engl.: Molecular Beam Epitaxy)
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
MoBiLE	Monostables-Bistables Logik Element
MOVPE	Metallorganische Gasphasenepitaxie (engl.: Metal-Organic Vapour-Phase Epitaxy)
NDR	Negative-Differential-Resistance
nid	non intentially doped (Hintergrunddotierung)

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Abkürzung	Bedeutung
PDR	Positive-Differential-Resistance
PIN	Schichtsequenz aus einem p-dotierten, intrinsischen und n-dotierten Halbleiter
PL	Photolumineszenz
PMMA	Polymethylmethacrylat; Resist für die Elektronenstrahlbelichtung
PVR	Verhältnis des Peak- zum Valleystrom einer RTD (engl.: peak-to-valley ratio)
REM	Rasterelektronenmikroskop
RIE	Reaktives Ionenätzen (engl.: Reactive Ion Etching)
RKM	Rasterkraftmikroskop
RLZ	Raumladungszone
RMS	Root-Mean-Square (quadratischer Mittelwert)
RTD	Resonanztunneldiode
s.i.	semi-isolierend
SiGe	Silizium-Germanium Mischkristall
SiN_x	Siliziumnitrid
UWB	Ultra-Wideband
VCCS	Spannungsgesteuerte Stromquelle (engl.: Voltage Controlled Current Source)

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

1 Einleitung und Aufbau der Arbeit

1.1 Motivation und Aufgabenstellung

Licht als Träger für die Übermittlung von Informationen ist sowohl zur Überbrückung von interkontinentalen Entfernungen Standard, als auch Gegenstand aktueller Forschung bezüglich der optischen Kommunikation zwischen integrierten Recheneinheiten auf engstem Raum. Die Vorteile des lichtbasierten Übertragungsmediums Lichtwellenleiter (LWL) im Vergleich zu Kupfer liegen in der deutlich höheren Übertragungskapazität, geringerer Signaldämpfung und seiner Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störeinflüssen. Im Bereich der on-chip Kommunikation ist es der geringere Leistungsbedarf für den Austausch von Daten, welcher eine entsprechende Entwicklung interessant macht, da der Abtransport der erzeugten Verlustleistung pro Flächeneinheit bei modernen Mikroprozessoren eine große Herausforderung darstellt.
Trotz der genannten Vorteile ist eine Handhabung der Daten in der elektrischen Ebene heute und auch auf absehbare Zeit unerlässlich, da alle kommerziellen Datenverarbeitungssysteme den Transistor als Grundelement beinhalten. Aus diesem Grund sind an den Schnittstellen zwischen Datenübermittlung und -verarbeitung entsprechende Wandlerelemente notwendig. Eingangsseitig des LWL-Netzes sind es Lichtemitter (Leuchtdiode oder Laserdiode) und ausgangsseitig Photodetektoren (PIN-Diode, MSM-Detektor, Wellenleiterabsorber, etc.), welche diese Aufgabe übernehmen.
Der Einsatz reiner Silizium-Bauelemente ist in diesem Bereich zwar auf Grund der monolithischen Integrierbarkeit mit CMOS-Prozessen von größtem Interesse, jedoch scheitert dieser Wunsch an der indirekten Bandstruktur und der mit den Kommunikationswellenlängen $\lambda = 1{,}3\ \mu m$ und $\lambda = 1{,}55\ \mu m$ inkompatiblen Bandlückenenergie des Siliziums. Der Silizium-Germanium Mischkristall (SiGe) macht die Einstellung einer Bandlückenenergie in diesem Bereich möglich (Bandgap-Engineering), jedoch sind die erreichbaren Absorptionskoeffizienten und damit die Effizienz mit diesem Material deutlich niedriger als die der III/V-Verbindungshalbleiter.
Das Indiumgalliumarsenid (InGaAs) auf Basis des Indiumphosphids (InP) ist bis heute das Material der Wahl für schnelle und effiziente Photodetektoren. Es zeichnet sich durch eine direkte Bandlückenenergie und eine hohe Absorption im Bereich der angesprochenen Wellenlängen aus. Das Material wird in epitaktischen Verfahren (MOVPE, MBE) als Dünnschicht auf einem Trägersubstrat (InP) abgeschieden und nimmt dessen Kristall-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

gitterinformation auf. Auf Grund der hohen Differenz der Gitterkonstanten zwischen InP und Silizium ist eine einfache Übertragung der Technologie auf das Silizium nicht möglich. Ein Teil dieser Arbeit widmet sich dem Aufbau und der Charakterisierung einer InGaAs PIN-Diode auf einem zur CMOS-Technologie kompatiblen Siliziumsubstrat, dessen Gitterkonstante durch epitaktische Maßnahmen auf die des Indiumphosphids transferiert wurde. Da die PIN-Diode als optisches Bauelement sensibel bezüglich der Kristallqualität ist, lässt der Vergleich mit einem entsprechenden Element auf InP-Substrat Rückschlüsse für die untersuchte Strategie zu. Die PIN-Diode wird hier stellvertretend für die Möglichkeit des Transfers weiterer III/V-Bauelemente und Schaltungen untersucht und leistet somit einen Beitrag zur möglichen zukünftigen Fusion der Stärken beider Technologien.

Ein anderer Aspekt bei der allgemeinen Optimierung der Elektronik der vergangenen Dekaden ist die Weiterentwicklung der Prozesstechnologie zur Schaffung immer kleinerer Strukturgrößen und damit verbundenen höheren Integrationsdichten, welche dem Schaltungsdesigner mehr Freiheiten zur Erhöhung der Funktionalität bescherte. Dieser Prozess gerät allmählich an seine physikalischen Grenzen, so dass die Untersuchung alternativer Ansätze immer wichtiger wird. Hierbei ist es beispielsweise die Materialwissenschaft, welche durch den Austausch bewährter Materialen den durch die Miniaturisierung hervorgerufenen Restriktionen entgegenwirkt. Ein Beispiel hierfür ist der Wechsel zu den sogenannten High-k-Dielektrika anstatt des Siliziumdioxids im Bereich der Gateisolation bei MOS-Transistoren. Hierdurch kann die Dicke der Isolationsschicht bei gleichbleibender Kapazität erhöht und die parasitären Leckströme deutlich reduziert werden.
Ein weiteres großes Feld ist der relativ neue Bereich der Nanoelektronik, bei welchem die Erforschung von elektronischen und optischen Eigenschaften von meist halbleitenden nadelförmigen Strukturen (Carbon-Nanotubes, Nanowhisker, etc.) mit Abmessungen herab bis zu einigen zehn Nanometern im Vordergrund steht.
Es gibt jedoch auch Ansätze, die Funktionalität von einzelnen Bauelementen zu erhöhen, so dass sie in der Lage sind, zeitgleich oder variabel mehrere Funktionen zu erfüllen. Im Rahmen dieser Arbeit ist es die PIN-Diode, welche durch eine Erweiterung um eine zweite Absorptionsschicht bestehend aus dem quaternären III/V-Mischkristall InGaAsP in die Lage versetzt wird, zeitgleich eine weitere Wellenlänge zu detektieren und für die elektronische Weiterverarbeitung auf einem zweiten Kanal bereitzustellen. Dieser gestapelte Photodetektor ist auf die selektive Detektion der beiden Kommunikationswellenlängen abgestimmt, welche innerhalb einer Glasfaser übertragen und in das Bauelement

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

eingekoppelt werden. Diese Arbeit umfasst die komplette Entwicklung dieses Detektoptyps angefangen vom MOVPE-Materialwachstum, über die Prozesstechnologie bis hin zur messtechnischen Charakterisierung und Modellbildung für einen Schaltungssimulator. Es werden die Aspekte verschiedener Bauelement- als auch Materialdesigns für eine Optimierung hinsichtlich der HF-Performance bis in den GHz-Bereich und des Kanalübersprechens beleuchtet. Beim Kanalübersprechen wird auf eine Wechselwirkung der Signale sowohl in der optischen als auch in der elektrischen Ebene eingegangen, deren Schnittstelle der gestapelte Detektor selbst bildet.
Tunnelstromelemente sind ebenfalls Kandidaten für alternative Ansätze. Resonanztunneldioden (RTD) beispielsweise zeichnen sich durch eine stark nichtlineare Strom/Spannungs-Charakteristik aus. Diese kann ausgenutzt werden, um durch eine einfache Reihenschaltung zweier RTDs ein sogenanntes Monostabiles-Bistabiles-Logik-Element (MoBiLE) zu bilden, welches über die komplette Funktionalität eines D-Flip-Flops verfügt und eingangsseitig Ströme verarbeitet. Dieses Element ist daher sehr gut geeignet, um in Kombination mit einem Photodetektor eine kompakte optoelektronische Empfängerschaltung zu bilden. Entsprechende Konzepte mit einem Photodetektor am Dateneingang sind bereits demonstriert worden [20].
Unter Verwendung des gestapelten Detektors wird das Konzept innerhalb dieser Arbeit hin zu einem vollständig optischen HF-Betrieb ausgeweitet. Das bedeutet, dass neben dem Datum auch das notwendige Taktsignal optisch übertragen und durch die Schaltung verarbeitet wird. Es entsteht eine sehr kompakte Empfängerschaltung, welche ohne Maßnahmen zur Taktrückgewinnung aus dem Datensignal auskommt (clock-recovery), was mit zusätzlichem Schaltungsaufwand verbunden wäre.
Eine weitere untersuchte Applikationsschaltung ist die Weiterentwicklung des in [21] entworfenen Demultiplexers auf Basis des MoBiLE-Elements. Über eine Erweiterung mit Hilfe des gestapelten Detektors kann der Datendemultiplex vom Zeitbereich auf die spektrale Ebene ausgeweitet werden (λt-DEMUX). Diese Schaltung stellt somit aus einem optischen Datenstrom vier Bit pro Taktperiode auf getrennten elektrischen Ausgängen zur Verfügung.
Hinsichtlich der Empfängerschaltungen umfasst die Arbeit die simulationstechnische Schaltungsentwicklung sowie deren Realisierung. Für den messtechnischen Funktionstest wurden Messumgebungen aufgebaut, welche den digitalen Betrieb der Schaltungen im GHz-Bereich abdecken.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

1.2 Gliederung der Arbeit

In dem folgenden Kapitel werden die Grundlagen der in dieser Arbeit verwendeten Bauelemente und des MoBiLE beschrieben, um das Verständnis der weiterführenden Ausführungen zu erleichtern. Einen besonderen Schwerpunkt bildet die Einführung zur PIN-Diode, da ihre Erweiterung zum gestapelten Detektor einen zentralen Punkt dieser Arbeit darstellt. Hierbei wird auf die physikalischen Grundlagen der Lichtabsorption und auf die Zusammenhänge im Hinblick auf das Hochfrequenzverhalten dieses Bauelements eingegangen. Es wird ein einfaches Ersatzschaltbild vorgestellt, auf dessen Grundlage die Modellierungsarbeiten des gestapelten Detektors durchgeführt wurden. Als weiteres Element wird die Resonanztunneldiode besprochen. Neben dem Tunnelprinzip werden an dieser Stelle die in [21] gewonnenen Erkenntnisse zur Großsignaldynamik zusammengefasst, da diese über die an sich sehr kurzen internen Schaltzeiten einer RTD dominieren, was für die untersuchten Applikationsschaltungen relevant ist. Der Heterostruktur-Feldeffekttransistor wird nur grob angesprochen, da er im Rahmen dieser Arbeit zwar als aktives Element Verwendung findet, jedoch nicht weiterentwickelt wird.
In Kapitel 3 ist die Beschreibung relevanter Technologieschritte und Prozessanlagen zusammengefasst, welche zum Verständnis des Herstellungsprozesses relevanter Hardware wichtig sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Anpassung der Standard PIN-Technologie im Bereich der nasschemischen Strukturierung des gestapelten Detektors vorgenommen. Des Weiteren beinhaltet der Schaltungsprozess Ätzschritte mittels eines trockenchemischen Verfahrens zum Erzielen eines möglichst präzisen Strukturübertrags.
Es folgt eine Beschreibung der relevanten Messtechnik. Streuparametermessungen bilden ein wichtiges Werkzeug bei der Bestimmung der HF-Ersatzschaltbildelemente für das elektrische Modell des gestapelten Detektors. Um eine gezielte Entwicklung von Photodetektoren für Hochfrequenzanwendungen durchführen zu können, ist eine Möglichkeit zur Charakterisierung der Empfindlichkeit (Responsivity) und der Bandbreite notwendig. Da das Fachgebiet diesbezüglich nicht über standardisierte Messplätze verfügt, werden in diesem Kapitel die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Messaufbauten und deren Grenzen beschrieben.
Kapitel 5 behandelt die durchgeführten Arbeiten bezüglich der Einzelbauelemente. Eingangs wird der komplette Standard-Herstellungsprozess einer PIN-Diode vorgestellt, sowie dessen Erweiterung zur Kombination mit trockenchemischen Verfahren. Es folgt die Übertragung des PIN-Diodenprozesses auf ein Siliziumsubstrat mit einer (001)- Kristall-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

orientierung. Vergleichende Messungen mit einer Standard-PIN auf InP-Substrat dienen der Beurteilung des angewandten Konzepts. Eine generelle Diskussion zur monolithischen Integration von III/V-Prozessen mit der CMOS-Technologie schließt dieses Unterkapitel unter Nennung der noch zu überwindenden Hürden ab.
Es folgen die Vorstellung des Konzepts und der durchgeführten Arbeiten zum gestapelten Photodetektor. Hierbei handelt es sich zunächst um Untersuchungen zur Schichtepitaxie, da Vorversuche gezeigt haben, dass speziell die mittels Kohlenstoff p-dotierte Schicht, so wie sie in der herkömlichen PIN-Diode eingesetzt wird, beim gestapelten Detektor über keine ausreichend hohe aktive Dotierung verfügt und dadurch die Kontakteigenschaften massiv degradieren. Anschließend wird auf die entworfenen Bauelementdesigns und auf die entsprechenden Untersuchungen zur Prozesstechnologie eingegangen, bevor die Ergebnisse zum Kanalübersprechen präsentiert werden. Das Kanalübersprechen ist ein wichtiger Bauelementparameter, dessen Kenntnis für eine erfolgreiche Schaltungsapplikation unbedingt erforderlich ist. Es findet eine selektive Untersuchung bezüglich der optisch und der elektrisch hervorgerufenen Störung des Nachbarkanals statt, sowie ein entsprechender Abgleich mit dem Bauelement- und dem Schichtdesign. Messungen des Frequenzgangs sowie die Modellierung des Bauelements runden das Unterkapitel ab. Bezüglich der Resonanztunneldiode wurde in dieser Arbeit eine für Transistoren in [22] entwickelte Technologie zur direkten Kontaktierung adaptiert. Sie erlaubt die Herstellung von Bauelementen mit Submikron-Abmessungen und einer sehr genauen Kontrolle des Strukturübertrags durch eine anisotrope Ätzung mittels der Trockenchemie. Dadurch wird eine reproduzierbare technologische Einstellung des für das MoBiLE notwendigen Steuerstroms, welcher aus der Flächendifferenz der RTDs resultiert, bis hinab zu 100 µA möglich.
In Kapitel 6 werden die geleisteten Arbeiten zu den realisierten kompakten optoelektronischen Empfängerschaltungen vorgestellt und diskutiert. Einleitend findet eine Abwägung des Integrationskonzeptes statt, wobei die Vor- und Nachteile der Integration mit Bipolar- bzw. Feldeffekttransistoren aus technologischer Sicht im Vordergrund stehen. Es werden das Konzept, die Simulations- und Messergebnisse eines vollständig optisch gesteuerten MoBiLE-Gatters und eines im Wellenlängen- und Zeitbereich arbeitenden Demultiplexers in eigenen Unterkapiteln zusammengefasst.
Die Zusammenfassung der Arbeit sowie ein Ausblick auf weiterführende Arbeiten erfolgen abschließend in Kapitel 7.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2 Relevante Bauelemente und Grundschaltungen

In diesem Kapitel werden die zum Verständnis dieser Arbeit relevanten Bauelemente PIN-Diode, Resonanztunneldiode (RTD) und der Heterostruktur-Feldeffekttransistor (HFET) in ihrem Aufbau und Funktionsprinzip erläutert. Des Weiteren wird die Grundschaltung des Monostabilen-Bistabilen Logik Elements (MoBiLE) eingeführt, auf dessen Grundlage die im weiteren Verlauf dieser Arbeit vorgestellten Schaltungen basieren.

2.1 PIN-Diode

Am Ende einer optischen Übertragungsstrecke ist es für die weitere Verarbeitung der Daten beim Empfänger notwendig, die Informationen aus der optischen in die elektrische Ebene umzusetzen (oe-Wandlung). Hierfür werden Strahlungsempfänger aus halbleitenden Materialien eingesetzt, wobei den Verbindungshalbleitern aus der dritten und fünften Hauptgruppe des Periodensystems (III/V-Halbleiter) aufgrund ihrer hervorragenden optischen Eigenschaften im Bereich der Glasfasertechnologie eine besondere Bedeutung zukommt. Als Photoempfänger in der optischen Nachrichtentechnik kommen ausschließlich Sperrschichtphotodioden in Frage, welche im Rückwärtsbetrieb als Detektor eingesetzt werden [23]. Die typischen Anforderungen an Photodioden lauten:

- hohe Empfindlichkeit gegenüber der eingestrahlten optischen Leistung
- hohe Dynamik bzw. kurze Antwortzeiten
- geringer Dunkelstrom und geringes Eigenrauschen
- lineare Übertragungscharakteristik
- hohe Toleranzen gegenüber Schwankungen der Versorgungsspannung
- möglichst kostengünstig.

Bezüglich ihres Aufbaus können Photodetektoren grundsätzlich in zwei Gruppen eingeteilt werden, wobei als Kriterium die Einstrahlrichtung der Photonen bezüglich der elektrischen Feldrichtung innerhalb der verarmten Zone herangezogen werden kann. Bei senkrechter Einstrahlung werden sogenannte Kantenabsorber in Wellenleiteranordnung eingesetzt. Wird die Faser hingegen in Richtung des elektrischen Feldes justiert, so werden vertikale Absorber herangezogen. Beide Detektorgruppen haben ihre Daseinsberechtigung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

und bieten spezifische Vor- und Nachteile, welche je nach Anwendung bzw. Fertigungsmöglichkeiten abgewogen werden müssen.
Die PIN-Diode in Auslegung für eine vertikale Absorption in Richtung des elektrischen Feldes ist ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit und Grundlage der durchgeführten Untersuchungen zu den gestapelten Photodetektoren. Das nächste Unterkapitel befasst sich daher mit den physikalischen und technischen Grundlagen dieses Detektortyps.

2.1.1 Aufbau

Die Namensgebung der PIN-Diode leitet sich aus ihrer Halbleiterschichtsequenz ab. Es handelt sich hierbei um einen pn-Übergang, welcher räumlich durch einen nominell undotierten, also intrinsischen Halbleiterkristall getrennt wird. Das für PIN-Dioden typischerweise verwendete Material ist auf Indiumphosphid (InP) gitterangepasstes Indiumgalliumarsenid ($In_{0,53}Ga_{0,43}As$). Auf Details zum III/V-Kristallwachstum sei an dieser Stelle auf [24, 25] verwiesen.

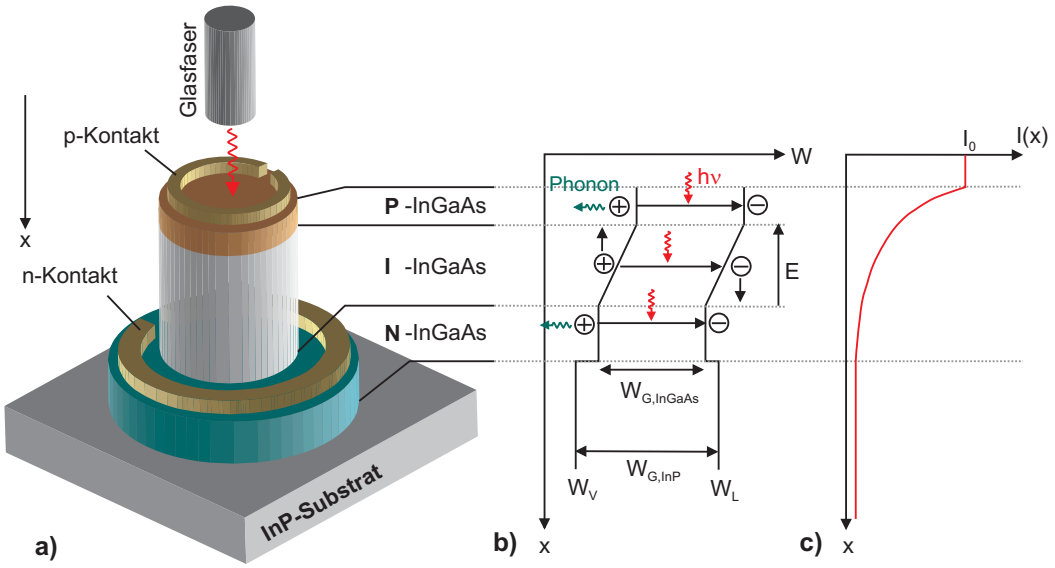


Abb. 2.1: a) Qualitativer Aufbau einer InGaAs PIN-Diode mit b) zugehörigem Bänderdiagramm und c) Absorptionsprofil I(x) des eingestrahlten Lichts

Die jeweils äußeren dotierten Epitaxieschichten[1] werden über Metallkontakte elektrisch zugänglich gemacht. Bei der in Abbildung 2.1a) gezeigten PIN-Diode wird die optische

[1] Epitaxie: Geordnetes Kristallwachstum auf einem Trägersubstrat

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Strahlung von oben in die p-dotierte Schicht eingekoppelt. Der obere Kontakt ist daher ringförmig ausgebildet, um die optische Abschirmung zu minimieren. Der innere Ringbereich wird als „optisches Fenster“ des Photodetektors bezeichnet. Der untere Kontakt wird ebenfalls ringförmig auf die unten liegende n-dotierte Schicht aufgebracht. Hierzu erfolgt eine zweistufige vertikale Strukturierung des Halbleitermaterials mit steigendem Mesadurchmesser[2] zum Substrat hin.

2.1.2 Absorption von Licht und Photostrom

Das Verhalten von Halbleitern bei Bestrahlung mit Licht hängt von der Photonenenergie W_{ph} und der Bandlückenenergie W_G des Materials ab. Während die Bandlückenenergie eine in erster Näherung temperaturunabhängige Materialkonstante ist, gehorcht die Photonenenergie folgender Beziehung

$$W_{ph} = h\nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}. \tag{2.1}$$

Ist die Photonenenergie des eingestrahlten Lichts kleiner als die Bandlückenenergie des Halbleiters, so propagieren die Photonen ungestört durch den Festkörper, d.h. der Halbleiter verhält sich transparent für das eingestrahlte Licht. Ist die Photonenenergie hingegen gleich oder größer der Bandlückenenergie, so findet eine Wechselwirkung zwischen den Lichtquanten und dem Material statt. Es werden Photonen absorbiert und dieser Prozess führt zur Bildung von Elektron-Loch-Paaren (e/h-Paare), indem Elektronen aus dem Valenzband ins Leitungsband angehoben werden. Dieser sogenannte innere Photoeffekt ist in Abbildung 2.1b) anhand des Bändermodels veranschaulicht. Man erkennt, dass die Ladungsträgergeneration sowohl in den dotierten Kontaktschichten, als auch in der undotierten Zwischenschicht stattfindet. Berücksichtigt man, dass die Lebensdauer der generierten Ladungsträger im nominell undotierten InGaAs ($N_D \approx 10^{16}$ cm^{-3}) im Bereich einiger hundert Nanosekunden liegt [26], müssen Elektronen und Löcher räumlich binnen dieser Zeitspanne voneinander getrennt werden, um eine Rekombination zu verhindern. Dies geschieht innerhalb der nominell undotierten Schicht bereits durch das elektrische Feld E, welches sich aufgrund der Ladungsträgerdiffusion an einem pn-Übergang ausbildet und kann durch eine geeignete äußere Vorspannung unterstützt werden. Die Elektronen

[2] Mesa: typischerweise durch Ätztechnik hervorgerufene Materialerhebung in der Halbleiterprozesstechnologie

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

werden hierdurch zum n- und die Löcher ihrerseits zum p-Kontakt abgelenkt und führen bei einer äußeren Beschaltung der PIN-Diode zu einem Ausgleichsstrom bzw. einem Spannungsabfall an einem Lastwiderstand. Der so durch Photonen generierte elektrische Strom wird als Photostrom I_{ph} bezeichnet und er ist der direkte Nachweis für detektiertes Licht. Das innerhalb der hochdotierten und somit nahezu feldfreien Schichten absorbierte Licht trägt nicht nennenswert zum Photostrom bei, da die generierten e/h-Paare unter Aussendung eines Photons oder vieler Phononen wieder rekombinieren. Der Anteil der absorbierten Photonen, welcher letztendlich zum Photostrom beiträgt, wird als Quanteneffizienz η bezeichnet. Aus technischer Sicht wird hier ein möglichst hoher Wert nahe 1 angestrebt. Der Photostrom I_{ph} lässt sich somit ausdrücken als

$$I_{ph} = Quanteneffizienz \times \frac{Anz.\ abs.\ Photonen}{Zeiteinheit} \times \frac{Ladungsbeitrag}{Photon} = \eta \cdot \frac{P_0}{h\nu} \cdot q, \quad (2.2)$$

wobei P_0 die eingestrahlte optische Eingangsleistung repräsentiert.

2.1.3 Empfindlichkeit (Responsivity)

Wie in Abbildung 2.1c) dargestellt, nimmt die Absorption einer sich im Festkörper ausbreitenden Lichtwelle mit zunehmender Eindringtiefe exponentiell ab. Es gilt das Absorptionsgesetz

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x}, \quad (2.3)$$

wobei I_0 die eingestrahlte Lichtintensität und α den materialspezifischen Absorptionskoeffizienten angibt. Das bedeutet analog, dass die Dichte der generierten e/h-Paare an der Oberfläche ihr Maximum hat und mit zunehmender Tiefe abklingt. Eine hohe Empfindlichkeit des Photodetektors bedeutet, dass idealerweise alle eingestrahlten Photonen zum Photostrom beitragen. Wie bereits erläutert ist dies in den dotierten Schichten nicht der Fall, so dass diese bei einem vertikalen Absorber die Empfindlichkeit mindern. Daher wird die obere p-Kontaktschicht der PIN-Diode, unter Berücksichtigung der elektrischen Eigenschaften, möglichst dünn ausgelegt. Die Dicke der undotierten Schicht ist ein weiterer wichtiger Designparameter, welcher die Empfindlichkeit maßgeblich beeinflusst, jedoch sind der maximalen Schichtdicke aufgrund von Technologiegrenzen und Wirtschaftlichkeit Grenzen gesetzt. Daher kommt dem Absorptionskoeffizienten α aus Gleichung 2.3, d.h. dem verwendeten Material, eine wichtige Bedeutung zu. Je höher sein Betrag, desto weniger Material wird benötigt, um die gleiche Empfindlichkeit zu erzielen. Abbildung 2.2 zeigt den Verlauf für einige wichtige Materialien. Hervorgehoben sind die beiden wichtigen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

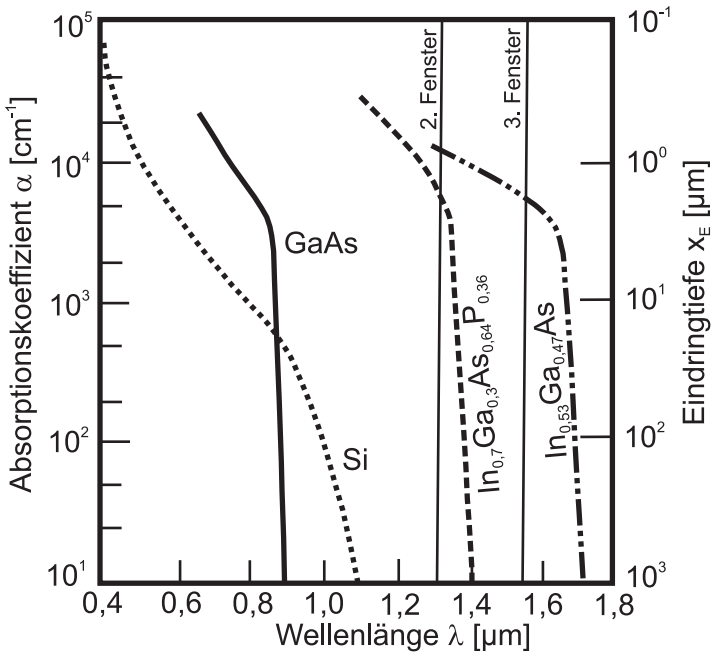


Abb. 2.2: Verlauf des Absorptionskoeffizienten α für einige wichtige Materialien [27]

Kommunikationswellenlängen des 2. und 3. Fensters[3] der optischen Nachrichtentechnik bei Verwendung von Glasfasern als Transportmedium hauptsächlich für die Fernübertragung. Die Eindringtiefe leitet sich aus dem Zusammenhang

$$\frac{I(x_E)}{I_0} = e^{-1} \tag{2.4}$$

ab und beschreibt damit den Ort, an welchem die Intensität auf etwa 37 % ihres ursprünglichen Wertes abgenommen hat. Es wird deutlich, dass $In_{0,53}Ga_{0,43}As$ von allen dargestellten Materialien die kleinste Bandlücke hat und im Bereich beider Kommunikationswellenlängen absorbiert. Des Weiteren steigt der Absorptionskoeffizient von $In_{0,53}Ga_{0,43}As$ steil an, so dass es bereits bei Energien kurz oberhalb seiner Bandlücke stark absorbiert. Diese beiden Eigenschaften treffen auf elementares Silizium nicht zu, so dass es als Absorbermaterial für das in der Glasfasertechnik technisch interessante 2. und 3. optische Fenster nicht in Frage kommt.

Diese Zusammenhänge lassen sich mathematisch folgendermaßen zusammenfassen. Die

[3] Wellenlängenabhängige Dämpfungsminima im Glas werden in der optischen Nachrichtenübertragung als 1. Fenster (λ=0,85 µm), 2. Fenster (λ=1,3 µm) und 3. Fenster (λ=1,55 µm) bezeichnet [28].

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Empfindlichkeit (engl.: Responsivity) ist der Anteil des generierten Photostromes bezüglich der eingestrahlten optischen Leistung

$$R = \frac{I_{ph}}{P_0} \quad [A/W]. \tag{2.5}$$

Dieser Größe kommt technisch eine wichtige Bedeutung zu. Mit Hilfe von Gleichung 2.2 lässt sich ableiten:

$$R = \frac{q\eta}{h\nu} = \frac{q\eta\lambda}{hc} = \frac{\lambda}{1,24}\eta, \quad mit\ \lambda\ in\ \mu m. \tag{2.6}$$

Dieser Zusammenhang beschreibt die Empfindlichkeit eines Photodetektors für eine bestimmte Wellenlänge als Funktion der Quanteneffizienz η. Geht man davon aus, dass nur die in der undotierten Schicht einer PIN-Diode absorbierten Photonen zum Photostrom beitragen, so lässt sich die Quanteneffizienz η einer PIN-Diodenstruktur mit Hilfe des Absorptionsgesetzes aus Gleichung 2.3 folgendermaßen ausdrücken:

$$\eta = \underbrace{(1 - R')}_{(1)} \cdot \underbrace{e^{-\alpha d_p}}_{(2)} \cdot \underbrace{(1 - e^{-\alpha d_i})}_{(3)}. \tag{2.7}$$

Hierbei ist R' der an der Oberfläche reflektierte Anteil der optischen Leistung und d_p bzw. d_i repräsentieren die Schichtdicken der p- bzw. der nid[4]-Absorberschicht. Faktor (1) der Gleichung 2.7 beschreibt den Anteil der eingestrahlten Photonen, welche nicht an der Halbleiteroberfläche reflektiert werden, Faktor (2) spiegelt den durch die p-dotierte Schicht transmittierten Anteil wieder und Faktor (3) beschreibt die für den Photostrom konstruktive Absorption in der undotierten Schicht. Für das Design eines möglichst empfindlichen Photodetektors ist also notwendig, ein intrinsisches Material mit einem möglichst hohen Absorptionskoeffizienten zu verwenden, die p-Schichtdicke d_p möglichst dünn zu halten und die Oberflächenreflektivität R' zu minimieren.

2.1.4 Reduzierung der Reflektivität

Beim Übergang einer elektromagnetischen Welle zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes n_1 und n_2 gilt laut der Fresnel'schen Formel folgender Zusammenhang zwischen der reflektierten und der eingestrahlten optischen Leistung [29]:

$$R' = \frac{P_r}{P_o} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 \tag{2.8}$$

[4] non-intentially-doped, Hintergunddotierung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Es wird deutlich, dass die Reflektivität R' mit zunehmender Differenz der Brechungsindizes steigt. Im Falle einer Freiluftbestrahlung einer InGaAs PIN-Diode über eine Glasfaser ergibt sich mit n_{Luft}=1 und n_{InGaAs}=3,36 eine Reflektivität R' ≈ 0,29, d.h. etwa 29% der eingestrahlten optischen Leistung werden an der Bauelementoberfläche reflektiert und erhöhen somit maßgeblich die Dämpfung der gesamten Übertragungsstrecke. Um dieses Phänomen zu unterdrücken, werden PIN-Dioden mit einer Antireflexschicht versehen. Für die Dicke der Beschichtung gilt

$$d_{antiRX} = (2m+1)\frac{\lambda}{4n_{antiRX}}, \quad mit\ m = 1, 2, 3... \tag{2.9}$$

und für den Brechungsindex [29]

$$n_{antiRX} = \sqrt{n_{Luft} \cdot n_{InGaAs}}\ . \tag{2.10}$$

Mit der Vorschrift 2.9 wird dafür gesorgt, dass der Gangunterschied der an den Übergängen Luft/Antireflex und Antireflex/Halbleiter reflektierten Wellen ein ganzzahliges Vielfaches von λ/4 beträgt und diese somit destruktiv interferieren. Aufgrund der Energieerhaltung wird dadurch die Reflexion verhindert und die eingestrahlte Leistung wird vollständig in das Bauelement transmittiert. In der Praxis erzielt man mit diesem Vorgehen monochromatische Filter, welche die Reflektivität R' beträchtlich minimieren.
Bei einer hinreichend dünnen p-Schicht und einer effizienten Entspiegelung des optischen Fensters lässt sich Gleichung 2.7 vereinfachen zu

$$\eta_{PIN} \approx 1 - e^{-\alpha d_i} \tag{2.11}$$

und damit der Einfluss auf die Empfindlichkeit des Bauelements näherungsweise auf die Dicke und das Absorptionsvermögen des intrinsischen Materials reduzieren.

2.1.5 Gleichstromverhalten

Die I(U)-Charakteristik einer PIN-Diode entspricht weitestgehend der eines einfachen pn-Übergangs. Mathematisch lässt sie sich beschreiben mit Hilfe der Diodengleichung

$$I = I_d(e^{\frac{qU_{PIN}}{\eta_i kT}} - 1) - I_{ph}, \tag{2.12}$$

wobei die Fähigkeit der PIN-Diode zur Photostromgeneration über den zusätzlichen Parameter I_{ph} mit in die Gleichung einfließt. Anders als eine Solarzelle, wird eine PIN-Diode

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

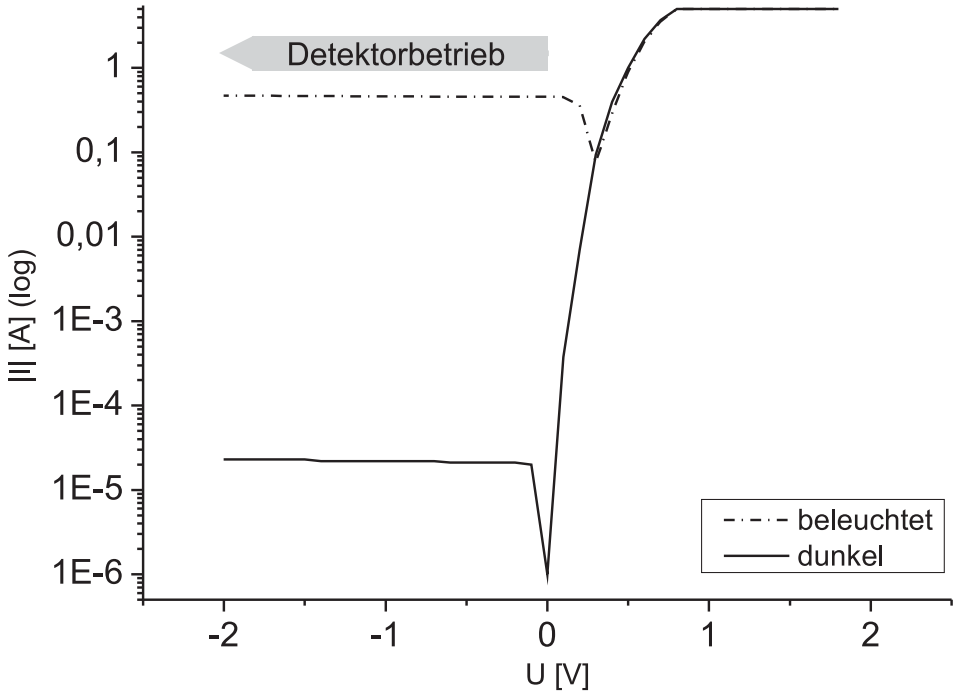


Abb. 2.3: Gemessene IU-Charakteristik einer PIN-Diode mit und ohne Beleuchtung

im Sperrbereich betrieben. Der ohne Bestrahlung bereits fließende elektrische Strom wird als Dunkelstrom I_d bezeichnet. Im Detektorbetrieb werden an das Bauelement Spannungen $U_{PIN} << 0V$ angelegt, um geeignet hohe Feldstärken im verarmten Gebiet für die Trennung der Ladungsträger zu erzeugen. Für diesen Fall vereinfacht sich Gleichung 2.12 zu

$$I \approx -(I_d + I_{ph}), \quad mit\, U_{PIN} << 0V. \tag{2.13}$$

Die Komponenten, welche für den parasitären Dunkelstrom bei Photodetektoren verantwortlich sind, können folgenden Ursprung haben:

- thermische Generation und Rekombination von Ladungsträgern innerhalb der verarmten Zone,
- Diffusion thermisch generierter Minoritätsladungsträger aus den Kontaktschichten in die verarmte Zone,
- Oberflächenleckstrom,

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

wobei der jeweilige Anteil von der Detektorstruktur und verwendeter Prozesstechnologie abhängt. Für geätzte PIN-Dioden ohne Passivierung der Seitenflanken trägt der Oberflächenleckstrom an der Mesaflanke hauptsächlich zum Dunkelstrom bei [30].

2.1.6 Hochfrequenzbetrachtung

Grundsätzlich lässt sich formulieren, dass mit „Geschwindigkeit“ eines Photodetektors seine Fähigkeit gemeint ist, möglichst schnell auf Änderungen der eingestrahlten optischen Leistung zu reagieren. In der optischen Nachrichtentechnik wird eine logische „1“ als Lichtpuls über das Medium übertragen. Bei einem zu detektierenden Datenstrom muss das Empfängerelement somit in der Lage sein, logische Zustände korrekt in die elektrische Ebene abzubilden, bevor das nachfolgende Datum abgetastet wird. Abbildung 2.4 verdeutlicht qualitativ das Antwortverhalten zweier Elemente mit ausreichender (Detektor A) und unzureichender Bandbreite (Detektor B) für die geforderte Datenrate.

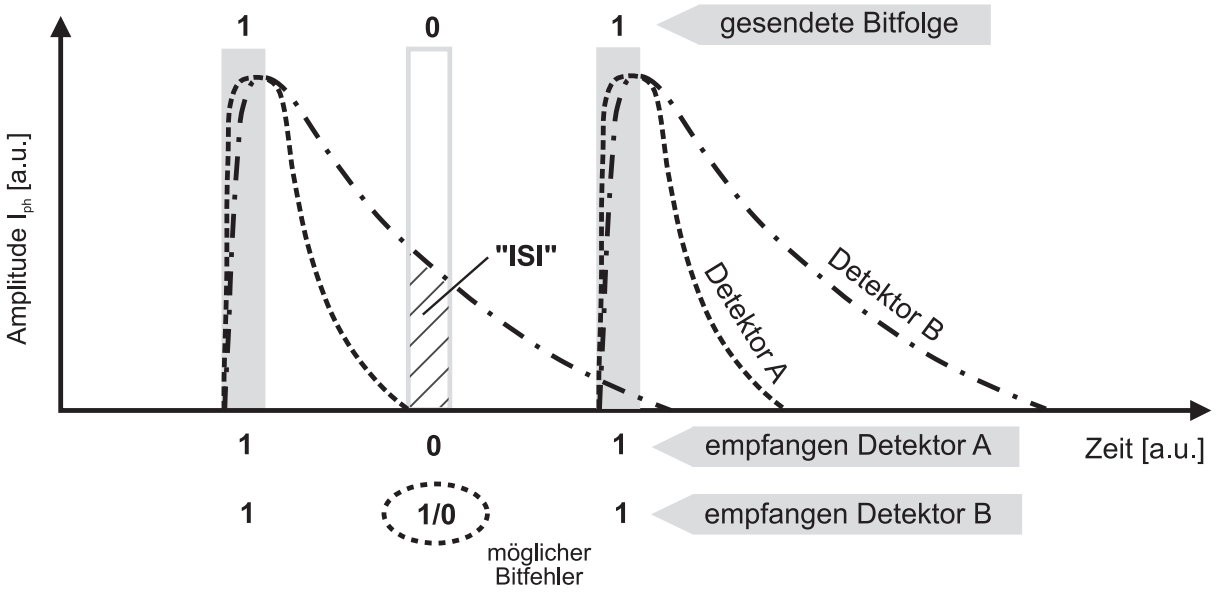


Abb. 2.4: Qualitatives Beispiel für das Antwortverhalten zweier Detektoren mit unterschiedlichen Antwortlängen

Es ist zu erkennen, dass die elektrischen Antworten auf den eingestrahlten Lichtimpuls bei beiden Detektoren unterschiedlich lange abklingen, d.h. es fließen immer noch La-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

dungsträger zu einem Zeitpunkt ab, zu welchem die Ursache für ihre Generation nicht mehr gegeben ist. Betrachtet man nun den Abtastzeitpunkt der logischen „0“, so wird deutlich, dass im Falle des langsameren Detektors B immer noch etwa die halbe Signalamplitude der zeitlich vorangegangenen logischen „1“ vorherrscht. Das kann dazu führen, dass die Auswerteelektronik hier fälschlicherweise eine logische „1“ erkennt und somit ein Übertragungsfehler auftritt. Im Falle des schnelleren Detektors A ist die Signalamplitude zum oben erwähnten Zeitpunkt bereits vollständig abgeklungen, so dass die logische „0“ hier korrekt abgetastet werden kann. Diese Wechselwirkung zwischen zwei benachbarten logischen Zuständen bezeichnet man als Symbolübersprechen (engl.: Intersymbol Interference, ISI). Man ist bestrebt, dieses Phänomen möglichst zu vermeiden, um Bitfehler auf der Empfängerseite zu minimieren. Neben einer hohen Responsivity sind hierfür Detektoren mit einer möglichst kurzen Antwortzeit notwendig.
Die beiden wichtigsten Mechanismen, welche die Antwortdauer einer homojunction[5] PIN-Diode auf einen Lichtimpuls beeinflussen sind:

- **Transitzeit** τ_t - Zeitbedarf für den Drift generierter Ladungsträger aus der verarmten Zone

- **parasitäre Effekte** - (Ent)ladedauer der inherenten Sperrschichtkapazität τ_{RC} und ggf. weiterer parasitärer Kapazitäten.

In Abbildung 2.5 ist schematisch eine vorgespannte PIN-Diode mit eingezeichnetem Ladungsträgertransport dargestellt. Wie bereits erwähnt, driften generierte Löcher aufgrund des elektrischen Feldes innerhalb des verarmten Bereichs zum p-Kontakt und die Elektronen entsprechend zum n-Kontakt. Sie bewegen sich bei hinreichend hohen Feldstärken von $\vec{E}_{InGaAs} > 50\frac{kV}{cm}$ mit ihren jeweiligen maximalen Driftgeschwindigkeiten v_p beziehungsweise v_n. Für das gitterangepasste Material InGaAs auf InP betragen die Absolutwerte $v_p = 4,8 \cdot 10^6 \frac{cm}{s}$ und $v_n = 6,5 \cdot 10^6 \frac{cm}{s}$ bei Raumtemperatur, d.h. Löcher bewegen sich mit etwa 74% der Elektronendriftgeschwindigkeit durch das verarmte Gebiet [31, 32]. Für eine kurze Transitzeit τ_t ist es notwendig dafür zu sorgen, dass die verarmte Zone nach dem Abschalten der optischen Anregung möglichst schnell geräumt wird. Hierfür sollen die langsameren Löcher einen möglichst kurzen Weg zum p-Kontakt zurücklegen müssen. Da laut Absorptionsgesetz die Generationsdichte mit zunehmender Tiefe der Photonen

[5] Halbleiterschichtfolge ohne Änderung der Bandlückenenergie

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

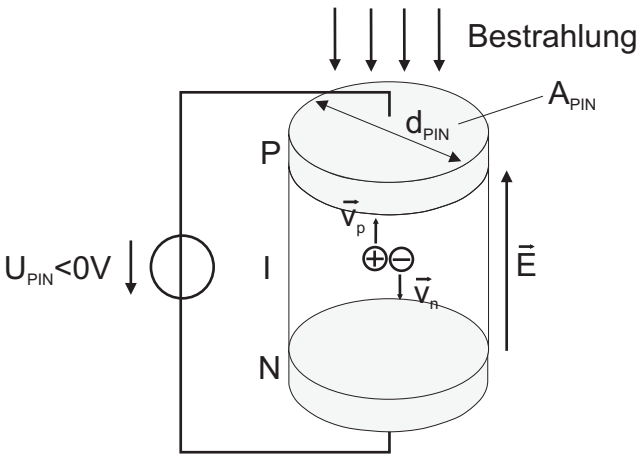


Abb. 2.5: Schematische Darstellung des Ladungsträgerdrifts einer PIN-Diode

im Material exponentiell abnimmt, wird die p-Kontaktschicht der PIN-Diode im Lichtweg vor der Absorptionsschicht positioniert. So werden die meisten Ladungsträger nahe des p-Kontakts generiert und damit sind die zurückzulegenden Wege beider Ladungsträgertypen entsprechend ihren Driftgeschwindigkeiten optimiert. Die Transitzeit ist in erster Linie abhängig von der Dicke des Absorbermaterials d_i. Mit der Annahme eines unendlichen Absorptionskoeffizienten α lässt sich für den frequenzabhängigen Photostrom $I_{ph}(\omega)$ bei einer PIN-Diode unter Annahme des beschriebenen Transitzeitmechanismus folgender Zusammenhang herleiten [33]:

$$\left|\frac{I_{ph}(\omega)}{I_{ph}(0)}\right| = \left|\frac{sin(\frac{\omega d_i}{2v_n})}{\frac{\omega d_i}{2v_n}}\right| = \left|si\left(\frac{\omega d_i}{2v_n}\right)\right| \quad . \tag{2.14}$$

Aus Gleichung 2.14 lässt sich ein Zusammenhang für die technisch wichtige 3dB-Eckfrequenz f_{3dB} ableiten, d.h. die Frequenz, bei welcher die ausgangsseitig generierte Leistung am Detektor um die Hälfte gegenüber ihrem DC-Wert abgefallen ist. Mit $|I_{ph}(\omega)/I_{ph}(0)|^2 = 0,5$ und $\omega = 2\pi \cdot f$ folgt:

$$f_{3dB,transit} = \frac{0,45 \cdot v_n}{d_i} = \frac{0,45}{\tau_n}. \tag{2.15}$$

Die elektrische Bandbreite ist nach Gleichung 2.15 umgekehrt proportional zur Dicke des Absorptionsmaterials und hängt aufgrund der p-seitigen Einstrahlung von der Driftgeschwindigkeit der Elektronen ab.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

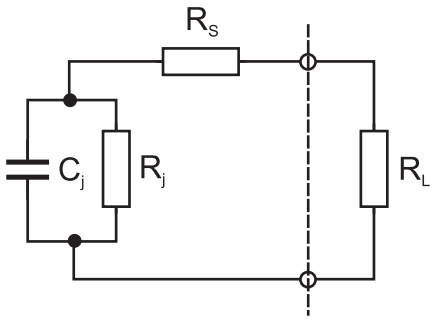


Abb. 2.6: Einfaches elektrisches Ersatzschaltbild einer PIN-Diode mit einem Lastwiderstand R_L

Der zweite wichtige Mechanismus, welcher parallel zur Transitzeit einen entscheidenden Einfluss auf die Antwortzeit einer PIN-Diode hat, sind parasitäre RC-Glieder, welche in Abbildung 2.6 innerhalb eines einfachen Ersatzschaltbildes dargestellt sind. Hierbei steht die Struktur der PIN-Diode selbst im Vordergrund, da die Einbettung einer isolierenden zwischen zwei hochleitfähigen Schichten eine Plattenkondensatoranordnung darstellt. Diese Sperrschichtkapazität ist mit C_j im Ersatzschaltbild berücksichtigt und es gilt:

$$C_j = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{r,i} \cdot A_{PIN}}{d_i}. \tag{2.16}$$

Be- bzw. Entladen wird die Kapazität C_j über den Serienwiderstand R_S und die angeschlossene Last R_L. R_S repräsentiert die Kontakt-, Zuleitungs- und Schichtwiderstände der Diodenstruktur. Der parallel zu C_j liegende hochohmige Sperrschichtwiderstand R_j spielt bei hohen Frequenzen keine nennenswerte Rolle. Für die Bandbreitenbegrenzung durch das RC-Glied ergibt sich demnach

$$f_{3dB,RC} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{C_j \cdot (R_S + R_L)}, \tag{2.17}$$

so dass sich in Verbindung mit Gleichung 2.16 unter der Annahme einer konstanten aktiven Fläche A_{PIN} und eines konstanten Serienwiderstandes R_S folgende Proportionalität aufstellen lässt

$$f_{3dB,RC} \sim d_i. \tag{2.18}$$

Aus dem Vergleich der mathematischen Beziehungen 2.15 und 2.18 ist ersichtlich, dass beide Mechanismen, sowohl die Transitzeit durch das verarmte Gebiet, als auch die RC-Zeitkonstante die Bandbreite beeinflussen, wobei die Auswirkung der Dicke des Absorbermaterials d_i jeweils gegenläufig ist. Der Einfluss von d_i auf die 3dB-Eckfrequenz ist

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

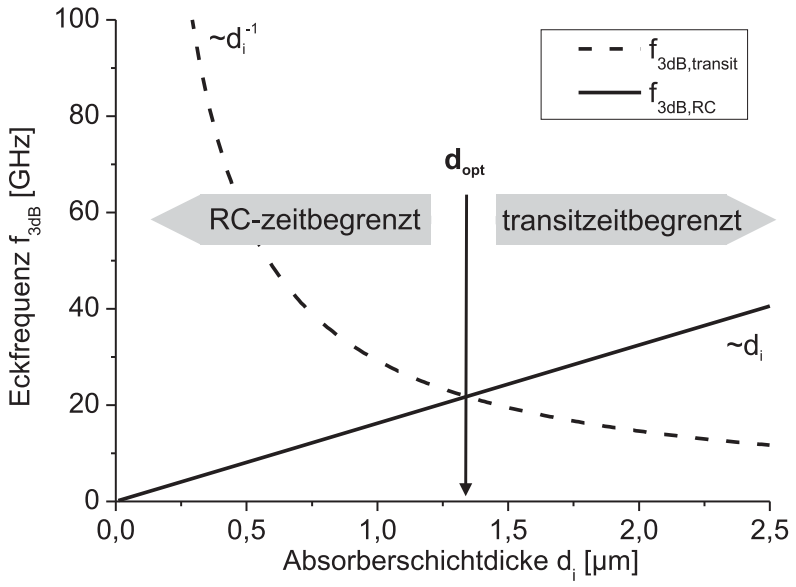


Abb. 2.7: Berechneter Verlauf der 3dB-Eckfrequenz einer InGaAs PIN-Diode mit d_{PIN} = 25 µm bei Limitierung durch die Transitzeit bzw. die RC−Zeitkonstante

in Abbildung 2.7 quantitativ dargestellt. Für einen festen Diodendurchmesser d_{PIN} = 25 µm sieht man den kalkulierten Verlauf beider Mechanismen unter der Berücksichtigung einer Last von 50Ω. Der Schnittpunkt beider Kurven kennzeichnet die optimale Absorberschichtdicke d_{opt} für eine maximale 3dB-Eckfrequenz, bei der gilt $\tau_t = \tau_{RC}$. Bei geringeren Schichtdicken steigt die Sperrschichtkapazität C_j, so dass die PIN-Diode aufgrund der RC-Zeitkonstanten an Bandbreite einbüßt. Bei höheren Schichtdicken als d_{opt} wird das Bauelement entsprechend durch die Transitzeit begrenzt.

2.1.7 Zusammenfassung und Diskussion

Als kompakte Designhilfe zeigt die tabellarische Zusammenstellung den Einfluss einiger Material- und Betriebsparameter auf die Bauelementeigenschaften Dunkelstrom, Empfindlichkeit und das Hochfrequenzverhalten. Die Angaben gelten für eine geätzte PIN-Struktur im zweistufigen Mesa-Design mit einer p-seitigen Einstrahlung. In Klammern

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

sind Verweise zu den entsprechenden Gleichungen angegeben. Aus dem Vergleich einzelner Parameter wird deutlich, dass ihr Einfluss auf verschiedene Bauelementeigenschaften unterschiedlich sein kann. Besonders die gegenläufige Auswirkung der Absorberschichtdicke d_i auf die Responsivity und die Transitzeit τ_t sind beim Design von PIN-Dioden von großem Nachteil, da breitbandige Elemente nur auf Kosten ihrer Empfindlichkeit realisiert werden können. Hier liegt der große Vorteil von Detektoren in Wellenleiteranordnung, da die Pfade der Lichtabsorption und des Photostomflusses senkrecht zueinander ausgerichtet sind. So ist es möglich, einen langen Absorptionsweg bereitzustellen unter gleichzeitiger Beibehaltung kurzer Driftwege der generierten Ladungsträger zu den Kontakten [31].

Tab. 2.1: Einfluss einiger Parameter auf die Eigenschaften einer PIN-Diode

Parameter	**Dunkelstrom**	**Responsivity**	**Bandbreite**
$\mathbf{d}_p \uparrow$	kein Einfluss	$\downarrow$	$R_S \downarrow \Rightarrow f_{3dB,RC} \uparrow$ (2.17)
$\mathbf{d}_i \uparrow$	kein Einfluss	$\uparrow$	$f_{3dB,transit} \downarrow$, $f_{3dB,RC} \uparrow$ (2.15, 2.18)
$\mathbf{d}_n \uparrow$	kein Einfluss	kein Einfluss	$R_S \downarrow \Rightarrow f_{3dB,RC} \uparrow$ (2.17)
$\mathbf{d}_{PIN} \uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$ für $d_{PIN} \leq d_{spot}$, konstant für $d_{PIN} > d_{spot}$	$f_{3dB,RC} \downarrow$ (2.18)
antiRX	kein Einfluss	$\uparrow$ (etwa 30% bei InGaAs)	kein Einfluss
$\mathbf{U}_{bias}(< 0V!)$	$\uparrow$	in erster Näherung konstant	$f_{3dB,transit} \uparrow$, bis $v_n, (v_p)$ max. erreicht

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2.2 Resonanztunneldiode

Neben der PIN-Diode ist die Resonanztunneldiode das zweite Kernelement der in dieser Arbeit vorgestellten optischen Empfängerschaltungen. Die geleisteten Arbeiten zur RTD konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Technologie des Bauelements und werden im späteren Verlauf vorgestellt. In diesem Kapitel wird zunächst auf das grundlegende Funktionsprinzip und später auf das für den Schaltungseinsatz wichtige Hystereseverhalten der RTD bei Großsignalaussteuerung eingegangen. Details zur Bauelementmodellierung, welche den durchgeführten Schaltungssimulationen zugrunde liegen, basieren auf den Arbeiten in [21].

2.2.1 Aufbau und Funktionsprinzip

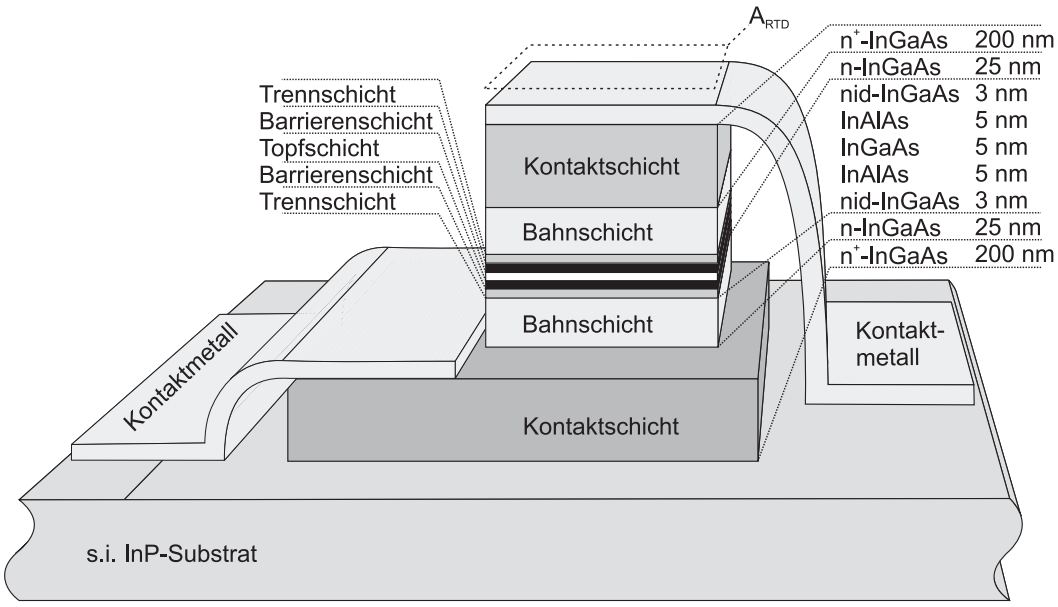


Abb. 2.8: Qualitativer Aufbau einer in dieser Arbeit verwendeten RTD

In Abbildung 2.8 ist der qualitative Aufbau der verwendeten RTD dargestellt. Es handelt sich hierbei um ein mittels der MOVPE hergestelltes, zur bezüglich der Topfschicht spiegelsymmetrisches Schichtpaket. Die beiden hochdotierten äußeren n^+-InGaAs Schichten dienen der ohmschen Bauelementkontaktierung. Zum Inneren hin wird die Dotierung durch zwei weitere InGaAs-Schichten bis in den Bereich der Hintergrunddotierung von etwa $N_{nid} = 10^{16}$ cm^{-3} herabgesetzt. Eingebettet zwischen die Kontakt- und Zuleitungs-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

schichtfolge befindet sich eine Quantenbrunnenstruktur, bestehend aus den beiden gitterangepassten InAlAs-Barrierenschichten und der leicht verspannten InGaAs-Topfschicht mit Schichtdicken von jeweils 5 nm. Strukturiert wird das Bauelement durch die Ausbildung von zwei Mesen mit entsprechenden metallischen Kontakten. Detaillierte Informationen zur Prozesstechnologie sind in Kapitel 5.4.1 beschrieben.

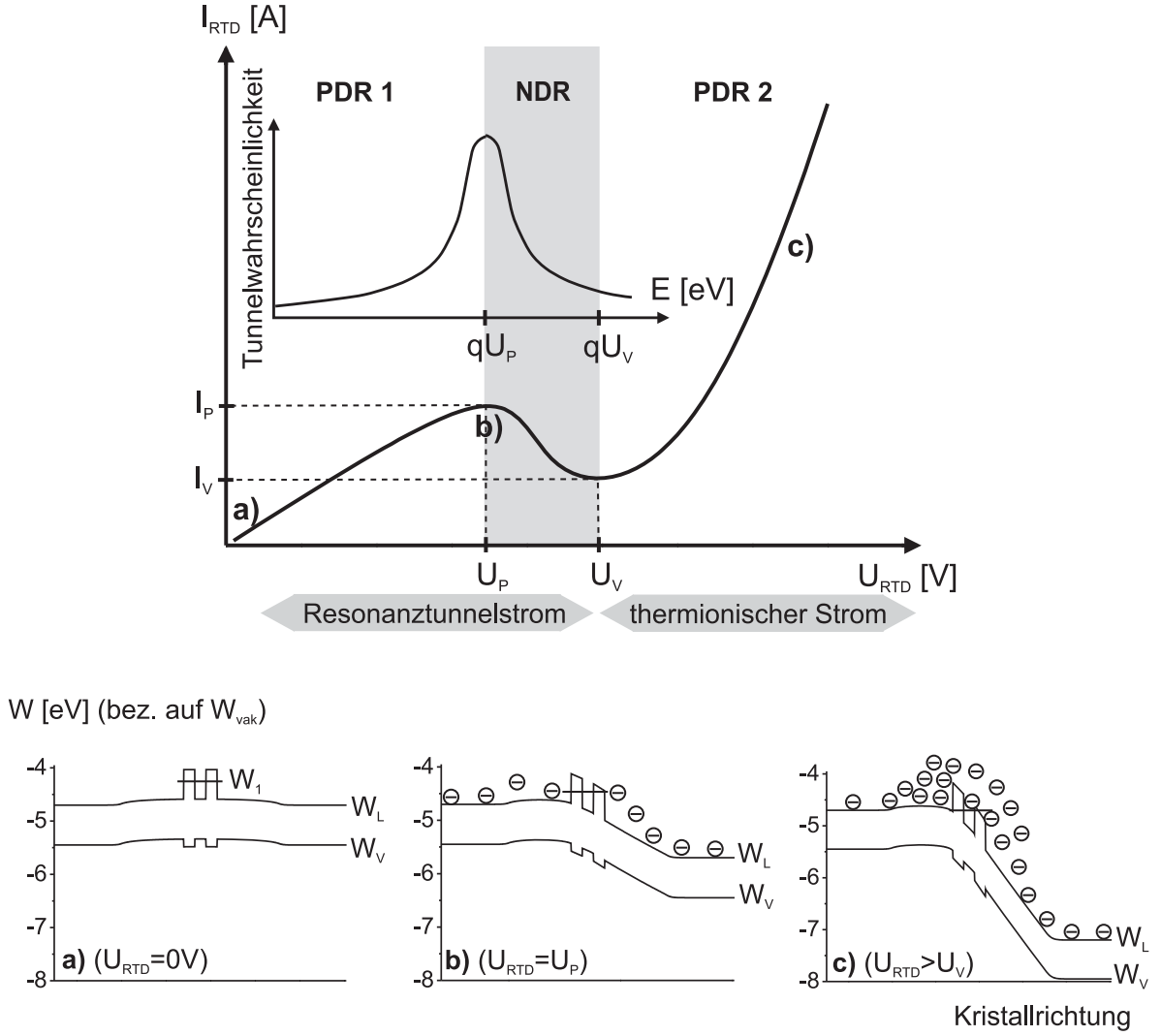


Abb. 2.9: RTD I(U)-Verhalten mit zugehörigen Bandverläufen für charakteristische Spannungswerte

Abbildung 2.9 zeigt eine typische, stark nichtlineare I(U)-Kennlinie einer RTD. Des Weiteren sind mittels der Software SimWindows [34] berechnete Bandverläufe für die markierten

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Spannungswerte dargestellt, basierend auf der eindimensionalen Lösung von Halbleitergleichungen für das verwendete Materialsystem. Der spannungsabhängige Stromtransport durch eine Doppelheterobarriere kann bezüglich des Transfermechanismus in zwei Anteile untergliedert werden:
Für kleine Spannungen wird der Transport durch den Quantenbrunnen durch das Tunneln der Ladungsträger dominiert. Basierend auf dem Teilchen-Welle-Dualismus nach de Broglie, lässt sich mit Hilfe der Schrödinger Gleichung eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit > 0 für Elektronen in Bereichen ableiten, in denen nach klassischer Auffassung keine Ladungsträger existieren dürften. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit klingt exponentiell mit der Eindringtiefe in diese verbotenen Bereiche ab, so dass Elektronen, trotz nicht ausreichender Energie, Barrieren überwinden können, sofern diese hinreichend dünn sind (Tunneleffekt). Für eine endliche Barrierenschichtdicke d_{bar} ergibt sich in Abhängigkeit von der Aufprallenergie der Elektronen $W_{e,bar}$ die Tunnelwahrscheinlichkeit mit [35, 25]

$$T(W_{e,bar}) = exp\left[-2 \cdot d_{bar} \cdot \sqrt{2m_e^* \cdot \frac{\Delta W_L - W_{e,bar}}{\hbar^2}}\right]. \tag{2.19}$$

Dieses quantenmechanische Phänomen konnte erstmals von Leo Esaki an einem mittels der Molekularstrahlepitaxie (MBE) hergestellten AlGaAs/GaAs Heterostruktur[6]- Quantentopf anhand der gemessenen I(U)-Charakteristik demonstriert werden [35]. Diese Leistung wurde 1973 mit dem Nobelpreis für Physik honoriert.
Für eine n-Typ RTD, welche in dieser Arbeit ausschließlich zum Einsatz kommt, können die Transportmechanismen durch Betrachtung der Elektronen im Leitungsband erklärt werden. Innerhalb des Quantentopfes kommt es zur Ausbildung eines oder mehrerer diskreter Energieniveaus entsprechend folgender Näherungslösung [36, 25]

$$W_n = 2(n - \frac{1}{2}) \cdot \frac{\hbar}{d_{topf}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot Q_L \cdot \Delta W_g}{m_e^*}}, \quad mit\ n = 1, 2, 3... , \tag{2.20}$$

wobei d_{topf} die Schichtdicke des Quantentopfmaterials angibt und die Leitungsbanddiskontinuität des Heteroübergangs dimensionslos als $Q_L = \Delta W_L/eV$ in die Gleichung eingeht. Physikalisch sinnvolle Lösungen ergeben sich für die Bedingung $W_n < \Delta W_L$. Aufgrund der dünnen Barriereschichten können diese mit einer hinreichend hohen Wahrscheinlichkeit durchtunntelt werden (vgl. Gl.: 2.19). Das Überwinden des Topfbereichs hingegen ist

[6] Halbleiterschichtfolge mit räumlich scharfem Bandlückenwechsel

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

nur möglich, wenn die Elektronenenergie $W_{e,bar}$ mit der Energie eines diskreten Niveaus W_n im Quantentopf übereinstimmt. In diesem Fall der quantenmechanischen Resonanz ist die Transmissionswahrscheinlichkeit durch die gesamte Quantenstruktur am höchsten. Bei Abweichungen in beide Richtungen nimmt die Tunnelwahrscheinlichkeit exponentiell ab. Ausgehend von lediglich einem diskreten Topfniveau W_1 befindet sich dieses für den spannungslosen Zustand oberhalb der Fermienergie W_F (Abb. 2.9 a)). Durch Erhöhen der Spannung U_{RTD} wird das Ferminiveau links des Quantenbrunnens angehoben und nähert sich dem diskreten Niveau im Topf an. Somit steigt die Transmissionswahrscheinlichkeit und damit auch die elektrische Stromstärke I_{RTD} bis zum Punkt der quantenmechanischen Resonanz (Abb. 2.9 b)). Dieser Bereich wird als erster positiv-differentieller Widerstandsbereich bezeichnet (engl.: positive-differential-resistance, PDR1). Hier besitzt die I(U)-Kennlinie ein lokales Maximum mit den charakteristischen Werten Peak-Strom I_P und Peak-Spannung U_P. Bei einer weiteren Spannungserhöhung nimmt die Tunnelwahrscheinlichkeit und mit ihr die Stromstärke wieder ab, bis die Strom- Spannungscharakteristik bei $U_{RTD} = U_V$ (Valley-Spannung) und dem zugehörigen Valley-Strom I_V ein lokales Minimum erreicht. Dieser Bereich der abnehmenden Stromstärke wird als negativ-differentieller Widerstandsbereich (engl.: negative-differential-resistance, NDR) bezeichnet.
Wird die Spannung weiter erhöht, so verliert der Tunnelstrom an Einfluss und der thermionische Ladungstransport dominiert. Hierbei wird das Leitungsband durch das angelegte elektrische Potential so stark verbogen, dass sich die zweite Barriere unterhalb der Fermienergie befindet und nur die erste Barriere durchtunnelt werden muss. Des Weiteren kommt es durch die hohe Energie der Ladungsträger zu einer Elektronenemission über die Barriere hinweg (Abb. 2.9 c)). Resultierend steigt der elektrische Strom exponentiell an und führt zur Ausbildung des zweiten positiv-differentiellen Widerstandsbereiches PDR2. Weitere, für den analogen wie digitalen Schaltungseinsatz relevante Bauelementparameter sind das Peak-zu-Valley Verhältnis PVR=$\frac{I_P}{I_V}$, die Ausdehnung des NDR-Bereiches U_{NDR}=U_V-U_P sowie die Peak-Stromdichte J_P.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2.2.2 Großsignaldynamik

Der Einsatz der RTD in den untersuchten Digitalschaltungen erfordert eine hochfrequente Aussteuerung des Bauelements über alle drei charakteristischen Bereiche der I(U)-Kennlinie. Basierend auf den Untersuchungen in [1], [21] sind hierbei mit zunehmender Frequenz Verschiebungen der Peak- und Valley-Punkte zu berücksichtigen, welche Auswirkungen auf den Schaltungseinsatz besitzen.

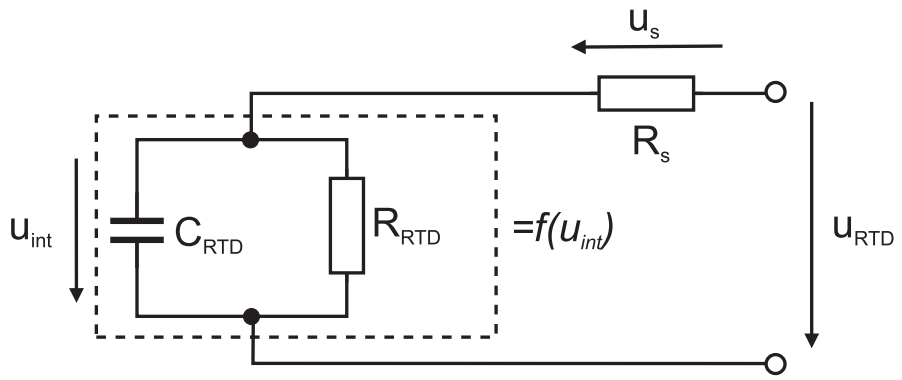


Abb. 2.10: Dynamisches Kleinsignal-Ersatzschaltbild einer RTD

Abbildung 2.10 zeigt ein einfaches Kleinsignal-Ersatzschaltbild einer RTD ohne Berücksichtigung der typischerweise vorhandenen Zuleitungsumgebung. Hierbei sind im Element R_S die parasitären Kontaktwiderstände und Zuleitungsverluste der Halbleiterschichten zusammengefasst. C_{RTD} beschreibt die spannungsabhängige Kapazität und R_{RTD} modelliert den differentiellen Widerstand, welcher im NDR-Bereich entsprechend negative Werte annimmt. Wird die RTD großsignalmäßig ausgesteuert, kommt es mit zunehmender Frequenz durch den Ladungsspeichereffekt der Kapazität C_{RTD} zu einer Phasenverschiebung zwischen U_{int} und der von außen angelegten Wechselspannung U_{RTD}. Hierdurch verschieben sich die charakteristischen Spannungswerte U_P und U_V, so dass sich mit steigender Frequenz ein immer stärker ausgeprägtes Hystereseverhalten ausbildet.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

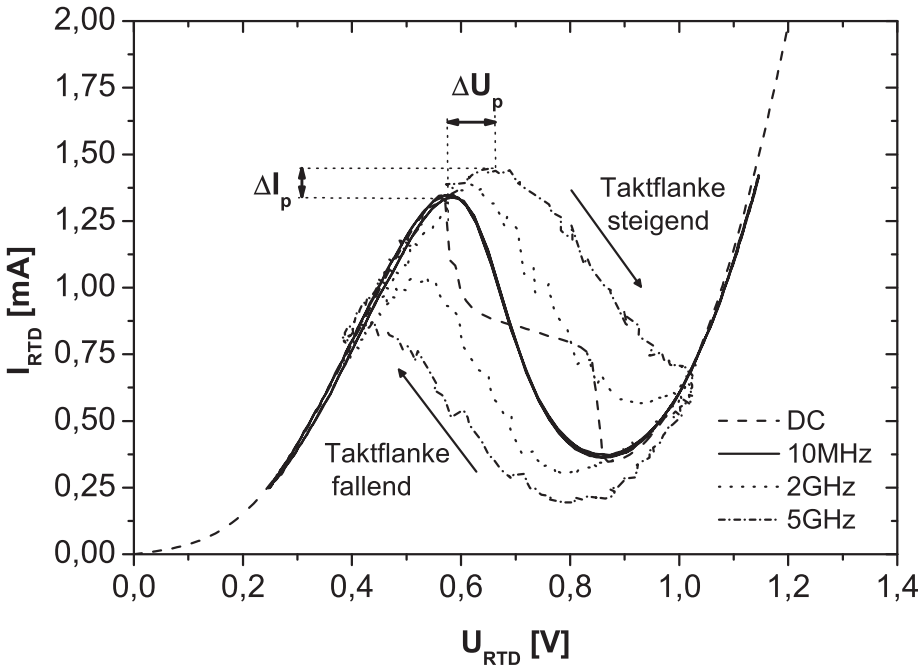


Abb. 2.11: Gemessene RTD I(U)-Kennlinie bei verschiedenen Frequenzen [21]

Die messtechnische Erfassung dieses Effektes an einem Einzelbauelement ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Verschiebung des NDR bei Frequenzen im einstelligen GHz-Bereich merklich einsetzt. Für Frequenzen oberhalb von 10 GHz kommt es zu einer nahezu vollständigen Aufspaltung der Kennlinie für die steigende und fallende Flanke über den gesamten Spannungsbereich. Der Einfluss des Hystereseeffektes auf den Einsatz der RTD in Digitalschaltungen wird im folgenden Unterkapitel diskutiert.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2.3 Monostabiles-Bistabiles Logik Element (MoBiLE)

Das Monostabile-Bistabile Logik Element (MoBiLE) besteht aus einer Reihenschaltung zweier RTDs. Diese prinzipiell sehr einfache und kompakte Schaltung, welche jedoch eine ausgeprägte logische Funktionalität beinhaltet, wurde erstmals im Jahr 1993 von Koichi Maezawa vorgestellt [37]. Durch die Ausnutzung der nichtlinearen RTD-Kennlinie lassen sich Anwendungen realisieren, welche im Vergleich zu herkömmlichen Technologien sehr kurze Schaltzeiten aufweisen. Zu nennen sind hier neben den logischen Gattern u.a. Forschungsaktivitäten betreffend Frequenzteiler [38, 39], Logikelemente mit multiplen gewichteten Eingängen [40, 41, 42], $\Delta\Sigma$-Modulatoren [42], Demultiplexer [43, 21] und Pulsformer für Ultra-Wideband Anwendungen (UWB) [2].

2.3.1 Aufbau und Funktion

In Abbildung 2.12 a) ist der prinzipielle Aufbau eines MoBiLE-Gatters dargestellt. Für die Funktion des Elements ist es zwingend erforderlich, dass die beiden in einer Treiber/Last-Konfiguration verschalteten RTDs unterschiedliche Absolutwerte für den Peak-Strom I_P aufweisen. Da bei einer monolithischen Integration von einer identischen Peak-Stromdichte J_P innerhalb einer begrenzten Fläche auf dem Wafer ausgegangen werden kann, wird diese Forderung durch eine Variation der aktiven RTD Flächen A_{RTD} erfüllt. Für den Betrieb benötigt das Gatter ein periodisches, unipolares Taktsignal U_{takt}. Über den gemeinsamen Knotenpunkt zwischen den beiden RTDs wird sowohl das Eingangsdatum in Form des Steuerstroms I_{steuer} eingeprägt, als auch der eingenommene logische Zustand parallel zur Treiber-RTD (RTD_T) ausgelesen.
In der folgenden Funktionsbeschreibung sei zunächst $I_{steuer} = 0A$ angenommen. Für diesen Fall sind die in Abbildung 2.12 b) und c) gezeigten Kennlinien durchgehend gezeichnet. Des Weiteren sei die aktive Fläche der Last-RTD (RTD_L) größer. Wird nun die Taktspannung U_{takt} erhöht, so entspricht das einer Verschiebung der Last-RTD Kennlinie auf der Spannungsachse in den im Teil b) der Abbildung 2.12 dargestellten Diagrammen. Der Arbeitspunkt ergibt sich aufgrund der Stromgleichheit durch beide Bauelemente aus dem Schnittpunkt der Treiber- mit der Lastkennlinie. Es stellt sich zunächst ein möglicher Arbeitspunkt (monostabil 1, AP 4) ein. Wird die Taktspannung weiter erhöht ($U_{takt,2}$), bis der Gatterstrom I_{MOBILE} den Peak-Strom der Treiber-RTD erreicht bzw. überschreitet, ergeben sich theoretisch zwei mögliche Arbeitspunkte (bistabil). In diesem Fall wird jedoch der Hochpegel-Arbeitspunkt eingenommen (AP 5), da aufgrund des klei-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

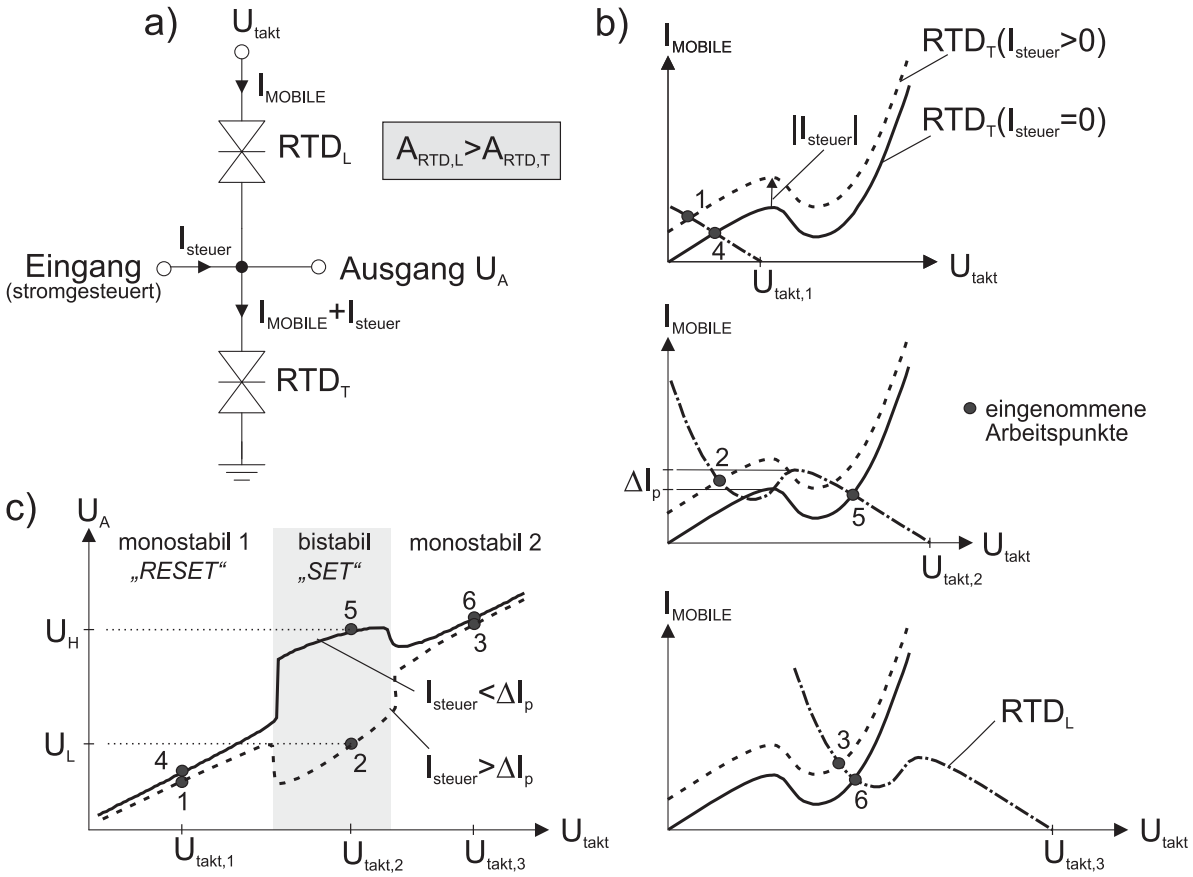


Abb. 2.12: a) Elektrischer Aufbau eines MoBiLE-Gatters, b) Treiber/Last-Konfigurationen für verschiedene Taktspannungen U_{takt} und c) das zugehörige Ausgangsverhalten (Bifurkationskurve)

neren Treiber-Peak-Stromes nur die Treiber-RTD ihren Arbeitspunkt vom PDR1 in den PDR2 wechseln kann. Dieses wird für die Last-RTD durch ihren größeren Peak-Strom zunächst verhindert. Da die Ausgangsspannung U_A parallel zur Treiber-RTD abgegriffen wird, liefert das MoBiLE-Gatter hier den hohen logischen Pegel U_H.

Bei einer weiteren Erhöhung der Taktspannung ($U_{takt,3}$) wechselt auch die Last-RTD ihren Arbeitspunkt in den PDR2, sobald I_{MOBILE} den Last-Peak-Strom überschreitet. Die Schaltung wechselt dann vom bistabilen in den zweiten monostabilen Zustand (monostabil 2, AP 6) über.

Wird über den gemeinsamen Knotenpunkt ein Strom I_{steuer} eingeprägt, welcher größer als die Differenz der Peak-Ströme ΔI_P beider RTDs ist, so führt das zu einer Verschiebung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

der Treiberkennlinie längs der Stromachse, so dass sich nun ein höherer Peak-Strom bei der Treiber-RTD einstellt. Hierdurch wechselt nun beim Übergang vom ersten monostabilen in den bistabilen Zustand die Last-RTD ihren Arbeitspunkt in den PDR2 und es wird der Niedrigpegel-Arbeitspunkt (AP 2) eingenommen. Die Ausgangsspannung U_A des Gatters entspricht dem niedrigen logischen Pegel U_L. Die Kennlinien für diesen Fall sind in Abbildung 2.12 gepunktet dargestellt.
Im Teil c) der Abbildung 2.12 wird das Verhalten des MoBiLE anhand der Bifurkationskurve verdeutlicht. Sie illustriert kompakt das zuvor erläuterte Ausgangsverhalten des Gatters in Abhängigkeit von der Taktspannung U_{takt} und des Steuerstroms I_{steuer}. Beim Betrieb des MoBiLE als logisches Gatter ist unbedingt darauf zu achten, dass bei der Wahl der Amplitude der Taktspannung der zweite monostabile Zustand nicht erreicht werden kann, da sonst der eingenommene logische Ausgangspegel im bistabilen Zustand verloren geht. Optimal ist eine Amplitude, welche in etwa der Spannung $U_{takt,2}$ entspricht. Das Zurücksetzen des Gatters erfolgt durch die fallende Flanke der Taktspannung aus dem bistabilen („*SET*“) in den ersten monostabilen Zustand („*RESET*“).

2.3.2 Optischer Steuereingang

Eine schaltungstechnische Realisierung der Stromquelle am Eingang hängt in erster Linie von der angestrebten Applikation ab. Sollen ausschließlich elektrische Größen verarbeitet werden, so bietet sich beispielsweise ein Feldeffekttransistor an. Dieser versorgt dann, in Abhängigkeit vom anliegenden Gate-Potenzial, den MoBiLE-Eingang entsprechend mit Drain-Strom [44]. Als Schnittstelle für eine optische Datenverarbeitung kommt wiederum ein Photodetektor in Frage. Hier kann unmittelbar ein optischer Datenstrom eingekoppelt werden und der generierte Photostrom direkt zur Speisung des MoBiLE-Eingangs verwendet werden. Die grundsätzliche Funktionalität wurde bereits vor einer Dekade demonstriert [20].
Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf der PIN-Diode. So ist es naheliegend, an dieser Stelle eine PIN-Diode als Stromquelle hinzuzuziehen. In Abbildung 2.13 sind alle möglichen Gundgatter mit einer PIN-Diode, sowohl für positive, als auch für negative Taktspannungen gezeigt. Bei der Verschaltung ist darauf zu achten, dass in beiden Fällen einerseits die PIN-Diode negativ vorgespannt wird, und andererseits die Flächenverhältnisse der RTDs so gewählt werden, dass der Peak-Strom der kleineren RTD durch den Photostrom moduliert wird. Hierzu ist immer die RTD mit der kleineren Fläche parallel

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

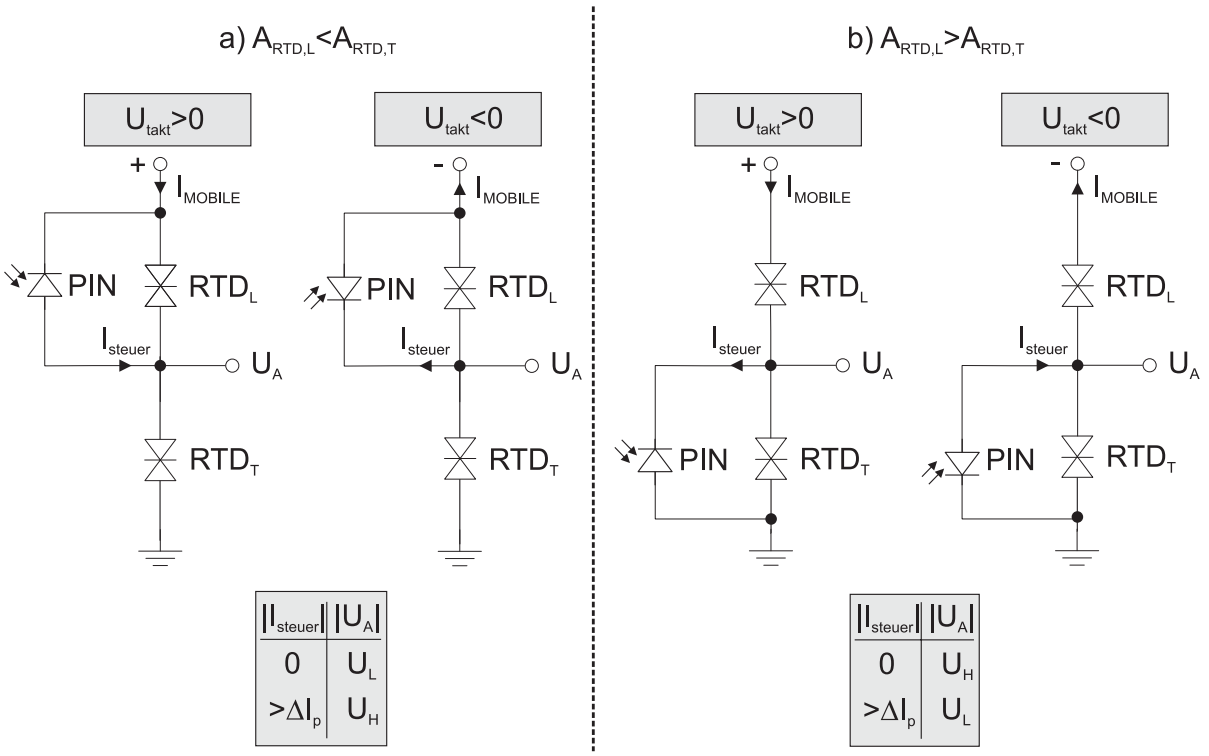


Abb. 2.13: Grundschaltungen des MoBiLE-Gatters mit einer PIN-Diode als optischer Dateneingang für verschiedene Polaritäten U_{takt} mit a) nicht-invertierendem und b) invertierendem Verhalten

zur PIN-Diode zu verschalten. Dem Schaltungsdesigner steht demnach für jede denkbare Ausgangssituation eine mögliche Lösung zur Verfügung, wobei sogar die Wahl zwischen nicht-invertierendem (Abb. 2.13 a)) und invertierendem (Abb. 2.13 b)) logischen Verhalten besteht.

2.3.3 Einfluss der RTD-Hysterese auf das Schaltverhalten

Das im Kapitel 2.2.2 diskutierte Hystereseverhalten einer RTD für hohe Frequenzen hat folgerichtig auch Auswirkungen auf das Schaltverhalten des MoBiLE, da hier die I(U)-Kennlinie in beide Richtungen durchfahren werden muss. In Abbildung 2.14 sind bei verschiedenen Frequenzen gemessene Bifurkationskurven dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich der für niedrige Frequenzen sehr scharfe Übergang zwischen dem ersten monostabilen und dem bistabilen Zustand mit zunehmender Frequenz ausweitet

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

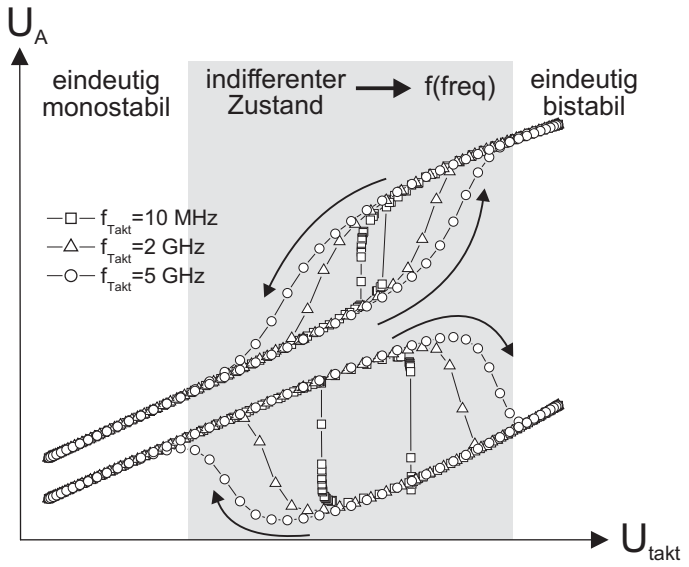


Abb. 2.14: Bifurkationskurven gemessen bei verschiedenen Frequenzen [21]

(vgl. Abb. 2.12 c)). Durch den Hystereseeffekt der RTD wird für die steigende Taktflanke der „SET"-Zeitpunkt des MoBiLE gegen den „RESET"-Zeitpunkt für die fallende Flanke zeitlich verzögert. Hierdurch wird einerseits das Ausgangssignal U_A im Zeitbereich zu höheren Frequenzen immer stärker verzerrt. Andererseits verliert das MoBiLE-Gatter seine Schalteigenschaft sobald der bistabile Bereich völlig durch den indifferenten Zustand überdeckt wird. Mit dem gegenwärtigen Bauelementdesign der RTD kann ein korrektes Schaltverhalten der monolithisch integrierten MoBiLE bis zu Taktfrequenzen von etwa 6 GHz demonstriert werden [21], wobei die Grenzfrequenzen des sonst in den Schaltungen verwendeten Bauelemente deutlich höher sind. Es erscheint daher sinnvoll, bezüglich der Hochfrequenztauglichkeit des Gatters Maßnahmen zur Reduzierung des Hystereseeffektes durch die Optimierung der RTD-Elemente R_S und C_{RTD} vorzunehmen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2.4 Heterostruktur-Feldeffekttransistor (HFET)

Da die in dieser Arbeit realisierten Schaltungen den Heterostruktur-Feldeffekttransistor u.a. in der Ausgangsstufe beinhalten, wird dieses Bauelement in diesem Kapitel kurz vorgestellt. Details können den zahlreich existierenden Publikationen entnommen werden. An dieser Stelle greift diese Arbeit größtenteils auf die im Fachgebiet vorhandene Technologie zurück, so dass auf Aktivitäten zur Weiterentwicklung des HFET als Einzelbauelement für den Schaltungseinsatz weitestgehend verzichtet werden konnte.
Prinzipiell lassen sich für diesen Transistortyp Heterostrukturen sowohl in GaAs- als auch in InP-Technologie realisieren, wobei hier der letztgenannte Vertreter aufgrund seiner höheren Ladungsträgerdichte und seiner höheren Ladungsträgerbeweglichkeit im Kanal ($In_{0,53}Ga_{0,47}As \approx 11200$ cm^2/Vs und GaAs ≈ 9000 cm^2/Vs [32]) deutlich bessere Mikrowelleneigenschaften aufweist. Aufgrund der erforderlichen Technologiekompatibilität zu PIN-Dioden, welche für Glasfaseranwendungen ein Absorbermaterial mit einer Bandlückenenergie $W_g < 0{,}8$ eV aufweisen müssen, kommt hier nur die InP-Technologie in Frage.

2.4.1 Funktionsprinzip

Wegen des zur Substratoberfläche parallelen Ladungstransports im Kanal zählt der HFET zu den sogenannten lateralen Bauelementen. Der zwischen den beiden ohmschen Kontakten Source und Drain eingeprägte elektrische Strom I_D fließt durch die Kanalschicht und wird durch die sich unterhalb des Gate-Kontakts ausbildende Raumladungszone (RLZ) idealerweise ohne nennenswerte Stromaufnahme moduliert ($I_G \approx$ 10nA...1µA). Hierfür ist es notwendig, dass die beiden Kontakte Source und Drain eine ohmsche Durchlasscharakteristik aufweisen, wohingegen der Gate-Kontakt als sperrender Metall-Halbleiter Übergang ausgeführt wird (Schottky-Diode). Technisch werden diese beiden unterschiedlichen Charakteristika erzielt, indem ein Metall mit einer geeigneten Austrittsarbeit Φ_M auf einen Halbleiter mit einer hohen (ohmsch) bzw. niedrigen n-Dotierung (sperrend) aufgebracht wird [24]. Aus diesem Grund befindet sich die Gate-Metallisierung auf der tiefer liegenden nid-Barrierenschicht, während die ohmschen Kontakte auf der obersten, hoch n-dotierten InGaAs Deckschicht aufgebracht werden.
Die besondere Eigenschaft dieses Transistortyps liegt in der räumlichen Trennung von Dotierstoffatomen, welche die benötigten Ladungsträger für den Kanal bereitstellen und dem Kanal selbst. Dies wird erreicht durch einen Heteroübergang exakt an der Grenze zur un-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

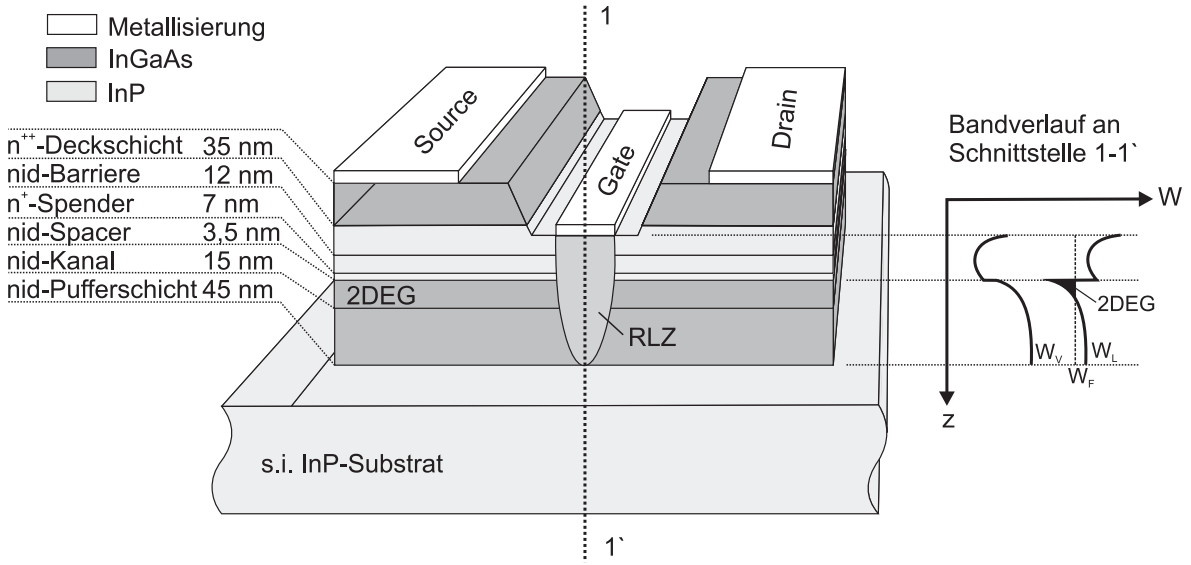


Abb. 2.15: Prinzipieller Technologiequerschnitt durch einen HFET mit dem zugehörigen Bandverlauf unterhalb des Gate-Kontakts

dotierten Kanalschicht, so dass sich durch die entstehende Leitungsbanddiskontinuität an dieser Stelle ein Potenzialtopf mit durch Elektronen besetzbaren diskreten Zuständen ausbildet (siehe Abb. 2.15), dessen Ausdehnung in vertikaler Richtung vernachlässigbar klein ist. Aus diesem Grund spricht man an dieser Stelle vom zweidimensionalen Elektronengas (2DEG). Über das Gate-Potenzial lässt sich im Bändermodell der Potenzialtopf nun unter bzw. über das Ferminiveau heben und somit die undotierte Kanalschicht mit Ladungsträgern anreichern bzw. verarmen. Die räumliche Trennung von freien Ladungsträgern im Kanal und den zugehörigen ortsfesten ionisierten Donatorrümpfen bewirkt eine deutliche Reduzierung der Coulombstreuung. Hierdurch wird die Ladungsträgerbeweglichkeit und damit die Hochfrequenztauglichkeit verbessert.

2.4.2 Schichtaufbau und Technologie

Ausgehend vom semi-isolierenden InP-Substrat, wird zunächst eine InGaAs Pufferschicht aufgebracht, welche dazu dient, die Oberflächenrauigkeit und die Defektdichte auf der Substratoberfläche zu reduzieren. Sie ist elektrisch inaktiv und verbessert die Kristallqualität für die folgenden Bauelementschichten. Das Wachstum einer Pufferschicht ist eine

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

etablierte Maßnahme und wird grundsätzlich vor der Epitaxie von Bauelementschichten durchgeführt. Es folgt der nominell undotierte InGaAs Kanal, auf welchem dann eine dünne, undotierte Abstandsschicht (Spacer) bestehend aus InP aufgebracht wird. Sie hat die Aufgabe, eine zusätzliche räumliche Trennung zwischen dem Kanal und der darüber liegenden, n-dotierten InP Spenderschicht herzustellen. Hierdurch wird die Coulombstreuung der freien Ladungsträger innerhalb der Kanalschicht an den ionisierten Donatorrümpfen der Spenderschicht weiter reduziert. Außerdem bilden sich durch den abrupten Materialwechsel mit unterschiedlichen Bandlückenenergien für Elektronen besetzbare Zustände innerhalb der undotierten Kanalschicht aus (Heteroübergang, 2DEG). Es folgt die InP Barrierenschicht und die InGaAs Deckschicht. Sie haben die Aufgabe, die im Unterkapitel 2.4.1 beschriebenen I(U)-Charakteristika am Gate bzw. an den Drain- und Source-Kontakten zu erzielen.
Der in dieser Arbeit verwendete HFET besteht aus dem Materialsystenm InP/InGaAs. Der Heteroübergang InAlAs/InGaAs ist zwar aufgrund der höheren Leitungsbanddiskontinuität ($\Delta W_{L,InGaAs/InAlAs} = 0{,}5$ eV; $\Delta W_{L,InP/InGaAs} = 0{,}2$ eV [24]) und der höheren Schottky-Barriere auf InAlAs aus physikalischer Sicht zu bevorzugen, jedoch fiel die Wahl aufgrund technologischer Beweggründe auf das InP/InGaAs System. Beim Herstellungsprozess des Transistors ist der sogenannte gate-recess der kritischste Schritt. Hierbei handelt es sich um einen definierten nasschemischen Abtrag der obersten hochdotierten InGaAs-Deckschicht im Gate-Bereich mit dem Ziel, die Gate-Metallisierung auf der darunterliegenden undotierten InP-Barrierenschicht aufzubringen (Schottky-Übergang). Es ist von entscheidender Bedeutung, dass die Ätztiefe beim gate-recess im nm-Maßstab exakt eingehalten wird, da der Abstand der Gate-Elektrode zum Kanal maßgeblich die Schwellspannung U_T bestimmt. Hier bietet das InP/InGaAs System mit einer Selektivität (vgl. Kapitel 3.1) von $S_{InGaAs/InP} \approx 150$ (phosphorsäurehaltige Ätze) den entscheidenden Vorteil gegenüber dem InAlAs/InGaAs System, bei welchem eine Selektivität von $S_{InGaAs/InAlAs} \approx 20$ (zitronensäurehaltige Ätze) erreicht werden kann [45]. Hierdurch wird ein weitaus stabilerer und reproduzierbarer Prozess möglich, da die Ätze beim gate-recess auf der InP-Zielschicht nahezu stoppt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

3 Technologieverfahren

In diesem Kapitel werden die zum Verständnis der nachfolgend beschriebenen Arbeiten relevanten technologischen Verfahren und Anlagen vorgestellt. Es handelt sich hier um weitestgehend etablierte Methoden der Halbleiterverarbeitung, welche teilweise auf die technologischen Bedürfnisse der in dieser Arbeit erzeugten Hardware hin optimiert wurden. Bei grundlegenden technologischen Prozessen, wie beispielsweise der optischen Lithografie oder der Aufdampftechnik für Metalle, sei an dieser Stelle auf weiterführende Literatur verwiesen [24].

3.1 Vertikale Strukturierung (Ätztechnik)

Die in der III/V-Mikroelektronik eingesetzte Prozesstechnologie basiert auf dem sogenannten „top-down"-Prinzip. Das bedeutet, dass zunächst in kristallzüchtenden Verfahren (z.B. Epitaxie) ein Volumenmaterial geschaffen wird, welches dann durch geeignete Verfahren zur Schaffung der funktionalen Strukturen definiert abgetragen wird.
Bei den III/V-Bauelementen ist es vor allem der Mesa-Prozess, welcher eine vertikale Strukturierung erfordert. Zum einen kann die Ätzung nasschemisch in einer wässrigen Lösung erfolgen. Zum anderen werden ionisierte Gase eingesetzt (Plasma), um das Material trockenchemisch zu entfernen (vgl. Kapitel 3.1.1). Die bei der Ätztechnik entscheidenden Randbedingungen sind die Materialselektivität

$$S_{X/Y} = \frac{\text{Ätzrate Material X}}{\text{Ätzrate Material Y}} \tag{3.1}$$

sowie die Unterätzung der Ätzmaske.
Eine Materialselektivität tritt bei auf chemischen Reaktionsprozessen basierenden Ätzungen auf, so wie es bei der Nasschemie der Fall ist. Hierbei werden nach Möglichkeit Ätzlösungen eingesetzt, welche auf das zu ätzende Material abgestimmt sind und mit anderen, im Schichtpaket vorkommenden Materialien entweder sehr träge oder gar nicht reagieren. Die für diese Arbeit relevanten Materialien sind InP, InGaAs sowie InGaAsP. Alle drei Materialien lassen sich nasschemisch sehr gut abtragen. Bei Hetroübergängen zum binären InP lassen sich in beide Richtungen sehr hohe Ätzselektivitäten nutzen, so dass sehr dünne InP-Schichten (<10 nm) gerne als definierter Ätzstopp im Schichtpaket, beispielsweise zwischen verschiedenen Bauelementen, implementiert werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

InP lässt sich direkt mittels Salzsäure (HCl_{aq}) ätzen. Ausgehend von etwa 200 nm/s bei Raumtemperatur, lässt sich die vertikale Ätzrate sehr empfindlich über die Konzentration und die Temperatur der Ätzlösung auf Werte unter 1 nm/s reduzieren.
Beim Abtrag von InGaAs und dem quaternären Mischkristall InGaAsP handelt es sich um eine Redox-Reaktion, d.h. es ist eine Oxidation des Halbleitermaterials notwendig, bevor es mit der Säure reagieren und in Lösung gehen kann. Aus diesem Grund bestehen die hier verwendeten Ätzen aus drei Komponenten, nämlich der Säure selbst (Phosphorsäure H_3PO_4 oder Schwefelsäure H_2SO_4), Wasserstoffperoxid (H_2O_2) als Oxidationsmittel und Reinstwasser zur entsprechenden Verdünnung.
Neben der Selektivität ist ein isotropes Ätzverhalten typisch für die nasschemische Strukturierung.

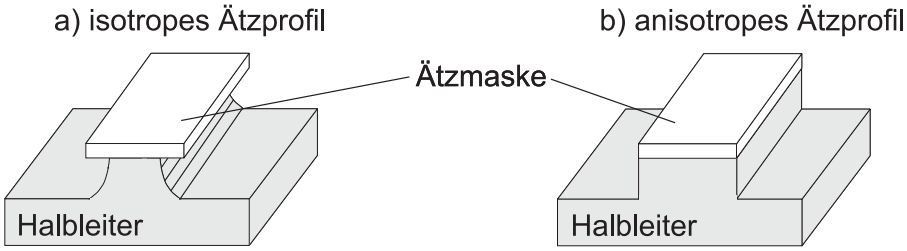


Abb. 3.1: Schematische Darstellung eines a) isotropen und eines b) anisotropen Ätzprofils

Das bedeutet, dass sich zusätzlich zur vertikalen auch eine Ätzrate in lateraler Richtung ausbildet, so dass es zu einer Unterätzung der Maskierung kommt (vgl. Abbildung 3.1 links). In der Praxis kommt es sogar zu richtungsabhängigen lateralen Ätzraten, welche zu verschiedenen Ätzprofilen führen (vgl. Kapitel 5.3.5.2). Das kann, beispielsweise für die selbstjustierte Kontakttechnologie, von Nutzen sein [46, 22]. Für eine präzise Strukturübertragung, wie für die RTDs im Rahmen dieser Arbeit gefordert, ist ein anisotropes Ätzverhalten wünschenswert.
Eine Vermeidung der Unterätzung, und damit möglichst senkrechte Ätzflanken, lassen sich trockenchemisch realisieren, indem zusätzlich zur chemischen Reaktion an der Oberfläche ein physikalischer Abtrag stattfinden kann. Dieser wird durch eine Beschleunigung der Reaktanten zur Probenoberfläche erreicht. Details zur genutzten Anlage und zum Prozess befinden sich im folgenden Kapitel.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

3.1.1 ICP-RIE Trockenätzsystem

Das reaktive Ionenätzen (engl.: Reactive Ion Etching, RIE) ist ein gerichtetes trockenchemisches Strukturierungsverfahren basierend auf einer Behandlung der abzutragenden Materialoberfläche mittels Plasma. Beim Plasma handelt es sich um ionisierte Gasmoleküle, welche auf die Probenoberfläche beschleunigt werden und dort mit dem Material interagieren. Hierbei unterscheidet man zwischen einem physikalischen und einem chemischen Herauslösen der Oberflächenatome.
Die im Fachgebiet zur Verfügung stehende Anlage *Oxford Plasmalab 100 ICP 65* arbeitet nach dem Prinzip des induktiv gekoppelten Plasma (engl.: Inductively Coupled Plasma, ICP) und besitzt, im Gegensatz zu herkömmlichen Parallelplattenreaktoren, zwei unabhängige HF-Generatoren, welche bei 13,56 MHz eine maximale elektrische Leistung P_{ICP} bzw. P_{RF} von 300 W liefern.

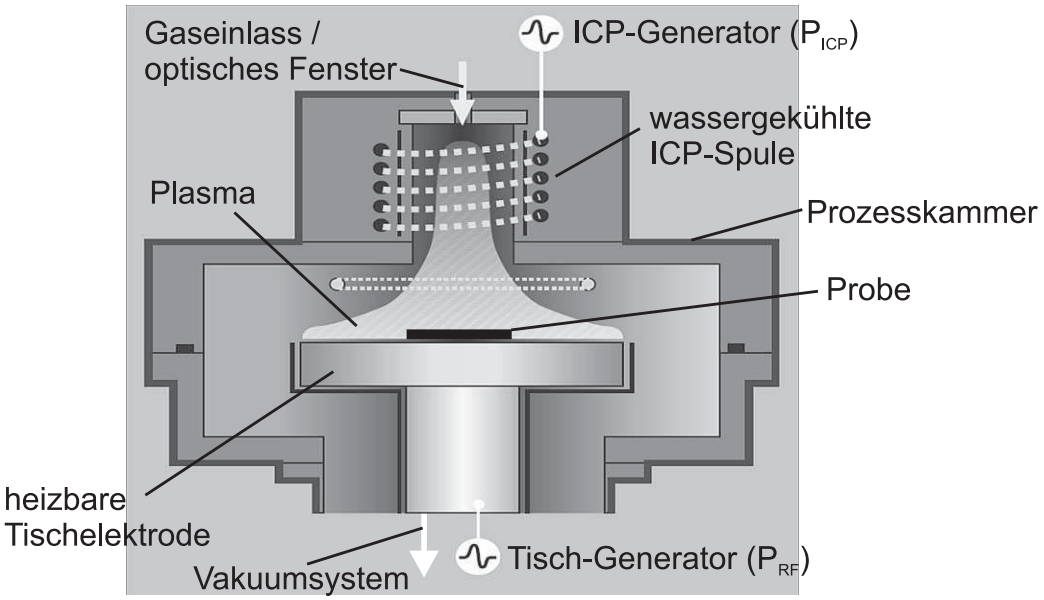


Abb. 3.2: Schematischer Aufbau einer ICP-RIE Reaktorkammer [47]

In Abbildung 3.2 ist schematisch ein solcher Reaktor gezeigt. Die Prozesskammer, welche über ein Pumpensystem evakuiert wird, kann grob in zwei Arbeitsbereiche unterteilt werden.
Im oberen Bereich befindet sich der Einlass für die Prozessgase und weiter unten eine wassergekühlte Spule, welche an den ICP-Generator angeschlossen ist. Als Prozessgase

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

kommen im Fachgebiet Chlor, Stickstoff und Sauerstoff zum Einsatz. Das sich innerhalb der Spule ausbildende magnetische Wechselfeld zwingt freie Elektronen (e), welche in einer geringen Anzahl immer vorhanden sind, auf eine Kreisbahn und beschleunigt diese (e_{kin}). Diese kollidieren mit zunächst neutralen Molekülen XY des Prozessgases und führen bei ausreichender Energie zu einer Ionisation derselben (Stoßionisation).

$$e_{kin} + XY \longrightarrow XY^{+} + e + e \tag{3.2}$$

Hierbei werden weitere Elektronen frei, welche den Ionisationsprozess lawinenartig unterstützen, bis sich in Abhängigkeit der eingekoppelten elektrischen Leistung ein Gleichgewicht aus Generation und Rekombination einstellt. Neben anderen möglichen Prozessen ist dieser ausschlaggebend für den Aufbau und den Erhalt des Plasma. Somit kann in diesem Teil des Reaktors die Plasmadichte[7] mit Hilfe der Prozessparameter ICP-Leistung P_{ICP} und Kammerdruck $p_{prozess}$ beeinflusst werden, ohne die reaktiven Teilchen XY^{+} gezielt Richtung Tischelektrode zu beschleunigen.
Das geschieht nämlich mit Hilfe des Tisch-Generators, welcher an die Elektrode im unteren Teil der Prozesskammer angeschlossen ist. Auf dieser Elektrode (Tisch) wird die zu ätzende Probe positioniert. Der Tisch ist kapazitiv gegen Masse entkoppelt, so dass auf ihm befindliche Ladungen nicht abfließen können. Das vom Tisch-Generator erzeugte Wechselfeld veranlasst nun sowohl die negativ geladenen Elektronen, als auch die positiv geladenen Molekülrümpfe zu einer sinusartigen Bewegung senkrecht zum Tisch, wobei die deutlich leichteren Elektronen auf Grund ihrer geringeren Trägheit eine größere Schwingungsamplitude ausführen können. Dadurch erreichen sie bevorzugt den Tisch bzw. die Probe, laden diese negativ auf und stoßen im Gleichgewichtsfall weitere Elektronen in der Nähe des Tisches ab. Dieser Bereich wird als Dunkelraum bezeichnet, da hier mangels Elektronen keine Rekombinationsprozesse stattfinden können, welche durch eine charakteristische Lichtemission begleitet werden. Außerdem führt die lokale Verarmung zur Ausbildung der selbstinduzierten Gleichspannung U_{bias}, welche die positiv geladenen Molekülrümpfe Richtung Probenoberfläche beschleunigt. U_{bias} ist ein Maß für die kinetische bzw. physikalische Komponente des Ätzprozesses und wird in erster Linie durch die Tischleistung P_{RF}, aber auch durch den Kammerdruck $p_{prozess}$ gegenläufig beeinflusst, da eine höhere Anzahl an Gasmolekülen pro Volumeneinheit die mittlere freie Weglänge reduziert. Die Möglichkeit der weitestgehend unabhängigen Einstellung der physikalischen und chemischen Ätzkomponente eröffnet ein breites Prozessfenster, welches es beispielsweise er-

[7] Anzahl ionisierter Moleküle XY^{+} pro Volumeneinheit

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

laubt, den Winkel der sich ergebenden Ätzflanken zu beeinflussen. Die Möglichkeit zur ausgeprägten anisotropen Ätzung mit sehr hohen Aspektverhältnissen[8] macht die ICP-RIE Systeme interessant für eine Vielzahl von Anwendungen.
Neben den beiden HF-Leistungen und dem Kammerdruck $p_{prozess}$ gibt es noch weitere Parameter, welche den Prozess beeinflussen. So ist beispielsweise das Prozessgas selbst eine wichtige Komponente. Traditionell sind auf Methan (CH_4) basierende Prozesse übliche Kandidaten für InP und artverwandte III/V-Materialien. Die bei der Stoßionisation entstehenden Wasserstoffradikale sind jedoch unerwünscht bei kohlenstoffdotierten p-InGaAs Schichten, da sie die Eigenschaft besitzen, ins Material zu diffundieren und die Dotierstoffatome zu passivieren (vgl. Kapitel 5.3.3). Entsprechende Schichten gehören zum Standard bei PIN-Dioden und bei Heterostruktur-Bipolartransistoren (HBT) im Fachgebiet. Aus diesem Grund wird Chlor (Cl_2) als Prozessgas verwendet. Es bietet hohe Ätzraten und umgeht die Problematik der Wasserstoffpassivierung. Da ionisiertes Chlor hochgradig reaktiv ist, würde die alleinige Verwendung dieses Gases, trotz der Beschleunigung Richtung Probe, ein überwiegend isotropes Ätzverhalten hervorrufen. Deshalb findet zusätzlich das inerte Gas Stickstoff (N_2) Verwendung, welches deutlich reaktionsträger ist und damit die physikalische Ätzung fördert. Über das Mischungsverhältnis beider Prozessgase steht somit ein weiterer Parameter zur Ausbalancierung der Ätzmechanismen zur Verfügung.
Die Prozesstemperatur $T_{prozess}$ kann über den heizbaren Tisch auf Werte zwischen Raumtemperatur und 400 °C eingestellt werden. Im Fall der Ätzung indiumhaltiger Materialien mit Chlor ist eine Prozesstemperatur von mindestens 150 °C erforderlich, um die Desorption des Reaktionsprodukts Indiumchlorid ($InCl_x$) zu unterstützen. Eine Unterschreitung dieser Temperatur führt zu einer Verringerung der Ätzrate und zu einer Passivierung der Ätzflanken, was sich in einem angeschrägten Ätzprofil wiederspiegelt [22].
Um die Zündung des Plasmas zu Beginn der Ätzung zu unterstützen, bietet die Anlage die Option, den Kammerdruck über den Parameter p_{strike} kurzzeitig zu erhöhen, bevor er für die verbleibende Ätzdauer auf den eingestellten Kammerdruck $p_{prozess}$ zurückgefahren wird.
Grundsätzlich ist bei trockenchemischen Ätzprozessen mit einer Schädigung des oberflächennahen Kristallgefüges auf Grund des physikalischen Bombardements durch die Gasmoleküle zu rechnen. Dies kann sich negativ auf die elektrischen Eigenschaften der prozessierten Bauelemente auswirken. Gerade wegen der vielen Freiheitsgrade, welche eine

[8] Quotient aus der Höhe einer Struktur zu ihrer kleinsten lateralen Abmessung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

ICP-RIE Anlage systembedingt bietet, sollte bei der Prozessoptimierung der Einsatz der physikalischen Komponente möglichst sparsam genutzt werden, um Strahlenschäden zu minimieren. Für trockenchemische Ätzungen im Rahmen dieser Arbeit wurde daher eine Tischleistung P_{RF} von maximal 50 W unter Beibehaltung eines gewünschten anisotropen Ätzprofils verwendet.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

3.2 Laterale Strukturierung durch die Abhebetechnik (Lift-Off)

Neben der vertikalen Strukturierung des Volumenmaterials, bedarf es einer Möglichkeit zur lateralen Dimensionierung von dauerhaft auf der Probe verbleibenden Beschichtungen. Hierzu zählen beispielsweise Kontaktmetallisierungen oder Dielektrika für lokale Passivierungen. Prinzipiell gibt es die Möglichkeit, die gewünschte Beschichtung zunächst ganzflächig aufzubringen und diese anschließend, beispielsweise durch Rückätzung, lokal zu strukturieren. Das Lift-Off Verfahren kommt ohne Ätzung der überschüssigen Beschichtung aus. Es ist somit schonender zur Probenoberfläche und zu bereits prozessierten Strukturen, so dass es im Bereich der III/V-Prozesstechnik als Standardverfahren etabliert ist.

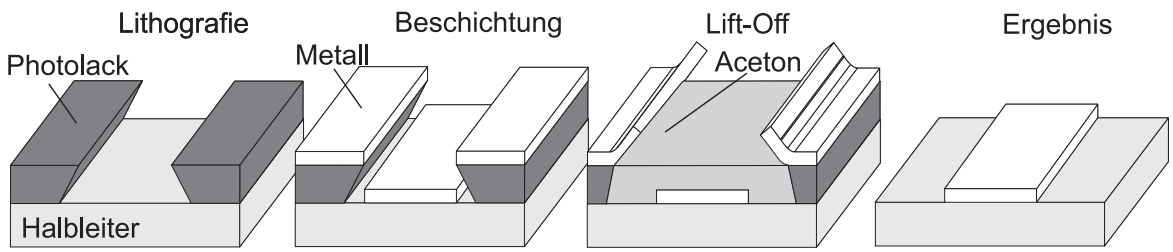


Abb. 3.3: Schematische Darstellung der Prozessabfolge des Lift-Off Verfahrens

In Abbildung 3.3 ist die prinzipielle Prozessabfolge der Strukturierung durch Lift-Off dargestellt. Die zu strukturierenden Bereiche müssen zunächst mittels der Lithografie in einen photoempfindlichen Resist übertragen werden, welcher zuvor durch eine Rotationsbeschichtung ganzflächig auf die Probe aufgebracht wurde. Die Bereiche, welche beschichtet werden sollen, müssen nach dem Entwicklerschritt frei vom Resist sein. Anschließend findet die ganzflächige Beschichtung der so vorbereiteten Probe statt. Es wird Material sowohl auf dem Resist abgeschieden, als auch in den offenen Bereichen direkt auf dem Halbleiter. Es folgt ein Lösungsmittelschritt (typischerweise Aceton), welches den Resist löst und die auf ihm befindliche parasitäre Beschichtung von der Probenoberfläche fort schwemmt. Die unmittelbar auf dem Halbleiter aufgebrachten Strukturen überstehen diesen Schritt auf Grund der sehr guten Haftung schadlos. Als Ergebnis verbleiben die während der Lithografie definierten Bereiche beschichtet.
Wichtige Voraussetzungen für die erfolgreiche Anwendung des Lift-Off Prozesses sind ein unterschnittenes Photolackprofil nach dessen Entwicklung und ein möglichst senkrecht zur Probenoberfläche gerichtetes Beschichtungsverfahren. Hierdurch soll verhindert

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

werden, dass die Photolackflanken ebenfalls beschichtet werden, wodurch das Lösemittel abgeschirmt würde. Je nach Grad der Flankenbelegung kommt es beim Lift-Off zu unerwünschten Randartefakten (*Flitter*) oder das Abheben wird gar vollständig verhindert (siehe Abb. 3.4).

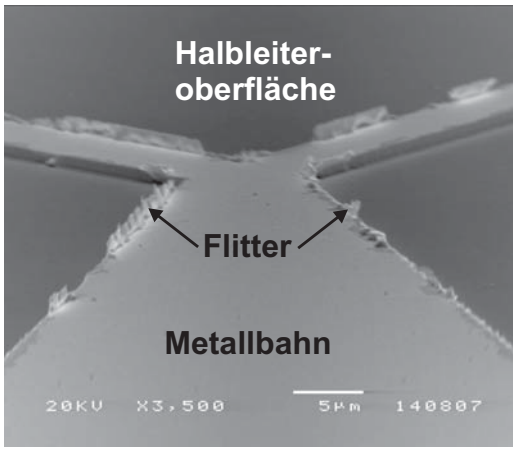


Abb. 3.4: REM-Aufnahme einer Flitter behafteten Metalbahn

Prinzipiell sind sowohl negativ- als auch positivempfindliche Lacke für den Lift-Off Prozess geeignet, wobei sich im Fall negativ arbeitender Resiste das unterschnittene Profil von selbst einstellt. Ein Negativlack ist ohne Bestrahlung im Entwickler löslich, d.h. durch die Lithografie werden die Bereiche definiert, welche abgedeckt bleiben sollen. Die während der Belichtung vom Photolack absorbierte Lichtdosis ist an der Lackoberfläche am höchsten und nimmt zur Probe hin ab. Das führt dazu, dass die chemische Vernetzung, welche den Lack resistent gegenüber dem Entwickler macht, mit der Lacktiefe abnimmt, so dass die laterale Strukturgröße der herausgelösten Bereiche mit der Tiefe zunimmt. Der Unterschnitt lässt sich bei Negativlacken durch die Wahl der Belichtungszeit variieren und somit auf die geforderten Bedürfnisse einstellen.
Beim Positivlack kehren sich die Verhältnisse entsprechend um. Die mit der Tiefe abnehmende Lichtdosis führt dazu, dass die Lacklöslichkeit im Entwickler abnimmt. Es ergeben sich hier üblicherweise im Profil trapezförmige Strukturen, welche für den Lift-Off völlig ungeeignet sind. Um Positivlacke dennoch für die Abhebetechnik verwenden zu können, wird in der Prozessführung für eine Ausbildung eines Überhangs im oberen Bereich gesorgt. Hierfür sind verschiedene Möglichkeiten gegeben. Beispielsweise wird über Temper-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

und Akklimatisierungsschritte vor der Belichtung die Empfindlichkeit des Lackes im oberen Bereich herabgesetzt. Gleiches kann mit einer kurzen Benetzung der unbelichteten Lackoberfläche mittels Entwickler unmittelbar nach dem Aufschleudern geschehen (*developer soaking*).

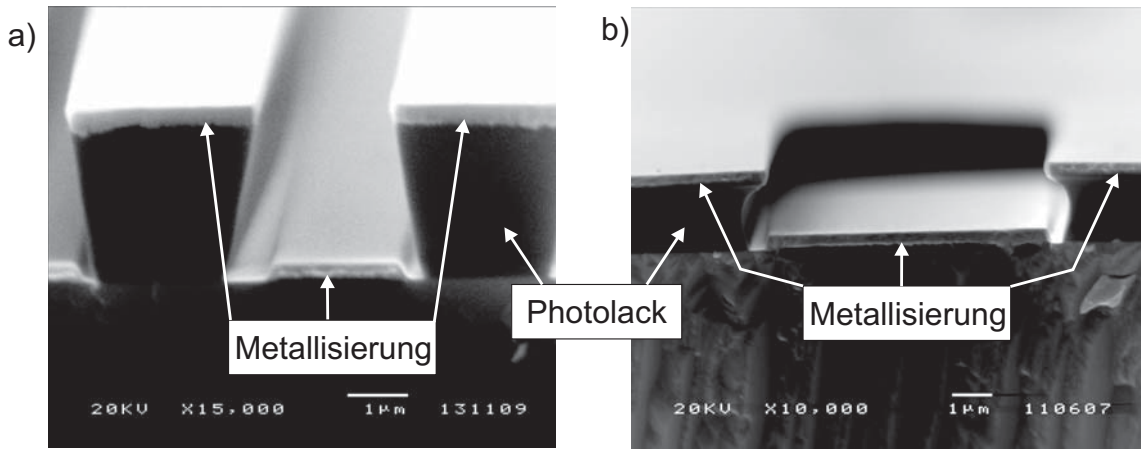


Abb. 3.5: REM-Profilaufnahmen von metallisierten Lift-Off Strukturen erzeugt mit a) einem Negativlack und b) einem Positivlack

In Abbildung 3.5 sind REM-Profilaufnahmen der im Fachgebiet eingesetzten Lift-Off Lacke dargestellt. Es handelt sich herbei um entwickelte und mit Metall bedampfte Strukturen, welche zum einen mit einem Negativlack der Firma MicroChemicals (AZ nLOF 2000) und zum anderen mit einem Positivlack der Firma Allresist (AR-P 5350) erzeugt wurden.
Im Fall des Negativlacks sind die unterschnittenen Flanken mit einem charakteristisch geraden Verlauf zu erkennen. Beim Positivlack hingegen besitzt die Flanke im unteren Bereich einen senkrechten bis leicht trapezförmigen Verlauf und krümmt sich auf Grund der angesprochenen Maßnahmen nach oben hin zu einem Überstand. In beiden Fällen ist eine Schattenwirkung vorhanden, welche eine Belegung an den Lackflanken verhindert.
Beide Lacke haben spezifische Vor- und Nachteile. Der Positivlack besitzt eine höhere laterale Strukturauflösung bis hin zu 0,5 µm, jedoch neigt er zu Randflitter bei topologiebehafteten Oberflächen. Dagegen können mit dem Negativlack auch bei hohen Topologien flitterfreie Strukturen mit einer lateralen Strukturgröße von > 1 µm hergestellt werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

3.3 SiN_x-Abscheidung durch das ECR-PECDV System

Dielektrische Schichten werden in der Mikroelektronik bei einer Vielzahl wichtiger Anwendungen eingesetzt. Neben dem wohl bekanntesten Einsatz als Isolator in einer MIS-Struktur (typischerweise Siliziumdioxid, SiO_2) sind es des Weiteren Dielekrika in MIM-Kapazitäten, Passivierungen von Bauelementen gegenüber Umwelteinflüssen, die Optimierung optischer Eigenschaften durch Entspiegelungsbeschichtungen oder die Verwendung als Ätzmaskierung für trockenchemische Ätzprozesse. Die beiden letztgenannten Punkte sind relevant für diese Arbeit.
III/V-Halbleiter bilden keine natürlichen Oxide mit technisch nutzbaren Eigenschaften aus. Daher bedarf es an dieser Stelle geeigneter Verfahren mit vollständig externen Prekursoren[9]. Siliziumnitrid (SiN_x) zählt zu den Standardmaterialien mit den geforderten Eigenschaften. Ein mögliches Verfahren zur Deposition dieses Materials ist die Abscheidung aus der Gasphase unter Verwendung von molekularem Stickstoff (N_2) und einem Mischgas, bestehend aus 5 % Silan (SiH_4) in Helium (He), als Siliziumlieferant.

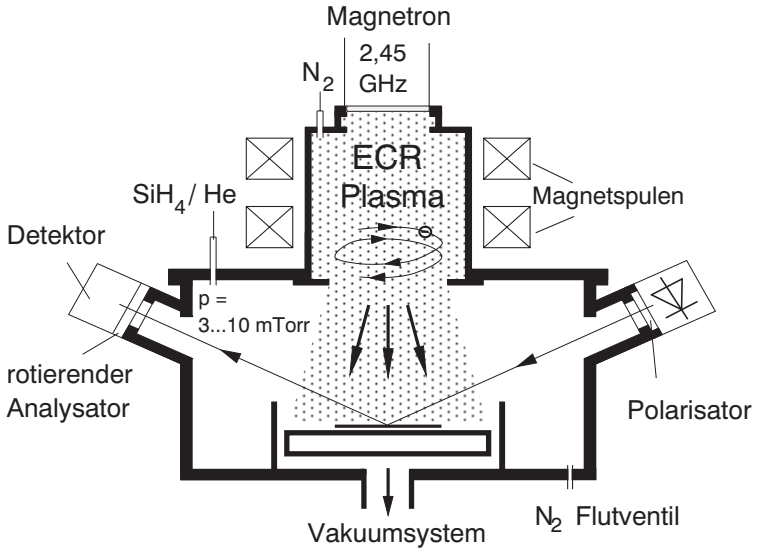


Abb. 3.6: Querschnitt durch den Reaktorraum eines PECVD Systems mit ECR Plasmaerzeugung [24]

Eine besondere Herausforderung bezüglich III/V-Materialien besteht in der maximal zulässigen Probentemperatur während der Abscheidung von maximal 500 °C, um eine

[9] Technisch nutzbarer, schichtbildender Ausgangsstoff bzw. Quellenmaterial

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Desorption der Gruppe-V Komponente aus dem Material zu vermeiden. Soll der Abscheideprozess gar kompatibel mit der Strukturierungstechnik durch Photolacke sein, so reduziert sich das Temperaturbudget auf unter 120 °C. Aus diesem Grund kommen Verfahren mit einer thermischen Zerlegung der Präkursoren nicht in Betracht.
In Abbildung 3.6 ist der Querschnitt des Reaktorraums einer Anlage zur plasmaunterstützten Gasphasenabscheidung (PECVD) unter Verwendung des Elektronzyklotron-Resonanz Prinzips (ECR) gezeigt. Der komplette Reaktorraum wird auf einen Restdruck im Bereich von 10^{-6} bis 10^{-7} mbar evakuiert. Die Zerlegung des N_2 findet mit Hilfe einer kinetischen Energieübertragung durch Elektronen statt. Im oberen Bereich des Reaktorraums (Mikrowellenresonator) befindet sich der Gaseinlass für den molekularen Stickstoff. Dort werden über die Einkopplung einer Mikrowelle bei f = 2,45 GHz und bei einer elektrischen Leistung von bis zu 1500 W freie Restelektronen beschleunigt, welche beim Zusammenstoß mit einem N_2-Molekül dieses bei einer ausreichenden kinetischen Energie in atomaren Stickstoff aufspalten und ionisieren. Um die Ionisierungseffizienz weiter zu steigern, befindet sich um den oberen Reaktorbereich ein Spulenpaar, durch dessen Magnetfeld die freien Elektronen auf eine Kreisbahn gezwungen und zusätzlich beschleunigt werden. Das ECR-Prinzip besteht in der Kopplung der Mikrowellenresonanz mit dem zusätzlichem Magnetfeld [48]. Dieses Verfahren erlaubt die technische Nutzung einer hoch effektiven Ionisierungsquelle, welche bei niedrigen Partialdrücken und vor allem bei Raumtemperatur arbeitet.
Der Gaseinlass des zweiten Prekursors (SiH_4 in He) befindet sich weiter unten unmittelbar über der Probe. Für dessen Reaktion innerhalb der evakuierten Prozesskammer sind keine weiteren technischen Maßnahmen notwendig.
Die ionisierten Atome Silizium und Stickstoff werden auf der Probenoberfläche ganzflächig zu einer SiN_x-Schicht zusammengesetzt. Der als Spaltprodukt des Silans entstehende Wasserstoff wird über das Vakuumsystem aus der Prozesskammer entfernt.
Als Prozessparameter stehen die über Mass-Flow-Controller (MFC) geregelten Gasflüsse, der Kammerdruck, die Prozesstemperatur, die eingekoppelte Mikrowellenleistung, sowie die Abscheidezeit zur Verfügung.
Mit Hilfe des integrierten Ellipsometers, bestehend aus einem Polarisator und einem rotierenden Analysator, kann das abgeschiedene Material in-situ auf seine Schichtdicke oder seine dielektrische Konstante hin analysiert werden. Auf dieses Messsystem soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

3.4 Elektronenstrahllithografie

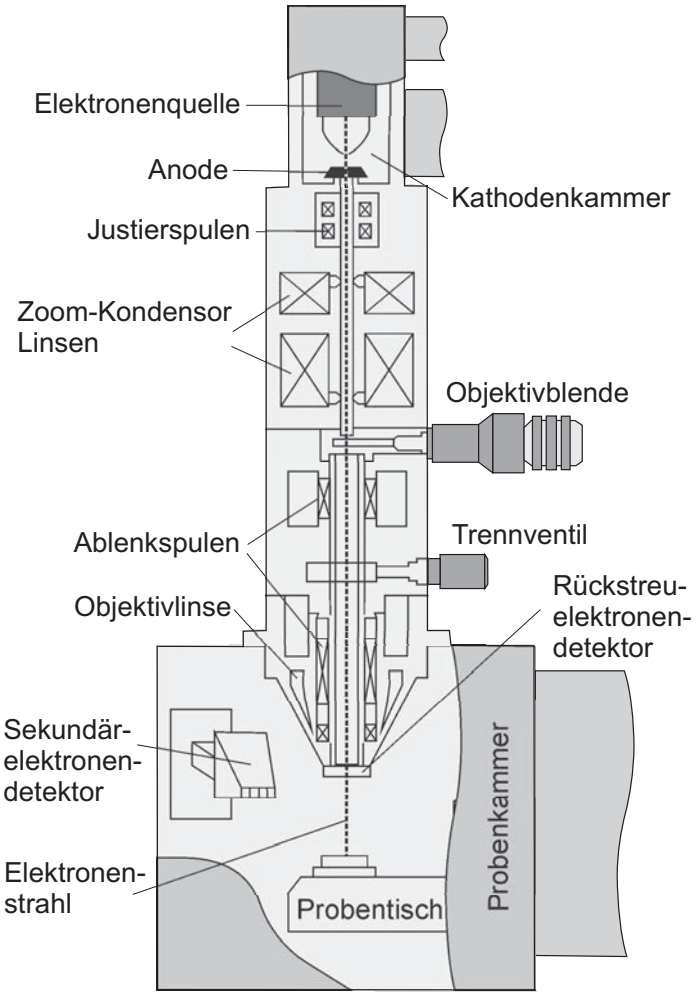


Abb. 3.7: Schematischer Querschnitt durch die Elektronensäule Jeol JSM 6400

Neben der optischen Lithografie besteht die Möglichkeit der Belichtung durch Elektronen. Die Strukturübertragung mittels eines gebündelten Elektronenstrahls in eine entsprechend empfindliche Resistbeschichtung (Polymethylmethacrylat, kurz: PMMA) bietet einige Vorteile gegenüber der optischen Lithografie. So entfällt bei diesem Verfahren beispielsweise der Zwischenschritt der Maskenherstellung, da das Strukturlayout direkt vom Elektronenstrahl auf der Probe belichtet werden kann. Das bietet ein Höchstmaß an Flexibilität, was im Forschungsbereich sicherlich sehr von Vorteil ist. Dem gegenüber steht jedoch der zeitliche Aspekt, da alle Strukturen mittels der Elektronenstrahllithografie (kurz: EBL) seriell abgearbeitet werden müssen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Der meist entscheidende Vorteil, welcher einen erhöhten zeitlichen Aufwand rechtfertigt, ist die deutlich höhere Strukturauflösung. Ist bei der standardmäßigen optischen Lithografie unter Verwendung von Quecksilberdampflampen die Wellenlänge des optischen Trägers (typisch 300 - 400 nm) der limitierende Faktor, so trifft diese Beschränkung auf Elektronen nicht zu. Die de Broglie-Wellenlänge von beschleunigten Elektronen beträgt nach dem Durchlaufen einer Potentialdifferenz von 20 kV lediglich etwa 9 Pikometer. Die limitierenden Faktoren sind hier die technische Ausführung der Anlage, Streuprozesse bei der Kollision des Elektronenstrahls mit der Probe und letztendlich die Qualität des verwendeten Resists. Die maximale Auflösung der beiden im Fachgebiet vorhandenen Lithografieverfahren ist bei der Elektronenstrahlbelichtung etwa um den Faktor 10 höher als bei der optischen Lithografie und ist dabei auch bei Proben mit einer ausgeprägten Topologie zu erzielen. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit die Belichtung der kritischen Strukturen (Gate-Steuerelektrode und oberer Kontakt der RTDs) mit diesem Verfahren durchgeführt.

In Abbildung 3.7 ist der Querschnitt durch die verwendete Elektronensäule der Firma Jeol dargestellt. Es handelt sich hierbei zunächst im Prinzip um ein Rasterelektronenmikroskop, welches im Wesentlichen aus drei Teilen besteht. Der Arbeitsdruck im Innenraum liegt im Bereich des Ultrahochvakuums (10^{-7} mbar). Im oberen Teil befindet sich die Elektronenquelle. Hier werden durch thermische Emission Elektronen aus einer Wolframkathode ausgelöst und zur offenen Anode beschleunigt. Die typischen Beschleunigungsspannungen U_{acc} liegen im Bereich einiger zehn kV.

Anschließend tritt der erzeugte Elektronenstrahl in den Bereich des elektronenoptischen Systems ein. Es besteht im Wesentlichen aus induktiv arbeitenden Linsensystemen und mechanischen Blenden, welche die Aufgabe haben, den Elektronenstrahl zu bündeln und zu fokusieren. Außerdem kann mit Hilfe der Ablenkspulen ein bestimmter Punkt auf der Probe adressiert werden. Laut Hersteller liegt der minimal erzielbare Strahldurchmesser beim Austritt aus dem elektronenoptischen System bei 3,5 bis 10 nm.

Im unteren Bereich des Systems befindet sich die Probenkammer mit dem Probentisch und dem Sekundärelektronendetektor. Bei Auftreffen des Elektronenstrahls auf die Probe werden im oberflächennahen Bereich Sekundärelektronen ausgelöst, welche die materialspezifische Austrittsarbeit überwinden. Mittels eines Kollektorgitters werden die Sekundärelektronen zum seitlich angebrachten Detektors abgelenkt und zur Anzeige gebracht. Bis hierhin handelt es sich prinzipiell um den Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Für den Betrieb der Elektronensäule zur kontrollierten Belichtung ist eine Erweiterung des Systems in Bezug auf die Möglichkeit zur gesteuerten Ein- und Ausblendung des Elektronenstrahls sowie eine rechnergestützte zweidimensionale Ansteuerung der Ablenkspulen notwendig. Letzteres geschieht über zwei 16 bit D/A-Wandler bei einer Taktfrequenz von 2,66 MHz. Hieraus ergibt sich die minimale Verweildauer des Elektronenstrahls auf einem Punkt zu 375 ns. Dies ist ein wichtiger Parameter für den Belichtungsprozess. Außerdem muss eine hoch präzise mechanische Verfahrmöglichkeit des Probentisches für die Belichtung größerer Probenoberflächen vorhanden sein (*stitching*). Dies geschieht mit Hilfe piezzoelektrischer Stellglieder und einer Positionsbestimmung mittels eines Laserinterferrometers. Die kleinste Schrittweite beträgt 5 nm. Eine entsprechende Erweiterung des Jeol-Systems zur EBL inklusive einer Softwareanbindung durch die Firma Raith steht dem Fachgebiet zur Verfügung.
Um einen chemischen Umwandlungsprozess im Resist auszulösen und damit einen Kontrast beim Entwicklungsprozess zu erhalten, muss dieser eine definierte Strahldosis C_S absorbieren. Weder eine Über- noch eine Unterschreitung der Dosis ist im Normalfall zulässig, da dies zu einer Abweichung der belichteten Strukturgeometrie vom Layout führt. Bezüglich der Dosis C_S gilt für die EBL folgender Zusammenhang bezüglich der Parameter Stahlstrom I_S, Strahldurchmesser A_S und der Belichtungszeit t_S:

$$C_S = \frac{I_S \cdot t_S}{A_S}. \tag{3.3}$$

Für eine hohe Auflösung ist man bestrebt den Strahldurchmesser möglichst gering zu halten. Praktisch wird der Strahldurchmesser direkt durch den Strahlstrom selbst beeinflusst, da eine höhere Elektronendichte durch den Abstoßungsprozess den Strahl aufweitet. Somit ist der gewählte Wert ein Kompromiss aus Belichtungszeit und Auflösung. Die Belichtungszeit t_S ist letztendlich so zu wählen, dass die notwendige Belichtungsdosis eingehalten wird. Ihr Mindestwert ist durch die Taktfrequenz der D/A-Wandler vorgegeben. Ein weiterer, die Auflösung bestimmender Parameter, ist die Beschleunigungsspannung U_{acc} der Elektronen. Je höher ihre kinetische Energie, umso schmaler wird das Wechselwirkungsvolumen des Elektronenstrahls mit der Probe bzw. dem Resist. Gleichzeitig nimmt die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung mit steigender kinetischer Energie ab, so dass bei einer Erhöhung der Beschleunigungsspannung und konstantem Strahlstrom die notwendige Belichtungszeit ebenfalls steigt. Die Elektronenstrahlbelichtungen im Rahmen dieser Arbeit fanden statt bei U_{acc} = 20 kV, I_S = 80 pA und t_S = 1,2 µs.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

4 Messtechnik

Dieses Kapitel stellt knapp die messtechnischen Geräte und Verfahren vor, welche im Rahmen dieser Arbeit zur Charakterisierung der erzeugten Demonstratorelemente dienten. Auf die messtechnische Untersuchung der optoelektronischen Empfängerschaltungen wird kontextbezogen im zugehörigen Kapitel 6 näher eingegangen, da es sich hier um sehr anwendungsbezogene Messaufbauten handelt.

4.1 Streuparametermesstechnik

In der Hochfrequenzmesstechnik zählt die Charakterisierung von Bauelementen mittels der Bestimmung ihrer Streuparameter zu den Standardwerkzeugen. Da bei den betrachteten Frequenzen (MHz bis GHz) das Signal Welleneigenschaften aufweist, müssen bei seiner Ausbreitung und beim Auftreffen auf das Messobjekt (DUT: Device-Under-Test) Reflektionen und Verschiebungen des Phasenwinkels berücksichtigt werden.

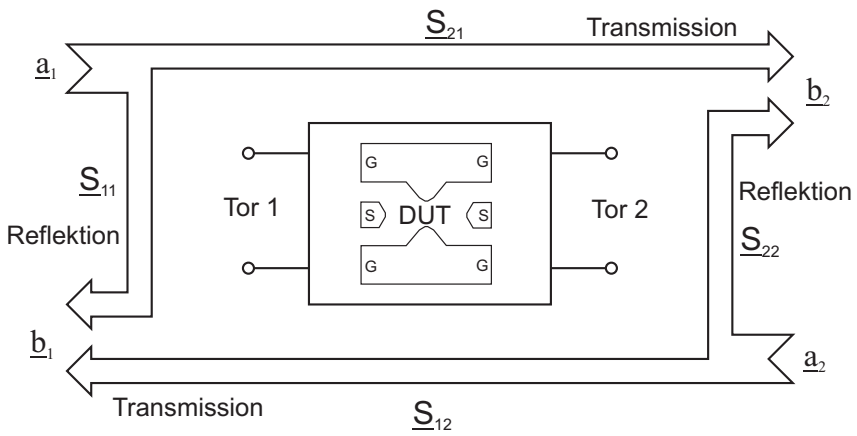


Abb. 4.1: Veranschaulichung der Definition von Zweitor-Streuparametern

In Abbildung 4.1 ist eine anschauliche Definition der Streuparameter auf Basis eines Messobjekts in Zweitor-Konfiguration dargestellt. Der Messvorgang findet statt, indem abwechselnd an den Toren eine Leistungswelle mit einer konstanten Frequenz eingekoppelt wird ($\underline{a}_1$ bzw. $\underline{a}_2$) und sowohl die entsprechende Reflektion am selben Tor, als auch die Transmission zum anderen Tor ($\underline{b}_1$ bzw. $\underline{b}_2$) gemessen werden. Der Vorgang wird für eine

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

definierte Liste von Frequenzpunkten wiederholt. Die Streuparameter selbst sind komplexe Faktoren zwischen den eingekoppelten und gemessenen Signalen, welche Informationen über die Auswirkung des Messobjekts auf Betrag und Phase des eingekoppelten Messsignals beinhalten:

$$\begin{aligned} \underline{b}_1 &= \underline{a}_1 \cdot \underline{S}_{11} + \underline{a}_2 \cdot \underline{S}_{12} \\ \underline{b}_2 &= \underline{a}_1 \cdot \underline{S}_{21} + \underline{a}_2 \cdot \underline{S}_{22} \quad . \end{aligned} \tag{4.1}$$

Hierbei beschreiben die beiden Parameter $\underline{S}_{11}$ und $\underline{S}_{22}$ die Reflektion und $\underline{S}_{21}$ bzw. $\underline{S}_{12}$ die Transmission.

Die frequenzabhängigen Streuparameter sind ein wertvolles Hilfsmittel bei der Beschreibung des Messobjekts durch ein alternatives Netzwerk bestehend aus frequenzunabhängigen Komponenten. Sie sind Grundlage für die Anpassung eines breitbandigen Modells des in dieser Arbeit entwickelten gestapelten Photodetektors, mit dessen Hilfe weiterführende Schaltungssimulationen durchgeführt werden konnten.

Des Weiteren ist in Abbildung 4.1 die Verwendung einer koplanaren Leiterstruktur angedeutet. Das bedeutet, dass zwei Masseleitungen von beiden Seiten in einem definierten

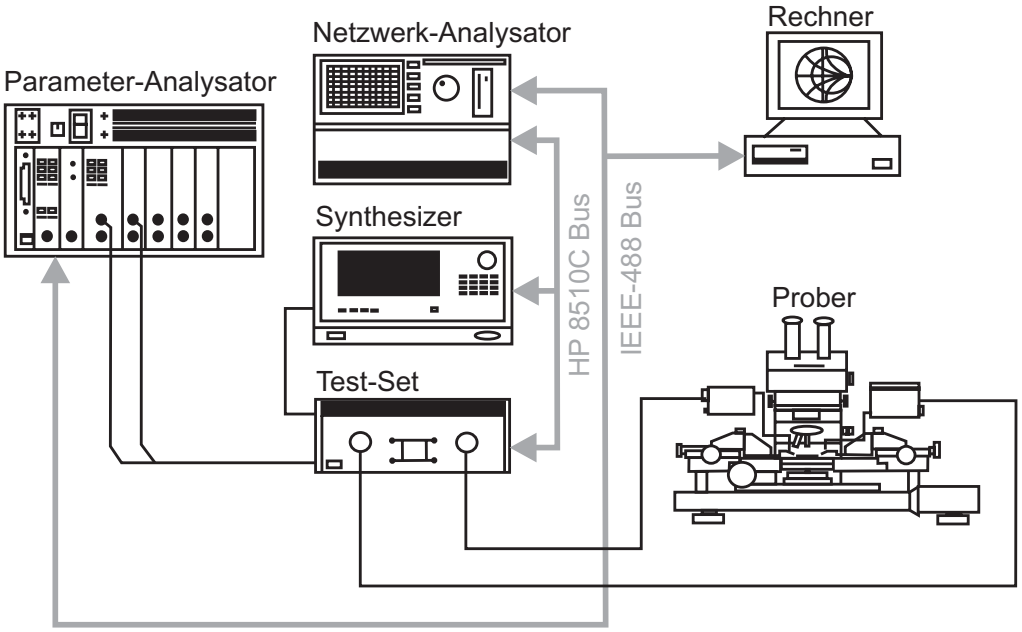


Abb. 4.2: Aufbau der Messplatzes zur Aufnahme der Streuparameter

Abstand zur Signalleitung auf dem Substrat geführt werden, um eine gewünschte Impedanz der gesamten Leitungsstruktur zu gewährleisten (typischerweise 50 Ω). Bei allen in

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

dieser Arbeit erzeugten Proben kam für HF-Pfade die koplanare Leitungstechnik mit ihrer charakteristischen Ground-Signal-Ground (GSG) Anordnung zum Einsatz.
In Abbildung 4.2 ist das zur Messung der Streuparameter verwendete System abgebildet. Es arbeitet in einem Frequenzbereich von 45 MHz bis 50 GHz und ist aus den folgenden Komponenten der Firma Hewlett Packard aufgebaut.
Der Synthesizer ist für die Generation des HF-Messsignals verantwortlich. Der Netzwerk-Analysator dient der Signalaufbereitung und der Steuerung des Messablaufs. Das Test-Set unterscheidet zwischen hin- und rücklaufenden Wellen und macht deren selektive Messung möglich. Zusätzlich steht ein Parameter-Analysator für die Erzeugung von DC-Pegeln zur Verfügung, um das DUT während der Messung in einem gewünschten Arbeitspunkt betreiben zu können. Außerdem sind so am selben Messplatz sowohl Gleichstrom- als auch Streuparametermessungen möglich. Das Messobjekt wird mit Hilfe eines Probers koplanar kontaktiert. Ein breitbandiges Kalibrationsprozedere vor jeder Messsitzung verlagert die Messebene zur Ein- und Ausgangsebene des Messobjekts. Das bedeutet, dass Einflüsse des Messplatzes inklusive Leitungen bis zur Probe das Messergebnis nicht verfälschen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

4.2 Optoelektronische Messtechnik

Bei der Entwicklung der optoelektronischen Komponenten war eine entsprechende Messtechnik notwendig, um die zur Beurteilung notwendigen Bauelementdaten aufnehmen zu können. Insbesondere ist es wichtig, die Responsivity der PIN-Dioden für die Wellenlängen $\lambda_1 = 1310$ nm und $\lambda_2 = 1550$ nm bestimmen zu können. Des weiteren ist es zur Beurteilung der Hochfrequenztauglichkeit notwendig, den frequenzabhängigen Abfall der Responsivity messen zu können. Da das Fachgebiet über keinen standardisierten Messplatz zur Charakterisierung optoelektronischer Komponenten verfügt, wurden entsprechende Messplätze mit Hilfe der vorhanden Komponenten aufgebaut. Diese werden im Folgenden vorgestellt sowie die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit aufgezeigt, um die im weiteren Verlauf der Arbeit präsentierten Messergebnisse einordnen zu können.

4.2.1 Messung der Responsivity von PIN-Dioden

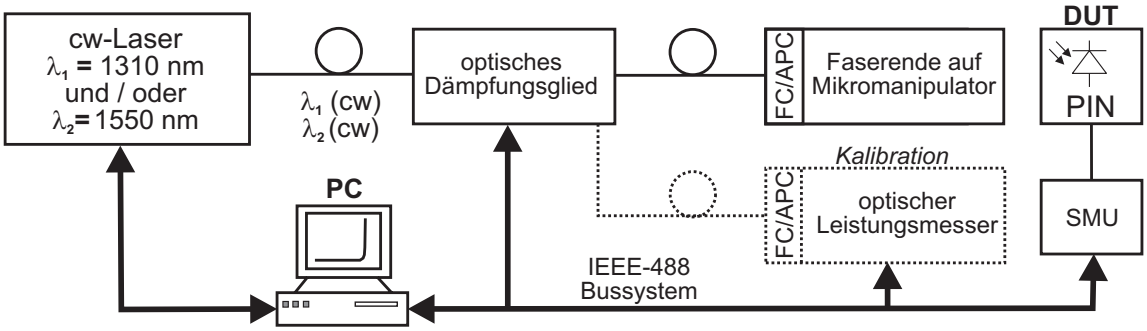


Abb. 4.3: Schematischer Aufbau zur Messung der Responsivity an PIN-Dioden

Entsprechend dem in Abbildung 4.3 gezeigten Blockdiagramm findet die Generation der optischen Leistung mittels einer Dauerstrich-Laserquelle (cw-Laser) statt, welche anschließend über eine Monomode-Faser geleitet in einem optischen Dämpfungsglied reguliert werden kann. Die Einkopplung in die PIN-Diode erfolgt über einen optischen Lichtleiter mit einer aufgeschmolzenen Linse am Faserende, welcher sich über einen Mikromanipulator in alle Raumrichtungen justieren lässt. Sie ist über einen optischen Standard-Konnektor (FC/APC)[10] an die optische Strecke angeschlossen. Die PIN-Diode selbst befindet sich auf

[10] Fiber Channel / Angled Physical Contact; kontaktbehaftete Verbindungstechnologie für Lichtwellenleiter mit einem 8° Schrägschliff am Leiterende zur Reduzierung der Rückstreuung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

einer Prober-Station und wird ausgangsseitig koplanar kontaktiert und mit einer Source-Monitor-Unit (SMU) verbunden. Hierdurch ist gleichzeitig sowohl eine entsprechende Vorspannung des DUTs als auch die Messung des Photostroms möglich.
Vor jeder Messsitzung ist eine Kalibration des Messplatzes im Hinblick auf die optische Leistung notwendig. Dies geschieht mittels eines optischen Leistungsmessers durch Messung der optischen Leistung in Abhängigkeit von der Dämpfung. Der Leistungsmesser wird ebenfalls über eine FC/APC-Steckverbindung angeschlossen, so dass das justierbare Faserende nicht in der Kalibration enthalten ist, was zu einer geringfügig höheren Dämpfung bei der Responsivity-Messung führen kann.

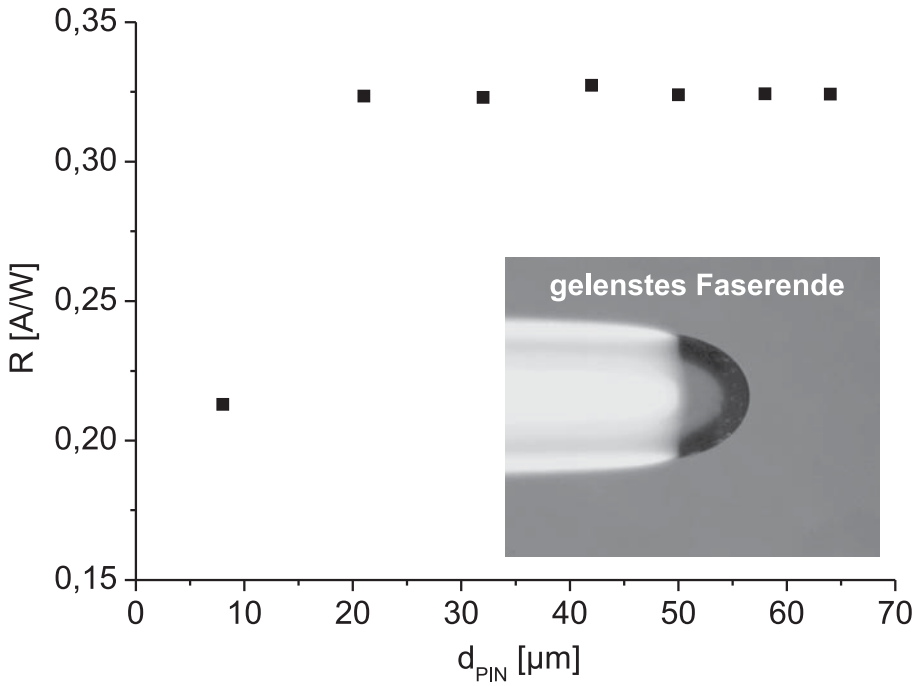


Abb. 4.4: Gemessene Responsivity in Abhängigkeit von d_{PIN} mittels einer gelensten Faser der Firma Soliton (Inlet)

Da die on-wafer Bestrahlung der PIN-Diode durch ein freies Faserende erfolgt, ist der Grad der Einkopplung ins Bauelement sehr wichtig für die Ermittlung der Responsivity. Für eine fehlerfreie Messung von Absolutwerten ist es notwendig, dass möglichst die

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

gesamte aus der Faser ausgekoppelte optische Leistung in die PIN-Diode eingekoppelt wird, da ansonsten der gemessene Photostrom nicht korrekt mit der optischen Leistung ins Verhältnis gesetzt wird. Der Hersteller der für die Messungen verwendeten gelensten Faser gibt einen Fokusdurchmesser von < 10 µm bei einem nicht näher spezifizierten Arbeitsabstand an. Um die Einkopplungseigenschaft der Faser zu untersuchen, wurden Messungen an PIN-Dioden durchgeführt, welche bis auf den aktiven Durchmesser über identische Spezifikationen verfügen. Das Ergebnis in Abbildung 4.4 bestätigt die Angabe des Herstellers. Die gemessene Responsivity sinkt erst beim Bauelement mit $d_{PIN} = 8$ µm ab und verharrt für größere Durchmesser auf einem konstanten Niveau.
Dennoch bleibt festzuhalten, dass die Justage der Faser für eine Messung der Absolutwerte eine gewisse Vertrautheit mit dem Messplatz erfordert. Der notwendige Arbeitsabstand sollte gerade für die Charakterisierung bei kleinen Durchmessern zwischen verschiedenen Proben möglichst konstant gehalten werden. Die laterale Ausrichtung wird auf den maximalen Photostrom optimiert.

4.2.2 Messung des Amplituden-Frequenzgangs von PIN-Dioden

Im Allgemeinen setzt sich der Frequenzgang eines Übertragungsglieds aus der frequenzabhängigen Änderung der Amplitude und der Phase zusammen. Da bei dem vorgestellten Messverfahren die Information über die Phase verloren geht und für die Beurteilung der Bandbreite auch nicht notwendig ist, ist im Folgenden der Bezug zur Signalamplitude gemeint, wenn allgemein vom Frequenzgang die Rede ist. Die verfügbare Bandbreite ist der entscheidende Parameter zur Beurteilung der Hochfrequenztauglichkeit von Bauelementen. Im Allgemeinen ist es die -3dB Eckfrequenz, welche aus dem Frequenzgang beim 50 %-igen Abfall eines charakteristischen ausgangsseitigen Bauelementparameters in Relation zu dessen DC-Wert bestimmt wird. Im Fall der Photodetektoren ist die Angabe einer elektrischen Bandbreite (-3dBe) oder einer optischen Bandbreite (-3dBo) gebräuchlich. Der Hintergrund ist zum einen die Betrachtung des frequenzabhängigen Abfalls des zur eingekoppelten optischen Leistung proportionalen Photostroms und zum anderen des Abfalls der aus der PIN-Diode ausgekoppelten elektrischen Leistung P_{PIN}. Zwischen dem Photostrom I_{ph} und der durch ihn am einem Lastwiderstand R_L generierten elektrischen Leistung P_{PIN} besteht ein quadratischer Zusammenhang

$$P_{PIN} = R_L \cdot I_{ph}^2, \quad mit \quad I_{ph} \sim P_{opt}, \tag{4.2}$$

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

welcher in der dB-Skala dem Faktor 2 entspricht. Das bedeutet, dass bei der Frequenz, bei welcher der Photostrom um 50 % gesunken ist, die elektrische Leistung bereits auf 25 % ihres DC-Wertes abgenommen hat bzw.

$$\text{-3dBo} = \text{-6dBe} \quad . \tag{4.3}$$

Praktisch relevant ist im Grunde genommen die elektrische Bandbreite, da der generierte Photostrom im Allgemeinen zur Speisung einer Last innerhalb der integrierten Schaltung bzw. des Systems genutzt wird. Daher ist entscheidend, ob die PIN-Diode bei einer bestimmten Frequenz noch die erforderliche Leistung liefern kann, um den Photostrom durch die Last aufrecht zu erhalten.
Die physikalischen Grundlagen der elektrischen Bandbreite einer PIN-Diode sind im Kapitel 2.1.6 zusammengetragen. Alle im weiteren Verlauf dieser Arbeit gemachten Untersuchungen und Angaben zu Eckfrequenzen beziehen sich auf die elektrische Bandbreite des Bauelements (-3dBe).

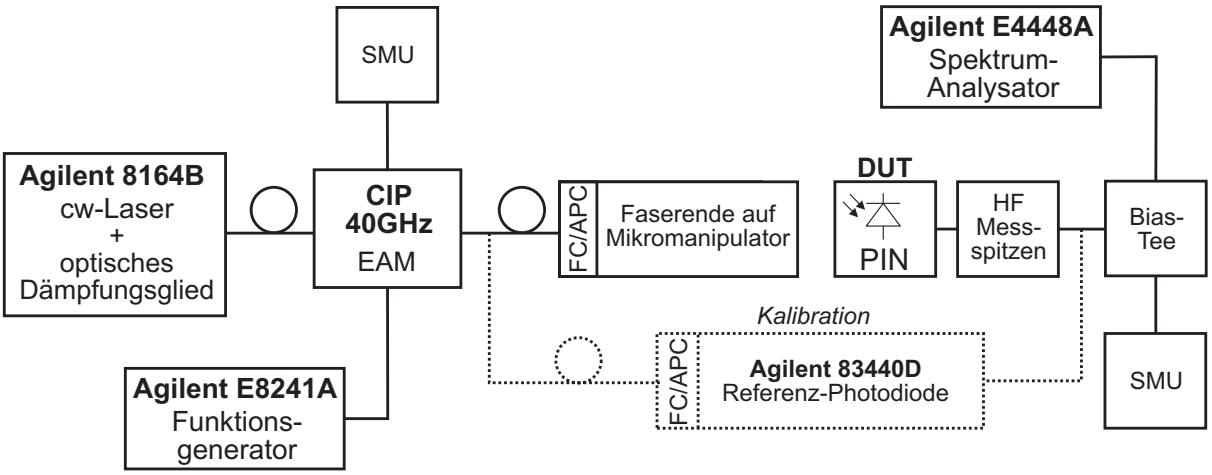


Abb. 4.5: Schematischer Aufbau zur Messung des Frequenzgangs von PIN-Dioden

In Abbildung 4.5 ist der verwendete Messaufbau zur on-wafer Bestimmung des Frequenzganges von PIN-Dioden dargestellt. Die optische Anregung der PIN-Diode geschieht über die Modulation eines Dauerstrich-Lasersignals mittels eines 40 GHz Elektro-Absorptions-Modulators (EAM). Dieser wird durch einen 20-GHz Funktionsgenerator mit dem aufzumodulierenden Signal versorgt und mittels einer SMU in den vorgeschriebenen DC-Arbeitspunkt gebracht. Das modulierte optische Signal wird über einen Prober-Aufbau

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

mit einer gelensten Faser in das DUT eingekoppelt. Ausgangsseitig wird das generierte elektrische Signal koplanar abgegriffen und der HF-Anteil über ein Bias-Tee[11] zu einem Spektrum-Analysator weitergeleitet. Hier wird die elektrische Leistung des Signals gemessen und spektral aufgelöst aufgetragen. Die Vorspannung der PIN-Diode wird über den DC-Pfad des Bias-Tee durch eine weitere SMU eingestellt.
Eine notwendige Voraussetzung für eine zuverlässige Messung ist die Kalibration der Messstrecke, d.h. die Bestimmung der Signaldämpfung durch die Messplatzkomponenten für eine entsprechende Korrektur der Messungen an DUTs. Zu diesem Zweck wird ein gehauster Referenz-Photodetektor mit $f_{3dB} = 27$ GHz herangezogen, dessen genauer Frequenzgang FG_{RefPD} vom Hersteller ermittelt wurde und in digitaler Form zur Verfügung steht. Für eine Kalibration wird der Referenz-Detektor in die Messstrecke eingebracht und der Frequenzgang FG_{kalib} bestimmt. Er beinhaltet die Dämpfung aller Komponenten des Messaufbaus, bis auf die des gelensten Faserendes und der koplanaren HF-Messspitzen, da diese mit dem gehausten Referenz-Detektor nicht kombinierbar aber für on-wafer Messungen zwingend notwendig sind. Dieser Punkt ist eine Schwäche dieses Messaufbaus. Da sich der Referenz-Detektor bei Messungen an DUTs nicht mehr in der Messstrecke befindet, wird FG_{kalib} entsprechend korrigiert, indem FG_{RefPD} abgezogen wird. Es entsteht so ein Datensatz, durch welchen die Einflüsse des Messplatzes weitestgehend aus der Messung an DUTs FG_{DUT} herausgerechnet werden können:

$$FG_{DUT,korr} = FG_{DUT} - (FG_{kalib} - FG_{RefPD}) \quad . \tag{4.4}$$

Der gesamte Messablauf wird über ein entsprechendes Programm gesteuert und das Ergebnis ausgelesen.
Durch vergleichende Messungen mit vollständig kalibrierten Messplätzen konnte festgestellt werden, dass die angesprochene Schwäche bei der Kalibration für die Bestimmung der -3dBe Eckfrequenz nicht ausschlaggebend ist. Der Messplatz zeigt jedoch im Frequenzbereich von etwa 5 bis 8 GHz reproduzierbare reflektionsbedingte Schwankungen im Frequenzgang, welche nicht dem DUT zuzuordnen sind. Sie behindern jedoch die messtechnische Charakterisierung bei der Entwicklung der Photodetektoren im Rahmen dieser Arbeit nicht.

[11] Netzwerkkomponente zur Trennung bzw. Zusammenführung des DC- und HF-Anteils eines elektrischen Signals

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

4.3 Messung der Bitfehlerrate (BFR)

Die Bitfehlerrate (BFR) ist ein Qualitätsmaß für digitale Übertragungs- und Verarbeitungssysteme. Sie ist definiert als das Verhältnis von:

$$BFR = \frac{\text{Anzahl fehlerhaft übertragener Bits}}{\text{Anzahl insgesamt übertragener Bits}} \quad . \tag{4.5}$$

Als Teil der Übertragungsstrecke beeinflusst eine PIN-Diode das zu übertragende Signal mit (vgl. Kapitel 2.1.6).

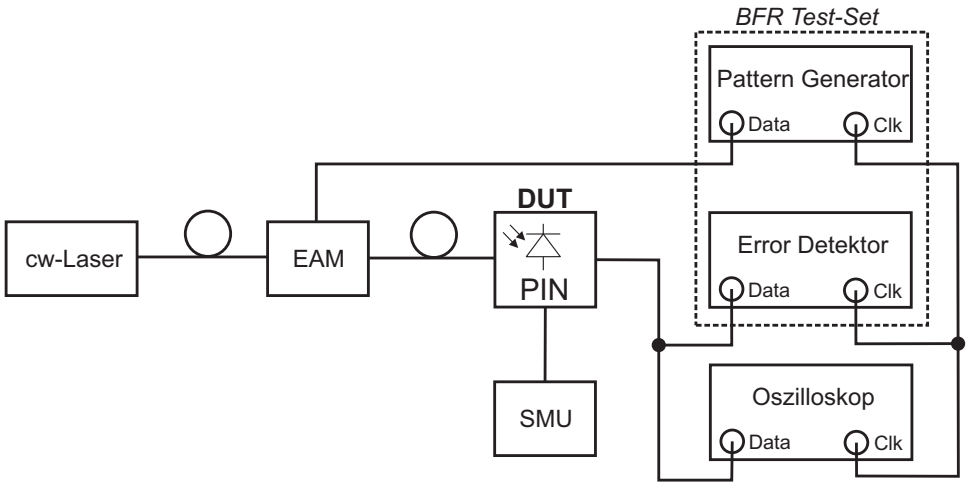


Abb. 4.6: Schematischer Aufbau zur Messung der Bitfehlerrate (BFR) an PIN-Dioden

In Abbildung 4.6 ist schematisch ein Messaufbau gezeigt, welcher zur messtechnischen BFR-Charakterisierung von PIN-Dioden eingesetzt wurde. Kernstück dieses Aufbaus ist das BFR Test-Set bestehend aus einem Bitmuster-Generator (Pattern Generator) und einem Fehler-Detektor (Error-Detektor). Der Pattern-Generator erzeugt ein zufälliges elektrisches digitales Bitmuster mit einer maximalen Datenrate von 12,5 Gbit/s und einer Wortlänge von bis zu 2^{31}-1 Bit. Dieses Signal wird über einen EAM in die optische Ebene umgesetzt und in das DUT eingekoppelt. Das durch die PIN-Diode generierte elektrische Signal wird im Fehler-Detektor analysiert, indem es mit der gesendeten Bitfolge verglichen und damit der Quotient aus Gleichung 4.5 ermittelt wird.
Gleichzeitig kann durch die Darstellung des PIN-Ausgangssignals an einem Speicheroszilloskop ein charakteristisches Augendiagramm aufgenommen werden. Es besteht aus einer

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

überlagerten Darstellung des in viele gleich lange Abschnitte unterteilten Datenstroms, so dass sich durch die gleichzeitige Anzeige der beiden logischen Zustände ein augenförmiges Muster ausbildet.
Eine Synchronisation der Geräte findet über die Clk-Anschlüsse statt. Eine Kallibration des Messaufbaus findet durch einen kommerziellen Freistrahl-Photodetektor mit bekannten Eigenschaften statt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5 Untersuchungen von Einzelbauelementen

In diesem Kapitel werden die geleisteten Beiträge zu Einzelbauelementen vorgestellt. Hierzu gehört vor allem die PIN-Diode, welche ausgehend von vorhandener InP-Technologie für weitere Applikationen untersucht wurde. Zu nennen ist hier der Technologietransfer auf Silizium-Substrate. Den Kern dieser Arbeit bildet der gestapelte Aufbau von zwei PIN-Dioden mit unterschiedlichen intrinsischen Materialien für die gleichzeitige Detektion von zwei Wellenlängen und deren Einsatz in digitalen optischen Empfängerschaltungen, welche im nächsten Kapitel vorgestellt werden.
Des Weiteren wird der entwickelte Prozess zur Herstellung von RTDs mit hoch präzisem Strukturübertrag bis in den sub-mikrometer Bereich mit Hilfe der Trockenätztechnik beschrieben. Hierdurch wird eine deutliche Absenkung des Steuerstroms I_{steuer} für die MoBiLE-Konfiguration technologisch realisierbar. Außerdem ist es durch diese Maßnahme möglich, die Leistungsaufnahme des Gatters gegenüber der vorherigen RTD-Technologie nennenswert zu reduzieren.
Eine ausführliche Erläuterung der in den folgenden Unterkapiteln genannten Technologieverfahren können im Kapitel 3 nachgeschlagen, bzw. der angegebenen Referenzliteratur entnommen werden.

5.1 PIN-Diode

5.1.1 Prozesstechnologie

Ergänzend zu den in Kapitel 2.1 gelegten physikalischen Grundlagen wird an dieser Stelle der Herstellungsprozess der PIN-Diode beschrieben. Dieser war zu Beginn der Arbeit weitestgehend etabliert und wurde durch die Entwicklung von entfernbaren Ätzmasken für den trockenchemischen Ätzprozess mittels der ICP-Anlage erweitert.
Ein typischer Schichtaufbau einer 20 GHz PIN-Diode ist in Tabelle 5.1 dargestellt. Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 2.1.6 ist für die erzielbare Bandbreite die Schichtdicke des Absorbermaterials mitentscheidend. In Verbindung mit einem für die Sperrschichtkapazität C_j wirksamen Bauelementdurchmesser von d_{PIN}=25 µm ergibt sich an dieser Stelle eine Schichtdicke von etwa 1400 nm. Die einzelnen Technologieschritte sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst. Ausgehend von einer Probe mit einem PIN-Dioden Schichtpaket beginnt der Prozess mit der Reinigung der Oberfläche. Hierzu wird die Probe zunächst von organischen Rückständen befreit, indem sie einem Aceton/Propanol-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tab. 5.1: Schichtaufbau für die Herstellung einer 20 GHz InGaAs PIN-Diode

Material	Funktion	Dotierung	Dotierstoff	Schichtdicke
p-InGaAs	p-Kontaktschicht	$3,0 \cdot 10^{19}$ cm^{-3}	C	150 nm
InGaAs	Photonenabsorber	nid	-	1380 nm
InP	Ätzstopp	nid	-	9 nm
n-InGaAs	n-Kontaktschicht	$1,0 \cdot 10^{19}$ cm^{-3}	Si	270 nm
InP	Buffer	nid	-	27nm

Reinigungsschritt (kurz: Ac/Pr) unterzogen wird. Anschließend wird eine Entfernung des Oberflächenoxids mit einer schwach konzentrierten Salzsäure ($HCl:H_2O$; 1:4)[12] vorgenommen, um eine definierte Ausgangsposition für den folgenden Photolackschritt zu gewährleisten.

Es folgt die Metallisierung der ersten Bauelementstruktur. Hierbei wird mittels der Lift-Off Technik der p-Kontakt aufgebracht, welcher als offene, ringförmige Zangenstruktur mit einer seitlichen Ausbuchtung für die spätere Weiterkontaktierung ausgebildet ist. Ein flächiger Kontakt ist an dieser Stelle nicht möglich, da er die Einstrahlung der Photonen abschirmen würde. Die Zangenöffnung ist aus prozesstechnischer Sicht unbedingt notwendig. Bei geschlossenen Polygonen, welche eine innere Fläche ohne Verbindung zum Probenrand aufweisen, besteht die Gefahr, dass der innere Metallfilm bei der Abhebetechnik nicht entfernt wird, so dass die betroffenen Bauelemente bereits zu Beginn des Prozesses zum Ausschuss zählen. In diesem Fall ist die Diffusion des Lösemittels unterhalb des Metalls innerhalb dieser lateral begrenzten Struktur nicht ausreichend und es verbleibt auf der Probe. Bei einer Verbindung aller zu liftenden Strukturen untereinander kommt zur Diffusion des Lösemittels zusätzlich eine Zugkomponente beim Ablösen des äußeren, großflächigen Metallfilms hinzu, welche den Lift-Off begünstigt. Erfahrungsgemäß führt die geöffnete Zangenstruktur an dieser Stelle zu einer einhundert prozentigen Ausbeute. Ein weiterer wichtiger Grund, das Layout des abzuhebenden Metalls als eine große geschlossene Struktur auszulegen, ist die Gefahr der Redeposition der sonst in einer großen Anzahl entstehenden kleinen Metallstrukturen. Diese können beim Liftvorgang in der flüssigen Phase an der Oberfläche haften bleiben und dort entweder für unerwünschte

[12] In Klammern sind die chemischen Formeln und die entsprechenden relativen Konzentrationen der Komponenten angegeben, aus welchen die verwendeten Ätzmischungen angesetzt werden

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tab. 5.2: Prozessablauf einer PIN-Diode

Schritt	Layout	Querschnitt	Erläuterung
1			Metallisierung des oberen Ringkontaktes (p-Kontakt)
2			Definition der ersten Mesa mittels Photolack und deren Ätzung
3			Definition der zweiten Mesa mittels Photolack und deren Ätzung
4			Metallisierung des unteren Ringkontaktes (n-Kontakt)
5a			Definition des Stützlackes für die Kontaktierung des oberen Ringkontaktes mittels Photolack
5b			Alternativ: Definition der Mesa-Passivierung und der Metallführung zum oberen Ringkontakt mittels BCB
6			Metallisierung der Messpads und deren Verbindung mit der PIN-Diode
7			Deposition und Strukturierung der SiN_x Entspiegelungsschicht

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Maskierung oder für Kurzschlüsse sorgen. Ein Beispiel für die Problematik der geschlossenen Metallpolygone ist in Abbildung 5.1 gezeigt.

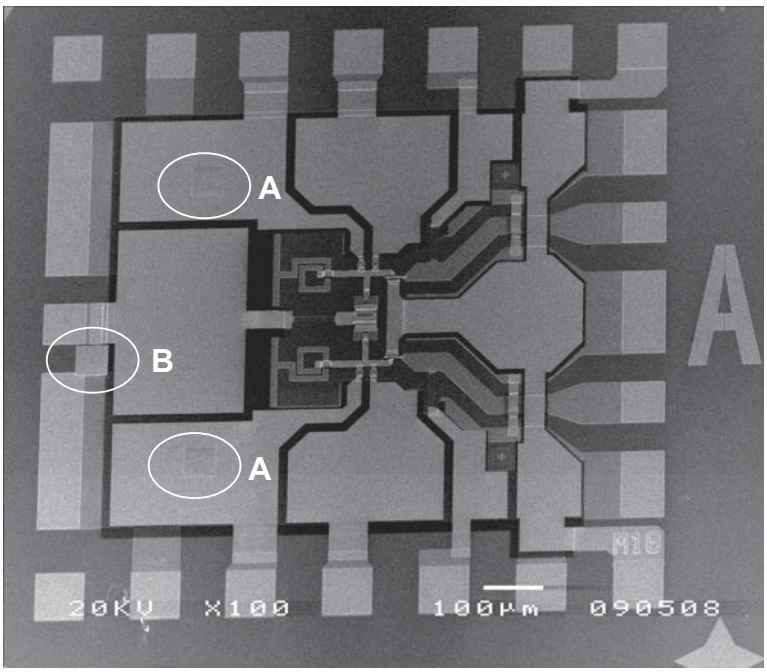


Abb. 5.1: REM Aufnahme einer Beispielschaltung mit A) nicht gelifteten geschlossenen Polygonen und B) einem Kurzschluss durch eine abgelagerte Metallstruktur

Die Abmessungen des p-Ringkontakts sind entsprechend den Ausführungen in Kapitel 2.1 ein Kompromiss zwischen der zu erzielenden Bandbreite und der Maximierung der Responsivity. Hierdurch werden gleichzeitig die Parameter C_j durch den Außendurchmesser, R_S und das optische Fenster hingegen gegenläufig durch den Innendurchmesser des Ringkontaktes bestimmt. Bei der Optimierung des Layouts ist hier darauf zu achten, dass die verbleibende Ringbreite nicht die Auflösungsgrenze der verwendetet Photolithografie unterschreitet. Als Metallisierung wird eine Schichtfolge bestehend aus Ti/Pt/Au (10/10/300 nm)[13] aufgedampft. Das Titan dient als mechanischer Haftvermittler, das Platin definiert die wirksame elektronische Barriere am Metal/Halbleiter-Übergang und das Gold minimiert aufgrund seiner hohen Leitfähigkeit den Zuleitungswiderstand und wird daher in ausreichender Schichtdicke aufgebracht. In Zusammenhang mit der sehr hohen

[13] Die Angaben in Klammern geben die jeweils aufgedampften Schichtdicken an.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

p-Dotierung in der Schicht von $N_A = 3 \cdot 10^{19} cm^{-3}$ führt diese Metallisierung zu einer ohmschen I(U)-Charakteristik.
Der Prozess wird mit der Ätzung der ersten Mesa-Struktur (p-Mesa) fortgesetzt. Da der zuvor aufgebrachte Metallkontakt den zu ätzenden Bereich nicht vollständig abdeckt, kann dieser nicht alleine als Ätzmaskierung genutzt werden. Es muss daher mittels der Photolithografie ein Schutzlack strukturiert werden, welcher resistent gegenüber der verwendeten Ätze ist und über eine gute Oberflächenhaftung verfügt. Der letzte Punkt wird durch eine erneute vorausgehende Entfernung des Oberflächenoxids unterstützt. Standardmäßig für einen nasschemischen Ätzprozess wird hier eine kreisrunde Struktur mit einem Überhang von 2 µm zum Ringkontakt strukturiert. Hierdurch wird der Halbleiter im Bereich des optischen Fensters geschützt. Die überstehende Ausbuchtung des Ringkontaktes maskiert den darunterliegenden Halbleiter ebenfalls während der Ätzung. Der nasschemische Abtrag des InGaAs-Materials wird mit einer phosphorsäurehaltigen Ätze (H_3PO_4:H_2O_2:H_2O; 1:1:25) bis zum sogenannten Ätzstopp-Material durchgeführt. Hierbei handelt es sich um eine dünne, wenige Nanometer betragende InP-Schicht, welche zwischen der intrinsischen und der n-dotierten InGaAs-Schicht eingebettet ist. Sie sorgt für eine Verlangsamung der Ätzgeschwindigkeit in Verbindung mit der oben genannten Ätze etwa um den Faktor 150. Das Ätzstopp-Material wiederum wird mit konzentrierter Salzsäure und einer ähnlich hohen Selektivität zum darunterliegenden Material entfernt, so dass nach Abschluss der p-Mesa Ätzung die Oberfläche der n-InGaAs Schicht frei liegt. Ein möglichst präziser Materialabtrag bis auf die n-InGaAs Schicht ist wichtig, da bei einer zu geringen Ätztiefe der zweite Ringkontakt auf undotiertem Material aufgebracht werden würde. Bei einer zu tiefen Ätzung wiederum würde die Schichtdicke der unteren n-InGaAs Kontaktschicht unnötig reduziert. Beide Szenarien führen zu einem Anstieg des Kontakt- bzw. des Bahnwiderstandes und damit zu einer Erhöhung von R_S.
Als nächstes folgt die Strukturierung der zweiten Mesa-Struktur. Hierbei handelt es sich um den gleichen Photolithografieschritt wie zuvor. Der Strukturdurchmesser ist entsprechend größer gewählt, um Platz für die Kontaktierung der n-dotierten Schicht vorzuhalten. Die Ätzung des n-InGaAs Materials wird ebenfalls mit der phosphorhaltigen Ätze bis zur InP-Bufferschicht durchgeführt. Da es sich bei der Bufferschicht um ein epitaktisch gewachsenes Material handelt, ist seine Hintergrunddotierung höher, und damit der spezifische Widerstand niedriger verglichen mit dem gezogenen, semi-isolierenden InP-Substratmaterial. Um die Parallelleitfähigkeit von Bauelementen und Leiterbahnen untereinander zu minimieren, müssen diese durch die Abätzung der Buffer-Schicht bis ins

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

hochohmige Substratmaterial voneinander isoliert werden. Die Ätzung wird mit einer verdünnten Salzsäure ($HCl:H_2O$; 1:1) bei 15°C durchgeführt. Hierdurch wird eine moderate und stabile Ätzrate von ca. 1,9 nm/s in InP erzielt. Das ist wichtig, um die Ätzung gut kontrollieren zu können. Ein Abtrag mit konzentrierter Salzsäure bei Raumtemperatur würde InP mit einer Ätzrate von ca. 200 nm/s abtragen. Bei einer gewünschten Ätztiefe von etwa 50 nm ohne Ätzstopp ist dies keine Option, denn eine zu tiefe Ätzung erhöht die Topologie[14] der Bauelemente unnötig.

Der Prozess wird mit dem Aufbringen des n-Ringkontakts fortgesetzt. Es handelt sich hier um eine zum p-Ringkontakt um 180° verdrehte Struktur, die ebenfalls mit einer Ausbuchtung für die spätere Weiterführung des Metalls versehen ist. Als Metallisierung wird hier eine Schichtfolge bestehend aus Ni/Ge/Au (10/10/300 nm) gewählt, wobei das Nickel als Flussmittel zur Verbesserung der Oberflächenmorphologie dient. Germanium diffundiert durch einen nach dem Lift-Off durchgeführten Legierschritt bei einer Temperatur von 360°C in den Halbleiter ein und sorgt lokal an der Grenzfläche für eine sehr hohe n^{++}-Dotierung. Hierdurch wird der Halbleiter entartet und die Dicke der elektronischen Barriere am Metall/Halbleiter-Übergang stark reduziert (Tunnelkontakt) [24]. Im betrachteten Spannungsbereich stellt sich eine lineare I(U)-Charakteristik ein.

Der Prozess des intrinsischen Bauelements ist an dieser Stelle abgeschlossen. Es folgen weitere Technologieschritte zur Kontaktierung der beiden Ringkontakte. Hierbei handelt es sich um die Strukturierung von Messpads im Falle der Prozessierung als Einzelbauelement bzw. um Verbindungsmetallisierungen, wenn die PIN-Diode in einer Schaltungsumgebung integriert werden soll. In beiden Fällen ist es notwendig, die Topologie zwischen dem Substrat und dem p-Ringkontakt zu überwinden. Diese beträgt bei der 20 GHz PIN-Diode etwa 2200 nm, was technologisch bereits eine gewisse Herausforderung darstellt. Hierzu eignet sich Photolack aufgrund seiner planarisierenden Eigenschaft sehr gut, d.h. die ausgeprägte Topologie der PIN-Diode mit abrupten Höhenunterschieden wird durch eine Bedeckung mit Photolack an der Mesaflanke entschärft. Der Bereich, welcher mit dem Stützlack strukturiert wird, ist in Tabelle 5.2, Schritt 5a zu erkennen. Hierbei handelt es sich um eine Version für wissenschaftliche Zwecke, d.h. der größte Teil der beiden Mesaflanken bleibt unbedeckt. Dieses Layout erlaubt eine nachträgliche chemische Behandlung der Mesaflanken und damit beispielsweise Untersuchungen zu Oberflächenströmen. Damit der Stützlack die nachfolgenden Prozessschritte unbeschadet übersteht,

[14] Als Topologie werden die Oberflächenstruktur und damit die auf der Probe auftretenden Höhenunterschiede bezeichnet. Je größer die Topologie, desto höher sind die Anforderungen an die Prozesstechnologie.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

wird er nach seiner Strukturierung bei einer Temperatur von typischerweise 160°C auf einer Heizplatte ausgebacken. Hierdurch bildet sich eine Resistenz gegenüber dem Ac/Pr-Lösemittelschritt aus. Alternativ zum Photolack kann die Planarisierung der Topologie mit einem photosensitiven Polymer bewerkstelligt werden. Das Produkt Cyclotene der Firma Dow Chemicals hat sich innerhalb der Mikroelektronik als Material mit hervorragenden dielektrischen, passivierenden und mechanisch stabilen Eigenschaften erwiesen [49]. Es ist das Material der Wahl für komplexe Prozesse, wie beispielsweise als Passivierung bzw. Haftmittel beim Substrattransfer bei HBTs [3], [50, 51]. Es ist abgeleitet von der Chemie des Benzocyclobutene (BCB) und lässt sich innerhalb der Prozesslinie ähnlich dem herkömmlichen Photolack verarbeiten. Bei Photodetektoren wird BCB ein positiver Einfluss auf den Dunkelstrom bescheinigt [52], welcher verglichen mit anderen Polymiden und SiN_x hier die besten Eigenschaften liefert [53]. Daher werden PIN-Dioden, welche für kommerzielle Zwecke oder für den Aufbau innerhalb eines Moduls vorgesehen sind, rundum an den Mesaflanken mit BCB passiviert. Das entsprechende Strukturlayout ist in Tabelle 5.2, Schritt 5b dargestellt. Man erkennt, dass die Mesaflanke langzeitstabil vor weiteren äußeren Einflüssen geschützt ist. Das optische Fenster sowie die Ausbuchtung des oberen Ringkontaktes verbleiben vom BCB unbedeckt.
Vor dem Aufbringen der Metallfolge Ti/Au (10/400 nm) wird die Substratoberfläche nach dem Entwickeln des belichteten Photolackes mittels Sauerstoffplasma angeraut, um die Haftung der metallisierten Flächen zusätzlich zum haftvermittelnden Titan weiter zu erhöhen. Dies ist notwendig, um die mechanische Stabilität für nachfolgende Prozesse wie z. B. das Drahtbonden oder für das Aufsetzen der Messnadeln zu gewährleisten.
Letztlich erfolgt die Entspiegelung des optischen Fensters für eine bestimmte Wellenlänge entsprechend den Ausführungen in Kapitel 2.1.4. Hierzu wird Siliziumnitrid analog zu einem Metallisierungsschritt mittels der Lift-Off Technik auf dem optischen Fenster strukturiert. Für eine Entspiegelung bei einer Wellenlänge von $\lambda = 1550$ nm wird das Material mit einer Schichtdicke von 215 nm abgeschieden, wobei über die Prozessparameter an der ECR-PECVD Anlage ein Lichtbrechungsindex von $n_{antiRX} \approx 1{,}8$ eingestellt wird. Bei einer PIN-Diode mit einer Absorberschichtdicke von 600 nm wurde die Effizienz der Entspiegelung für unterschiedliche Bauelementdurchmesser untersucht und das Ergebnis in Abbildung 5.2 zusammengetragen. Es zeigt sich, dass unabhängig vom untersuchten Bauelementdurchmesser durch die Antireflexbeschichtung eine Zunahme der externen Quanteneffizienz von etwa 26% erreicht wird. Anders ausgedrückt bedeutet dieses Ergebnis, dass 26% der insgesamt eingestrahlten optischen Leistung durch das Auf-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

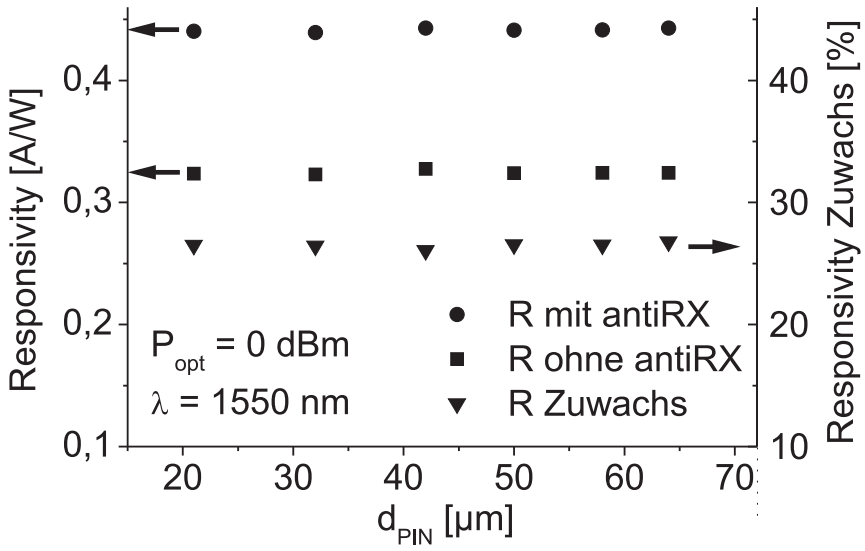


Abb. 5.2: Experimentelles Ergebnis der Antireflexbeschichtung mittels SiN_x an PIN-Dioden verschiedenen Durchmessers

bringen des SiN_x-Materials zusätzlich in das Bauelement eingekoppelt werden und zum Photostrom beitragen. Im Vergleich zu den Ausführungen in Kapitel 2.1.4, wonach die theoretische Reflektivität R' für das Material InGaAs etwa 29% beträgt, wird die Effizienz dieses Verfahrens deutlich. Durch dieses technologisch relativ einfache Prozedere lässt sich die Reflektivität reproduzierbar um circa 90% reduzieren.

5.1.2 Masken für trockenchemische Ätzprozesse

Anders als beispielsweise RTDs oder HBTs besitzen PIN-Dioden keine flächigen Metallkontakte, welche als Ätzmaske für trockenchemische Ätzprozesse verwendet werden könnten (vgl. Tabelle 5.2). Zur trockenchemischen Ätzung von Mesen bei PIN-Dioden bzw. als Schutz der Bauelemente bei einem Schaltungsprozess sind entfernbare Masken nötig, welche über eine ausreichend hohe Selektivität zum Halbleitermaterial verfügen und sich wieder restlos von der Probe entfernen lassen. Dieses Unterkapitel beschreibt die Entwicklung PIN-Dioden tauglicher Hartmasken, welche für Ätztiefen > 2 µm mit dem im Kapitel 3.1.1 beschriebenen Oxford RIE-ICP Trockenätzsystem mit einer Cl_2/N_2-Chemie geeignet sind.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Photoresist als Maskierungsmaterial

Die einfachste Möglichkeit zur trockenchemischen Ätzung von PIN-Dioden wäre die Nutzung der Photoresistmasken äquivalent zum nasschemischen Prozess. Diesbezüglich wurde der im Fachgebiet standardmäßig eingesetzte Photolack für Mesaprozesse (Allresist, AR-P 3740) sowie zwei Ebeam-Resiste (Allresist, AR-N 7500.18 und Zeonrex, ZEP 520 A) auf ihre Tauglichkeit hin untersucht. Es wurden strukturierte Testproben mit allen drei Resisten vorbereitet, an welchen Testätzungen mit für das Material InGaAs etablierten Prozessparametern durchgeführt wurden. Die Ätzzeit betrug 150 s und die Prozesstemperatur wurde auf die für indiumhaltige Materialien notwendigen 170 °C eingestellt.

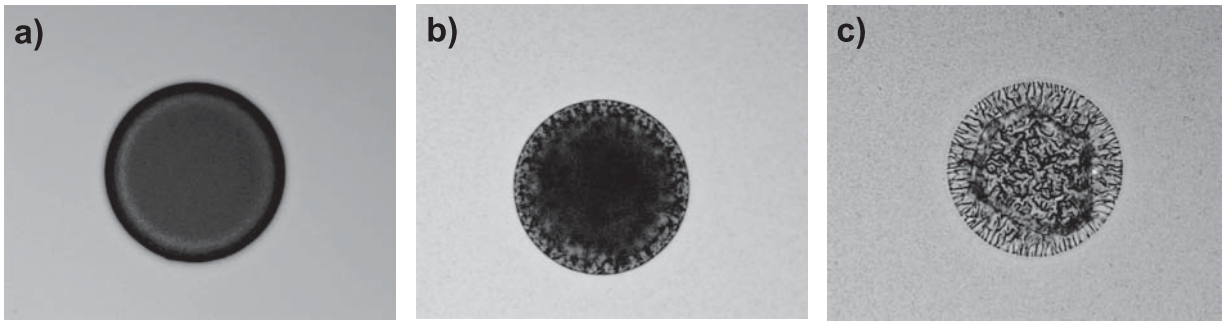


Abb. 5.3: Lichtmikroskopaufnahmen einer a) strukturierten Photoresist-Ätzmaske nach dem Entwicklungsschritt, b) nach der RIE-ICP Ätzung und c) nach einem Lösungsmittelschritt

Die erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 5.3 anhand von Lichtmikroskopaufnahmen für verschiedene Prozessstadien zu erkennen. Es wird deutlich, dass der Photolack durch den Ätzprozess eine gewisse Struktur ausbildet, welche zuvor nicht vorhanden war. Nach dem Lösungsmittelschritt mit Aceton und Isopropanol, welcher dazu dient, die Maske wieder von der Probe zu entfernen, verbleibt über die gesamte Mesa-Fläche Photoresist zurück. Die Strukturierung ist zu diesem Zeitpunkt noch deutlicher zu erkennen. Das bedeutet, dass durch das Lösungsmittel ein gewisser, noch löslicher Teil des Photolackes oberflächlich entfernt wurde. Auch der Einsatz von stärkeren Lösungsmitteln wie z. B. Dimethylformamid (DMF) mit einer im Vergleich zu Aceton und Isoplopanol deutlich höheren Siedetemperatur von 153 °C bringt keinen Erfolg. Die erzielten Ergebnisse waren für alle drei untersuchten Resiste vergleichbar. Der Grund für die ausgeprägte Unlöslichkeit der Resi-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

ste hängt sehr wahrscheinlich mit der Prozesstemperatur von 170 °C zusammen. Optische Lacke bilden ab Trocknungstemperaturen von etwa 150 °C eine Resistenz gegenüber Lösungsmitteln aus. Auf Grund der notwendigen Desorption von $InCl_x$-Reaktionsprodukten von der Probenoberfläche während des Ätzprozesses kann eine Temperatur von 170 °C nicht unterschritten werden. Damit sind photolackbasierte Ätzmasken für Trockenätzprozesse unter diesen Randbedingungen nicht möglich.

SiN_x als Maskierungsmaterial

Als weiterer Kandidat für das Hartmaskenmaterial kommt Siliziumnitrid (SiN_x) in Frage [54, 55]. Es wird mittels des in Kapitel 3.3 beschriebenen ECR-PECVD Systems ganzflächig bei Raumtemperatur aus der Gasphase auf die Probe abgeschieden.

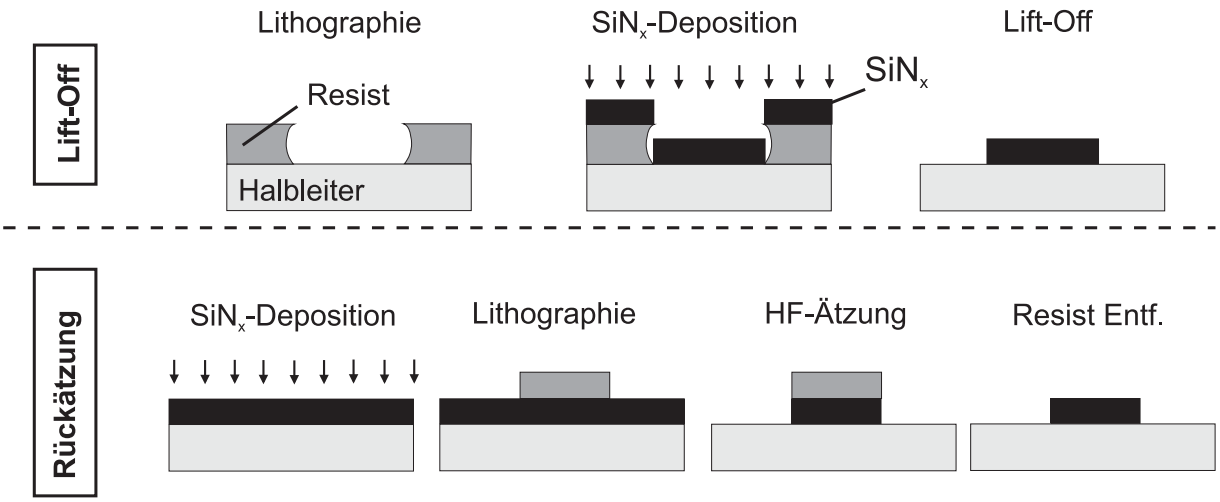


Abb. 5.4: Schematische Darstellung von SiN_x-Strukurierungsmethoden durch das Lift-Off Verfahren (oben) und durch Rückätzung mittels Flusssäure (unten)

Wie in Abbildung 5.4 schematisch gezeigt, kann SiN_x auf zwei unterschiedliche Weisen auf der Probe strukturiert werden. Einerseits wird bereits vor der Abscheidung Lift-Off fähiger Photolack auf der Probe strukturiert und das überschüssige SiN_x nach der Abscheidung in einem Lösungsmittel abgehoben. Diese Möglichkeit wird beispielsweise zur Strukturierung der Entspiegelungsschicht bei PIN-Dioden gewählt (vgl. Tabelle 5.2, Schritt 7). Andererseits wird das SiN_x zunächst ganzflächig abgeschieden, bevor anschließend ein Mesa-Photolack auf der Oberfläche strukturiert wird. Nun werden das überschüssige

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Maskenmaterial durch eine Ätzung mittels Flusssäure (HF_{aq}, 5 %) und anschließend der Schutzlack durch einen Ac/Pr-Schritt entfernt. Um eine möglichst hohe Strukturtreue zu gewährleisten, wird die Ätzzeit von ca. 30 s in 10 s Schritte unterteilt, um den Schutzlack zwischendurch auf einer Heizplatte zu tempern. Hierdurch kann einer Unterätzung durch eine Optimierung der Lackhaftung in gewissem Rahmen entgegengewirkt werden. Um eine Auswirkung der SiN_x-Strukturierungsmethode auf das Ätzergebnis zu untersuchen, wurden Testätzungen an einer InGaAs-Epischicht durchgeführt.

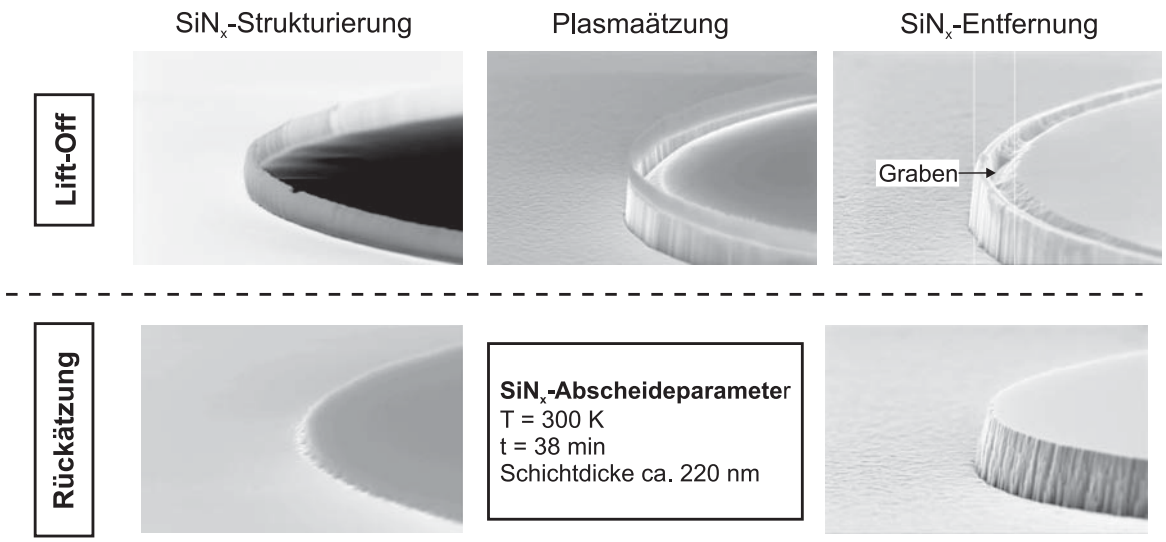


Abb. 5.5: REM-Aufnahmen von verschiedenen Stadien des trockenchemischen Ätzprozesses in Abhängigkeit von der SiN_x-Strukturierungsmetode

In Abbildung 5.5 sind die entsprechenden REM-Aufnahmen dargestellt. Abhängig von der gewählten Methode, bei sonst identischen Abscheideparametern, gibt es einen großen Unterschied am Rand der SiN_x-Strukturen. Beim Lift-Off Verfahren kommt es durch den ungerichteten Anteil bei der Abscheidung zu einer Deposition des Materials auf den Seitenwänden des Photolacks, welches nach dem Lösungsmittelschritt als eine konvexe Abbildung des Lift-Off Profils auf der Probe verbleibt (vgl. Abbildung 5.5 links oben). Des Weiteren beobachtet man eine Verjüngung der Schichtdicke zum Rand hin.
Wird eine auf diese Weise vorbereitete Probe gerichtetem Plasma ausgesetzt, findet ein kompletter Abtrag der SiN_x-Maske zuerst an dieser Stelle statt, während die hohe Randstruktur weiterhin vorhanden ist. Es kommt schließlich zu einer unerwünschten Ausbil-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

dung eines Grabens im Randbereich der Mesa. Bei der SiN_x-Strukturierung durch Rückätzung besitzt die Maske über die gesamte Fläche eine homogene Schichtdicke ohne Artefakte, so dass eine trockenchemische Ätzung hier zu einer glatten Mesaoberfläche führt.

Einfluss der Parameter P_{ICP} und P_{RF} auf den Prozess

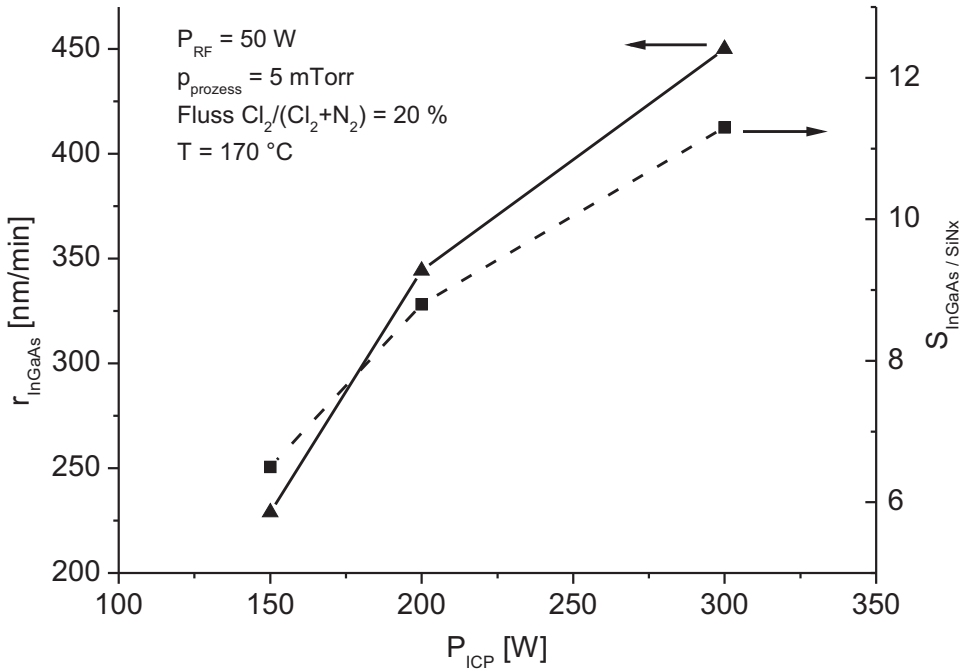


Abb. 5.6: Ätzrate und Selektivität für InGaAs in Abhängigkeit von P_{ICP}

Die Selektivität der Hartmaske zum Halbleiter ist eine wichtige Kenngröße, welche das mögliche Prozessfenster im Hinblick auf die maximale Ätztiefe definiert. Außerdem ist die Morphologie der geätzten Oberfläche wichtig für nachfolgende Prozessschritte. Unter diesen Gesichtspunkten wurde der Trockenätzprozess (vgl. Kapitel 3.1.1) von PIN-Didoen für die beiden Parameter P_{ICP} und P_{RF} untersucht. Die experimentellen Ergebnisse bezüglich der Ätzrate für InGaAs und der Selektivität bezüglich der SiN_x-Maske sind in den Abbildungen 5.6 und 5.7 zusammengefasst. Die ermittelten Ätzraten des Halbleiters steigen erwartungsgemäß mit Erhöhung der beiden Anlagenparameter. Durch Erhöhung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

der ICP-Leistung werden mehr hoch reaktive Chlorradikale in der Prozesskammer bereitgestellt, welche durch chemische Reaktion mit der Halbleiteroberfläche das Material abtragen. Eine Erhöhung der Tischleistung, und damit der selbstinduzierten Gleichspannung, beeinflusst die Kinetik der Gasmoleküle, so dass der physikalische Abtrag wächst. Der leichte Einbruch der Ätzrate bei $P_{RF} = 60$ W, welcher durch eine Wiederholung des Experiments bestätigt wurde, weicht an dieser Stelle vom Trend ab.

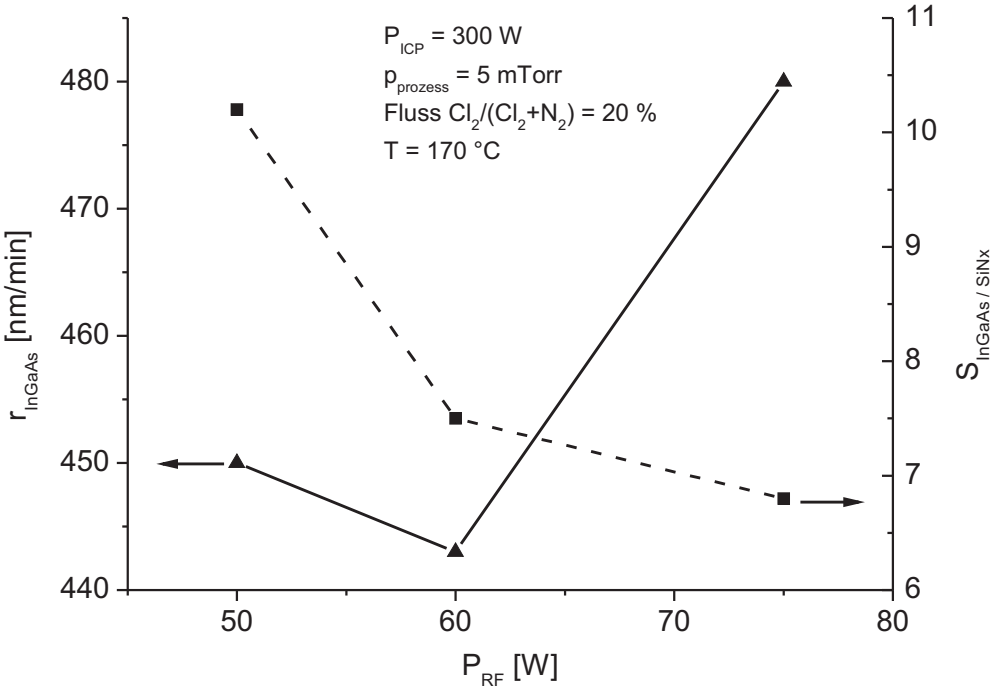


Abb. 5.7: Ätzrate und Selektivität für InGaAs in Abhängigkeit von P_{RF}

Im Gegensatz dazu nimmt die Selektivität mit steigender ICP-Leistung zu und fällt kontinuierlich mit Erhöhung der physikalischen Ätzkomponente. Die Begründung hierfür liegt in dem überwiegend physikalischen Abtrag der SiN_x-Hartmaske, d. h. der Einfluss der chemischen Komponente durch Chlorradikale auf das Maskenmaterial ist von untergeordneter Bedeutung [56].

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

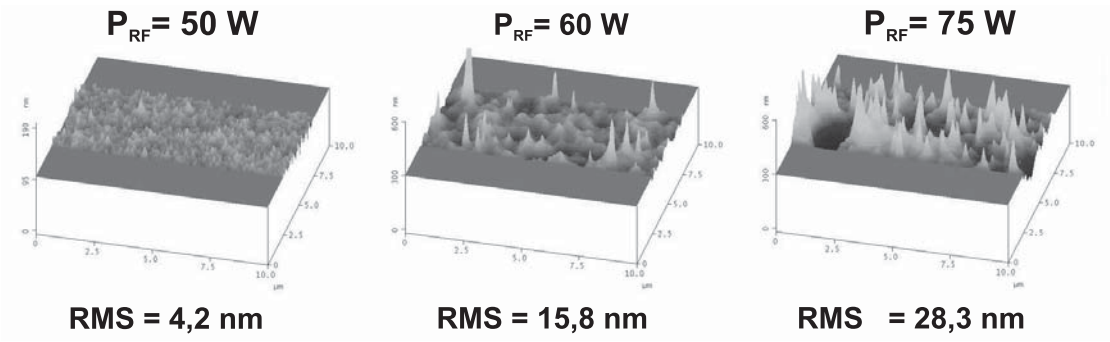


Abb. 5.8: Rasterkraftmikroskopische Bestimmung des quadratischen Mittelwerts (RMS) der Oberflächenrauigkeit in Abhängigkeit von P_{RF}

Neben der Minderung der Selektivität, spricht der sehr deutliche Anstieg der Oberflächenrauigkeit gegen höhere Tischleistungen. In Abbildung 5.8 sind für drei verschiedene Werte P_{RF} Oberflächenmessungen mittels eines Rasterkraftmikroskops dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit steigender Sputterwirkung die Oberflächenmorphologie massiv geschädigt wird. Bei einer Erhöhung der Tischleistung um 50 % steigt die Oberflächenrauigkeit im quadratischen Mittel (RMS) auf etwa das Sechsfache.
Als Ergebnis dieser Versuchsreihe lässt sich festhalten, dass bezüglich der beiden untersuchten Parameter P_{ICP} und P_{RF} eine trockenchemische Ätzung mit maximaler ICP-Leistung von 300 W und mit einer Tischleistung von mindestens 50 W sinnvoll ist. Bei einer Unterschreitung dieses Wertes wird das Plasma instabil und führt zu nicht reproduzierbaren Ätzergebnissen.

Kombinierte Hartmaske aus SiN_x und Nickel

Die Selektivität der Hartmaske kann durch eine zusätzliche Belegung mit Nickel weiter erhöht werden, ohne dass der Vorteil der Entfernbarkeit nach dem Prozess darunter leidet. Nickel bietet in dem hier genutzten Parameterbereich eine Selektivität zu InP basiertem Material von etwa 20 [22]. In Abbildung 5.9 ist der notwendige Prozessablauf verdeutlicht. Nachdem das SiN_x durch Rückätzung strukturiert wurde, wird im folgenden Schritt Nickel mir der identischen Maske aufgebracht. Dieser Schritt erfordert eine sehr präzise Justage der Maske, um eine vollständige Abdeckung der SiN_x-Strukturen sicherzustellen. Mit einer wenige Nanometer dünnen Titanschicht als Haftvermittler wurden an dieser Stelle gute Erfahrungen gemacht. Anschließend erfolgt der eigentliche trockenchemische

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

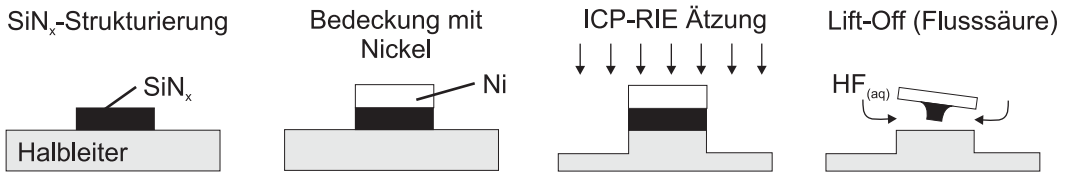


Abb. 5.9: Schematische Darstellung des Ätzprozesses mittels kombinierter SiN_x/Nickel Hartmaske

Ätzschritt, bevor die verbleibende Hartmaske in Flusssäure (HF_{aq}, 5 %) entfernt wird. SiN_x kann mittels HF_{aq} sehr selektiv zum Halbleiter mit einer starken Neigung zum Unterschnitt geätzt werden. Für eine vollständige Unterätzung der Strukturen reicht eine Ätzdauer von 60 s aus. Hierdurch wird der verbliebene metallische Teil der Hartmaske, ähnlich dem lösungsmittelbasierten Lift-Off, von der Probe entfernt.

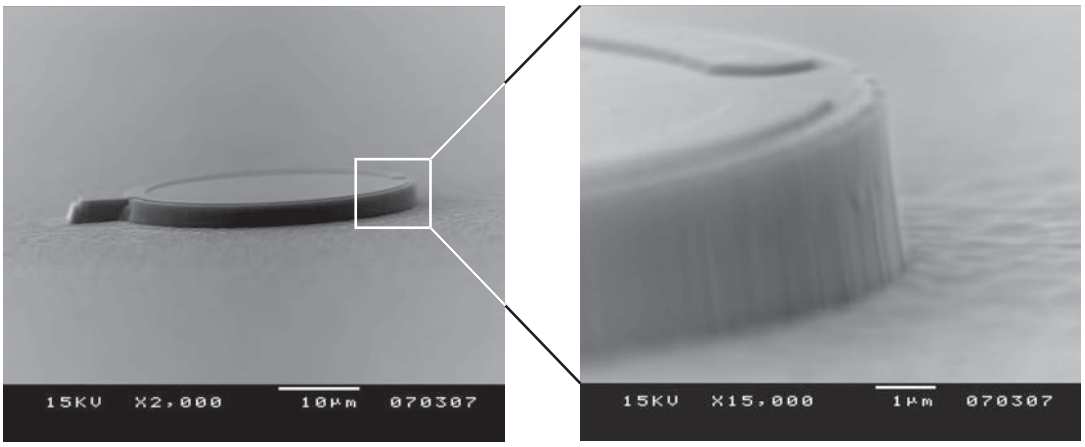


Abb. 5.10: REM-Aufnahme einer trockenchemisch geätzten p-Mesa mit einer Ätztiefe > 2 µm

Eine trockenchemisch geätzte p-Mesa unter Verwendung der kombinierten Hartmaske ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Die Mesahöhe beträgt 2,2 µm. Die für die Ätzung relevanten Anlagenparameter sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tab. 5.3: RIE-ICP Parameter zur isotropen Ätzung der p-Mesa einer InGaAs PIN-Diode

$\mathbf{P}_{ICP}$	$\mathbf{P}_{RF}$	$\mathbf{p}_{strike}$	$\mathbf{p}_{prozess}$	$\mathbf{Cl_2/N_2}$	**T**	**t**
300 W	50 W	45 mTorr	6 mTorr	4/36 sccm	170 °C	615 s

Wie zu erkennen ist, bilden sich durch die Balance zwischen physikalischer und chemischer Ätzkomponente steile Flanken aus. Des Weiteren verbleibt die geätzte Oberfläche wegen der moderaten Tischleistung von 50 W relativ glatt, so dass dieser Prozess insgesamt die zu Beginn dieses Kapitels erwähnten notwendigen Voraussetzungen erfüllt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.2 PIN-Diode auf (001) Siliziumsubstrat

Seit der Vorstellung der ersten integrierten Schaltung im Jahr 1959 von J. S. Kilby [57], nahm die rasante Entwicklung der Mikroelektronik ihren Lauf. Schon vier Jahre später legten Wanlass und Sah mit ihrer Veröffentlichung den Grundstein für die CMOS-Technologie [58], welche durch eine revolutionäre Weiterentwicklung in den letzten Dekaden digitale Schaltungen mit Packungsdichten von nunmehr mehreren hundert Millionen Transistoren auf einer Chipfläche von wenigen Quadratzentimetern hervorbrachte. Heute bildet die siliziumbasierte Halbleitertechnologie eine hochgradig effiziente und vergleichsweise preiswerte Plattform für die monolithische Realisierung von analogen, digitalen sowie mixed-signal Anwendungen unter Verwendung von sowohl Bipolar- als auch Feldeffektbauelementen.
Ungeachtet der erzielten Fortschritte in der Skalierung bleiben der Siliziumtechnologie bis heute einige Anwendungsbereiche verwehrt. Zum einen ist hier der Massenmarkt der mobilen Kommunikationstechnik zu nennen. Die in der Sendeendstufe der mobilen Endgeräte eingesetzten HF-Leistungsverstärker beinhalten zumeist HBTs, welche in GaAs-Technologie gefertigt sind. Der Grund hierfür sind die im Vergleich zu CMOS höheren möglichen Betriebsspannungen, so dass der Flächenbedarf und damit die Kosten eines CMOS-Verstärkers für die Bereitstellung einer gewünschten HF-Leistung ungleich höher sind. Obwohl durch die Erweiterung der Siliziumtechnologie um den Silizium-Germanium (SiGe) Mischkristall nun auch leistungsfähige SiGe-HBTs mit CMOS integrierbar sind, erfährt die kommerzielle Entwicklung entsprechender Module zurzeit keinen nennenswerten Schub [59]. Zum anderen wird der Photonikmarkt im Bereich der HF-Photodetektoren nahezu vollständig von III/V-Verbindungshalbleitern dominiert. Reines Silizium eignet sich aufgrund seines indirekten Bandübergangs, seines vergleichsweise niedrigen Absorptionskoeffizienten und einer Bandlückenenergie, welche die beiden wichtigen Wellenlängen der optischen Kommunikationstechnologien $\lambda = 1{,}3$ µm und $\lambda = 1{,}55$ µm nicht abdeckt (siehe Abb. 2.2) [32] , nicht als Material für effiziente optoelektronische Komponenten. Da die CMOS-Technologie einen Marktanteil von über 95% bei den Halbleiterchips aufweist, sind hierzu kompatible und effiziente Lichtemitter und Lichtabsorber hochgradig interessant, um die optoelektronische Wandlung und den photonenbasierten Datentransport monolithisch integrieren zu können [60]. Vielversprechende Ergebnisse wurden auch auf diesem Gebiet mit dem SiGe-Mischkristall bis hin zu reinem Germanium als Absorbermaterial erzielt [61, 62, 63]. Durch die Verkleinerung der Bandlückenenergie mit

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

steigendem Germanium Anteil kann Licht mit Wellenlängen bis hin zu $\lambda > 1{,}55$ µm absorbiert werden. Auch der Absorptionskoeffizient α steigt gegenüber dem des reinen Siliziumkristalls. Jedoch bleibt die Einschränkung des indirekten Bandübergangs auch für SiGe bestehen, so dass Thermalisierungsprozesse die effiziente Generation von Photostrom negativ beeinflussen. So reichen die bis dato vorgestellten SiGe-Photodetektoren bezüglich der Bereitstellung von niedrigen Dunkelströmen und gleichzeitig hoher Responsivity sowie Bandbreite bei weitem nicht an ihre Konkurrenten in InP-Technologie heran [64, 65, 66]. Aus diesen Gründen werden Möglichkeiten untersucht, um beide Technologien möglichst effizient miteinander zu kombinieren. Die Flip-Chip Methode [67] und das Wafer-Bonding [68, 69] sind zwei Möglichkeiten für einen hybriden Chipaufbau. Beide Methoden zeichnen sich durch geringe Schädigung der mechanisch und elektrisch zu verbindenden Hardware aus und sind prinzipiell dafür geeignet, III/V-Strukturen und CMOS gemeinsam zu integrieren. Betrachtet man jedoch neben der Wirtschaftlichkeit auch Anforderungen wie Justagetoleranzen oder die parasitäre induktive Belastung durch Bonddrähte, so muss man feststellen, dass die genannten Methoden für hochintegrierte und hochbitratige Komponenten nicht geeignet sind. Hierfür kann nur die monolithische Integration durch epitaktisches Wachstum des III/V-Materials direkt auf dem Siliziumsubstrat in Betracht gezogen werden.

5.2.1 Untersuchtes Integrationskonzept für III/V auf Silizium

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse zur Technologie und zu den Messergebnissen einer auf (001) orientiertem Siliziumsubstrat hergestellten InGaAs PIN-Diode vorgestellt. Die Entwicklung des Materialwachstums hoher Qualität war nicht Bestandteil dieser Arbeit und wird daher der Vollständigkeit halber nur kurz mit entsprechenden Verweisen angesprochen. Durch die (001) Substratorientierung soll die Kompatibilität zur CMOS-Technologie sichergestellt werden, welche traditionell aufgrund der hier optimalen Elektronenbeweglichkeit diese Kristallausrichtung wählt. Maßnahmen zur Erhöhung der Löcherbeweglichkeit der PMOS-Elemente durch Kombination von (001), (110) und auch (111) orientiertem Silizium mit Hilfe der sogenannten „Hybrid-Orientation Technology (HOT)“ behindern diesen Ansatz nicht [70, 71]. Eine große Herausforderung beim kristallinen Wachstum von InP auf Si ist die hohe Gitterfehlanpassung Δa von etwa 8% ($a_{Si} = 0{,}543$ nm, $a_{InP} = 0{,}587$ nm [32]), welche einen konventionellen Epitaxieprozess für kristalline, planare Schichten verhindert.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Ein Ansatz für den Abbau der resultierenden Gitterverspannung in hoch verspannten Systemen ist eine gezielte Vorstrukturierung der Substratoberfläche im Nanometermaßstab. Hierdurch wird in der Anfangsphase des Wachstums die Nukleation der angebotenen Quellmaterialien selektiv auf den strukturierten Inseln stattfinden. Da sich so zunächst keine geschlossene Schicht ausbildet, stehen für den Abbau der Gitterverspannung neben der vertikalen zusätzlich die beiden lateralen Dimensionen zur Verfügung. Im weiteren Verlauf verschmelzen die selektiven Epitaxiezentren wegen der lateralen Wachstumskomponente zu einer geschlossenen Schicht, wodurch die anfängliche Gitterverspannung bereits reduziert wird. Nachdem eine kritische Schichtdicke aufgewachsen ist, findet flächiges, kristallines Wachstum mit der transformierten Gitterkonstante statt [72]. Die praktische Umsetzung dieser Theorie zu bauelementfähigen Schichten ist jedoch sehr komplex. Für das System InP auf Si verfolgte die Arbeitsgruppe von Prof. Andreas Schlachetzki an der TU-Braunschweig den Ansatz der Vorstrukturierung der Si-Substratoberfläche im Nanometermaßstab mit verschiedenen Methoden [73]. Zum einen wurden selbsorganisierte InP-Inseln epitaktisch aufgewachsen, welche bei einem folgenden Siliziumätzschritt in einer 30%-igen Kalilauge (KOH) bzw. einer Natriumhydroxidlösung (NaOH) als Ätzmaskierung dienen und so pyramidenförmige Strukturen im Silizium erzeugt wurden. Zum anderen wurden maskenlose Verfahren untersucht, bei welchen das Siliziumsubstrat vor der Standardoxidreinigung gezielt oxidiert wurde. Hierdurch konnte die Oberflächenrauigkeit des Si-Substrats im Vergleich zur direkten Oxidreinigung um den Faktor von bis zu 2,5 erhöht werden. Es zeigte sich weiterhin, dass sich bei den nanostrukturierten Substraten die Kristalldefekte während des Wachstums überlagern und damit aufheben können, wobei eine zu hohe Ausgangsrauigkeit wiederum zur verstärkten Ausbildung von Antiphasen-Domänen[15] führt. Der optimale Rauigkeitswert beträgt im quadratischen Mittel (RMS) ca. 0,45 nm. Auf die entsprechend vorbereiteten (001) Si-Substrate wurde in Braunschweig ein 1,5 µm dickes InP Quasi-Substrat aufgewachsen, welches keine Antiphasen-Domänen und eine Versetzungsdichte von 10^8 cm^{-2} sowie eine RMS Oberflächenrauigkeit von 3,5 nm aufwies. Eine Untersuchung des Materials belegt eindeutig die erfolgreiche Überführung der Gitterkonstanten vom Si zu InP und bescheinigt dem III/V-Material eine hohe Qualität [4].

Um die III/V-Oberflächenstruktur für Bauelementanwendungen weiter zu verbessern, wurden nunmehr in unserer Arbeitsgruppe Wachstumsexperimente mittels der Moleku-

[15] Störung der Kristallperiodizität in lateraler Richtung [74]

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

larstrahlepitaxie (MBE). Hierzu zählt zum einen eine verspannte Übergitterstruktur bestehend aus 20 Perioden InAlAs/InGaAs und zum anderen gitterangepasstes, bei 370 °C gewachsenes LT-InAlAs (Low Temperature) mit einer Schichtdicke von 200 nm, welche auf das InP Quasi-Substrat aufgewachsen und auf ihren Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit und auf die Defektdichte hin untersucht wurden [75]. Die Übergitterstruktur führte zu einer Erhöhung der RMS Oberflächenrauigkeit auf 7,8 nm. Im Gegensatz dazu konnte durch die LT-InAlAs Bufferschicht eine Reduktion der gemessenen Rauigkeit auf 1,9 nm sowie eine vollständige Unterdrückung von kleinen Defekten erzielt werden.
Das mittels des InP-Quasibuffers und der LT-InAlAs Schicht präparierte (001) Si-Substrat bildet den Ausgangspunkt für das Wachstum der funktionalen Bauelementschichten. Die so bereitgestellte Oberflächenqualität ist ausreichend, um hierauf sogar III/V RTDs zu realisieren, welche aufgrund des dünnen Quantenbrunnens sehr empfindlich gegenüber der Oberflächenrauigkeit sind [4, 5].

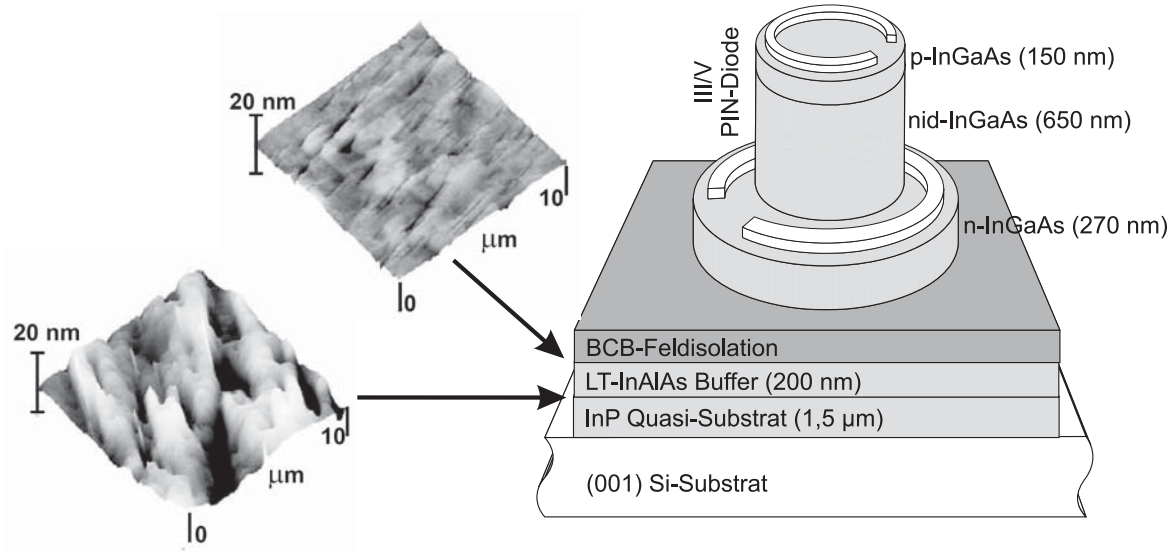


Abb. 5.11: Qualitative Technologieabbildung einer InGaAs PIN-Diode auf (001) Si-Substrat mit zugehörigen RKM-Topologiemessungen vor und nach dem Wachstum der InAlAs-Bufferschicht [75]

Teil dieser Arbeit ist ein Beitrag zur Integration eines leistungsstarken III/V-Photodetektors auf (001) Siliziumsubstrat [6, 7]. Abbildung 5.11 zeigt qualitativ eine prozessierte PIN-Diode auf dem entsprechend vorbereiteten Si-Substrat. Topologiemessungen mittels der

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Rasterkraftmikroskopie verdeutlichen die Abnahme der Oberflächenrauigkeit durch den LT-InAlAs Buffer. Für dieses Experiment wurde eine vergleichsweise niedrige Absorberschichtdicke von 650 nm gewählt, um die Gefahr von Problemen beim Wachstum und beim Prozess im Vorfeld zu minimieren. Die Prozesstechnologie entspricht weitestgehend der im Kapitel 5.1.1 beschriebenen PIN-Diode direkt auf einem s.i. InP-Substrat mit Ausnahme einer BCB-Isolationsschicht. Diese ist hier mangels eines semi-isolierenden Halbleitermaterials zur Erzeugung einer hochohmigen Oberfläche notwendig. Nach dem Prozess der aktiven Bauelementschichten wird die Oberfläche des LT-InAlAs Buffers mit BCB passiviert und anschließend die Messpads aufgebracht. Die Passivierung erfolgt an dieser Stelle, um die Topologie der Probe nicht unnötig zu erhöhen.

5.2.2 Experimentelle Bauelementergebnisse

Um die Messdaten der PIN-Diode auf Silizium mit denen eines Elements in herkömmlicher InP-Technologie vergleichen zu können, ist die PIN-Schichtsequenz und der Prozess auf einem InP-Substrat reproduziert worden. Die Vergleichsprobe verfügt ebenfalls über eine BCB-Passivierung, um gerade für Hochfrequenzuntersuchungen ähnliche Verhältnisse zu schaffen, da das BCB durch seine deutlich niedrigere relative Permittivität ($\varepsilon_{r,BCB}$ = 2,65; $\varepsilon_{r,InP}$ = 12,4) Einfluss auf die Eigenschaften der Koplanarleitung nimmt.

DC-Analyse

Abbildung 5.12 zeigt Gleichstrommessungen an den beiden Detektoren für den Dunkelbetrieb und bei Bestrahlung unter Variation der optischen Eingangsleistung P_0 (λ = 1,55 μm). Da jede prozessierte Probe bei dem verwendeten Maskensatz (Interne Bezeichnung: IPD21µm) über fünfhundert PIN-Dioden gleichen Typs beinhaltet, wurden zum Vergleich zwei Elemente ausgewählt, welche bezüglich des Dunkelstroms I_d und des Serienwiderstandes R_S dem durchschnittlichen Wert entsprechen. Bei der Betrachtung des Dunkelstroms fällt auf, dass dieser bei den Elementen auf Silizium reproduzierbar etwa drei Größenordnungen höher ist als bei den InP Vergleichselementen. Tendenziell kann dieses Verhalten durch eine höhere Defektdichte in der PIN-Absorberschicht auf der Silizium Probe erklärt werden. Außerdem besteht die Möglichkeit einer Diffusion des Siliziums während der III/V-Epitaxie aus dem Substrat in die InGaAs-Absorberschicht.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

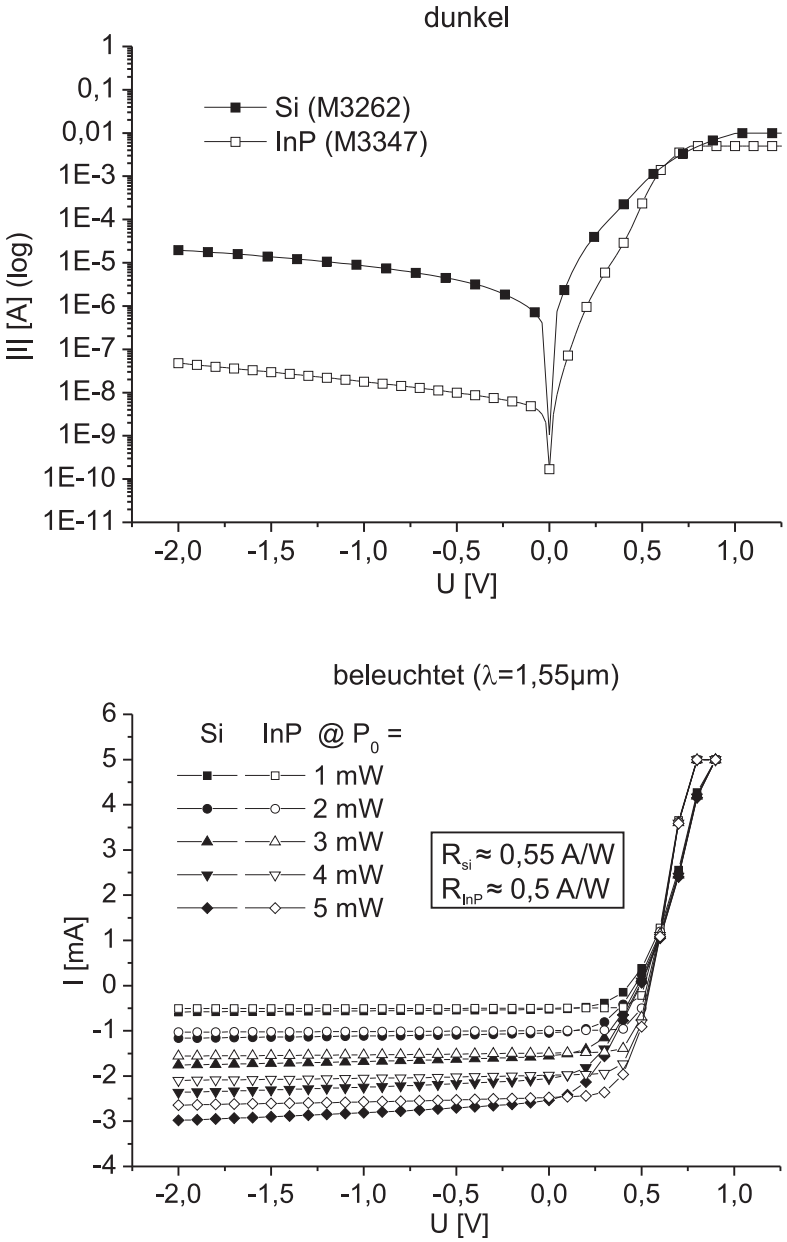


Abb. 5.12: Kennlinienvergleich einer PIN-Diode auf Silizium und eines Vergleichselements auf Indiumphosphid mit und ohne Beleuchtung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dort verursacht es eine Hintergrunddotierung in Form eines Donators. Diese zusätzlichen Störstellen im Bulk[16] sind bei Raumtemperatur bereits ionisiert und tragen zum Ladungstransport bei. Im Hinblick auf die optoelektronischen Eigenschaften herrscht eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den beiden Proben. Der Photostrom steigt im untersuchten Bereich erwartungsgemäß linear mit der eingekoppelten optischen Leistung an und die bestimmte Responsivity beträgt bei beiden Proben etwa 0,5 A/W.
Ein Unterschied zwischen beiden Technologien ist beim Verlauf der Sperrkennlinien unter Beleuchtung zu erkennen. Während das Element auf InP im untersuchten Spannungsbereich eine flache Kennlinie und damit einen von der Bias-Spannung nahezu unabhängigen Photostrom liefert, steigt dieser beim Element auf Silizium mit einer höheren Vorspannung an. Da dieser Effekt mit einer stärkeren optischen Einstrahlung wächst, kann es sich hierbei nicht um die Abbildung des Dunkelstroms handeln. Auch eine Vervielfältigung der Ladungstäger über den Lawineneffekt kann aufgrund des hierfür viel zu geringen Stromzuwachses ausgeschlossen werden. Eine bei niedrigen Bias-Spannungen nicht vollständig verarmte Absorptionsschicht kann dieses Verhalten erklären. Durch eine höhere Hintergrunddotierung sinkt die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ in der Absorptionsschicht. Außerdem ist davon auszugehen, dass trotz der Maßnahmen zur Verbesserung der Oberflächenqualität das auf Silizium gewachsene Material stärker mit Kristalldefekten durchsetzt ist. Störungen in der Kristallperiodizität wirken als Streuzentren und beeinträchtigen den Ladungstransport durch die Absorptionsschicht. Eine höhere Vorspannung sorgt für eine stärkere Verarmung der Absorptionsschicht, so dass der Anteil der Ladungsträger, welche die Absorptionsschicht verlassen und zum Photostrom beitragen steigt. Mit den extrahierten Bahnwiderständen von von etwa 40 Ω für InP und 60 Ω für die Silizium Probe liegen die Werte durchaus im gewohnten Bereich und die Abweichung lässt sich mit Technologieschwankungen erklären.

HF-Analyse

In Abbildung 5.13 sind Hochfrequenzuntersuchungen beider Proben in Form von Bitfehlerratenmessungen gezeigt (vgl. Kapitel 4.3). Im Fall der vorliegenden Messungen ist der Messaufbau kalibriert, so dass nur das DUT, also die PIN-Diode, die Bitfehlerrate maßgeblich beeinflusst. Grundsätzlich ist für eine geringe Bitfehlerrate ein möglichst großer Abstand zwischen dem Nutzsignal (hier: Photostrom) und dem Störsignal bzw.

[16] Volumenmaterial; im Unterschied dazu können bei Halbleiterstrukturen Oberflächen bzw. Grenzflächen zwischen verschiedenen Materialien betrachtet werden

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

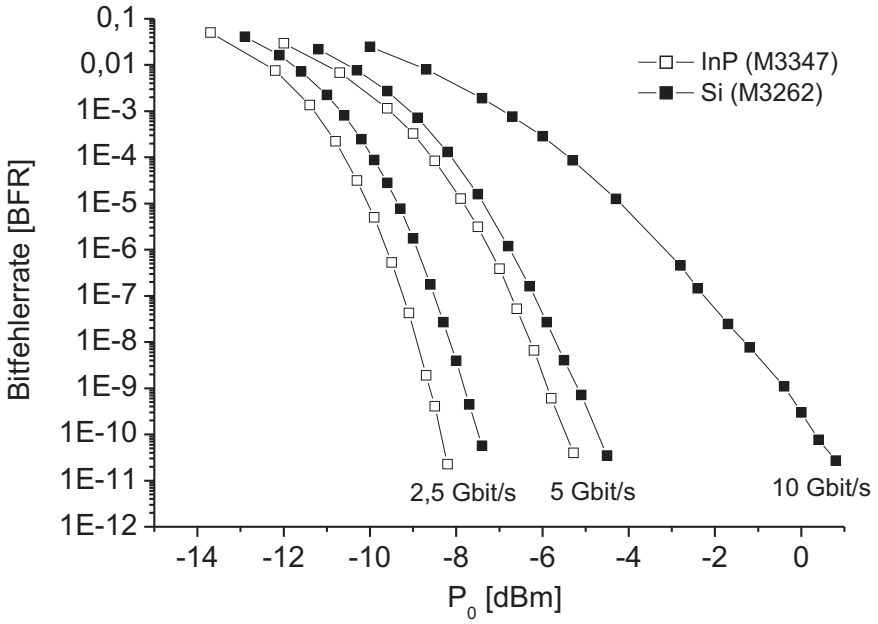


Abb. 5.13: Vergleich der Bitfehlerraten zweier PIN-Dioden in Abhängigkeit des Substratmaterials

Rauschen (hier: Dunkelstrom) notwendig. Eine Anhebung des Nutzsignals kann beispielsweise erreicht werden, indem die Systemleistung erhöht wird, d.h. die PIN-Diode mit einer höheren optischen Eingangsleistung bestrahlt wird. Wie in Abbildung 5.13 zu erkennen, beeinflusst eine Variation der optischen Eingangsleistung die Bitfehlerrate über viele Größenordnungen. Um eine bestimmte Fehlerrate bei einer höheren Bitrate zu halten, muss entsprechend stärker eingestrahlt werden, um die Signaldämpfung auszugleichen. Die niedrige Bitfehlerrate von $3{\cdot}10^{-11}$ bei 10 Gbit/s wird durch die vergleichsweise sehr hohe optische Eingangsleistung erkauft. Unter Berücksichtigung der theoretischen Bandbreite der hergestellten PIN-Dioden von < 10 GHz ist diese Leistungsgrenze nachvollziehbar. Interessanter als die absoluten Kenndaten ist auch beim Hochfrequenzverhalten der relative Vergleich zwischen den beiden Proben. Für die Datenraten 2,5 Gbit/s und 5 Gbit/s konnten Vergleichsmessungen für die Probe auf InP-Substrat aufgenommen werden. Die jeweiligen Bitfehlerraten werden hier bei etwa 1 dB geringeren optischen Leistungen erzielt, als bei dem Vergleichselement auf Silizium. Dieses Ergebnis korreliert gut mit dem

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

deutlich höheren Dunkelstrom auf der Silizium-Probe, welcher den Signal-Rausch Abstand reduziert. Darüber hinaus zeigt die Messung tendenziell ein nahezu identisches Verhalten beider Proben. Es kann insgesamt festgestellt werden, dass das Material auf Silizium, bis auf den Parameter Dunkelstrom, zur klassischen PIN-Diode auf InP vergleichbare Ergebnisse liefert. Unter dem hohen Dunkelstrom leidet die Empfindlichkeit der hergestellten Elemente auf Silizium erheblich, so dass an diesem Punkt der größte Optimierungsbedarf besteht.

5.2.3 Diskussion zur monolithischen Integration mit Siliziumprozessen

Die Möglichkeit zur Integration einer Fremdtechnologie auf einem Siliziumsubstrat kann nur dann das Anwendungsfenster erweitern, wenn sie kompatibel zu etablierten Siliziumprozessen ist. Als Standard ist hier sicherlich der CMOS-Prozess anzusehen. Der Begriff Kompatibilität umfasst neben der technischen Machbarkeit auch wirtschaftliche Gesichtspunkte, welche gerade im Bereich der kommerziell-industriellen Fertigung einen stark reglementierenden Einfluss haben. In den Bereichen Raumfahrt und Rüstung spielen finanzielle Aspekte nicht immer die entscheidende Rolle, so dass sich hier technisch bessere aber kostspieligere Lösungen leichter durchsetzen können.
Für die monolithische Integration von III/V-Elementen mit der CMOS-Technologie können im Grunde drei mögliche Zeitpunkte diskutiert werden. Entweder ein kompletter III/V-Prozess vor der CMOS Front-End-Fertigung[17], oder ein kombinierter paralleler Prozess beider Technologien und zuletzt die Integration der Verbindungshalbleiter, nachdem die CMOS-Schaltkreise vollständig prozessiert wurden.

Tab. 5.4: Temperaturbudget einiger CMOS-Prozessschritte (Zusammengetragen aus [76])

CMOS-Prozessschritt	typ. Prozesstemperatur [°C]
Dotierung (Diffusion)	ca. 800 - 1200
Aktivierung der Dotierung (Ionenimplantation)	max. 1000
Dünnschichtabscheidung (CVD)	800 (Si_3N_4)
Oxidation des Siliziums (trocken, nass)	900 - 1100

[17] Herstellungsprozess bis zur Vereinzelung der Bauelemente bzw. Schaltkreise

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Um die erste Möglichkeit zu bewerten, ist es notwendig, sich das Temperaturbudget der CMOS-Prozesse vor Augen zu führen. Tabelle 5.4 zeigt die Zusammenstellung einiger CMOS-Prozessschritte mit den zugehörigen Prozesstemperaturen. Hieraus geht hervor, dass bereits auf dem Siliziumwafer vorhandene Strukturen Temperaturen von bis zu 1200 °C teilweise über mehrere Stunden standhalten müssten. Für III/V-Elemente scheidet diese Möglichkeit prinzipiell aufgrund der hohen Dampfdrücke von Arsen und Phosphor aus (vgl. [24], S. 50). Würden sich vor dem CMOS-Prozesses bereits arsen- oder phosphorhaltige Halbleiterverbindungen auf dem Wafer befinden, dann würden diese Elemente während der Hochtemperaturprozesse aus dem kristallinen Verbund abdampfen und somit das Material zerstören. Gegenmaßnahmen in Form einer entsprechenden Atmosphäre, welche durch einen Gegendruck das Abdampfen verhindert, stehen in keinem Verhältnis zum Aufwand und stellen eine Kontaminationsquelle für die CMOS-Bereiche dar.

Gegen einen kombinierten Prozess sprechen wirtschaftliche Aspekte, die durch eine Modifikation etablierter Prozesse und auch Produktionsstätten berücksichtigt werden müssen [77]. Hierbei muss ebenfalls die Problematik des Temperaturbudgets und der gegenseitigen Kreuzkontamination geklärt und mit jeder Weiterentwicklung der jeweiligen Technologie neu bewertet werden. Es erscheint also nicht praktikabel, die Prozesse miteinander zu vermischen und es bleibt außerdem fraglich, ob es technisch zu bewerkstelligen ist. Ein modularer Ansatz, bei welchem jede Technologie nacheinander möglichst vollständig durchgeführt wird, ist zu bevorzugen.

Diese Überlegungen führen dazu, dass eine Post-CMOS Integration von siliziumfremden Technologien von diversen Arbeitsgruppen klar favorisiert wird. Es finden sich hierzu in der Literatur Beispiele im Bereich MEMS (engl.: Micro-Electro-Mechanical Systems) [77], sowie GaAs und InP basierten Technologien [78, 79]. Der CMOS-Prozess wird mit einem Legier- und Ausheilschritt bei 440 °C abgeschlossen ([76], Kap. 10.2), d.h. diese Temperaturgrenze sollte von nachfolgenden Prozessen nicht überschritten werden, um die CMOS-Elemente nicht zu verändern. Unter Berücksichtigung von steigenden Kontaktwiderständen können die CMOS-Elemente Temperaturen bis 525 °C ausgesetzt werden [77].

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

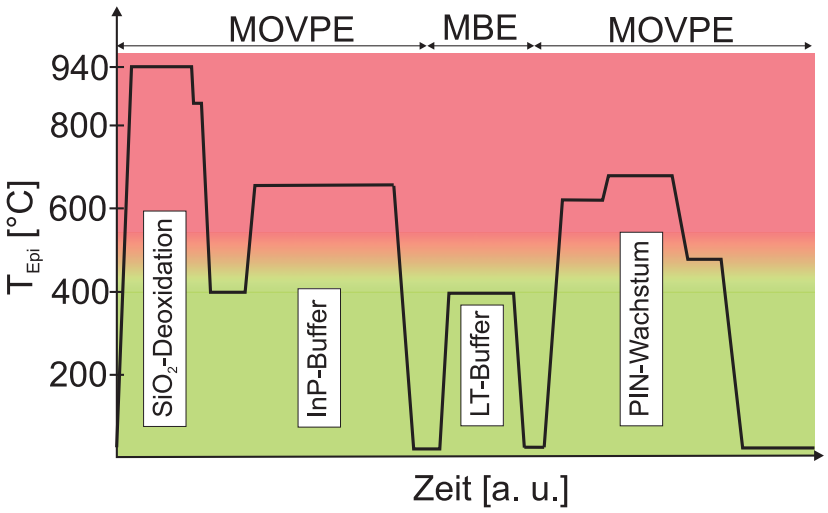


Abb. 5.14: Qualitativer Epitaxie-Temperaturverlauf der PIN-Schichten auf Silizium mit farblich kodiertem Post-CMOS Temperaturbudget im Hintergrund

Abbildung 5.14 zeigt qualitativ den Verlauf der Wachstumstemperatur der in diesem Kapitel vorgestellten PIN-Diode auf Silizium. Das Temperaturbudget für eine monolithische Post-CMOS Integration ist im Hintergrund farblich kodiert. Die Abbildung verdeutlicht, dass vor allem der SiO_2-Abheizschritt zu Beginn der Epitaxie bei 940 °C völlig inkompatibel mit einem Post-CMOS Prozess ist. Auch das Wachstum des InP-Buffers und der PIN-Diodenschichten übersteigt die akzeptable Temperatur. Auswege für diesen Ansatz werden in [79] diskutiert. Hierbei wird davon ausgegangen, dass zu hohe Temperaturen die Dotierungsprofile in den Siliziumelementen verändern, so dass eine Verlegung der thermischen Aktivierung, speziell für das Bor, in den Post-CMOS Prozess vorgeschlagen wird. Berechnungen zeigen, dass das Dotierungsprofil bei einer Aktivierung durch den SiO_2-Ausheizschritt sehr ähnlich dem während der CMOS-Prozesse erzeugten Profil ist. Des Weiteren gehen die Autoren davon aus, dass aufgrund des exponentiellen Zusammenhangs zwischen der Temperatur T und dem Diffusionskoeffizienten D(T) die Dotierstoffdiffusion bei niedrigeren Temperaturen bis 700 °C akzeptabel und damit die Post-CMOS III/V-Epitaxie bis zu dieser Temperatur möglich sei. Die SiGe-Technologie ausgenommen (z.B. BiCMOS), gibt es zur Zeit keine kommerziellen mit CMOS kombinierten Prozesse. Da die Attraktivität einer monolithischen Verfügbarkeit von Lösungen mit Fremdtechnologien nach wie vor ungebrochen ist, beschäftigen sich Arbeitsgruppen weiter mit der Erforschung vielversprechender Ansätze zur Umgehung der vorhandenen Restriktionen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.3 Gestapelter Photodetektor für Mikrowellenanwendungen

Der Ansatz zur Erhöhung der Funktionalität von Photodetektoren durch die Stapelung von mehreren Absorptionsschichten ist seit langem bekannt und hat, neben der Informationstechnologie, beispielsweise auch im Bereich der spektral auflösenden Sensorik das Interesse geweckt [80, 81]. Hierbei modulieren zweipolige Elemente in Abhängigkeit vom Farbspektrum im sichtbaren Bereich den Photostrom, so dass auf Maßnahmen wie Farbfilter und die Bereitstellung eines Detektors für jede Grundfarbe verzichtet werden kann. In der Nachrichtenübertragung ist für die Funktion eines gestapelten Photodetektors, welcher für den simultanen Empfang von Daten auf mehreren Kanälen eingesetzt wird, die Möglichkeit zur Unterscheidung der Datenströme unerlässlich. Hierzu eignet sich beispielsweise die Verwendung von unterschiedlichen Polarisationsebenen des Lichts oder die Nutzung von verschiedenen Wellenlängen als Träger für die Kanäle. Beide Möglichkeiten lassen eine störungsfreie Ausbreitung der jeweiligen Datenströme auf der Glasfaser zu.
Mit Hilfe geeigneter Absorbermaterialien wird dafür gesorgt, dass die Datenströme entsprechend ihrem optischen Träger in unterschiedlichen Bereichen des Detektors absorbiert und in die elektrische Ebene umgesetzt werden. Durch die Wahl geeigneter Epitaxieparameter lassen sich kristalline Ordnungen im Halbleitermaterial erzeugen, wodurch dessen Absorptionseigenschaft eine Abhängigkeit von der Polarisationsrichtung des eingestrahlten Lichts aufweist. Dadurch ist es möglich, eine Modulation des Photostroms in Abhängigkeit von der Lichtpolarisation zu bewerkstelligen. Eine Applikation in Form eines Polarisationsschalters basierend auf diesem Ansatz ist in [82] publiziert.
Hauptbestandteil dieser Arbeit ist die Untersuchung eines gestapelten Photodetektors, welcher nach dem spektralen Trennungsprinzip in der Lage ist, zwei Wellenlängen $\lambda_1 = 1{,}3\ \mu m$ und $\lambda_2 = 1{,}55\ \mu m$ zu detektieren und den entsprechenden Photostrom auf zwei getrennten elektrischen Kanälen zur Weiterverarbeitung bereitzustellen. Hierbei wird das Element im Hinblick auf eine Erweiterung des MoBiLE-Konzepts (vgl. Kapitel 2.3) optimiert, bei welcher die Demonstration eines vollständig optischen Betriebs (Takt und Datum) des Gatters im Gigahertzbereich angestrebt wird. Des Weiteren wird durch die gesteigerte Funktionalität des Photodetektors eine Applikation auf Basis des MoBiLE-Konzepts ermöglicht, welche eine Erweiterung der in [21] entwickelten optoelektronischen Empfängerschaltung mit demultiplexender Eigenschaft darstellt. Die Schaltungsuntersuchungen sind Bestandteil des nächsten Hauptkapitels.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.3.1 Aufbau und Funktion

Prinzipiell basiert der gestapelte Photodetektor bezüglich seines Aufbaus und seiner physikalischen Wirkprinzipien auf der PIN-Diode, wobei der Schichtaufbau um eine zusätzliche Absorber- und Kontaktschicht erweitert wird. Es ergeben sich somit zwei PIN-Übergänge, welche eine gemeinsame Kontaktschicht in der Mitte besitzen. Dieses Konzept ist grundsätzlich sowohl mit einer PINIP, als auch mit einer NIPIN Schichtsequenz realisierbar.

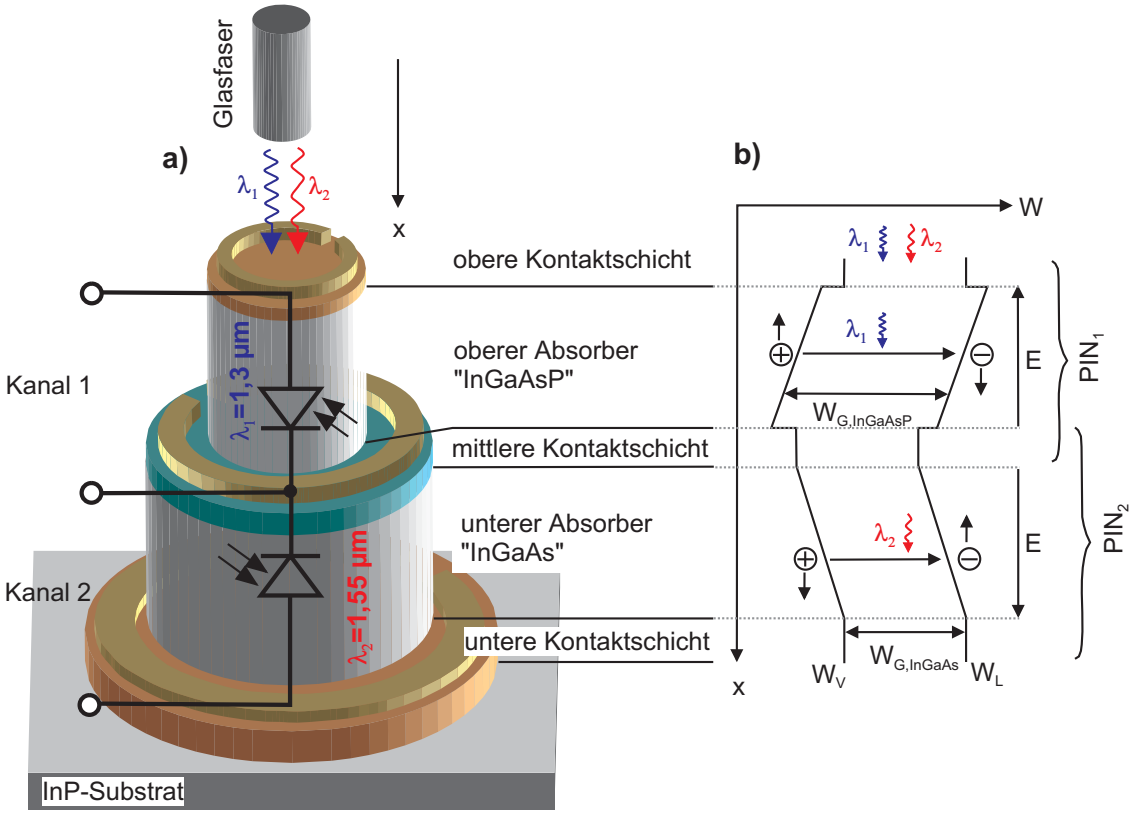


Abb. 5.15: a) Qualitativer Aufbau eines gestapelten PINIP-Photodetektors mit b) zugehörigem Bänderdiagramm

Abbildung 5.15 illustriert qualitativ den technologischen Aufbau des gestapelten Photodetektors. Die einzelnen Kontaktschichten werden, entsprechend dem Standard PIN-Prozess (siehe Kapitel 5.1.1), mittels optischer Lithografie und Ätztechnik im „Tripple-Mesa-Design“ mit nach unten hin größer werdendem Durchmesser freigelegt und kontaktiert. Der gestapelte Photodetektor ist ein dreipoliges Bauelement mit der ebenfalls in

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Abbildung 5.15 gezeigten Anordnung der Dioden. Die beiden elektrischen Kanäle nutzen den mittleren Abgriff gemeinsam. Gegenüber einem PINPIN-Konzept hat die gemeinsame Nutzung eine Vereinfachung der Epitaxie und eine Reduktion der Bauelementtopologie zum Vorteil. Dieses Argument ist ausschlaggebend für die ausschließliche Untersuchung von PINIP bzw. NIPIN Elementen im Rahmen dieser Arbeit, um die Technologie im Hinblick auf eine Schaltungsapplikation mit weiteren Bauelementen innerhalb des Epitaxie-Schichtpaketes möglichst einfach zu gestalten. Nachteile, wie die zwangsläufig nicht optimale Reihenfolge der Schichten zur Laufzeitoptimierung der Löcher bei jeweils einem PIN-Übergang werden dabei in Kauf genommen.
Um die lokal definierte Absorption der beiden eingestrahlten Wellenlängen zu ermöglichen, werden zwei verschiedene Absorbermaterialien mit unterschiedlichen Bandlücken eingesetzt. Hierbei wird der PIN-Übergang mit dem Absorber größerer Bandlücke im Lichtweg an erster Stelle positioniert (PIN_1). Dieser fungiert sozusagen als „optischer Tiefpass“, d.h. er absorbiert bei geeigneter Auslegung die kurzwelligere der beiden eingestrahlten Wellenlängen λ_1 und ist entsprechend transparent für die andere Wellenlänge λ_2. Hierfür eignet sich bei InP-basiertem Materialsystem das quaternäre InGaAsP hervorragend, da sich seine Bandlücke gitterangepasst im Bereich von 0,75 eV $< W_{g,InGaAsP} <$ 1,35 eV einstellen lässt und damit den Bereich des 2. und 3. Fensters der optischen Nachrichtenübertragung abdeckt. Für den zweiten PIN-Übergang wird ein Absorbermaterial mit kleinerer Bandlücke benötigt, so dass es nicht transparent für die größere der beiden Wellenlängen ist (PIN_2). Für diese Aufgabe findet gitterangepasstes InGaAs Verwendung. Der selektive Absorptionsvorgang ist in Abbildung 5.15 b) anhand des Bänderdiagramms für diese Struktur dargestellt. Dieses Konzept zum Aufbau eines demultiplexenden Photodetektors mit diesem Materialsystem wurde bereits Ende der siebziger Jahre von J. C. Campbell vorgestellt [83, 84] und patentiert [85]. Hier wurde ein Demonstrator basierend auf mithilfe der Flüssigphasenepitaxie (LPE) gezüchtetem Material aufgebaut, bei welchem die Höhe des Schichtpakets über 3 µm beträgt und der Durchmesser der Bauelemente mit etwa 250 µm in Sperrschichtkapzitäten von 4,5 pF bzw. 3,3 pF für die jeweiligen PIN-Übergänge resultiert [84]. Das Konzept der Wellenlängentrennung für den statischen Fall konnte erfolgreich demonstriert werden, wobei die verwendete Technologie heute weitestgehend überholt ist. Auch die Hochfrequenzeigenschaften des Bauelements werden von den Autoren nicht behandelt. Über eine Weiterentwicklung dieses Konzepts für Glasfaseranwendungen in den letzten drei Dekaden ist nichts bekannt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.3.2 Einflüsse des Schichtdesigns auf die Bauelementeigenschaften

Das gewählte Schichtdesign hat maßgeblichen Einfluss auf die Eigenschaften des gestapelten Photodetektors. Je nach Wahl der verschiedenen Schichtparameter wie Material, Schichtdicke, Dotierungstyp und Dotierungshöhe werden, ganz analog zur einfachen PIN-Diode (vgl. Tab. 2.1), die Responsivity und die Bandbreite beeinflusst. Zusätzlich dazu muss beim gestapelten Photodetektor, wie bei allen Mehrkanal-Bauelementen, die gegenseitige Beeinflussung der Kanäle untereinander berücksichtigt werden. Das parasitäre Übersprechen (engl.: crosstalk) einer Information vom Zielkanal auf den jeweils anderen kann im Falle des gestapelten Photodetektors zwei Ursachen haben. Zum einen können Photonen, welche eigentlich bereits in der oberen Diode absorbiert werden sollten, in die untere gelangen und dort zum Photostrom beitragen. Zum anderen ist bei einer modulierten Einstrahlung mit einer Überkopplung des erzeugten elektrischen HF-Signals auf den jeweils anderen PIN-Übergang zu rechnen. Die Ergebnisse zum Übersprechen sind in Kapitel 5.3.6 detailliert beschrieben.
Die nachfolgende Auflistung liefert eine kurze Beschreibung der einzelnen Schichten und geht auf ihre Bedeutung für die Eigenschaften des gesamten Bauelements ein. Die Ausführungen in Kapitel 2.1.7 gelten für die gestapelten PIN-Dioden entsprechend.

Untere Kontaktschicht

Da an dieser Stelle ein Heteroübergang zur unteren Absorptionsschicht nicht sinnvoll ist, wird typischerweise InGaAs als Material verwendet. Die Aufgabe der unteren Kontaktschicht beschränkt sich auf die Bereitstellung einer Gegendotierung zur mittleren Kontaktschicht und die Ausbildung eines ohmschen Metall- Halbleiterübergangs zur Bauelementkontaktierung. Die Parameter Schichtdicke und Dotierungshöhe bestimmen den Serienwiderstand mit.

Untere Absorberschicht

Hier gelten die gleichen Zusammenhänge wie bei einer einfachen PIN-Diode. Mit InGaAs als Material findet eine Absorption beider eingestrahlten Wellenlängen statt, wobei zu berücksichtigen ist, dass das Material für λ_1 einen höheren Quantenwirkungsgrad besitzt als für λ_2 (vgl. Abb. 2.2). Das verstärkt das optische Übersprechen, da der Beitrag zum elektrischen Signal auf Kanal 2 durch ein Photon der Wellenlänge λ_1 höher ist. Eine Optimierung ist nur durch die obere Absorptionsschicht möglich.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Mittlere Kontaktschicht

Neben der Funktion als Kontaktschicht für beide PIN-Übergänge hat die mittlere Kontaktschicht einen wichtigen Einfluss auf das Übersprechen des elektrischen HF-Signals zwischen den beiden PIN-Übergängen. Hierbei spielt sowohl die Schichtdicke als auch die Dotierung eine entscheidende Rolle.

Als Material kommt sowohl InGaAs als auch InP in Frage. Im Falle des Letzteren findet eine Optimierung der Responsivity von PIN_2 statt, da das Material transparent für beide Wellenlängen ist. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass der sich ergebende Heteroübergang im Fall von PIN_2 eine Bandlückendifferenz von $\Delta W_G = 0{,}6$ eV aufweist, welche sich mit $\Delta W_L = 0{,}2$ eV und $\Delta W_V = 0{,}4$ eV auf die beiden Bänder verteilt [24]. Das hat zur Folge, dass der Ladungsträgertransport von der Absorberschicht in eine InP-Kontaktschicht speziell im Valenzband nicht optimal ist. Ein Löcherfluss zur mittleren Kontaktschicht tritt bei einer NIPIN-Schichtsequenz auf.

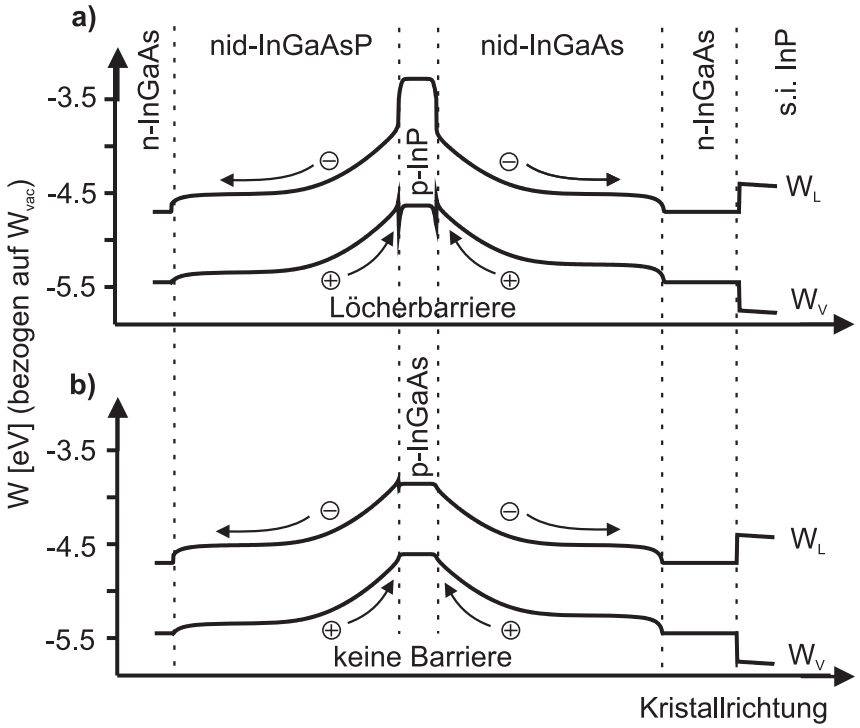


Abb. 5.16: Berechneter Bandverlauf einer NIPIN-Schichtsequenz mit a) InP und b) InGaAs als mittleres Kontaktschichtmaterial

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Abbildung 5.16 zeigt mittels der Software SimWindows [34] berechnete Bandverläufe einer NIPIN-Schichtsequenz für den spannungslosen Fall in Abhängigkeit vom mittleren Kontaktschichtmaterial. Zwar wird bei Verwendung von InP als Kontaktmaterial aufgrund der p-Dotierung die Valenzbandoberkante angehoben, jedoch verbleibt an den beiden Hateroübergängen zum InGaAs und zum InGaAsP eine energetische Barriere, welche im günstigsten Fall durchtunnelt und im ungünstigsten Fall von den Löchern komplett überwunden werden muss. Eine Stauung von Ladungsträgern würde die Rekombinationswahrscheinlichkeit und damit wiederum die Responsivity negativ beeinflussen. Des Weiteren erhöht sich in diesem Fall die Transitzeit der Löcher, was speziell bei laufzeitbegrenzten PIN-Dioden die Bandbreite reduziert. Bei der Verwendung von InGaAs für die mittlere Kontaktschicht findet auch beim Heteroübergang zum InGaAsP keine Ausbildung einer energetischen Barriere im Valenzband statt (vgl. Abb. 5.16 b)).
Bei einer PINIP-Schichtsequenz findet der Ladungstransport zur mittleren Kontaktschicht im Leitungsband statt, so dass sich die zuvor beschriebene Problematik bei Verwendung von InP wegen der kleineren Leitungsbanddiskontinuität nicht so stark auswirkt.

Obere Absorberschicht

Das obere Absorbermaterial hat eine besondere Bedeutung im Hinblick auf das optische Übersprechen in beiden PIN-Übergängen. Wie bereits erwähnt, findet hier das quaternäre Material InGaAsP Verwendung, da sich durch Variation der Zusammensetzung der Einzelelemente die Bandlücke im Bereich der beiden Telekommunikationswellenlängen unter Beibehaltung der Gitteranpassung zu InP einstellen lässt. Die epitaktische Schichtentwicklung wird intensiv in [86] behandelt.
Für die Wellenlängenselektion in PIN_1 wird die Bandlückenenergie des InGaAsP genutzt. Das Bestreben hierbei ist, eine möglichst hohe Absorption von λ_1 und eine möglichst hohe Transparenz für λ_2 zu erreichen. Auf Grund des zu kleineren Wellenlängen hin monoton steigenden Absorptionskoeffizienten $\alpha_{InGaAsP}$ (vgl. Abb. 2.2) ist eine Maximierung von $\alpha_{InGaAsP}$ bei $\lambda_1 = 1{,}3$ µm durch eine Justage der Bandlücke $W_{g,InGaAsP}$ zu möglichst großen Wellenlängen möglich. Für diese Art der Optimierung bildet prinzipiell die Wellenlänge λ_2 eine Begrenzung, wobei eine Einstellung von $W_{g,InGaAsP}$ nahe der λ_2 entsprechenden Energie von 0,8 eV auf Grund der Temperaturabhängigkeit der Bandlückenenergie nicht praktikabel ist. Da die Bandlückenenergie eines Halbleiters mit steigender Temperatur wegen der Zunahme von Gitterschwingungen sinkt, würde eine Erwärmung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

des Bauelements einen signifikanten Einfluss auf die Absorption von λ_2 in PIN_1 und damit auf das optische Übersprechen in diesem PIN-Übergang besitzen.
Für das optische Übersprechen in PIN_2 ist es entscheidend, welcher Anteil der zuvor eingestrahlten optischen Leistung der Wellenlänge λ_1 nicht in PIN_1 absorbiert wird. Laut dem Absorptionsgesetz (vgl. Gl. 2.3) ist neben dem Absorptionskoeffizienten $\alpha_{InGaAsP}$ die Schichtdicke des Materials entscheidend. Aus technischer Sicht bietet die Variation der Schichtdicke des InGaAsP die beste Möglichkeit zur Reduktion des optischen Übersprechens in PIN_2, da sich hier ein relativ großes Optimierungsfenster befindet. Begrenzt wird eine Erhöhung der InGaAsP-Schichtdicke durch Aspekte wie Laufzeit der Ladungsträger, Bauelementtopologie oder Epitaxiekosten.

Obere Kontaktschicht

Wie die untere, dient auch die obere Kontaktschicht der möglichst verlustarmen Bauelementkontaktierung und der Bereitstellung einer Dotierung entgegengesetzten Typs zur mittleren Kontaktschicht. Eine Optimierung der Responsivity durch Verwendung eines transparenten Materials ist prinzipiell mit den schon für die mittlere Kontaktschicht beschriebenen Einschränkungen möglich.

An dieser Stelle wird deutlich, dass das Schichtdesign eine große Anzahl an Freiheitsgraden zur Optimierung des Bauelements auf die gewünschten Eingenschaften liefert. Da die Anzahl der möglichen Experimente, welche im Rahmen der Arbeit mit einem derart komplexen Schichtpaket durchgeführt werden konnten, begrenzt ist, liefert die folgende tabellarische Aufstellung einen Überblick über die untersuchten Schichtpakete und die durchgeführten Parametervariationen, aus welchen sich die in den folgenden Unterkapiteln präsentierten Ergebnisse ableiten lassen. Um eine Kombination des Schichtpaketes mit weiteren Elementen für eine Schaltungsapplikation sicherzustellen, ist die Gesamtschichtdicke des gestapelten Detektors auf etwa 1,5 µm begrenzt.
Eine explizite Unterscheidung zwischen einer PINIP- und einer NIPIN-Schichtequenz wird lediglich bei der Behandlung des elektrischen Übersprechens in Kapitel 5.3.6.2 vorgenommen, da hier eine deutliche Abhängigkeit festgestellt wurde. Darüber hinaus sind es im Folgenden PINIP-Elemente, welche konkret untersucht wurden, wobei die erzielten Ergebnisse auch für NIPIN-Elemente Gültigkeit besitzen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tab. 5.5: Untersuchte Schichtpakete mit hervorgehobenen Parametervariationen zur Entwicklung eines gestapelten Photodetektors

Schicht	PINIP-Sequenz	NIPIN-Sequenz
untere Kontaktschicht	p-InGaAs:**C** @ T_{Epi} = **480°C** d = 200 nm $N_{A,nom} = 3 \cdot 10^{19} cm^{-3}$ ——— p-InGaAs:**Zn** @ T_{Epi} = **600°C** d = 200 nm $N_{A,nom} = 7,5 \cdot 10^{18} cm^{-3}$	n-InGaAs:Si @ T_{Epi} = 620 °C d = 200 nm $N_{D,nom} = 1 \cdot 10^{19} cm^{-3}$
unterer Absorber	nid-InGaAs @ T_{Epi} = 620 °C d = 600 nm $N_{D,Hall} \approx 1..5 \cdot 10^{15} cm^{-3}$	
mittlere Kontaktschicht	n-InP:Si @ T_{Epi} = 600 °C d = 100 nm $N_{D,nom} = 1,5 \cdot 10^{19} cm^{-3}$	p-InGaAs:Zn @ T_{Epi} = 600 °C **d = 50 / 200 nm** $N_{A,nom} = 7,5 \cdot 10^{18} cm^{-3}$
oberer Absorber	nid-InGaAsP @ T_{Epi} = 625°C d = 650 nm $N_{D,Hall} \approx 6 \cdot 10^{16} cm^{-3}$ **$W_g \approx$ 0,8.. 0,85 eV**	
obere Kontaktschicht	p-InGaAs:**C** @ T_{Epi} = **480°C** d = 50 nm $N_{A,nom} = 3 \cdot 10^{19} cm^{-3}$ ——— p-InGaAs:**Zn** @ T_{Epi} = **600°C** d = 50 nm $N_{A,nom} = 7,5 \cdot 10^{18} cm^{-3}$	n-InGaAs:Si @ T_{Epi} = 625 °C d = 50 nm $N_{D,nom} = 1 \cdot 10^{19} cm^{-3}$

5.3.3 Wachstum tief vergrabener p-InGaAs Kontaktschichten

Das Wachstum des vorgestellten Schichtdesigns erfordert keine Neu- bzw. Weiterentwicklung des Epitaxieprozesses. Es basiert auf dem MOVPE-Wachstum mit alternativen Quel-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

len in der Arbeitsgruppe [25], wobei das Wachstum quaternärer InGaAsP-Schichten insbesondere in [86] untersucht wurde. Im Hinblick auf die hoch p-dotierte, vergrabene Kontaktschicht hat sich jedoch eine gravierende Einschränkung ergeben, welche nachfolgend diskutiert wird. Vergraben bedeutet, dass sich oberhalb der betreffenden Epitaxieschicht (untere Kontaktschicht bei der PINIP-Sequenz) noch etwa 1,4 µm weiteres Material befindet.

Eine p-Dotierung von InGaAs ist in der Arbeitsgruppe unter Verwendung der Elemente Zink (Zn) und Kohlenstoff (C) möglich. Schwerpunktmäßig bei der Entwicklung von Basisschichten für HBTs in jüngerer Vergangenheit wurden die technischen Details für das Wachstum von hoch p-dotierten Schichten mit Akzeptorkonzentrationen von bis zu $1{\cdot}10^{20}$ cm^{-3} untersucht. Auf Grund der sehr stark ausgeprägten Diffusionsneigung von Zn lassen sich mit diesem Element Akzeptorkonzentrationen $N_A < 1{\cdot}10^{19}$ cm^{-3} realisieren. Bei höheren Konzentrationen kommt es zu einer in der Regel kontraproduktiven Ausdiffusion des Dotierstoffes in benachbarte Schichten. Kohlenstoff hingegen besitzt einen vergleichsweise geringen Diffusionskoeffizienten, so dass die Problematik der Kontamination benachbarter Schichten hier nicht relevant ist. Der Einsatz von p-InGaAs:C Schichten mit einer Akzeptorkonzentration $N_A > 1{\cdot}10^{19}$ cm^{-3} in HBTs gehört (in der Arbeitsgruppe und darüber hinaus) zum Standard [46, 22].

Wegen der hohen realisierbaren Akzeptorkonzentration bei gleichzeitig sehr niedriger Gefahr der Kontamination benachbarter Absorptionsschichten war Kohlenstoff erste Wahl als p-Dotierstoff zu Beginn der Arbeiten zum gestapelten Photodetektor. Das erste Experiment mit einer p-InGaAs:C PINIP-Schichtsequenz (M3363) unter Nutzung von nicht legierten Ti/Pt/Au p-Kontakten zeigte gewohntes Verhalten hinsichtlich der oberen Kontaktschicht. Die entsprechende Kontaktierung der unteren Kontaktschicht, und damit PIN_2 bzw. Kanal 2, zeigte hingegen durch Messung der I(U)-Charakteristik keinen nennenswerten Stromfluss. Eine Messung der elektrisch aktiven p-Konzentration mittels eines Van-der-Pauw Hall-Messaufbaus an der unteren Kontaktschicht lieferte eine massive Diskrepanz zwischen der nominellen $N_{A,nom} = 3{\cdot}10^{19}$ cm^{-3} und der aktiven[18] $N_{A,Hall} = 1{,}8{\cdot}10^{18}$ cm^{-3} p-Dotierung, was einer äußerst niedrigen Aktivierung von 6 % entspricht [8]. Bereits bei einer aktiven p-Konzentration von $\leq 5{\cdot}10^{18}$ mit nicht-legiertem Ti/Pt/Au Metallsystem zeigen kontaktierte p-InGaAs Schichten ein nicht-ohmsches Verhalten[87].

Kohlenstoffdotierte InGaAs-Schichten sind sehr anfällig für eine Passivierung der Akzep-

[18] Die Charakterisierung mittels Hall erfasst die elektrisch aktive Dotierstoffkonzentration. Das Verhältnis zur nominell ins Kristall eingebauten Konzentration wird als Aktivierung bezeichnet.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

toren durch Wasserstoffradikale (H^*). Diese hoch reaktiven Teilchen mit einem hohen Diffusionskoeffizienten entstehen im MOVPE-Epitaxiesystem zum einen bei der thermischen Zerlegung der metall-organischen Quellmaterialien und können zum anderen bei Verwendung von H_2 als Trägergas gebildet werden. Sie sättigen schon während des Wachstums die Akzeptorplätze des auf Gruppe V-Plätzen eingebauten Kohlenstoffs ab und sorgen dafür, dass diese passivierten Akzeptoren elektrisch inaktiv sind. Die H^*-Passivierung ist thermisch umkehrbar, d. h. H^* lassen sich unter einer entsprechenden Stabilisierung der Wachstumsoberfläche aus der p-InGaAs:C austreiben, wodurch der Aktivierungsgrad steigt [88, 89, 90, 91].
Dieser bekannte und gut beherrschbare Prozess der Passivierung durch H^* kann jedoch nicht ursächlich als Erklärung für die massive elektrische Degradierung der unteren Kontaktschicht dienen. Die Schichten werden unmittelbar nach dem Wachstum innerhalb der Epitaxieanlage einem Ausheizschritt zur Aktivierung der Kohlenstoffdotierung unterzogen, welcher jedoch nur bei der oberen Kontaktschicht die gewünschte Wirkung zeigt. Vielmehr muss an dieser Stelle der Blick auf den Einfluss der Epitaxieparameter der Schichten fokkusiert werden, welche auf die vergrabene Kontaktschicht aufgewachsen werden. Hierbei steht speziell die Wachstumstemperatur im Vordergrund. Arbeiten in [92] beschäftigen sich mit dem Passivierungsmechanismus von p-InGaAs:C Schichten in Abhängigkeit von der Wachstumstemperatur einer weiteren aufgewachsenen Schicht. Die Autoren berichten eine nicht-reversible Degradierung der aktiven p-Dotierung, wenn die betreffende p-InGaAs:C Schicht bei Temperaturen ≥ 625 °C überwachsen wird. Als Erklärung wird zum einen der thermisch begünstigte Einbau von C auf Gruppe III-Plätzen angeführt, was zu einer Kompensation der p-Dotierung führt. Zum anderen wird die Bildung von C-Komplexen diskutiert, welche nach außen abgesättigte Valenzen besitzen und damit elektrisch neutral sind. Die in [92] gemachten Beobachtungen untermauern die experimentellen Ergebnisse bezüglich des gestapelten Detektors. Die vergrabene p-InGaAs:C Schicht wird insgesamt fast zwei Stunden lang überwachsen, davon 34 min bei 620 °C (nid-InGaAs, 600 nm) und 60 min bei 625 °C (nid-InGaAsP, 650 nm). Im Vergleich dazu wird eine p-InGaAs:C Basisschicht eines HBTs lediglich etwa 18 min bei $T_{Epi} \leq 620$ °C überwachsen und zeigt eine aktive p-Dotierung im Bereich von $3 \cdot 10^{19}$ cm^{-3}. Es liegt somit der Schluss nahe, dass eine p-Kohlenstoffdotierung von InGaAs im Falle des gestapelten Detektors auf Grund der extrem langen Wachstumsdauer der InGaAsP-Schicht bei der für eine nicht-reversible Passivierung charakteristischen Temperatur von $T_{Epi} = 625$ °C [92] nicht möglich ist.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Aus diesem Grund wurden die Experimente zum gestapelten Detektor trotz der möglichen Risiken unter Verwendung von Zink als Dotierstoff für alle p-dotierten Schichten fortgesetzt. Die nominelle Konzentration hierbei beträgt $N_{A,nom} = 7{,}5 \cdot 10^{18}$ cm^{-3} und wurde mittels einer Hall-Messung mit $N_{A,Hall} = 6{,}3 \cdot 10^{18}$ cm^{-3} zu 90 % bestätigt. Die Kontakteigenschaften der oberen und der vergrabenen p-InGaAs:Zn Schichten sind vergleichbar, so dass mit dieser Technologie eine Kontaktierung beider Kanäle möglich ist.

5.3.4 Untersuchte Bauelementlayouts

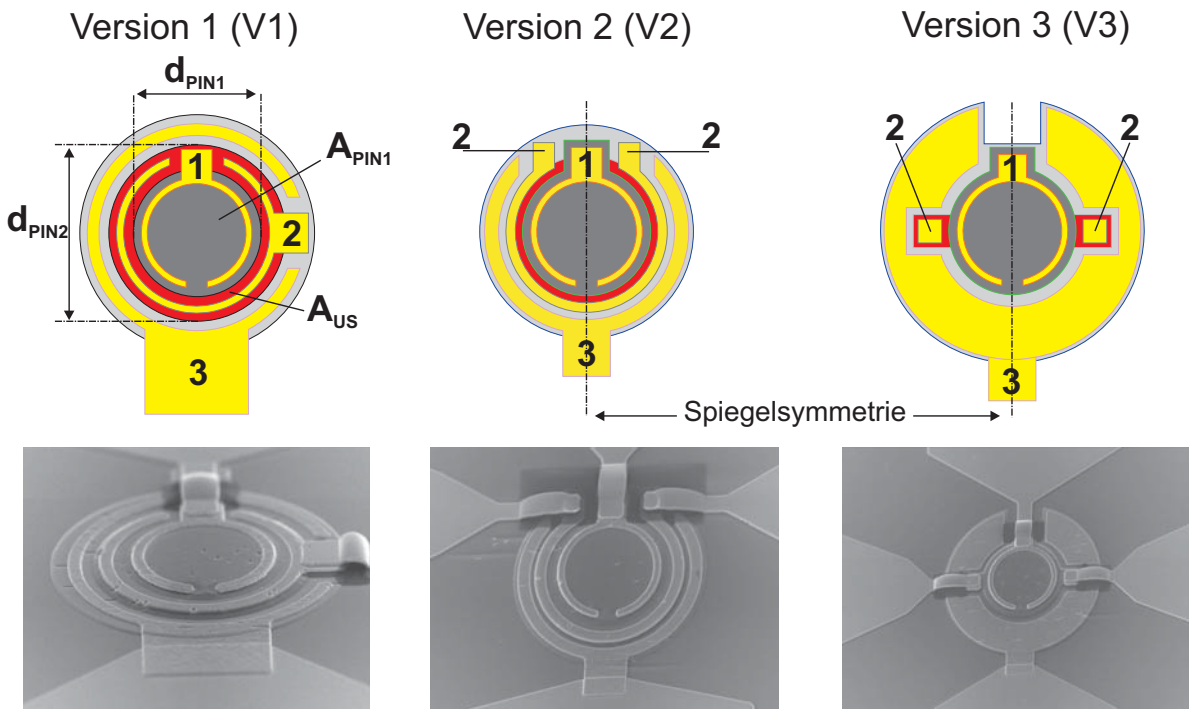


Abb. 5.17: Layouts und REM-Technologieaufnahmen der drei untersuchten Bauelementdesigns des gestapelten Detektors mit Kennzeichnung der oberen 1), mittleren 2) und unteren 3) Kontaktmetallisierung

In Abbildung 5.17 sind drei Layoutversionen des gestapelten Photodetektors dargestellt, welche zur Untersuchung der Bauelementeigenschaften mit einem optischen Maskensatz (MOBILE08) realisiert wurden. Die Durchmesser d_{PIN1} der aktiven Einkoppelflächen A_{PIN1} betragen 12 µm, 21 µm und 30 µm. Alle weiteren Strukturen sind entsprechend skaliert. Im Vergleich zur einfachen PIN-Diode (vgl. Tab. 5.2) ist hier eine weitere Kon-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

taktmetallisierung notwendig, welche das Bauelement möglichst weit umschließen sollte, um gute Kontakteigenschaften sicherzustellen. Version 1 (V1) wurde streng in Anlehnung an das Layout der einfachen PIN-Diode erstellt. Es besteht aus drei ineinander liegenden, offenen Ringkontakten. Hierbei ist es nicht möglich, die Ausbuchtungen der Ringkontakte bei allen drei Metallisierungen genau gegenüber der Ringöffnung zu positionieren und gleichzeitig ein kompaktes Design beizubehalten. Hierdurch ergibt sich ein Design ohne vollständige Spiegelsymmetrie, was unter Umständen Nachteile für den Hochfrequenzbetrieb mit sich bringen kann. Version 2 (V2) und Version 3 (V3) wurden daher unter dem Gesichtspunkt einer vollständigen Spiegelsymmetrie gelayoutet. Hierdurch ergeben sich jeweils zwei Flächen zur Kontaktierung der mittleren Metallisierung.
Ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen den drei Designs ist die Variation der Fläche A_{US}, welche sich aus dem Überstand von PIN_2 ergibt. Es handelt sich hier im Grunde genommen um die Fläche der mittleren Mesa, welche nicht durch die obere Mesa oder durch Kontaktstrukturen abgedeckt wird. Bei V2 wurde hierfür die Ringbreite der mittleren Kontaktmetallisierung vergrößert und ihr Abstand zur oberen Mesa verkleinert. Das Design V3 verzichtet zu diesem Zweck auf eine ringförmige Ausbildung des mittleren Kontakts. Die Flächen A_{US} sind in Abbildung 5.17 rot gekennzeichnet. Tabelle 5.6 gibt den Anteil von A_{US} im Verhältnis zur optischen Einkoppelfläche A_{PIN1} an.

Tab. 5.6: Nomineller Überstand A_{US} bezogen auf die Einkoppelfläche A_{PIN1}.

Bauelementdesign	**A_{US} bzgl. A_{PIN1}**
V1	78 %
V2	28 %
V3	18 %

Mit Hilfe der Variation von A_{US} lassen sich Rückschlüsse auf den Einfluss von Streulicht auf das optische Übersprechen ziehen. Zur effizienten Wellenlängenselektion ist es notwendig, dass möglichst alle Photonen bereits in PIN_1 eingekoppelt werden. An der überhängenden Fläche eingekoppeltes Streulicht, gleich ob λ_1 oder λ_2, führt in PIN_2 zur zusätzlichen Generation von Photostrom und kann durch den gewichteten Einfluss auf die verschiedenen Bauelementlayouts nachgewiesen werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.3.4.1 Teststruktur zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten $\alpha_{InGaAsP}$

Wie in Kapitel 5.3.2 erläutert, spielt der Absorptionskoeffizient des oberen InGaAsP-Absorbers eine wichtige Rolle für das gesamte Bauelement. Da sein Betrag von der Schichtkomposition abhängt, ist seine Messung für die Bauelententwicklung notwendig. Typischerweise werden Absorptionskoeffizienten messtechnisch bestimmt, indem das zu untersuchende Material in eine kalibrierte Lichtstrecke bestehend aus einer Lichtquelle und Photodetektor eingebracht wird und der Absorptionskoeffizient aus dem Rückgang der detektierten Lichtleistung über das Absorptionsgesetz bestimmt wird (vgl. Gleichung 2.3). Hierfür sind die Schichtdicke des untersuchten Materials und der an seiner Oberfläche reflektierte Anteil R' der Lichtleistung für eine korrekte Bestimmung notwendig.
Im Falle des gestapelten Detektors bietet sich die Gelegenheit, die Absorption durch die InGaAsP-Schicht mithilfe vergleichender Photostrom-Messungen folgendermaßen zu bestimmen. Der Maskensatz MOBILE08 enthält für jedes Design und jeden Bauelementdurchmesser eine entsprechende Teststruktur (TS).

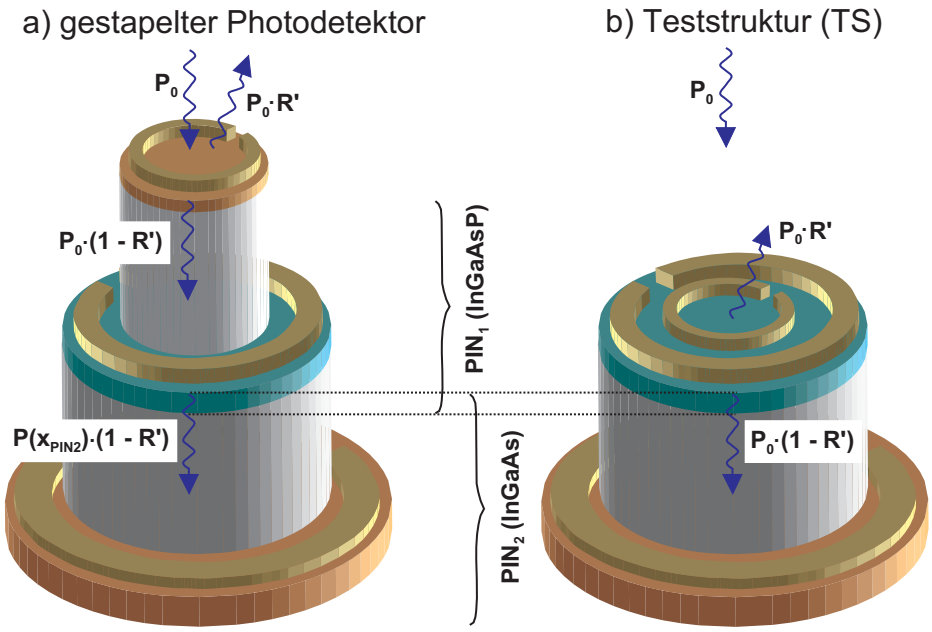


Abb. 5.18: a) Gestapelter Photodetektor und b) zugehörige Teststruktur zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten $\alpha_{InGaAsP}$

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

In Abbildung 5.18 ist das Prinzip gezeigt. Die Teststruktur besteht lediglich aus dem unteren Teil des gestapelten Photodetektors (PIN_2), wobei die obere Ringmetallisierung zusätzlich auf die mittlere Kontaktschicht aufgebracht wird, um die hierdurch verursachte Abschattung für eine korrekte Messung beizubehalten. Die Teststruktur entsteht im Prozess völlig parallel zu dem gestapelten Photodetektor und ist anschließend auf der gleichen Probe verfügbar. Dadurch werden vergleichende optoelektrische Messungen sehr gut möglich, da auf Grund derselben Epitaxieschichten und identischer Technologie von gleichem Absorptionsverhalten bei PIN_2 und der Teststruktur ausgegangen werden kann. Außerdem muss die sensible Höheneinstellung der Faser im Messaufbau nach einer fokkusierten Messung am gestapelten Detektor beim Wechsel zur entsprechenden Teststruktur nicht geändert werden, da hier mit einer Höhenänderung der Bauelemente von lediglich 650 nm ein Zuwachs der Einkoppelfläche um 3 µm im Durchmesser einhergeht. Dadurch ist sichergestellt, dass das Laserlicht ohne erneute Justage der Faserhöhe vollständig durch die Teststruktur eingesammelt wird. Wird nun die Responsivity-Messung von PIN_2 eines gestapelten Detektors und der zugehörigen Teststruktur unter Bestrahlung mit $\lambda_1 =$ 1,3 µm durchgeführt, ergibt sich eine Diskrepanz zwischen den beiden Werten hervorgerufen durch die Absorption innerhalb von PIN_1. Auf Grund der linearen Abhängigkeit zwischen optischer Eingangsleistung P_0 und dem erzielten Photostrom I_{ph} (vgl. Gleichung 2.5) innerhalb der gewählten messtechnischen Randbedingungen ($P_0 < 7$ dBm) kann aus dem relativen Unterschied der gemessenen Photoströme auf die Abnahme der optischen Leistung durch PIN_1 geschlossen werden.
Damit lässt sich der an der Grenze zwischen der oberen InGaAsP Absorberschicht und der mittleren Kontaktschicht innerhalb des gestapelten Photodetektors noch nicht absorbierte Anteil der eingestrahlten Lichtleistung $P(x_{PIN2})$ bestimmen mit

$$\frac{P(x_{PIN2})}{P_0} = \frac{I_{ph,PIN2}}{I_{ph,TS}} \tag{5.1}$$

und damit ist mit Hilfe des Absorptionsgesetzes der Absorptionskoeffizient bestimmbar zu

$$\alpha_{InGaAsP} = -\left(\frac{x}{[cm]}\right)^{-1} \cdot ln\left(\frac{I_{ph,PIN2}}{I_{ph,TS}}\right). \tag{5.2}$$

Bei dieser Methode ist es nicht notwendig, die an der Halbleiter/Luft-Grenzfläche auftretende Reflektivität R' zu berücksichtigen, da diese sowohl bei der Messung am gestapelten Detektor als auch an der Teststruktur auftritt und sich durch die relative Auswertung (vgl. Gleichung 5.1) egalisiert. Wichtig ist lediglich, dass der reflektierte Anteil R' bei beiden

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Messungen möglichst identisch ist. Hierfür werden vergleichbare Einkoppelbedingungen durch das Aufbringen der oberen Ringmetallisierung auch bei der Teststruktur geschaffen. Die Tatsache, dass es sich beim obersten Material beim gestapelten Detektor um InGaAs und bei der Teststruktur um InP handelt, verursacht bezüglich der Reflektivität keinen nennenswerten Fehler, da die Brechungsindizes nahe beieinander liegen ($n_{InGaAs} \approx 3{,}36$ und $n_{InP} \approx 3{,}1$). Laut Gleichung 2.8 ergibt sich hierdurch ein Unterschied in der Reflektivität von ca. 3 %. Entsprechendes gilt für Reflektionen an Heterogrenzflächen innerhalb von PIN1.
Eine geringfügige Verfälschung bei der Bestimmung des Absolutwertes $\alpha_{InGaAsP}$ zu höheren Werten kommt durch die Absorption innerhalb der oberen InGaAs-Kontaktschicht zustande, welche mit dieser Methode zunächst dem InGaAsP-Material zugeschrieben wird. Hier besteht die Möglichkeit einer rechnerischen Korrektur mit Hilfe des Literaturwertes für α_{InGaAs}.

5.3.5 Erweiterung der Prozesstechnologie für den gestapelten Photodetektor

Ausgehend von der Technologie der einfachen PIN-Diode beschränkt sich die notwendige Erweiterung der Prozesse im Herstellungsablauf des gestapelten Photodetektors auf die vertikale Strukturierung vom InGaAsP und vom InP.

5.3.5.1 Nasschemische Ätzung von InGaAsP

Die vertikale Strukturierung des oberen Absorbermaterials kann prinzipiell mit Hilfe des in 5.1.2 vorgestellten Trockenätzverfahrens vorgenommen werden. Um die Technologie im Hinblick auf einen komplexen Schaltungsprozess möglichst einfach zu halten, empfiehlt sich eine nasschemische Strukturierung. Dies trifft besonders dann zu, wenn die deutlich aufwändigere Trockenätzung keine Vorteile im Hinblick auf das Bauelementverhalten hat. Die Standardätzen für InP (HCl) und für InGaAs (H_3PO_4:H_2O_2:H_2O; 1:1:25) finden bei dem quaternären Mischkristall InGaAsP keine Anwendung, da ihre Abtragsrate völlig unzureichend ist. Konzentrierte Salzsäure eignet sich lediglich zum Abtrag dünner quaternärer Zwischenschichten, welche an Heterogrenzflächen zwischen InP und InGaAs entstehen können. Für das Abtragen von InGaAsP Volumenmaterial eignet sich eine verdünnte Caro'sche Säure im Verhältnis (H_2SO_4:H_2O_2:H_2O; 1:1:10). Unmittelbar nach dem Ansetzen unter Reinraumbedingungen erreicht diese Ätze eine Temperatur von etwa 42 °C aufgrund des exothermen Zerfalls der konzentrierten Schwefelsäure in wässriger Lösung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

bei einer Ausgangstemperatur der Edukte von 21 °C. Die Temperatur hat nach Svante Arrhenius einen quantitativen Einfluss auf die Reaktions- bzw. in diesem Fall auf die Ätzgeschwindigkeit, was eine exponentielle Zunahme der Ätzrate mit der Temperatur zur Folge hat. Für einen reproduzierbaren Prozess ist es notwendig, die Prozesstemperatur einer jeden Ätze auf einen bestimmten Wert festzulegen. Wenn prozesstechnisch sinnvoll, empfiehlt sich hier der Einfachheit halber die Umgebungstemperatur von 21 °C. Praktisch heißt dies, dass die Ätze nach dem Ansetzen ohne aktive Kühlung etwa zwei Stunden bis zum Erreichen der geforderten Spezifikation benötigt und dann das InGaAsP in der hier untersuchten stöchiometrischen Zusammensetzung mit einer gemäßigten Ätzrate von etwa 2 nm/s abträgt. Die Selektivität zu InP $S_{InGaAsP/InP}$ beträgt etwa 23. Damit ist die ver-

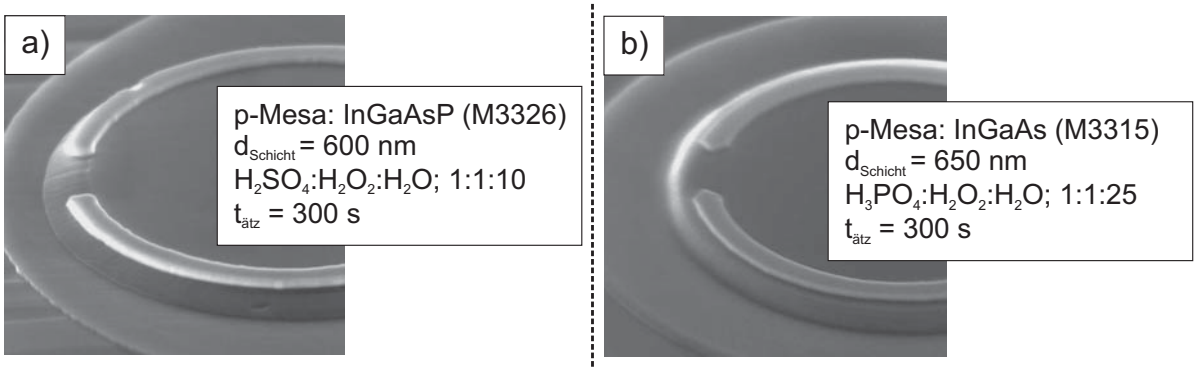


Abb. 5.19: Vergleichende REM-Aufnahmen einer nasschemisch strukturierten p-Mesa in a) InGaAsP und b) InGaAs Matarial

tikale Ätzrate vergleichbar mit dem Standardsystem zum Abtrag von InGaAs. Abbildung 5.19 illustriert nasschemisch geätzte Mesen einer PIN-Diode mit einer InGaAsP Absorptionsschicht (Abb. 5.19 a)) und einer Standard PIN-Diode (Abb. 5.19 b)). Es ist eindeutig zu erkennen, dass die Caro'sche Säure im Vergleich zur Phosphorsäure basierter Ätze eine deutlich stärker ausgeprägte Unterätzung hervorruft, was zu flachen Mesaflanken beim InGaAsP führt. Aufgrund der sehr hohen Haftung zwischen aufgedampftem Metall und der Halbleiteroberfläche stoppt der laterale Ätzabtrag am Ringkontakt, so dass vorwiegend parasitärer Überstand der p-Mesa abgetragen wird. Lediglich im Bereich der Ringöffnung kann es bei größeren Schichtdicken zu einer stärkeren Unterätzung kommen. Da im Falle des gestapelten Detektors für die Strukturierung der Mesen ein hoch präziser Übertrag der Strukturen mit einer Genauigkeit im sub-µm Bereich nicht unbedingt erforderlich ist, kann dieser Prozess trotz der stärkeren Unterätzung eingesetzt werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.3.5.2 Nasschemische Strukturierung von runden InP-Mesen

Wird zur Erhöhung der Responsivity transparentes InP als (mittlere) Kontaktschicht verwendet, so zeigt sich eine ausgeprägte Abhängigkeit zwischen der Konzentration der für die Ätzung verwendeten Salzsäure und der erzielten Isotropie. Typisch für III/V-Verbindungen ist eine Anisotropie der lateralen Ätzkomponente, d. h. die Unterätzung der Ätzmaske ist in Abhängigkeit von der Kristallrichtung mehr oder minder stark ausgeprägt. Bei Bauelementen mit rechteckigen Mesen (z. B. HBTs) führt dieser Sachverhalt dazu, dass die Ausrichtung der Ätzmaske immer entlang einer definierten Kristallrichtung erfolgen muss, um die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten [25, 22]. Außerdem kann hier der unterschiedlichen Unterätzung bereits durch eine entsprechende Anpassung im Maskenlayout Rechnung getragen werden. Bei runden Mesen führt eine laterale Anisotropie zur Ausbildung von elliptischen bis hin zu linsenförmigen Strukturen und damit zum Verlust der Geometrie.

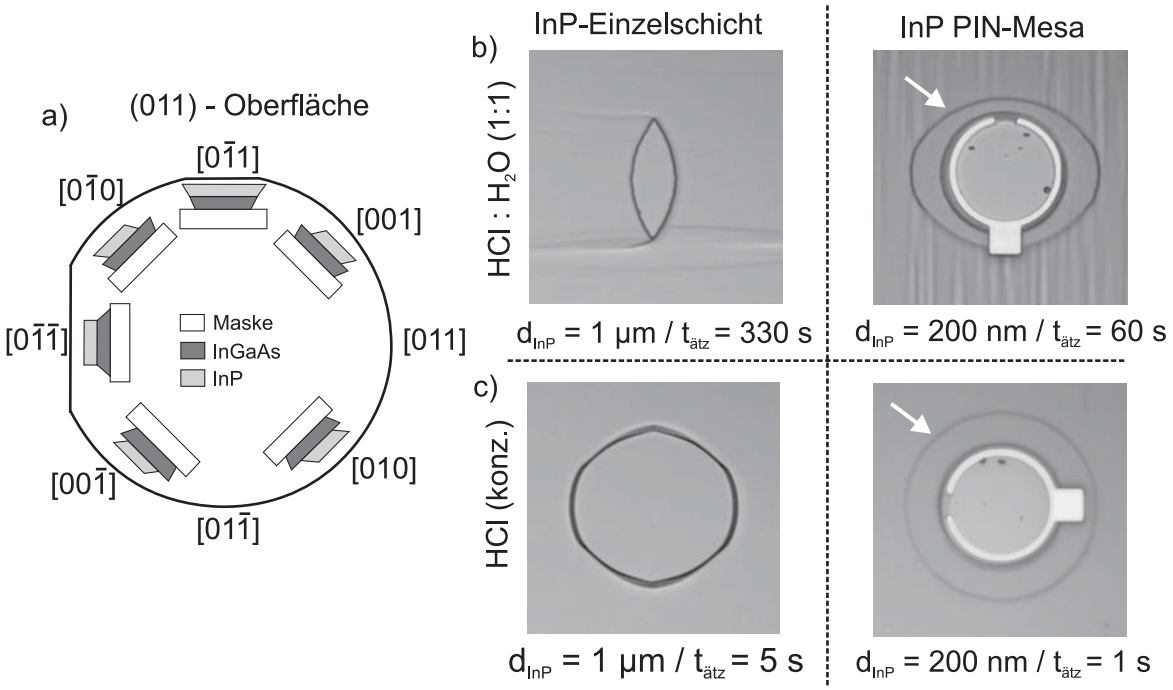


Abb. 5.20: a) InP-Wafer Kristallrichtungen und sich ergebende Ätzprofile für InP und InGaAs [93], sowie entsprechende Lichtmikroskopaufnahmen von geätzten InP-Strukturen mittels b) verdünnter und c) konzentrierter Salzsäure

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Eine Anpassung über das Maskenlayout ist hier nicht praktikabel, da es immer nur für eine zu ätzende Schichtdicke des entsprechenden Materials optimiert werden kann und damit die Prozessflexibilität einschränkt. In Abbildung 5.20 sind Lichtmikroskopaufnahmen von in InP geätzten Strukturen mit Hilfe runder Ätzmasken gezeigt, welche zum einen mit verdünnter und zum anderen mit konzentrierter Salzsäure geätzt wurden. Zusätzlich gibt eine qualitative Darstellung eines InP-Wafers mit einer (001)-Oberfläche Auskunft über die Kristallrichtungen und die sich entsprechend ergebenden Ätzprofile aufgrund der lateralen Ätzanisotropie [93]. Dabei ist die laterale Ätzrate in InP für die $\langle 001 \rangle$-Richtungen am höchsten, gefolgt von den $\langle 011 \rangle$ und schließlich den $\langle 0\bar{1}1 \rangle$-Richtungen. Die vertikale Ätzrate einer konzentrierten Salzsäure beträgt für InP etwa 200 nm/s. Dieser Wert ist auf Grund des sehr schnellen Materialabtrags relativ schwer exakt zu bestimmen, da bereits kleine Abweichungen bei der Zeitnehmung einen starken Einfluss haben. Wird die Salzsäure hingegen im Verhältnis 1:1 verdünnt, so sinkt die Ätzrate für InP bereits auf 3 nm/s. Dieser Wert eignet sich prinzipiell sehr gut für die Prozesstechnologie von Schichtdicken im Bereich einiger hundert Nanometer. Allerdings führen die unterschiedlichen lateralen Ätzgeschwindigkeiten bei der 1µm dicken InP-Einzelschicht bereits bei einer Ätzzeit von 5 s mit konzentrierter Salzsäure zu beginnendem Geometrieverlust. Man erkennt hier bereits deutlich den stärkeren Materialabtrag in den $\langle 001 \rangle$-Richtungen. Wird diese Schicht mit verdünnter Salzsäure geätzt, so steigt die benötigte Ätzzeit bereits auf 330 s und gleichzeitig die resultierende Unterätzung der Maske. Es ist hier eine massive Diskrepanz zwischen der Unterätzung in $\langle 011 \rangle$ und den $\langle 0\bar{1}1 \rangle$-Richtungen zu erkennen, was zur Ausbildung einer linsenförmigen Struktur führt. Im Bauelement sind die zu ätzenden InP-Schichtdicken mit 100 bis 300 nm erheblich dünner, was die benötigten Ätzzeiten reduziert. Bei einem entsprechenden Experiment mit PIN-Bauelementschichten ist bei der Ätzung mit verdünnter Salzsäure ebenfalls eine elliptische Deformierung der geätzten Mesa festgestellt worden, wenn auch bei weitem nicht so ausgeprägt, wie bei der 1µm dicken Einzelschicht. Dennoch ist dieses Ergebnis für einen Bauelementprozess nicht anwendbar, da der noch aufzubringende Ringkontakt nicht vollständig auf der Mesa aufliegt und dadurch die Gefahr der parasitären Kontaktierung darunterliegender Schichten existiert. Die Ätzung der Bauelementschicht mit einer konzentrierten Salzsäure mit einer Ätzzeit von 1 s führt zum vollständig maßhaltigen Übertrag der Ätzmaske in die InP-Schicht. Praktisch handelt es sich bei dieser kurzen Ätzung lediglich um einen kurzen Dipp mit einer sofortigen Spülung der Probe unter DI-Wasser.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Ergebnis zeigt, dass im Fall sehr kurzer Ätzzeiten die Diffusion der Reaktanten in einer wässrigen Lösung unterhalb einer Ätzmaske nahezu vollständig unterbunden wird und es dadurch nicht zur Ausbildung einer lateralen Ätzkomponente kommt. Auf Grund der sehr hohen Ätzselektivität zum darunterliegenden InGaAs-Material kann die konzentrierte Salzsäure an dieser Stelle zur präzisen nasschemischen Strukturübertragung herangezogen werden.

5.3.6 Untersuchung des Kanalübersprechens (Crosstalk)

Bei Bauelementen bzw. Systemen, bei denen zwei oder mehr parallele Übertragungskanäle vorhanden sind, kann es zu einer gegenseitigen Beeinflussung der übertragenen Daten kommen. Hierbei spricht man vom Kanalübersprechen bzw. dem Crosstalk. Da der gestapelte Photodetektor kein reines Übertragungsmedium ist, sondern gewissermaßen eine Schnittstelle zwischen der optischen und der elektrischen Ebene darstellt, muss das Übersprechverhalten für beide Ebenen untersucht werden. In Kapitel 5.3.2 wurde bereits der Einfluss einzelner Schichtparameter auf das Übersprechen vorgestellt. In diesem Kapitel werden die durchgeführten Untersuchungen und deren Schlussfolgerungen diskutiert, welche die wichtigen Beiträge innerhalb des gestapelten Photodetektors zum Kanalübersprechen aufzeigen [9].

5.3.6.1 Optisch hervorgerufenes Kanalübersprechen

Liegen die zu übertragenen Daten noch als Photonen vor, so kann ein Übersprechen der Daten entstehen, indem Photonen in der nicht für sie vorgesehenen PIN-Diode absorbiert werden. Für eine derartige Fehlabsorption kommen mehrere Möglichkeiten in Betracht.
Im Fall von λ_1 kommt es zu einer Injektion in PIN2, wenn keine vollständige Absorption bereits in PIN1 stattgefunden hat. Des weiteren besteht die Möglichkeit, dass PIN2 auf Grund des Überstandes relativ zu PIN1 direkt oder indirekt (z. B. durch Streulicht) durch die Faser bestrahlt wird. Eine direkte Bestrahlung würde ins Gewicht fallen, wenn die durch die Faser bestrahlte Fläche größer ist als die aktive Fläche der oberen PIN-Diode. Um diesen möglichen Mechanismus zu untersuchen, wurden entsprechend den Ausführungen in Kapitel 5.3.4 Designs mit einer Variation des Überhangs von PIN2 realisiert. Zusätzlich dazu wurde für jedes Bauelementdesign eine Variation des Durchmessers vorgenommen, um bei einem Einfluss des PIN2-Überhangs auf das optische Übersprechen zusätzlich eine Aussage relativ zur beleuchteten Fläche treffen zu können.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Im Fall von λ_2 kommt es zu einer Absorption in der oberen InGaAs-Kontaktschicht. Da hier, nahe des InGaAsP-Heteroübergangs, Verarmung vorliegt, kommt es zur Ausbildung eines parasitären Photostroms in PIN1. Des Weiteren hat die thermische Verschmierung der Bandlückenenergie Einfluss auf die Absorption von λ_2 in PIN1. Dies fällt umso mehr ins Gewicht, je weiter $W_{g,InGaAsP}$ zu kleineren Energien hin verschoben wird. Um den quantitativen Einfluss der InGaAsP-Bandlückenenegie auf die Absorptionsverhältnisse innerhalb des gestapelten Photodetektors zu untersuchen, wurden zwei Proben mit $W_{g,InGaAsP}$ = 0,85 eV und eine weitere, zur Erhöhung von $\alpha_{InGaAsP}$, mit $W_{g,InGaAsP}$ = 0,8 eV hergestellt.

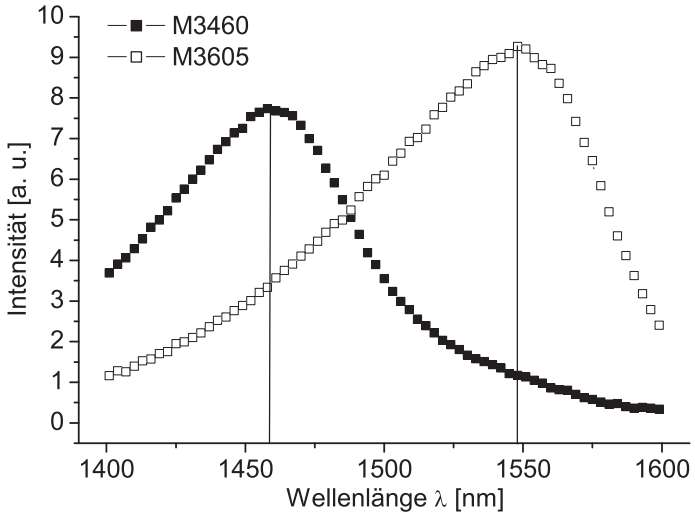


Abb. 5.21: Photolumineszenz-Messungen zweier InGaAsP-Kalibrationsschichten für nominelle Bandlückenenergieen von 0,85 eV (λ=1,46 µm) und 0,8 eV (λ=1,55 µm) bei T = 300 K

In Abbildung 5.21 ist das Ergebnis von Photolumineszenzmessungen (PL) an den zugehörigen InGaAsP-Kalibrationsschichten bei Raumtemperatur dargestellt und entspricht damit den thermischen Bedingungen für den Betrieb der Schichten innerhalb des gestapelten Detektors. Kalibrationsschichten sind in der Regel Einzelschichten und dienen der epitaktischen Parameterjustage zur Einhaltung der gewünschten Bandlückenenergie und Gitterkonstanten vor dem Wachstum innerhalb des gesamten Schichtpakets. Die gemessenen Emissionsmaxima liegen nahe den angepeilten Bandlücken zugehörigen Wellenlängen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die für das optische Übersprechen relevanten Ergebnisse der auf Basis der Kalibrationsschichten hergestellten gestapelten Detektoren sind in den Tabellen 5.7 bzw. 5.8 zusammengefasst. Sie umfassen die gemessenen Responsivity-Werte sowie deren prozentuale Gewichtung zwischen der gewünschten und der parasitären Absorption jeweils für PIN1 und PIN2. Des Weiteren ist der mit Hilfe der in Kapitel 5.3.4.1 vorgestellten Methode extrahierte Absorptionskoeffizient $\alpha_{InGaAsP}$ angegeben. Typischerweise wird das Signal-Rausch-Verhältnis bzw. das Übersprechen auf Grund des mehrere Größenordnungen betragenden Abstandes zwischen den Absolutwerten in dB angegeben. Im Falle des gestapelten Detektors liegen die Werte deutlich näher beieinander, so dass hier die prägnantere Angabe in Prozent gewählt wurde:

$$C_{opt,PIN1} = \frac{R@\lambda 2}{R@\lambda 1} \cdot 100 \quad \text{bzw.} \quad C_{opt,PIN2} = \frac{R@\lambda 1}{R@\lambda 2} \cdot 100, \quad \text{mit} \quad [C_{opt}] = \%. \tag{5.3}$$

Tab. 5.7: Responsivity, optischer Crosstalk und $\alpha_{InGaAsP}$ für verschiedene Bauelementdesigns einer PINIP-Doppelstruktur (M3463) mit $W_{g,InGaAsP} \approx 0{,}85$ eV ([R]=$\frac{A}{W}$, C_{opt} in %)

	PIN1			**PIN2**			
Bauelement	**R@λ_1**	**R@λ_2**	**C_{opt}**	**R@λ_1**	**R@λ_2**	**C_{opt}**	**$\alpha_{InGaAsP}$ [cm^{-1}]**
V1, 21 µm	0,356	0,003	0,8	0,305	0,297	103	8480
V2, 21 µm	0,362	0,004	1,1	0,307	0,297	103	8350
V3, 21 µm	0,357	0,002	0,6	0,302	0,296	102	8650

Beim Vergleich der PIN2-Daten in Tabelle 5.7 fällt zunächst auf, dass die ermittelten Responsivity-Werte für alle drei untersuchten Bauelementdesigns mit dem Durchmesser von 21 µm nur sehr gering voneinander abweichen. Unter Berücksichtigung der Fehlertoleranz bei der Messung der Responsivity können die ermittelten Werte sogar als identisch angesehen werden. Dieses wichtige Ergebnis lässt den Schluss zu, dass der Überstand von PIN2 bei diesem Bauelementdurchmesser keine Rolle für das optische Übersprechen spielt. Das ermittelte optische Übersprechen in den beiden PIN-Dioden fällt sehr unterschiedlich aus. Während PIN1 durch λ_2 eine parasitäre Steigerung des Photostroms um etwa 1 %

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

erfährt, führt λ_1 in PIN2, trotz der bereits erfolgten teilweisen Absorption in PIN1, gar zu einem geringfügig höheren Photostrom als durch die vorgesehene Wellenlänge λ_2, d.h. das optische Übersprechen liegt hier bei knapp über 100 %.
Auf den ersten Blick scheint es widersprüchlich zur Literatur zu sein, dass eine InGaAs PIN-Diode für λ=1,3 µm eine höhere Responsivity aufweist als für λ=1,55 µm. Entsprechend der Gleichung

$$P_0 = r_{ph} \cdot W_{ph} = r_{ph} \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda} \tag{5.4}$$

muss bei konstanter optischer Eingangsleistung mit kleiner werdender Wellenlänge bzw. größer werdender Photonenenergie W_{ph} die Photonenrate r_{ph} sinken. Dementsprechend

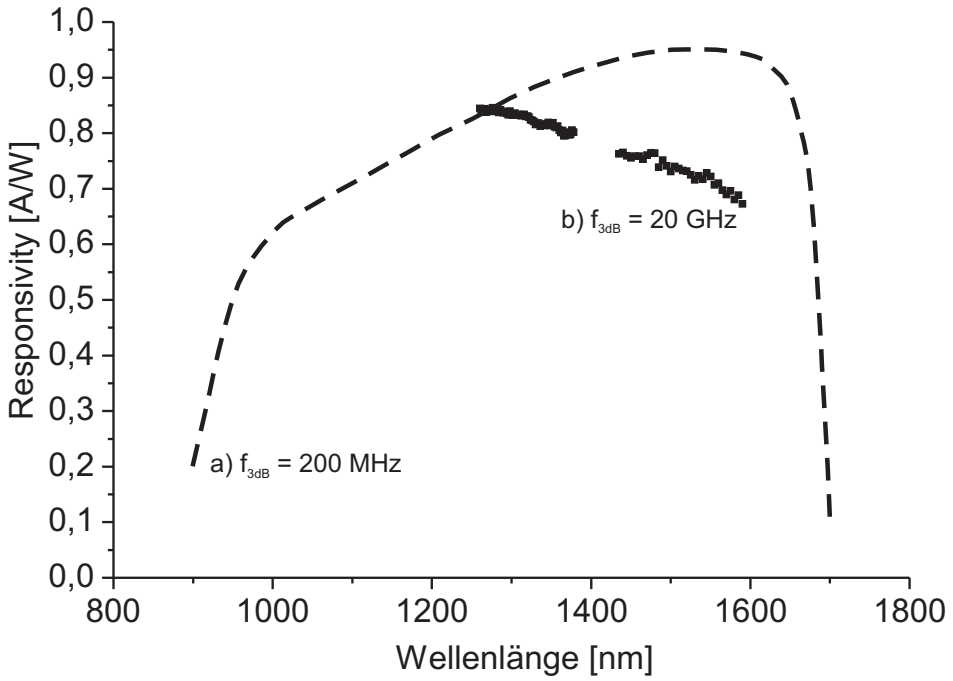


Abb. 5.22: Verläufe der spektralen Empfindlichkeiten einer a) kommerziellen [94] und b) einer breitbandigen InGaAs PIN-Diode des Fachgebiets

reduziert sich die Anzahl potentiell generierter e/h-Paare mit steigender Photonenenergie. Es ergibt sich der allgemein hin bekannte Verlauf der spektralen Empfindlichkeit einer InGaAs PIN-Diode, welcher in Abbildung 5.22 a) dargestellt ist. Dieser Zusammenhang

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

gilt allerdings nur für Bauelemente mit hinreichend dicken Absorptionsschichten, bei denen von einer nahezu vollständigen Absorption der eingestrahlten Photonen ausgegangen werden kann. Ist die Absorptionsschicht hingegen so dünn, dass keine vollständige Absorption stattfinden kann, so sinkt die Responsivity für eine bandkantennahe Wellenlänge stärker als für eine zu kleineren Werten hin weiter entfernte auf Grund des hier höheren Absorptionskoeffizienten (vgl. Abbildung 2.2). Dies betrifft sehr breitbandige Elemente, bei denen der Laufzeitbegrenzung durch eine Reduktion der Absorberschichtdicke begegnet wird. Mit anderen Worten, bei dünnen Absorptionsschichten werden trotz einer kleineren Photonenrate absolut mehr höherenergetische Photonen absorbiert als für kleinere Photonenenergien in der Nähe der Bandkante. Dieses Verhalten wurde für einen GaAs-Absorber mit Hilfe des physikalischen Simulators ATLAS in [95] unter der Variation der Absorberschichtdicke verifiziert (0,3 µm $< d_i <$ 1,2 µm) und wird durch die Messung einer breitbandigen PIN-Diode mit einer Absorberschichtdicke von d_i = 1400 nm in Abbildung 5.22 b) bestätigt.

Im Falle von PIN2 des gestapelten Detektors aus Tabelle 5.7 bedeutet das, dass die Absorption von λ_1 in PIN1 gerade ausreicht, um den eben beschriebenen Effekt auszugleichen. Der ermittelte Absorptionskoeffizient $\alpha_{InGaAsP}$ von etwa 8400 cm^{-1} deckt sich mit dem theoretischen Wert in Abbildung 2.2. Durch eine Verringerung der InGaAsP-Bandlückenenergie kann der Absorptionskoeffizient für λ_1 erhöht werden. Für einen gestapelten Detektor mit $W_{g,InGaAsP}$ = 0,8 eV sind die entsprechenden Messdaten in Tabelle 5.8 angegeben. Neben den verschiedenen Designs wurden hier zusätzlich Bauelementdurchmesser d_{PIN} zwischen 12 µm und 30 µm untersucht. Es stellt sich heraus, dass die gemessenen Responsivity Werte für kleine Durchmesser mit denen größerer Bauelemente im Rahmen der Messgenauigkeit identisch sind. Das bedeutet nicht nur, dass die bereits zuvor festgestellte Unabhängigkeit des optischen Übersprechens vom Überhang A_{US} durch diese Probe nochmals bestätigt wird, sondern dass die Einkopplung in 12 µm Elemente mit dem genutzten Messaufbau optimal ist. Die Änderung der Bandlückenenergie lässt $\alpha_{InGaAsP}$ erwartungsgemäß auf durchschnittlich 13500 cm^{-1} ansteigen. Für $W_{g,InGaAsP} \approx$ 0,8 eV lässt sich aus Abbildung 2.2 ein Erwartungswert für $\alpha_{InGaAsP} >$ 10000 cm^{-1} extrahieren. Die dadurch erhöhte Absorption von λ_1 in PIN1 führt zu einer Abnahme von C_{opt} in PIN2 auf etwa 77 %.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Tab. 5.8: Responsivity, optischer Crosstalk und $\alpha_{InGaAsP}$ für verschiedene Bauelementdesigns einer PINIP-Doppelstruktur (M3607) mit $W_{g,InGaAsP} \approx 0{,}8$ eV ([R]=$\frac{A}{W}$, C_{opt} in %)

	PIN1			PIN2			
Bauelement	**R@λ_1**	**R@λ_2**	**C_{opt}**	**R@λ_1**	**R@λ_2**	**C_{opt}**	**$\alpha_{InGaAsP}$ [cm^{-1}]**
V1, 21 µm	0,388	0,083	21,4	0,242	0,302	80,1	13300
V2, 12 µm	0,386	0,091	23,6	0,252	0,317	79,5	12170
V2, 21 µm	0,384	0,086	22,4	0,227	0,300	75,7	14340
V2, 30 µm	0,372	0,094	25,3	0,249	0,306	81,4	12860
V3, 12 µm	0,373	0,092	24,7	0,221	0,307	72	14200
V3, 21 µm	0,376	0,083	22,1	0,235	0,304	77,3	13680
V3, 30 µm	0,388	0,094	24,2	0,229	0,311	73,6	14200

Gleichzeitig steigt jedoch ebenfalls die Absorption von λ_2 in PIN1, so dass sich nun C_{opt} in PIN1 auf etwa 23 % erhöht. Einen Hinweis auf diesen Anstieg liefern die PL-Messungen in Abbildung 5.21, welche für eine Bandlücke des InGaAsP-Materials nahe 0,8 eV eine deutliche Zunahme der strahlenden Rekombination bei $\lambda = 1550$ nm aufzeigen. Ein naheliegender Grund hierfür liegt in einer Variation der InGaAsP-Stöchiometrie, so dass sich keine scharfe Bandlückenenergie im Volumenmaterial ausbildet.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass keine Beeinflussung des optischen Übersprechens durch das Bauelementdesign festgestellt werden kann. Eine Optimierung des optischen Übersprechens durch $W_{g,InGaAsP}$ ist für beide PIN-Dioden gleichzeitig nicht möglich. Hier kann lediglich Einfluss auf Kosten der jeweils anderen Diode genommen werden, was im Hinblick auf die gewünschte Applikation entsprechend justiert werden muss. Durch eine zusätzliche massive Erhöhung der Absorptionsschichtdicken beider PIN-Dioden kann eine unabhängige Optimierung des optischen Übersprechens erreicht werden. Hierbei ist jedoch der Einfluss auf die Ladungsträgerlaufzeit und die maximale Topologie des Schichtpaketes zu berücksichtigen. Mit jeweils 600 nm Absorberschichtdicke für PIN1 und PIN2 erreicht das Schichtpaket unter Berücksichtigung weiterer, für die Schaltungsapplikation noch notwendiger Bauelemente, eine Gesamthöhe von etwa 2,3 µm, so dass eine weitere Steigerung aus prozesstechnischer Sicht nicht sinnvoll ist.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.3.6.2 Elektrisch hervorgerufenes Kanalübersprechen

Im Gegensatz zum optischen Übersprechen, welches als frequenzunabhängig angesehen werden kann, kommt es zur frequenzabhängigen Überkopplung des generierten Mikrowellensignals von einer PIN-Diode zur andern. Das folgende Unterkapitel befasst sich mit den ursächlich für das elektrische Übersprechen verantwortlichen Gegebenheiten innerhalb des Schichtpaketes.

Ausgangsbasis für die Untersuchung des elektrischen Übersprechens bilden drei Proben, davon eine mit einer PINIP- und zwei mit einer NIPIN-Schichtsequenz. Bei den letzteren wird die mittlere Kontaktschichtdicke variiert. Abbildung 5.23 zeigt gemessene frequenzabhängige Beträge des Transmissionsparameters S21 aller drei Proben, welcher unmittel-

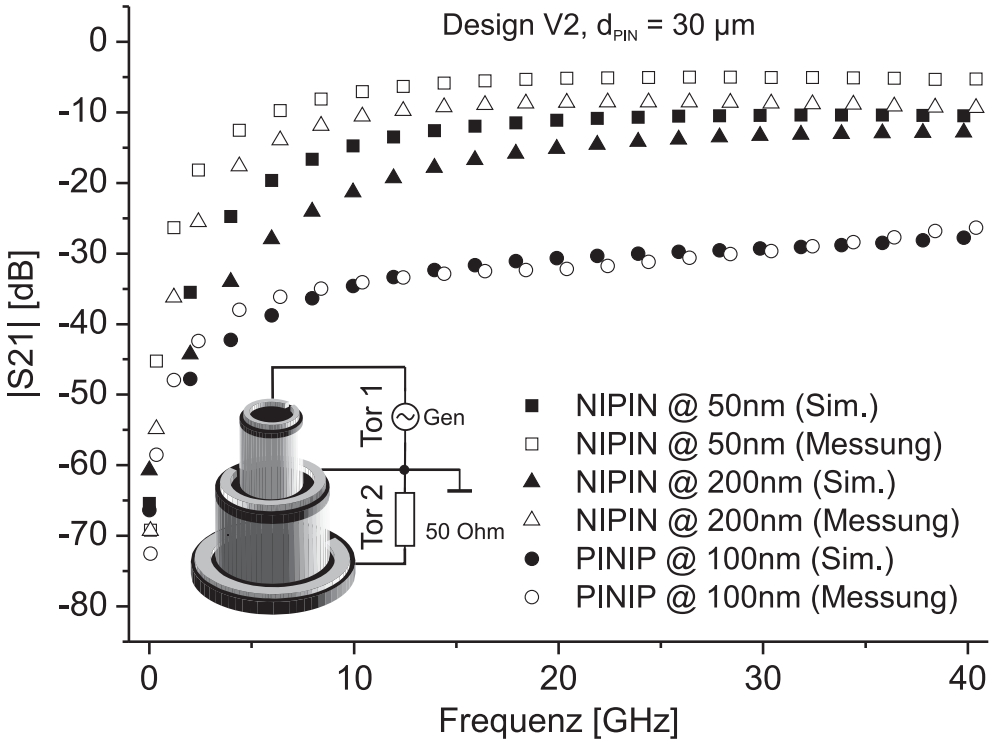


Abb. 5.23: Gemessene und simulierte Verläufe des Betrages des Transmissionsparameters S21 für einen PINIP-Detektor sowie für NIPIN-Elemente unter Variation der mittleren Kontaktschichtdicke

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

bar ein Maß das Übersprechen einer elektromagnetischen Welle von PIN1 zu PIN2 sind. Die Messung und auch die im Anschluss vorgestellte Simulation erfolgten unter Einkopplung des Generatorsignals zwischen 45 MHz und 40 GHz in PIN1, während PIN2 über 50 Ohm gegen Masse geschaltet ist. Ausgehend von einer vernachlässigbaren Transmission bei niedrigen Frequenzen kommt es zu einer Sättigung ab etwa 10 GHz. Hierbei ist zu beobachten, dass die Proben mit NIPIN-Schichten eine deutlich höhere Transmission aufweisen als das PINIP-Bauelement. Wie zu erwarten, wird beim direkten Vergleich der NIPIN-Schichten deutlich, dass eine dünnere mittlere Kontaktschicht zu einer höheren Transmission führt.

Offenbar ist demnach die Qualität der elektrischen Ankopplung der mittleren Kontaktschicht an das Massepotential (GND) entscheidend für das elektrische Übersprechen. Hierbei spielen sowohl die Schichtdicke, als auch die Leitfähigkeit eine wichtige Rolle. Die in Tabelle 5.5 zusammengefassten Schichtdaten liefern die gewählten nominellen n- bzw. p-Dotierungshöhen. Wegen der in Kapitel 5.3.3 genannten Gründe beträgt die p-Dotierung $7{,}5 \cdot 10^{18}$ cm^{-3} und liegt damit bei 50 % des n-Dotierungsniveaus. Dadurch besitzt ein PINIP-Element nicht nur eine höhere Leitfähigkeit der mittleren Kontaktschicht, sondern es erfährt absolut gesehen eine im Vergleich zum NIPIN-Element schwächer ausgeprägte Verarmung derselben durch die Raumladungszone. Eine theoretische Abschätzung der Ausdehnung der Raumladungszone l_n bzw. l_p für eine Vorspannung U_{bias} = -2 V liefert mit

$$l_{n,p} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_r N_{D,A}}{q N_{A,D}(N_A + N_D)}} \cdot \sqrt{U_D - U_{bias}} \tag{5.5}$$

Werte von 13 nm für die n-Seite und 17 nm für die p-Seite. Da die mittlere Kontaktschicht von beiden Seiten eine Verarmung erfährt, bedeutet das im Falle einer NIPIN- im Vergleich zu einer PINIP-Schichtequenz eine um etwa 8 nm größere Reduktion des leitenden Schichtquerschnitts unter sonst gleichen Bedingungen. Bei einer Schichtdicke der mittleren Kontaktschicht von 50 nm bedeutet dies also, dass auf Grund der unterschiedlich hohen p- und n-Dotierungen ein NIPIN-Element eine um etwa 16 % stärker verarmte p-Schicht besitzt, als das für die n-Schicht eines PINIP-Elements der Fall ist.

Die experimentell erzeugten Ergebnisse werden mittels des 3D-EM Feldsimulators EMPIRE XCcel^{TM} der Firma IMST GmbH verifiziert. Hierfür wird das dreidimensionale Layout eines V2, 30 µm Elements ohne Messpadperipherie exakt in die Simulationsumgebung übernommen. Alle Schichtdicken und Dotierungswerte entsprechen den nominellen Bauelementdaten. Die Darstellung der so simulierten Transmissionsparameter S21 für alle drei

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Bauelemente sind zum Abgleich mit den gemessenen Werten ebenfalls in Abbildung 5.23 abgebildet. Der prinzipielle Verlauf von S21 und die relative Höhe der Absolutbeträge zueinander werden durch die Simulation in guter Übereinstimmung mit den gemessenen Werten wiedergegeben. Die Verläufe für das PINIP-Element sind sogar nahezu deckungsgleich. Für die beiden NIPIN-Elemente wurden jeweils kleinere Beträge von S21 simuliert, was durch eine Abweichung der Schichtdicke oder der Dotierung vom nominellen Wert hervorgerufen werden kann.
Die Simulationen belegen den Zusammenhang zwischen dem elektrischen Übersprechen und der elektrischen Ankopplung an Masse durch die mittlere Kontaktschicht eindeutig, da Variationen der Parameter anderer Schichten keinen entsprechend starken Einfluss auf die Transmission besitzen.

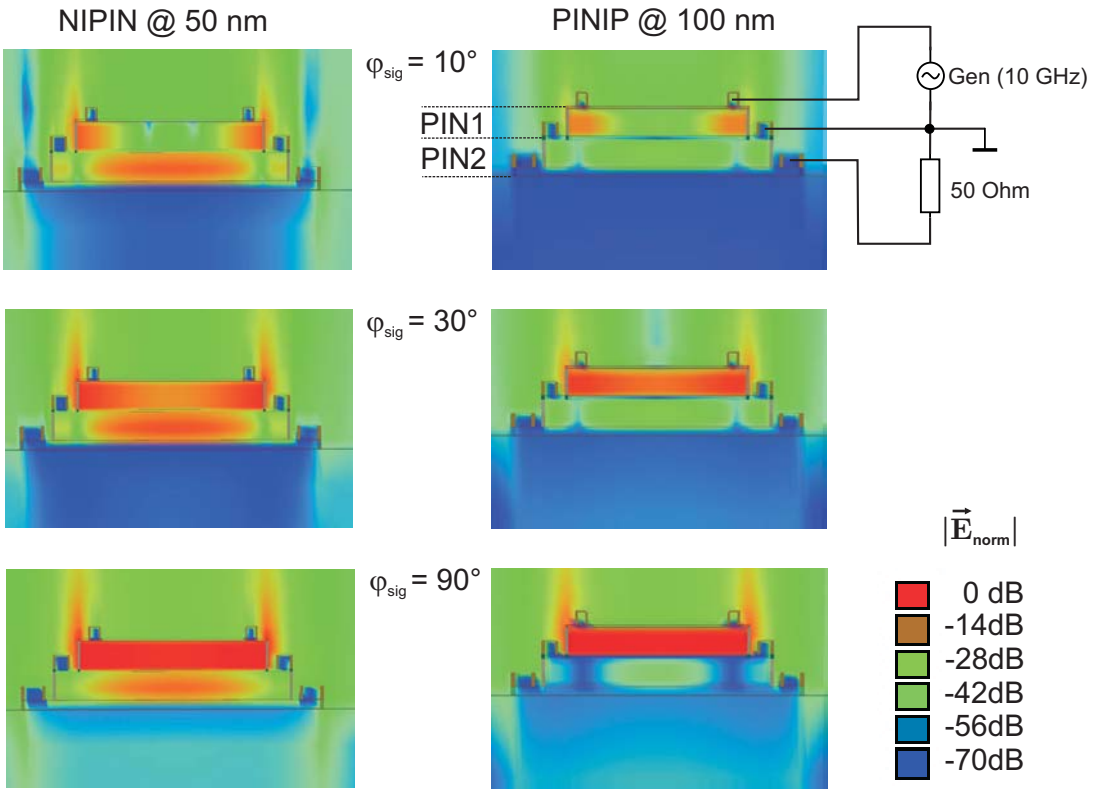


Abb. 5.24: Querschnittsabbildungen simulierter Feldstärkeverläufe eines NIPIN- und eines PINIP-Detektors im Design V2 für drei verschiedene Phasenwinkel φ_{sig} des anregenden 10 GHz Sinussignals

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

In Abbildung 5.24 ist die simulierte Normalkomponente der elektrischen Feldstärke im Querschnitt farbkodiert für drei verschiedene Phasenwinkel des Generatorsignals φ_{sig} bei einer Signalfrequenz von 10 GHz dargestellt. Die Anschlussbedingungen der Bauelementterminals verbleiben wie bereits oben beschrieben. Um einen besseren Vergleich zu ermöglichen, sind entsprechende Abbildungen eines NIPIN-Elementes mit einer 50 nm dicken und eines PINIP-Elements mit einer 100 nm dicken mittleren Kontaktschicht nebeneinander angeordnet. Bei der mit dem Generatorsignal beaufschlagten oberen Diode PIN1 erkennt man eine sich von außen nach innen ändernde Verteilung der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit von der Signalamplitude. Bei Betrachtung der unteren Diode PIN2 wird nun noch einmal in dieser Darstellung der Unterschied zwischen beiden Schichtpaketen deutlich. Obwohl gegen Masse geschaltet, erfährt das NIPIN-Schichtpaket eine phasenverschobene mitschwingende Feldstärkenamplitude in PIN2. Diese weist einen deutlich höheren Betrag auf als die entsprechende Region im PINIP-Schichtpaket, was in der schlechteren Abschirmung beider PIN-Dioden voneinander begründet ist.

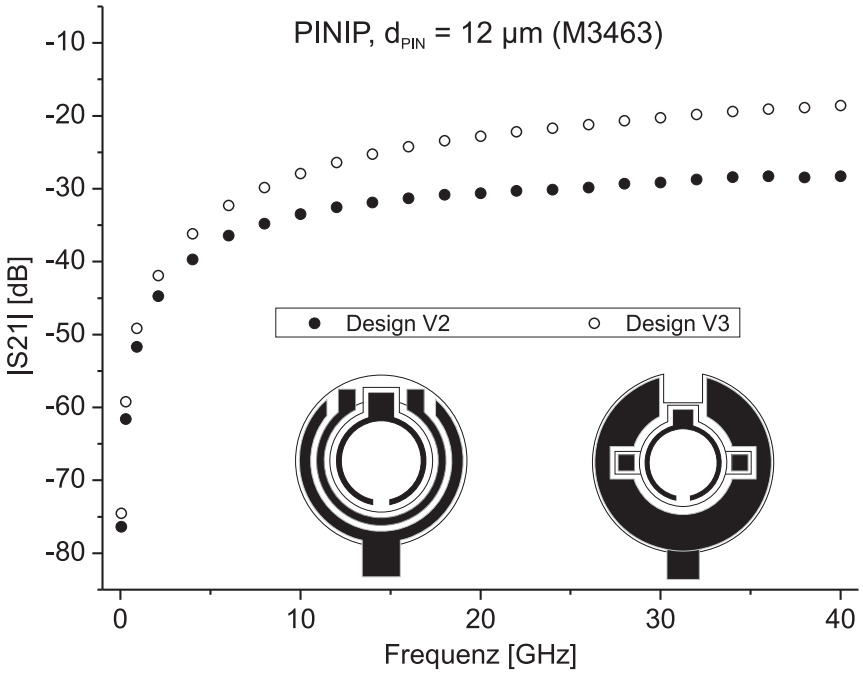


Abb. 5.25: Gemessene Verläufe des Betrages des Transmissionsparameters S21 eines PINIP-Detektors für zwei verschiedene Bauelementdesigns

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anders als beim optischen Übersprechen, kann beim elektrischen Crosstalk eine Abhängigkeit vom gewählten Bauelementdesign festgestellt werden. Speziell ist hier die Ausbildung der mittleren Kontaktmetallisierung gemeint, welche beim Design V2 das Bauelement nahezu komplett umschließt und beim Design V3 nur punktuell ausgebildet ist.
In Abbildung 5.25 sind gemessene Transmissionsparameter S21 zweier 12 µm PINIP-Detektoren dargestellt, welche auf derselben Probe vorhanden sind. Design V3 besitzt zu hohen Frequenzen eine um bis 10 dB höhere Transmission als das Bauelement mit der umschließenden mittleren Kontaktmetallisierung. Die punktuelle Strukturierung der mittleren Metallisierung führt zu einem höheren Serienwiderstand R_S innerhalb der mittleren Kontaktschicht und damit zu einer Vergleichsweise schlechteren Ankopplung zum Massepotential.

Zusammenfassend lässt sich formulieren, dass das vom Bauelementdesign unabhängige optische Übersprechen bei den untersuchten Schichtstrukturen klar dominiert und für Schaltungsapplikationen berücksichtigt werden muss. Optimierungsansätze durch das Schichtdesign sind wegen der Topologiebegrenzung an dieser Stelle nicht praktikabel. Das elektrische Übersprechen spielt für die angepeilten Betriebsfrequenzen der Schaltungen von etwa 5 GHz zwar eine untergeordnete Rolle, wobei auf Grund der erzielten Ergebnisse die PINIP-Schichtfolge im Bauelementdesign V2 für den Schaltungseinsatz favorisiert wird.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.3.7 Messung des Frequenzgangs am gestapelten Photodetektor

Der Frequenzgang für das favorisierte Design V2 wurde mittels des in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Messaufbaus bestimmt.

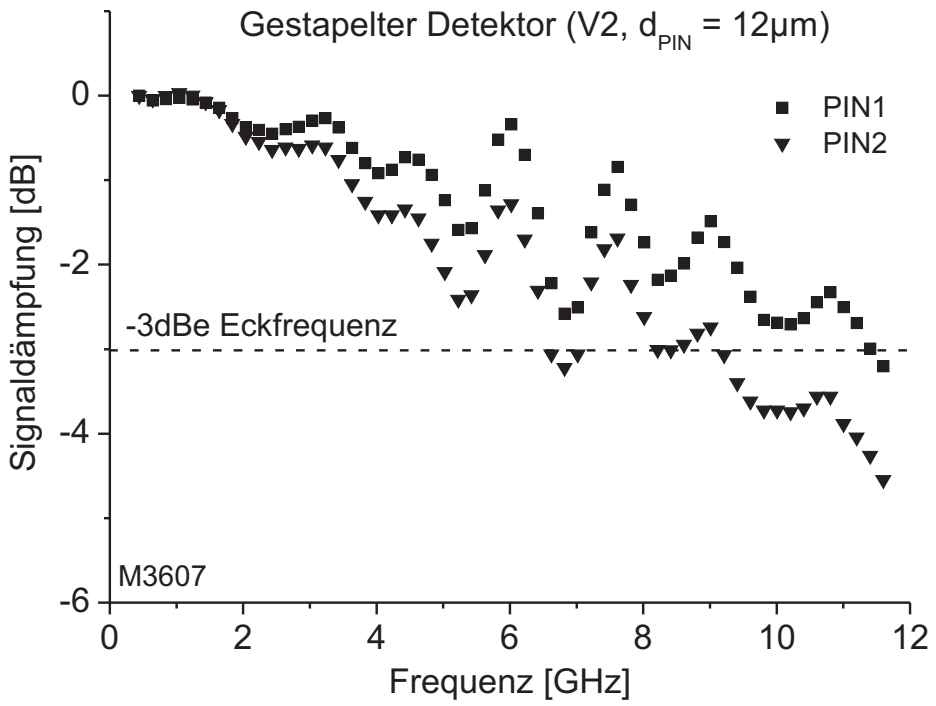


Abb. 5.26: Gemessener Frequenzgang eines PINIP-Detektors im Design V2 und d_{PIN} = 12 µm für beide PIN-Dioden

In Abbildung 5.26 sind die Messergebnisse für den kleinsten untersuchten aktiven Durchmesser dargestellt. Die Messung bescheinigt diesem Bauelement eine Grenzfrequenz von etwa 10 GHz, wobei die Bandbreite der unteren Diode PIN_2 auf Grund der höheren Kapazität niedriger ist. Da sichergestellt werden kann, dass das optische Signal mittels einer gelensten Faser komplett in ein Element dieser Abmessungen eingekoppelt werden kann und das Design unempfindlich gegenüber Streulicht ist, bildet dieser Detektor die Grundlage für die untersuchten Schaltungsapplikationen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.3.8 Modellierung des gestapelten Photodetektors

Für eine rechnergestützte Schaltungsentwicklung unter Verwendung des gestapelten Photodetektors ist dessen Modellierung ausgehend von realisierten Bauelementen notwendig.

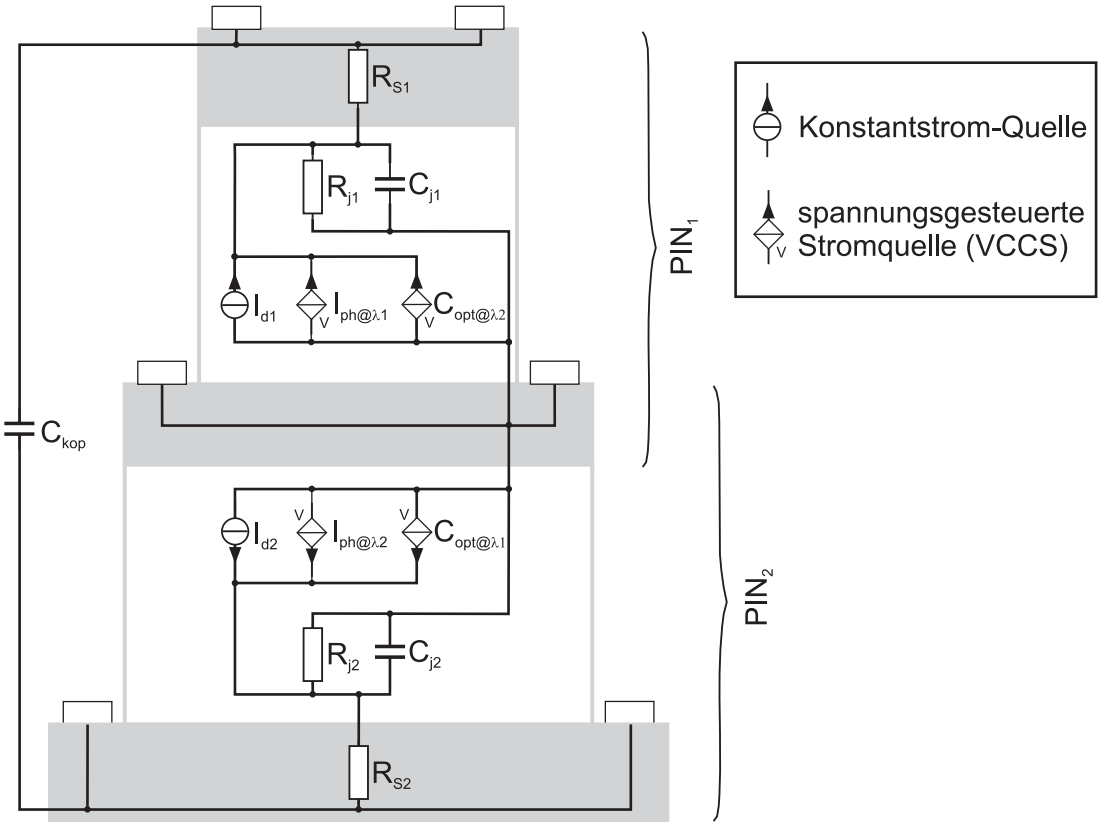


Abb. 5.27: Elektrisches Ersatzschaltbild eines gestapelten PINIP-Photodetektors für den Betrieb in Sperrrichtung

Da sich eine Bauelementmodellierung beliebig komplex gestalten lässt, sollte zunächst die Frage geklärt werden, ob ein Kleinsignalmodell genügt oder ob für die angestrebte Applikation ein Grosssignalmodell erforderlich ist. Des Weiteren muss definiert werden, welche Eigenschaften des Bauelements das Modell mit welcher Genauigkeit berücksichtigen soll. Im Falle der PIN-Diode als Photodetektor ist ausschließlich der Rückwärtsbetrieb von Interesse, so dass das nichtlineare Verhalten des Bauelements in Flussrichtung nicht relevant ist. Für spätere Schaltungssimulationen bedeutet dies, dass keine positiven Bias-Spannungen am gestapelten Photodetektor zulässig sind. Da die angepeilte Anwendung auf einen digitalen Betrieb mit Spannungsamplituden von mehreren hundert mV abzielt,

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

ist die Gültigkeit des Models in diesem Arbeitspunktbereich sicherzustellen (vgl. Kapitel 5.3.8.2).
In Abbildung 5.27 ist ein Ersatzschaltbildnetzwerk mit einer qualitativen örtlichen Zuordnung der einzelnen Elemente im gestapelten Detektor gezeigt. Das passive frequenzabhängige Verhalten wird für jede PIN-Diode separat durch das bereits in Kapitel 2.1.6 vorgestellte Netzwerk (vgl. Abbildung 2.6) modelliert. Bei DC und niedrigen Frequenzen bestimmt der hochohmige Sperrschichtwiderstand R_j das Verhalten und wird zu höheren Frequenzen durch die Reihenschaltung aus Sperrschichtkapazität C_j und Serienwiderstand R_S dominiert.
Parallel zu den beiden Sperrschichtelementen R_j und C_j sorgen Stromquellen für die entsprechende Berücksichtigung der im Bauelement auftretenden Ladungsbewegungen mit einer Ausrichtung der technischen Stromrichtung zu den p-Kontaktschichten hin. Hierbei wird der Dunkelstrom durch eine unabhängige Stromquelle eingeprägt. Mangels entsprechender Elemente in den gängigen Simulationsprogrammen werden für optisch generierte Ströme lineare spannungsgesteuerte Stromquellen (VCCS) herangezogen. Der durch sie generierte Strom gehorcht der Beziehung

$$I_{VCCS} = G \cdot U_{VCCS}, \tag{5.6}$$

mir dem Übertragungsleitwert G als Proportionalitätsfaktor. In Anlehnung an die Beziehung für die Empfindlichkeit

$$I_{ph} = R \cdot P_0, \tag{5.7}$$

kann somit die ermittelte Bauelementresponsivity R durch den Übertragungsleitwert G und die eingestrahlte optische Leistung P_0 durch die Steuerspannung V_{VCCS} modelliert werden. Somit erhält PIN1 und PIN2 jeweils eine spannungsgesteuerte Stromquelle I_{ph}, welche die Responsivity bei der entsprechend gewünschten Wellenlänge berücksichtigt. Um dem optischen Übersprechen im Modell Rechnung zu tragen, enthalten beide PIN-Dioden jeweils eine weitere spannungsgesteuerte Stromquelle C_{opt}, welche die Generation von Photostrom durch die jeweils unerwünschte Wellenlänge anteilsmäßig berücksichtigt (Crosstalk).
Um die gegenseitige Beeinflussung beider Elemente in Form des frequenzabhängigen elektrischen Übersprechens abzubilden, genügt die kapazitive Kopplung beider PIN-Elemente über C_{kop}. Diese einfache Methode genügt einer sehr guten Anpassung an die real ermittelten Werte.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.3.8.1 Bestimmung der Ersatzschaltbildelemente

Für die quantitative Bestimmung der Ersatzschaltbildelemente sind Messungen an hergestellten Bauelementen notwendig. Mit Hilfe von I(U)-Messungen lassen sich aus dem Rückwärtsbetrieb die Dunkelströme bestimmen und aus dem Vorwärtsbetrieb bei entsprechend hohen Strömen der Serienwiderstand R_S extrahieren. Für eine möglichst exakte Messung der Dunkelströme ist der Messplatz gegen Tageslicht und Raumbeleuchtung abgeschottet. Die Messung der Responsivity beider Dioden, sowohl bei λ_1 als auch bei λ_2, liefert die notwendigen Daten für die Modellierung der spannungsgesteuerten Stromquellen I_{ph} und C_{opt}.

Das frequenzabhängige passive Verhalten des gestapelten Photodetektors wird mittels der Streuparamteranalyse bestimmt (vgl. Kapitel 4.1). Hierbei ist das Bauelement innerhalb der Messumgebung so orientiert, dass die DC-Arbeitspunkte für PIN1 und PIN2 unabhängig voneinander gewählt werden können. Mit Hilfe der Simulationssoftware Advanced-Design-System (ADS) der Firma Agilent kann nun das Verhalten des passiven Netzwerkes aus Abbildung 5.27 an die gemessenen Streuparameter unter Verwendung eines Gradientenoptimierungsverfahrens [21] angepasst werden.

Um hierbei eine möglichst gute Abbildung des intrinsischen Bauelements zu erhalten, wird der Streuparametermessplatz vor Beginn der Messung kalibiriert, d. h. die parasitären Einflüsse der Messplatzhardware (Kabel, Messnadeln etc.) werden mittels geeigneter Kalibrationsstrukturen messtechnisch bestimmt und die Messungen an Bauelementen später entsprechend korrigiert. Bei diesem Verfahren wird eine Kalibration des Messplatzes bis zu den Spitzen der koplanaren Messnadeln erreicht. Für den messtechnischen Zugriff auf Einzelbauelemente sind diese innerhalb einer Anordnung von metallischen Pad-Strukturen integriert, welche wiederum einen eigenen parasitären Einfluss auf die Messung ausüben. Sie müssen ebenfalls bei der Extraktion der intrinsischen Bauelementparameter berücksichtigt und herausgerechnet werden, da die Pad-Strukturen bei der Integration des gestapelten Detektors innerhalb einer Schaltungsanordnung nicht mehr vorhanden sind.

Hierfür wurde für die Anpassung das Ersatzschaltbild des gestapelten Detektors um das in Abbildung 5.28 gezeigte Netzwerk erweitert, welches sich für die Berücksichtigung des Pad-Verhaltens in Zweitorkonfiguration bei diversen Arbeiten im Fachgebiet als zweckmäßig erwiesen hat [46, 96]. Es berücksichtigt den kapazitiven, induktiven und ohmschen Einfluss der Pad-Anordnung ohne DUT. Eine Transmission des Signals zwischen den beiden Toren wird durch die Kapazität C_{io} berücksichtigt. Um eine quantitative Analyse dieser parasitären Pad-Elemente vornehmen zu können, und damit eine Einschränkung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

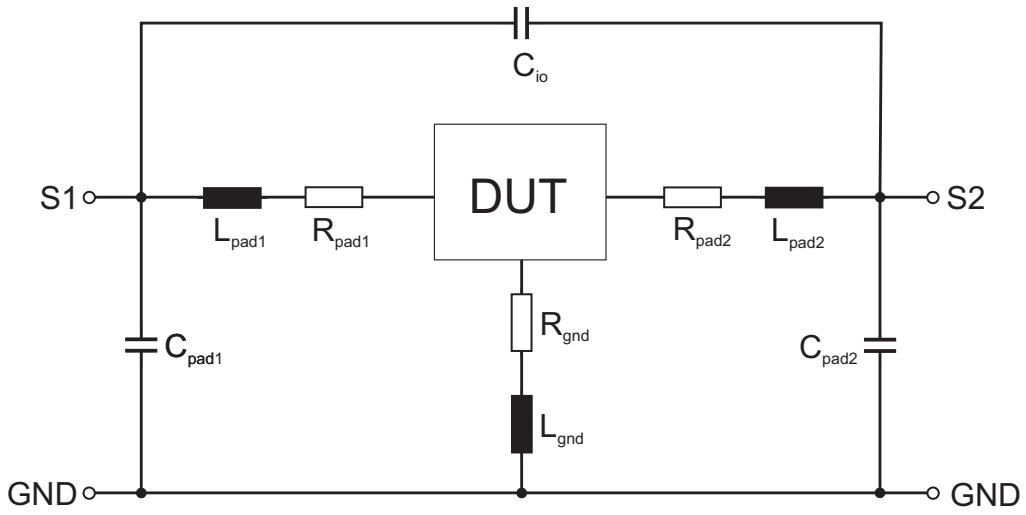


Abb. 5.28: Netzwerk parasitärer Elemente, welche der GSG-Kontaktstruktur zugeordnet werden

der Variablen bei der Modellanpassung zu erreichen, kann anhand der Messung von on-wafer Teststrukturen eine Bestimmung des Netzwerkes parasitärer Elemente vorgenommen werden [96]. Hierbei handelt es sich um reine Pad-Strukturen ohne Bauelement, welche entweder elektrisch durchverbunden (SHORT) oder definiert unterbrochen sind (OPEN).

Des Weiteren ist es sinnvoll, für die anzupassenden Elemente vor Beginn des Optimierverfahrens plausible Startwerte vorzugeben, um bei mehreren möglichen globalen Lösungen diejenige zu finden, welche einen sinnvollen physikalischen Bezug aufweist. Im Falle einer PIN-Diode handelt es sich insbesondere um R_S und C_j. Eine Vorgabe zum Serienwiderstand erhält man aus der Diodenkennlinie im Flussbereich. Die Sperrschichtkapazität kann mit Hilfe der Plattenkondensatorformel (vgl. Gl. 2.16) abgeschätzt werden. In Tabelle 5.9 sind die so bestimmten Ausgangswerte für die verschiedenen Bauelementgrößen und Versionen eines PINIP-Bauelements zusammengefasst. Beim Vergleich der Designs V2 und V3 bezüglich der Serienwiderstände fällt auf, dass R_{S2} unabhängig vom Design und Durchmesser nahezu konstant bleibt, während R_{S1} eine Designabhängigkeit aufweist. Ursächlich hierfür ist die Geometrie der mittleren Kontaktmetallisierung, welche bei V2 das Bauelement umschließt und bei V3 nur noch punktuell ausgebildet ist. Zwar ist der mittlere Kontakt in den Ladungstransport sowohl von PIN1 als auch PIN2 involviert, jedoch beinhaltet der Strompfad durch PIN1 innerhalb der mittleren Kontaktschicht eine

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

laterale Komponente zwischen der PIN1-Mesa und der mittleren Kontaktmetallisierung. Bezogen auf PIN2 ist hingegen ein Ladungstransport unmittelbar vertikal vom mittleren Kontakt zur unteren Kontaktschicht möglich. Der Einfluss der lateralen Engstelle für PIN1 fällt somit umso stärker ins Gewicht, je mehr der Querschnitt durch eine punktuelle Metallisierung (V3) reduziert wird. Die Sperrschichtkapazitäten für PIN1 sind bei allen drei Versionen dem Bauelementdurchmesser entsprechend identisch, da hier die nominell gleichen aktiven Flächen der Elemente ausschlaggebend sind. Die Kapazität von PIN2 wird von der aktiven Fläche zuzüglich dem in Kapitel 5.3.4 diskutierten Überstand A_{US} dominiert, so dass hier V3 den niedrigsten Wert aufweist, gefolgt von V2 und schließlich V1.
Ausgehend von dieser Vorbereitung wurden die passiven Elemente des Ersatzschaltbildes für die verschiedenen Versionen und Größen des gestapelten Detektors mit Hilfe des Optimierers angepasst. Die hierdurch gewonnenen absoluten Werte stimmen mit denen in Tabelle 5.9 gut überein.

Tab. 5.9: Startwerte für die Modellanpassung mit Hilfe eines rechnerbasierten Optimierverfahrens (M3607B)

Bauelement	$\mathbf{R}_{S1}$ **[Ω]**	$\mathbf{C}_{j1}$ **[fF]**	$\mathbf{R}_{S2}$ **[Ω]**	$\mathbf{C}_{j2}$ **[fF]**
V1, 21 µm	18	108	33	222
V2, 12 µm	22	57	33	103
V2, 21 µm	22	114	34	183
V2, 30 µm	21	195	31	289
V3, 12 µm	41	54	32	78
V3, 21 µm	43	112	35	146
V3, 30 µm	46	192	35	237

Abweichungen, vor allem zu den nominell berechneten Sperrschichtkapazitäten, lassen sich durch die Variation der Mesaflächen durch Unterätzung erklären. Außerdem liegt der Anpassung ein sehr einfaches Modell zu Grunde, welches für eine höhere Übereinstimmung erweitert werden kann [30].

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.3.8.2 Verifizierung des Modells

Wie bereits erwähnt, muss das Modell für die Simulation von Digitalschaltungen die Eigenschaften des gestapelten Photodetektors für eine Variation des Arbeitspunktes von mehreren 100 mV im negativen Spannungsbereich abdecken. Bei einer Resonanztunneldiode oder gar bei aktiven Elementen (Transistoren) wird deren grosssignalmäßige Modellierung durch das nichtlineare Übertragungsverhalten sehr erschwert. Anders verhält es sich bei PIN-Dioden für den Rückwärtsbetrieb. Unter der Voraussetzung einer Absorptionsschicht mit einer geringen Hintergrunddotierung findet bereits für den spannungslosen Fall eine vollständige Verarmung statt, so dass die Effizienz der optisch angeregten Ladungsträgergeneration bereits maximal ist.

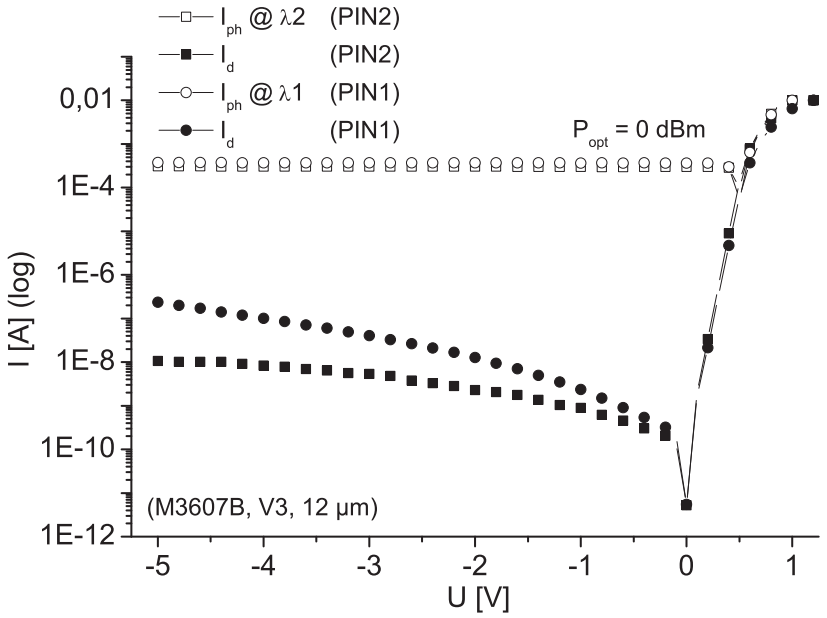


Abb. 5.29: Verlauf der Dunkel- und Photoströme in Abhängigkeit von der Bias-Spannung

In Abbildung 5.29 sind die DC-Kennlinien eines gestapelten Detektors mit und ohne Beleuchtung für PIN1 und PIN2 dargestellt. Es wird deutlich, dass der Photostrom bzw. die Responsivity bei einer Beleuchtungsleistung von 0 dBm für Bias-Spannungen ≤ 0 V

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

in einem weiten, für die geforderten Anwendungen ausreichenden Spannungsbereich nahezu konstant ist. Somit ist die Modellierung durch die entsprechenden spannungsgesteuerten Stromquellen mit einem spannungsunabhängigen Übertragungsleitwert gültig. Im Gegensatz dazu unterliegen die Dunkelströme einer deutlichen Abhängigkeit von der Bias-Spannung. Im Gegensatz zur Responsivity, welche sich durch eine sehr hohe Homogenität auszeichnet, kann die Streuung der Dunkelstöme auf einer Probe durchaus mehrere Größenordnungen betragen. Daher stellt in diesem Punkt eine Modellierung durch eine Konstantstromquelle nur eine Näherung dar. Diese ist aber im Zusammenhang mit einem Schwellwertgatter durchaus berechtigt. Ausgehend von der ermittelten Streuung der Dunkelströme wird für PIN1 und PIN2 ein maximal zulässiger Wert definiert, welcher in diesem Punkt eine ausreichend hohe Ausbeute ($\approx$ 90 %) zulässt. Für PIN1 beträgt dieser Wert $I_{d1,max}$ = 1 µA und PIN2 $I_{d2,max}$ = 100 nA. Somit lässt sich eine aussagekräftige Schaltungssimulation sicherstellen, denn das Schaltverhalten eines Schwellwertgatters wird von einem relativ zu $I_{d,max}$ kleineren Dunkelstrom nicht negativ beeinflusst.
Bezüglich der Abhängigkeit des Hochfrequenzverhaltens von der Bias-Spannung geben die in Abbildung 5.30 gezeigten Messungen Aufschluss. Hierbei wurde an jedem Tor die Bias-

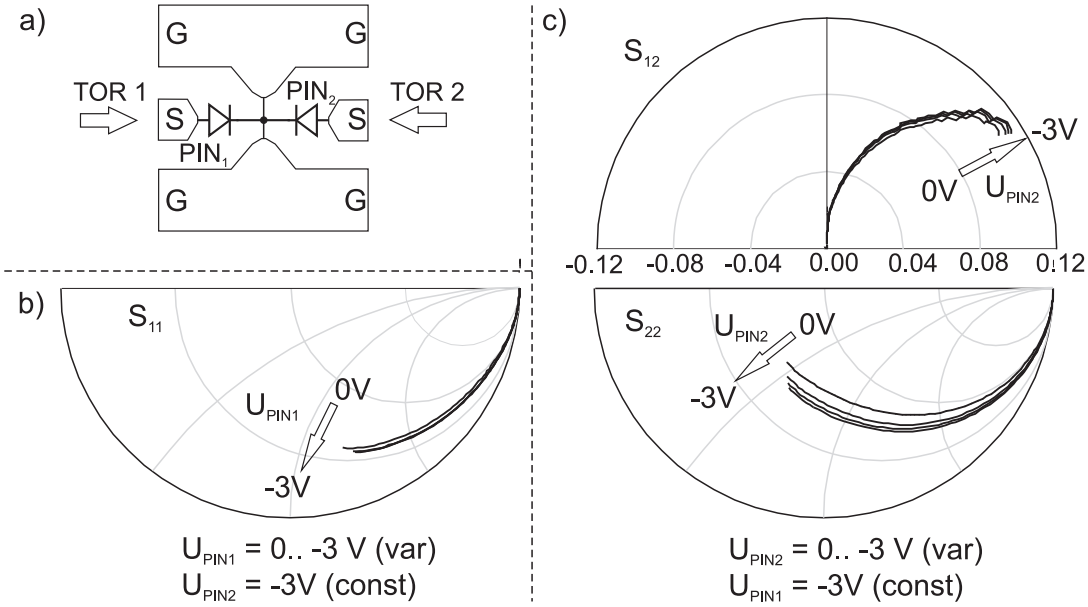


Abb. 5.30: a) Verschaltung des gestapelten Photodetektors innerhalb einer Zweitor-Padstruktur und gemessene arbeitspunktabhängige Streuparameter von b) PIN1 und c) PIN2

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Spannung von 0 V bis -3 V variiert, wobei das jeweils andere Tor bei einem konstanten Arbeitspunkt von -3 V gehalten wurde. Aus diesem Datensatz lässt sich der Einfluss des DC-Arbeitspunktes auf das passive Hochfrequenzverhalten beider PIN-Dioden studieren. Die beiden Reflektionsparameter S_{11} und S_{22} liefern entsprechend der Verschaltung in Abbildung 5.30 a) Aufschluss über die beiden PIN-Dioden selbst. Die durch die variierten Arbeitspunkte verursachten Änderungen der Verläufe sind nur marginal, jedoch lässt sich hieraus bei betragsmäßig steigender Bias-Spannung auf geringfügig sinkende Sperrschichtkapazitäten und steigende Serienwiderstände schließen. Physikalisch kann dieses Verhalten durch die sich in die hochdotierten Kontaktschichten ausbreitende Raumladungszone erklärt werden, was gleichbedeutend mit einer Vergrößerung des „Plattenabstandes“ und einer Reduktion der effektiven Kontaktschichtdicken ist. Auch das elektrische Übersprechen, repräsentiert durch S_{12}, ändert sich kaum. Es wächst mit betragsmäßig steigender Bias-Spannung geringfügig, was mit der zunehmenden Verarmung der mittleren Kontaktschicht einhergeht.

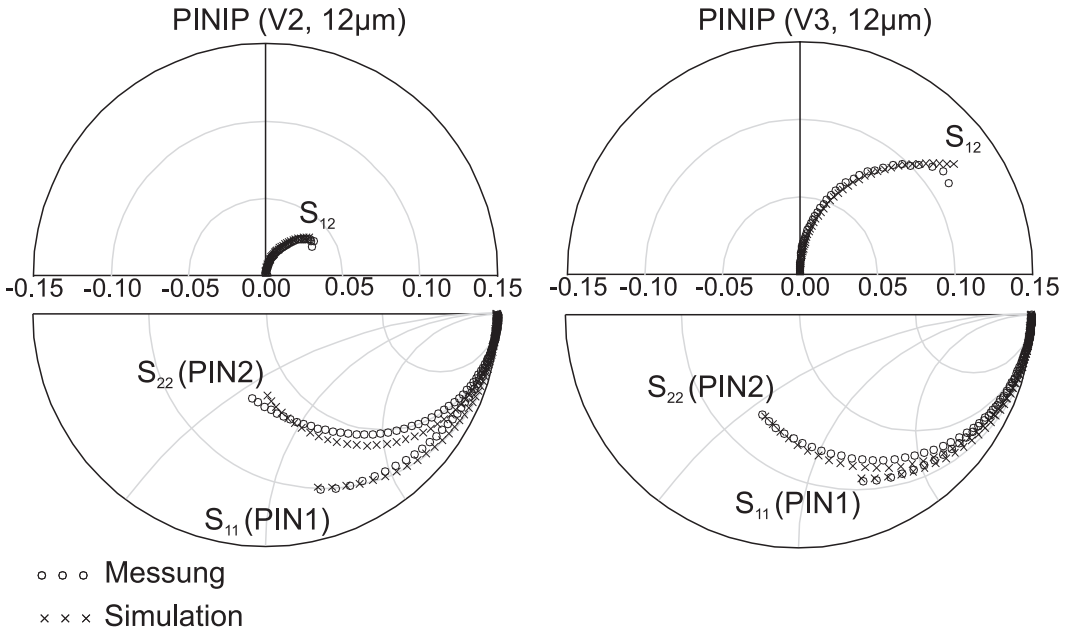


Abb. 5.31: Gemessene und durch Simulation modellierte Streuparameter eines 12 µm PINIP-Elements in den Layoutversionen V2 und V3

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Eine Gegenüberstellung der gemessenen und modellierten Streuparameter zeigt Abbildung 5.31 für 12 µm Bauelemente, welche auf Grund der kleinsten RC-Zeitkonstanten für den Schaltungseinsatz bevorzugt werden. Die Streuparameter sind in einem Frequenzbereich von 45 MHz bis 40 GHz bei Bias-Spannungen beider Dioden von -2 V aufgenommen. Es wird deutlich, dass das elektrische Übersprechen anhand der Modellierung des Transmissionsparameters S_{12} durch die Koppelkapazität C_{kop} gut gelungen ist. Die Beschreibung der beiden PIN-Dioden selbst anhand der Anpassung der Reflektionsparameter S_{11} und S_{22} ist ebenfalls zufriedenstellend. Lediglich der Verlauf von S_{22} der Bauelementversion V2 weist eine etwas stärkere Abweichung auf, was für die Modellbildung an dieser Stelle jedoch noch toleriert wurde.
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die relevanten Parameter einer in Sperrrichtung betriebenen PIN-Diode nahezu unabhängig vom Arbeitspunkt sind. Daher ist das Modell, welches über eine Anpassung der Streuparameter in einem einzigen Arbeitspunkt erstellt wurde, für die digitale Schaltungssimulation einsetzbar.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

5.4 Direkt kontaktierte sub-µm Resonanztunneldiode mit hoher Strukturtreue

Die Anforderungen an die Prozesstechnologie der für ein optisch gesteuertes MoBiLE-Gatter verwendeten RTDs liegen unter anderem in der möglichst präzisen Einhaltung der nominellen aktiven RTD-Fläche A_{RTD}, welche durch den oberen RTD-Kontakt vorgegeben wird. Hierdurch wird ein möglichst kleiner Flächenunterschied zwischen der Treiber- und der Last-RTD realisierbar, was den notwendigen Steuerstrom am Eingang der Gatters I_{steuer} reduziert. Hierdurch steigt die Empfindlichkeit des Gatters. Zum anderen sind im Hinblick auf die Leistungsaufnahme des MoBiLE-Gatters RTDs mit möglichst geringen absoluten Strömen interessant, so dass eine Skalierung der aktiven Fläche zu kleinen Werten hin prozesstechnisch wünschenswert ist.
In diesem Zusammenhang behandelt dieses Kapitel die Weiterentwicklung des im Fachgebiet verwendeten Bauelementdesigns und der entsprechenden Prozesstechnologie. Basierend auf den Arbeiten zur direkten Kontaktierung von HBTs in [22] wurde diese Technologie im Rahmen dieser Arbeit auf den RTD-Prozess übertragen.

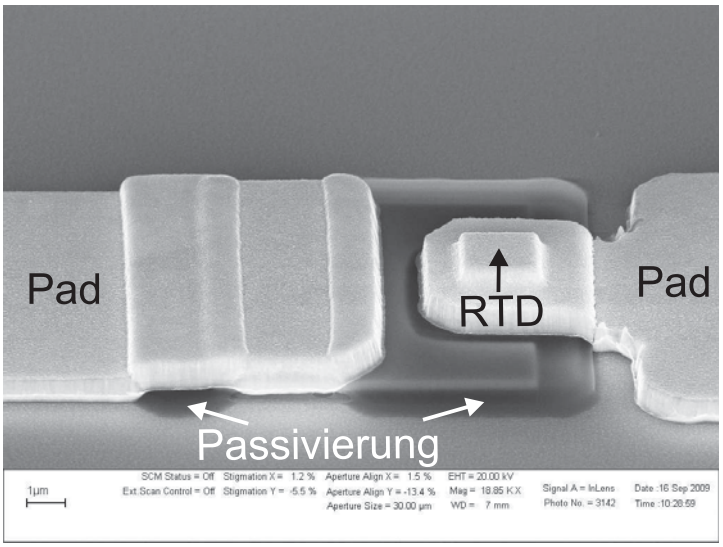


Abb. 5.32: Rasterelektronenaufnahmen einer RTD gefertigt mit Hilfe einer Technologie zur direkten Kontaktierung

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Hierbei wird zum präzisen Übertrag der Ätzmaskierung in den Halbleiter ein hochgradig isotroper, trockenchemischer Prozess angewendet, welcher für sehr kompakte Bauelemente mit aktiven Flächen im Submikron-Bereich geeignet ist. Eine Rasterelektronenaufnahme einer entsprechend hergestellten RTD ist in Abbildung 5.32 zu sehen.
Der bisher zur Herstellung von RTDs eingesetzte Prozess basierte auf der Kontaktierung der intrinsischen Bauelementstruktur über sogenannte „Dummy-Mesen“. Diese waren in der Vergangenheit notwendig, da die Justagetoleranzen während der optischen (Kontakt-)Lithografie höher sind als die intrinsischen Bauelementabmessungen. Dummy-Mesen verlagern und vergrößern die Kontaktflächen außerhalb des intrinsischen Bereichs und machen das Design damit unempfindlicher gegen Fehljustagen, was sich allerdings nachteilig auf den Platzbedarf des Bauelements auswirkt. Außerdem ist durch eine gezielte Unterätzung eine vollständige Entfernung des Halbleitermaterials unter dem Verbindungssteg zwischen der Dummy-Mesa und der intrinsischen RTD notwendig, um eine klare Definition der aktiven Fläche A_{RTD} zu erreichen. Gerade dieser Punkt bereitet technologisch Schwierigkeiten, da sich eine reproduzierbare Unterätzung mit derart hohen Anforderungen speziell für Elemente mit sehr kleinen aktiven Flächen schwer realisieren lässt.

5.4.1 Prozesstechnologie direkt kontaktierter RTDs

Das für die RTDs verwendete Schichtpaket wurde bereits im Grundlagenkapitel in Abbildung 2.8 eingeführt. Der Prozessablauf der direkt kontaktierten RTD ist in Tabelle 5.10 zusammengefasst. Er besteht im Wesentlichen aus der Definition der oberen und der unteren Kontaktstruktur sowie den entsprechenden Mesaätzungen (Schritte 1 und 2). Es folgt eine Passivierung des Bereichs um die obere RTD-Mesa mit einem photosensitiven Polymer. Nach seiner Strukturierung wird das Polymer mittels eines O_2-Plasma Veraschungsprozesses so lange vertikal abgetragen, bis der obere RTD-Kontakt freigelegt ist. Gleichzeitig wird in diesem Prozessschritt ein weiterer Bereich mit dem Polymer abgedeckt, welcher die Aufgabe hat, den Topologiesprung zum unteren RTD-Kontakt zu entschärfen (Schritt 3). Es folgt der finale Kontaktierungsschritt des Bauelements, bei welchem die Verbindungsmetallisierung auf die beiden bereits vorhandenen RTD-Kontakte aufgebracht werden muss (Schritt 4). Durch die zuvor vorgenommene Passivierung besteht keine Gefahr eines Kurzschlusses der RTD-Struktur. Diese hohe Prozesssicherheit macht sogar eine problemlose Kontaktierung von Submikron-RTDs möglich, da die Di-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

mensionierung der Verbindungsmetallisierung am oberen Kontakt in Abstimmung mit der Passivierung beliebig groß gestaltet werden kann.

Tab. 5.10: Prozessablauf einer direkt kontaktierten Resonanztunneldiode

Schritt	Layout	Querschnitt	Erläuterung
1			Metallisierung des oberen RTD-Kontakts und anisotrope Ätzung der oberen RTD-Mesa (Plasmaätzung)
2			Metallisierung des unteren RTD-Kontakts und Ätzung der unteren Mesa
3			Passivierung des Bereichs um die obere Mesa mit einem Polymer (Durimide®)
4			Direkte Kontaktierung der intrinsischen Bauelementbereiche

Der obere RTD-Kontakt dient bei der ersten Mesa-Atzung als Maskierung, so dass seine Strukturierung den Ausgangspunkt für die Definition der aktiven RTD-Fläche bildet. Seiner Strukturierung muss daher, vor allem für sehr kleine Abmessungen, besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Untersucht wird die Definition mittels der optischen Lithografie, oder alternativ der Elektronenstrahlbelichtung (Ebeam). Die untersuchten Designs des oberen Kontaktes weisen eine quadratische Geometrie mit Kantenlängen von 0,75 µm, 1 µm, 2 µm und 2,5 µm auf. In Abbildung 5.33 sind Lichtmikroskopaufnahmen von metallisierten Kontaktstrukturen dargestellt, wobei die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Strukturabmessung und vom gewählten Lihografieverfahren direkt miteinander verglichen werden können. Bezüglich der optisch belichteten Strukturen lässt sich feststellen, dass das Design mit der kleinsten Kantenlänge von 0,75 µm durch dieses Verfahren nicht mehr aufgelöst wird. Die nächstgrößeren Strukturen sind zwar vorhanden, jedoch

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

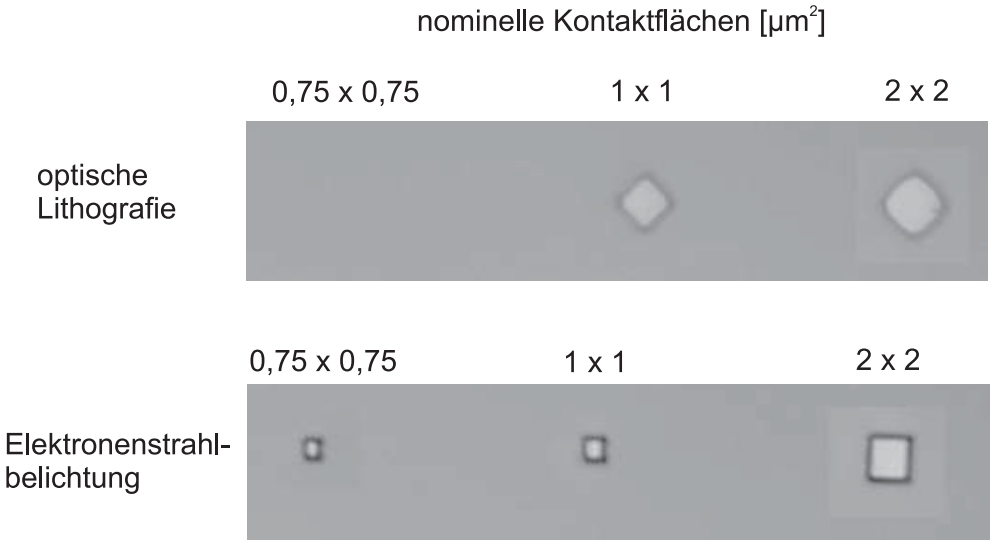


Abb. 5.33: Nicht maßstäbliche Lichtmikroskopaufnahmen nach dem Prozess der oberen RTD-Kontakte verschiedener Abmessungen mit Hilfe der optischen Lithografie (oben) und der Elektronenstrahlbelichtung (unten)

nicht vollständig. Durch Beugungseffekte kommt es zur destruktiven Interferenz in den Ecken der ursprünglich quadratischen Struktur, so dass nach der Entwicklung des Photolacks und der folgenden Metallisierung rautenförmige Kontakte vorhanden sind. Entsprechend stimmt die aktive RTD-Fläche nicht mehr mit der nominellen überein. Erfahrungsgemäß können mittels der verwendeten optischen Lithografie Strukturen mit einer Geometrie ab etwa 1x5 μm^2 maßhaltig von der Maske übertragen werden. Im Gegensatz zur optischen Lithografie erreicht man einen hochpräzisen Strukturübertrag in das Ebeam-Resist (Polymethylmethacrylat, PMMA). Die im Fachgebiet vorhandene Elektronenstrahlbelichtung ist in der Lage, Strukturen bis hinab zu 0,25 µm aufzulösen. Für den Prozess der strukturtreuen RTDs bedeutet das, dass für den kritischen Prozess der oberen RTD-Kontakte mit kleinsten Abmessungen ausschließlich die Elektronenstrahlbelichtung in Frage kommt.

Die Ätzung der oberen Mesa durch die Quantenbrunnenstruktur bis hinab auf die untere Kontaktschicht mit dem oberen Kontakt als Ätzmaske ist ein weiterer kritischer Schritt. Bei Verwendung eines nasschemischen Prozesses kommt es zu einer kristallrichtungsabhängigen Unterätzung der Ätzmaske, was entsprechend den Querschnitt mindert. Hinzu kommt, dass die Unterätzung mit der erforderlichen Ätztiefe variiert, so dass eine Modifi-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

kation des Schichtpaketes gleichzeitig eine Auswirkung auf die Abweichung der effektiven von der nominellen aktiven Fläche hat. Einen Ausweg bietet hier die Nutzung eines anisotropen trockenchemischen Ätzprozesses. Im Folgenden werden die Auswirkungen der nasschemischen im Vergleich zur trockenchemischen Mesastrukturierung auf die Bauelementdaten vorgestellt.

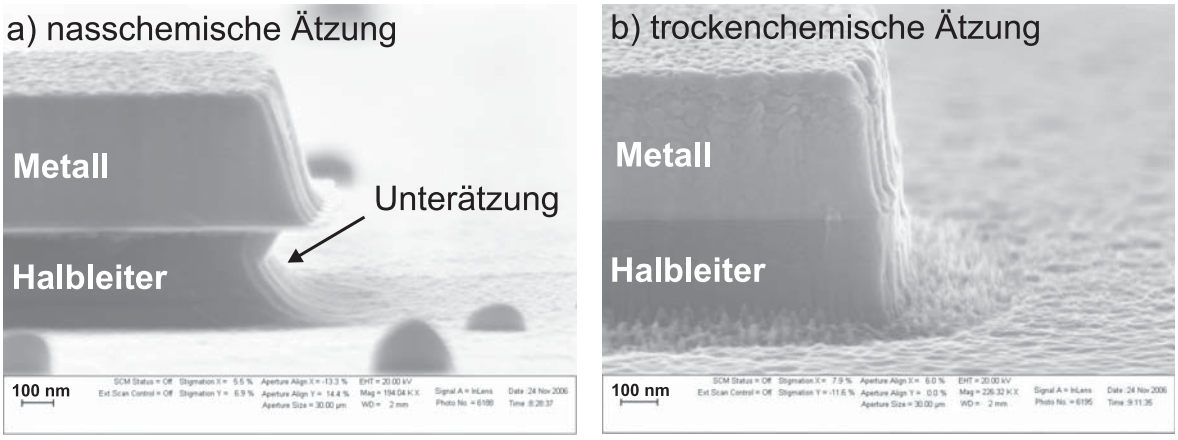


Abb. 5.34: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen a) nasschemisch und b) trockenchemisch geätzter RTD-Mesen

In Abbildung 5.34 sind die Ätzprofile von entsprechend geätzten Mesen gegenübergestellt. Die nasschemische Ätzung erfolgte mittels einer H_3PO_4:H_2O_2:H_2O (1:1:25) Ätze. Die Trockenätzung wurde mit einer Oxford RIE-ICP Anlage unter Verwendung von Chlor und Stickstoff als Prozessgase durchgeführt (vgl. Kapitel 3.1.1). Um die Selektivität zu erhöhen, wird auf die standardmäßige Ti/Pt/Au (10/10/300 nm) Schichtfolge des oberen Kontaktes zusätzlich 20 nm Nickel aufgedampft. Die entsprechenden Prozessparameter sind in Tabelle 5.11 angegeben.

Tab. 5.11: RIE-ICP Parameter zur isotropen Ätzung der oberen RTD-Mesa

P_{ICP}	P_{RF}	p_{strike}	$p_{prozess}$	Cl_2/N_2	T	t
150 W	50 W	45 mTorr	6 mTorr	4/36 sccm	170 °C	100 s

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die unterschiedliche Ausprägung des Ätzprofils ist deutlich zu erkennen. Während die nasschemisch strukturierte Probe eine Unterätzung von etwa 200 nm aufweist, findet trockenchemisch mit den angegebenen Parametern ein sehr präziser Übertrag der Maske in den Halbleiter mit senkrechten Flanken statt. Die Auswirkungen der Unterätzung auf die Bauelementparameter sind in Abbildung 5.35 zu sehen.

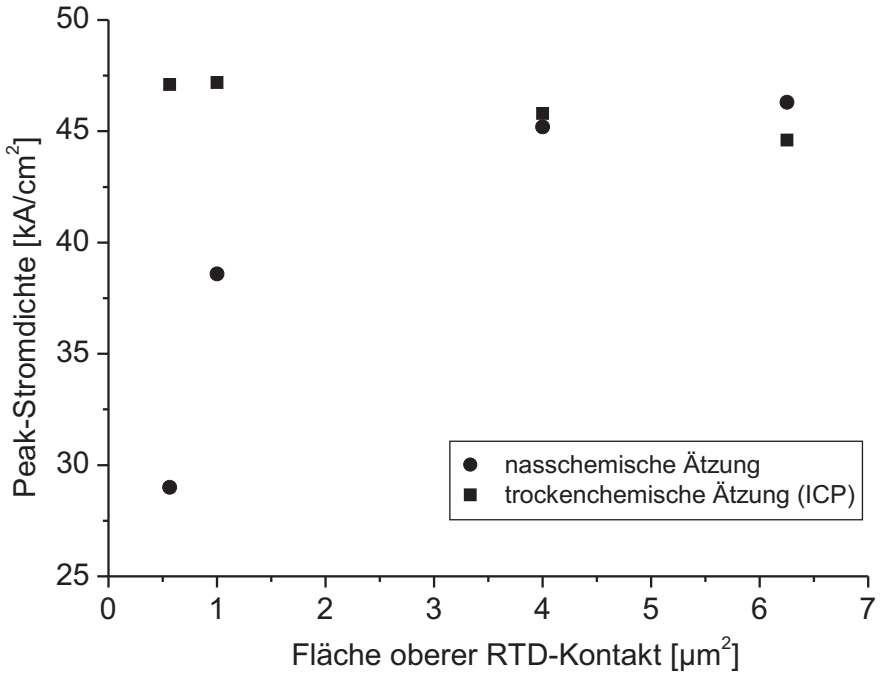


Abb. 5.35: Ermittelte Peak-Stromdichten hergestellter RTDs in Abhängigkeit von der oberen quadratischen Kontaktfläche und der eingesetzten vertikalen Strukturierungstechnologie

Ausgehend von den nominellen aktiven RTD-Flächen sind hier die gemessenen und anschließend normierten Peak-Stromdichten für beide Technologien aufgetragen. Die trockenchemisch geätzte Probe ohne Unterätzung weist für alle Bauelementabmessungen eine Peak-Stromdichte von etwa 45 kA/cm^2 auf. Die nasschemisch strukturierte Probe hingegen weicht für die beiden Kantenlängen 0,75 µm^2 und 1 µm^2 von diesem Wert nach unten hin ab. Das bedeutet, dass für diese Abmessungen die durch die Unterätzung begründete

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Abweichung von der nominellen Fläche ins Gewicht fällt und für entsprechend größere Bauelemente von untergeordneter Bedeutung ist.
Ausgehend von diesen Ergebnissen wird für den Schaltungsprozess die vertikale Strukturierung der oberen RTD-Mesa der RIE-ICP Prozess auf Grund der hervorragenden Skalierbarkeit vorgezogen.

5.4.2 MoBiLE-Gatter mit minimiertem Steuerstrom I_d

Wie zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, ist ein gut kontrollierbarer RTD-Prozess notwendig im Hinblick auf die Optimierung der Empfindlichkeit und der Leistungsaufnahme eines MoBiLE-Gatters. Aus diesem Grund wurden MoBiLE-Testschaltungen mit dem zuvor beschriebenem Prozess hergestellt, bei welchen die RTD Abmessungen und die Flächendifferenz zwischen Treiber- und Last-RTD minimal ausgelegt wurden.

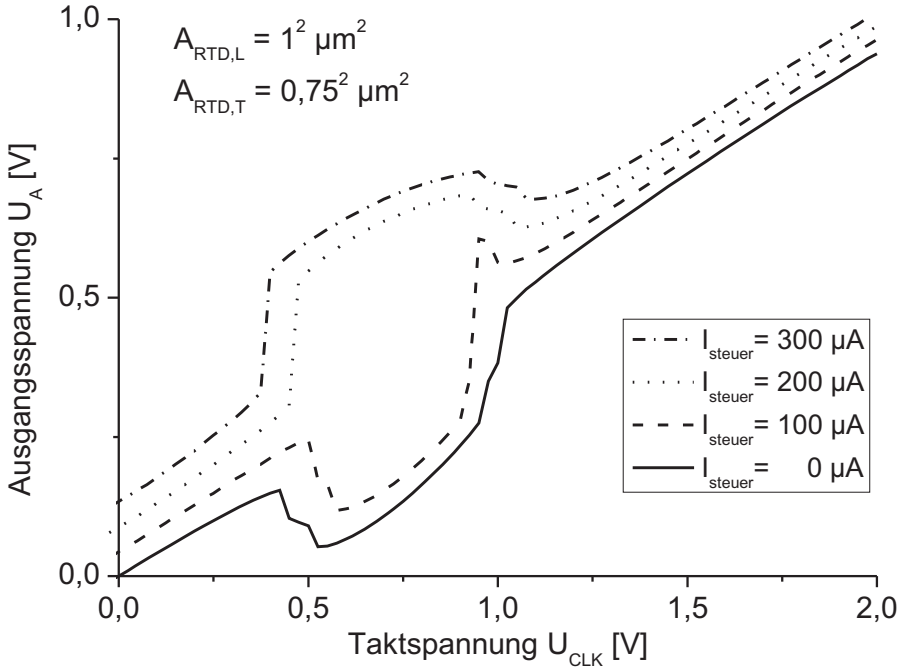


Abb. 5.36: Bifurkationskurve eines trockenchemisch hergestellten MoBiLE-Gatters mit sub-µm Abmessungen der Treiber-RTD

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

In Abbildung 5.36 ist eine gemessene Bifurkationskurve eines MoBiLE-Gatters mit $A_{RTD,L}$ = 1 µm^2 und $A_{RTD,T}$ = 0,56 µm^2. Ausgehend von einer nominellen Flächendifferenz von 0,44 µm^2 liegt die Schaltschwelle mit der zuvor bestimmten Peak-Stromdichte von 45 kA/cm^2 bei knapp 200 µA. Dieser Wert wird durch die Messung bestätigt, d.h. bis zu einem Steuerstrom von 100 µA schaltet der Gatterausgang in den niedrigen logischen Pegel und ab 200 µA entsprechend in den anderen. Ausgehend von einer Responsivity von 0,3 A/W des gestapelten Detektors (vgl. Tabelle 5.7) liegt die optische Schaltschwelle eines solchen Gatters bei lediglich P_{opt} = 0,7 mW.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

6 Optoelektronische Empfängerschaltungen

Dieses Kapitel befasst sich mit Applikationsschaltungen des gestapelten Photodetektors und der trockenchemisch prozessierten Resonanztunneldiode hoher Strukturtreue (vgl. Kapitel 5). Hierbei handelt es sich zum einen um ein vollständig optisch gesteuertes MoBiLE-Gatter und zum anderen um einen MoBiLE-basierten Demultiplexer, welcher in der Lage ist, parallel ankommende Daten auf zwei unterschiedlichen Wellenlängen zu verarbeiten (λt-DEMUX).

6.1 Integrationskonzepte unter Berücksichtigung der Transistortechnologie

Neben dem gestapelten Detektor und der RTD sind für die Realisierung der angestrebten Demonstratorschaltungen zusätzlich aktive Bauelemente notwendig. Prinzipiell stehen hier sowohl der npn-Heterostruktur- Bipolartransistor (HBT) als auch der Heterostruktur-Feldeffekttransistor (HFET) zur Verfügung. Für eine Entscheidung, welche Transistortechnologie Verwendung findet, müssen neben dem rein funktionellen Aspekt auch die technologischen Randbedingungen berücksichtigt werden. Hierzu zählen die epitaktische Integrierbarkeit der Halbleiterschichten aller drei Bauelemente, sowie die sich ergebende Topologie während der Prozessphase, resultierend aus der Gesamtschichtdicke aller aufgewachsenen Halbleiterschichten. Beide Punkte haben Einfluss auf die Qualität der hergestellten integrierten Schaltungen.

6.1.1 Integration mit Heterostruktur-Biplolartransistoren

Die Realisierbarkeit eines vollständig optisch gesteuerten MoBiLE-Gatters unter Verwendung von HBTs wurde in [46] anhand von Schaltungssimulationen untersucht. Die dort erzielten Ergebnisse berücksichtigen die begrenzten Absolutwerte der Photoströme, welche durch zwei diskrete Photodetektoren unter Laborbedingungen für optische Eingangsleisungen $P_0 < 10$ dbm zur Verfügung gestellt werden können. Allerdings ist das Kanalübersprechen, wie es in dem gestapelten Photodetektor auftritt, nicht in die Simulationsarbeiten eingeflossen. Bei diesem Konzept beinhaltet die vorgeschlagene Schaltung, neben den beiden MoBiLE-RTDs und zwei Photodetektoren, fünf Transistoren (HBT) und fünf Widerstände. Die Funktionalität der Schaltung konnte im Simulator bis zu einer Taktfrequenz von 1,5 GHz demonstriert werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

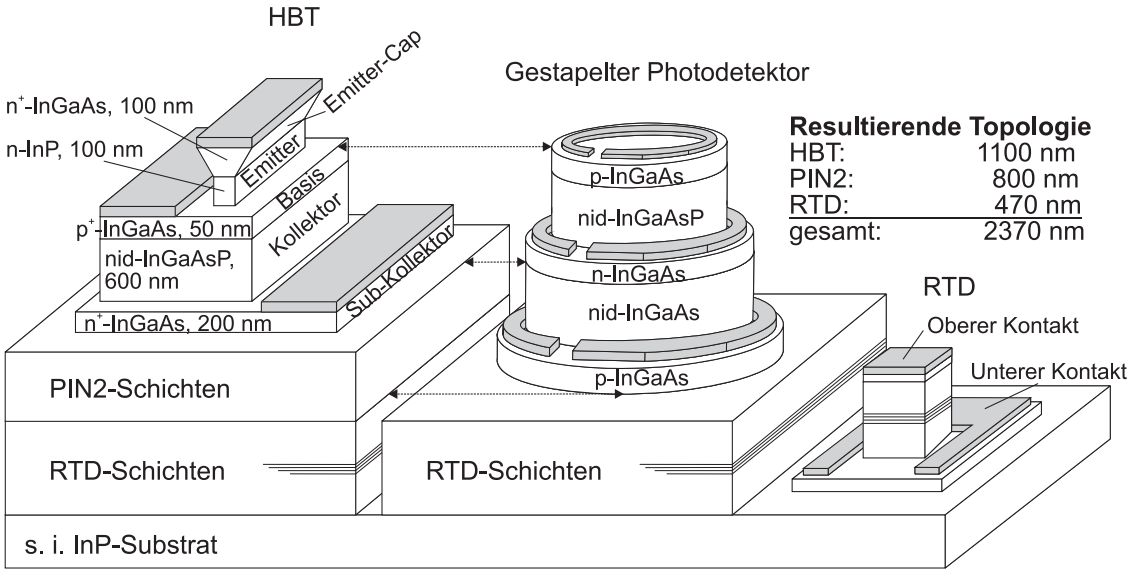


Abb. 6.1: Qualitatives Integrationskonzept für den gestapelten Detektor und für die RTD unter Verwendung von HBT als aktives Bauelement

In Abbildung 6.1 ist ein Integrationskonzept der Epitaxieschichten bei Verwendung eines HBTs dargestellt. Da sowohl der HBT mit 1,1 µm, als auch der gestapelte Detektor mit 1,6 µm bereits über sehr hohe Topologien verfügen, ist eine Realisierung dieser Elemente unter Verwendung von jeweils eigenen Schichtsequenzen aus technologischer Sicht nicht möglich. Zusammen mit der RTD ergäbe sich eine Gesamttopologie von über 3 µm. Deshalb ist eine gemeinsame Verwendung von Epitaxieschichten beim HBT und beim gestapelten Photodetektor, ein sogenanntes Schichtmerging, an dieser Stelle unumgänglich. Hierfür bietet sich auf Grund der sehr ähnlichen Schichtparameter die Zusammenlegung der Basis, Kollektor und Sub-Kollektor Schichten eines npn-HBTs mit den PIN1 Schichten des PINIP-Photodetektors an, so dass hierdurch die Topologie um etwa 850 nm entspannt wird. Um die beiden Bauelemente zu komplettieren, wird noch für den HBT der Emitter und zur ohmschen Kontaktierung der hochdotierte Emitter-Cap auf den gemeinsam genutzten Schichten benötigt. Für den gestapelten Detektor werden unterhalb der gemeinsamen Schichten der noch fehlende PIN2-Absorber sowie die untere p-InGaAs Kontaktschicht ergänzt.

Die beschriebene Zusammenlegung von Schichten bringt einige Einschränkungen beim Design der jeweiligen Bauelemente mit sich. So ist bei einer Festlegung auf eine npn-Bipolartechnologie automatisch die NIPIN-Schichtsequenz für den gestapelten Detektor

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

nicht möglich. Des Weiteren ist eine Optimierung des optischen Übersprechens über die Schichtdicke des oberen InGaAsP-Absorbers nicht mehr ohne weiteres möglich, da diese Maßnahme unmittelbar die Eigenschaften des HBTs durch die Änderung der Kollektorschichtdicke beeinflusst.
Zur Diskussion verbleibt die Platzierung der RTD-Schichten oberhalb oder unterhalb des HBT/Detektor-Schichtkomplexes. Im Rahmen eines weiteren Forschungsprojekts[19] im Fachgebiet, bei welchem die Integration von HBTs und RTDs ohne Photodetektor für Oszillatoranwendungen im Vordergrund steht, wurde der Einfluss der Wachstumsreihenfolge der beiden Bauelemente auf die Qualität bzw. Ausbeute der RTDs mit ihrer empfindlichen, nur wenige Nanometer dünnen Quantenbrunnenstruktur untersucht.

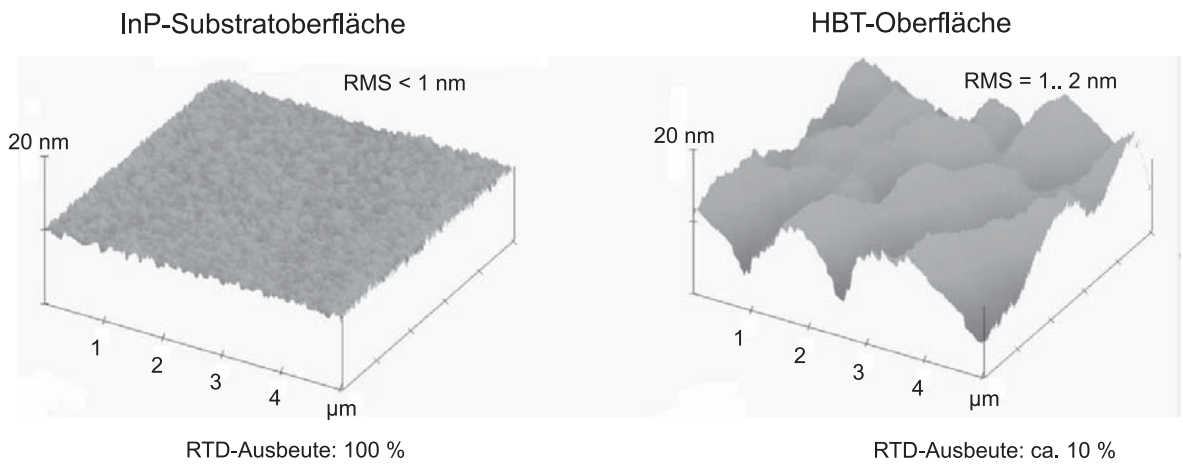


Abb. 6.2: Messung der Oberflächenrauigkeit (RMS) direkt auf einer InP-Substratoberfläche und auf HBT-Epischichten mittels des Rasterkraftmikroskops, sowie deren Korrelation mit der RTD-Ausbeute

Abbildung 6.2 zeigt 3D-Oberflächenscans mittels eines Rasterkraftmikroskops unmittelbar auf einem unbewachsenen InP-Substrat und auf Epitaxieschichten eines unprozessierten HBTs. Diese Untersuchung zeigt, dass die Oberflächenrauigkeit durch die Epitaxie eines HBTs deutlich zunimmt. Im quadratischen Mittel (RMS) werden auf dem HBT Werte von bis zu 2 nm bei einer maximalen Amplitude R_{max} von etwa 10 nm erreicht. Direkt auf einem InP-Substrat besitzt die maximale Rauigkeitsamplitude deutlich niedrigere Wer-

[19] RTD/HBT Kombinationsbauelemente für Oszillatoranwendungen für die Satellitenkommunikation im Ku- und Ka-Band, Förderkennzeichen 50 YB 0711

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

te von etwa 2 nm. Korreliert man diese Daten mit der Schichtdicke der funktionalen Barriere/Topf-Struktur einer RTD von 15 nm, so wird deutlich, dass die für den HBT ermittelten Rauigkeitswerte durchaus in der Lage sind, das flächig geschlossene Wachstum eines dünnen Quantenbrunnens negativ zu beeinflussen.
Um diese Aussage experimentell zu untermauern, wurden auf den Oberflächen aus Abbildung 6.2 nominell identische RTDs aufgewachsen, welche anschließend parallel prozessiert wurden. Bei der anschließenden messtechnischen Auswertung wurde die Ausbeute betreffend eine große Diskrepanz zwischen den beiden Proben festgestellt. Während bei einem Wachstum direkt auf dem InP-Substrat alle untersuchten Elemente eine charakteristische RTD I(U)-Kennlinie aufwiesen, konnten beim Wachstum auf dem HBT nur etwa 10 % funktionierende RTDs identifiziert werden. Die übrigen Elemente wiesen einen linearen Verlauf der I(U)-Kennlinie ohne NDR-Bereich auf, was durch eine laterale Unterbrechung des Quantenbrunnens erklärt werden kann.
Bei dem hier vorliegenden HBT/Detektor-Schichtpaket muss auf Grund der wesentlich höheren Gesamtschichtdicke von einer noch weitaus höheren Oberflächenrauigkeit ausgegangen werden. Entsprechend dem Konzept in Abbildung 6.1, kann die einzig sinnvolle Platzierung der RTD-Schichten unmittelbar auf dem Substrat sein.

6.1.2 Integration mit Heterostruktur-Feldeffekttransistoren

Die erfolgreiche Integrierbarkeit von MoBiLE-Gattern und diskreten PIN-Dioden mit Heterostruktur-Feldeffekttransistoren wurde sowohl durch Schaltungssimulation, als auch anhand von Demonstratorschaltungen in [21] gezeigt.
Ausgehend von diesem Integrationskonzept ist die Schichten- bzw. Bauelementabfolge unter Einbeziehung des gestapelten Photodetektors in Abbildung 6.3 dargestellt. Im Vergleich zur Integration mit einem HBT ist eine Kombination von Schichten zwischen zwei Bauelementen mangels ähnlicher Schichtparameter zwar nicht möglich, sie ist aber auch auf Grund der im Vergleich zum HBT deutlich geringeren Topologie des HFET mit 120 nm nicht erforderlich. So kann das Schichtdesign der drei Bauelemente unabhängig voneinander erfolgen und bietet damit eine größtmögliche Flexibilität bei einer um knapp 200 nm geringeren Gesamttopologie verglichen mit dem HBT-Konzept.
Die Wachstumsreihenfolge der einzelnen Bauelemente hingegen ist durch physikalische Randbedingungen strikt vorgegeben.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

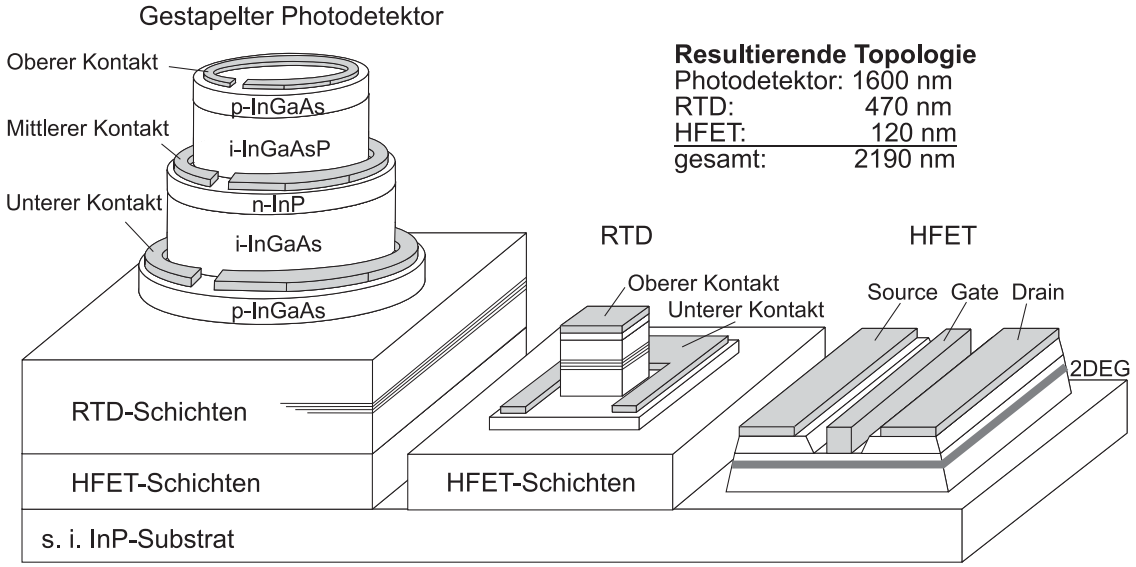


Abb. 6.3: Qualitatives Integrationskonzept für den gestapelten Detektor und für die RTD unter Verwendung von HFET als aktives Bauelement

Der HFET muss zwingend als erstes Element auf dem semi-isolierenden InP-Substrat gewachsen werden. Das Substratmaterial verfügt im Vergleich zu Epitaxieschichten über eine weitaus höhere elektrische Isolation, so dass hierdurch eine parasitäre Leitfähigkeit unterhalb des HFET verhindert wird. Als nächstes wird die gegenüber einer zu großen Oberflächenrauigkeit empfindliche RTD gewachsen (vgl. Kapitel 6.1.1). Da der HFET eine vergleichsweise geringe Schichtdicke besitzt, degradiert er die durch das Substrat vorgegebene Oberflächenrauigkeit nicht nennenswert. Schließlich wird auf den beiden Elementen der gestapelte Photodetektor aufgewachsen, welcher über keine sehr dünnen und damit kritischen Schichten verfügt. Sowohl der HFET, als auch die RTD besitzen keine mit Kohlenstoff dotierten p-InGaAs Schichten, so dass für diese Elemente keine Probleme bezüglich der aktiven Dotierung auf Grund der Überwachsungsprozedur durch den gestapelten Detektor zu erwarten sind (vgl. Kapitel 5.3.3).

Für die Realisierung der Demonstratorschaltungen im Rahmen dieser Arbeit fiel die Wahl auf eine Integration mit der HFET-Technologie. Ausschlaggebend hierfür ist die maximale Flexibilität beim Schichtdesign der Einzelbauelemente, so dass bei möglichen Problemen bezüglich der Schaltungsfunktionalität diese Optimierungsmaßnahme uneingeschränkt zur Verfügung steht. Des weiteren haben Schaltungssimulationen des vollständig optischen MoBiLE-Gatters bei Verwendung von HFETs eine Realisierung dieser Schaltung mit zwei

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Transistoren und drei Widerständen in Aussicht gestellt. Das bedeutet im Vergleich zur HBT-Technologie eine weitere Reduzierung der Anzahl an notwendigen Bauelementen für diese Applikation, was der Forderung nach einer kompakten und robusten Lösung entgegenkommt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

6.2 Optischer Maskensatz und Prozesstechnologie für die optoelektronischen Empfängerschaltungen

Für die Realisierung der Demonstratorschaltungen wurde ein optischer Maskensatz mit der Bezeichnung MOBILE'08 erstellt, dessen Organisation in Abbildung 6.4 dargestellt ist.

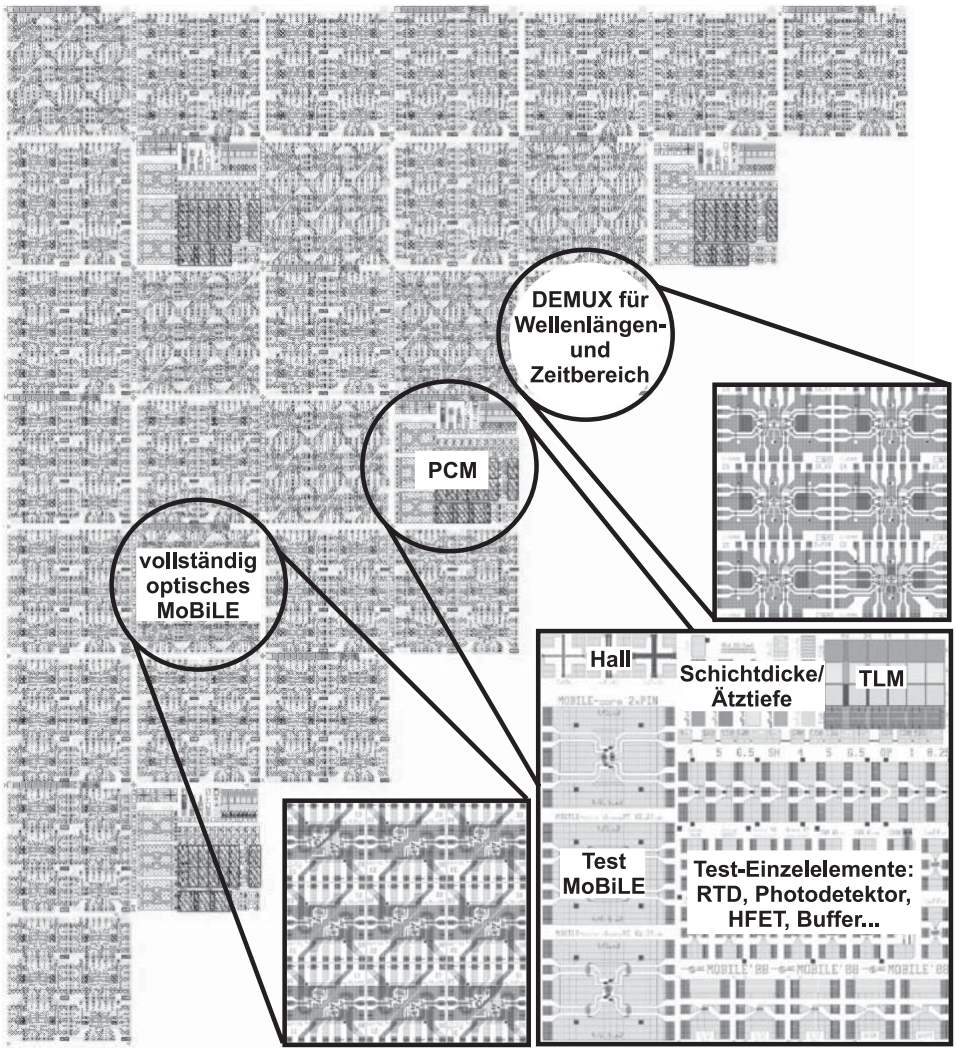


Abb. 6.4: Organisation des MOBILE'08 Maskensatzes

Der Maskensatz ist für den Prozess von Proben mit den Abmessungen eines geviertelten 2 Zoll Wafers ausgelegt. Er besteht aus insgesamt drei verschiedenen Makrozellen[20], wel-

[20] Einheit von zusammengehörenden Strukturen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

che möglichst gleichverteilt über der Maske angeordnet sind. Bei den Makrozellen handelt es sich zum einem um sogenannte Process-Control-Monitoring Strukturen (PCM), welche dazu dienen, elektrische Schichtdaten durch Hall und Transmissionline (TLM) Messungen zu gewinnen, sowie Ätztiefen bzw. Schichtdicken während des Prozesses zu kontrollieren. Des weiteren beinhalten die PCM-Makrozellen Einzelbauelemente und kleinere Schaltungsteile der Demonstratorschaltungen. Hierdurch wird bei grundsätzlichen Problemen eine gezielte Ursachenforschung mit Hilfe der Messtechnik ermöglicht. Die beiden Typen der hergestellten optoelektronsichen Empfängerschaltungen, nämlich das vollständig optische MoBiLE-Gatter und der λt-Demultiplexer, sind jeweils in einer eigenen Makrozelle mit einer Variation des gestapelten Photodetektors angeordnet. Hierbei kommen die Detektorversionen V2 und V3 mit den Durchmessern 12 µm und 21 µm zum Einsatz. Der Prozess einer 1/4 - 2 Zoll Probe mit dem Maskensatz MOBILE'08 liefert jeweils über 100 Demonstratorschaltungen beider Typen.

Als epitaktische Ausgangsbasis für den Prozess findet das in Abbildung 6.3 gezeigte Schichtkonzept Anwendung. Die in Kapitel 6.1.2 aufgeführten Vorteile dieses Konzepts bezüglich der Freiheitsgrade beim Schichtpaket wurden bei der Prozessplanung und beim Maskendesign berücksichtigt. So ist wahlweise die Integration eines nipin- und eines pinip-Detektors mit dem MOBILE'08 Maskensatz möglich.

Die Prozesstechnologie selbst orientiert sich stark an den bereits vorgestellten Verfahren zur Herstellung der entsprechenden Einzelbauelemente, jedoch erfordert der integrierte Prozess aller drei Bauelemente zusätzliche Maßnahmen zur Herstellung von sub-µm Strukturen in Verbindung mit einer Probentopologie von über 2 µm.

Die Belichtung des oberen RTD-Kontaktes und des HFET-Gates wird auf Grund der erforderlichen hohen Strukturtreue mittels der Elektronenstrahlbelichtung durchgeführt. Gerade bei der Steuerelektrode handelt es sich um eine kritische Struktur mit einer Gatelänge von nominell 200 nm, welche selbst ohne vorhandene Topologie mittels der optischen Lithografie des Fachgebiets nicht mehr abgebildet werden kann. Auch bei der Elektronenstrahlbelichtung verhält sich die Strukturauflösung reziprok zur Resistdicke (PMMA). Für die geforderte Strukturgröße von nominell 200 nm darf die Schichtdicke des PMMA 0,7 µm nicht übersteigen und reicht somit nicht für eine Abdeckung der hohen gestapelten Photodetektoren.

Um dieses Problem zu lösen, wurde ein kombinierter Photolackprozess entwickelt [10]. Er setzt sich aus dem optischen Photolack (AR-P 3740, Fa. Allresist) und dem PMMA (AR-P 671.06; Fa. Allresist) zusammen. Der optische Photolack dient der Abdeckung hoher

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Strukturen und gleichzeitig der Entschärfung von Höhenunterschieden durch die Ausbildung einer großzügigen Relaxationszone. Das PMMA wird zum präzisen Strukturübertrag durch die Elektronenstrahlbelichtung benötigt.

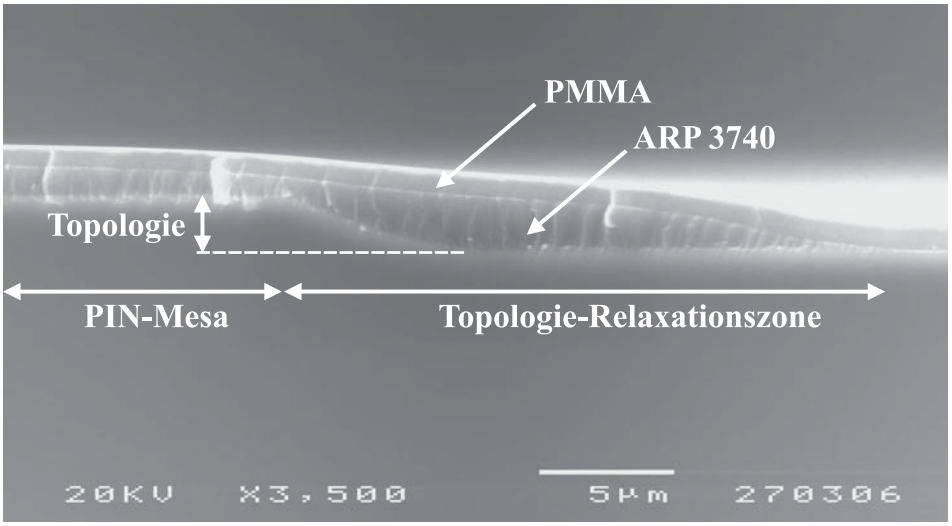


Abb. 6.5: REM-Querschnittsaufnahme einer topologiebehafteten Probe mit einem kombiniertem Resistprozess zur Optimierung der Strukturauflösung

Eine REM-Querschnittsaufnahme einer entsprechend präparierten Probe ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Es handelt sich hierbei um geätzte Halbleitermesen mit einer Höhe > 2 µm. Diese werden lokal mittels des optischen Lackes mit einer ausreichenden Schichtdicke und mit einem Überstand von 20 µm abgedeckt. Der Überstand dient als eine Relaxationszone, in welcher ein entspannter Ausgleich des Höhenunterschieds stattfindet. Anschließend kann das PMMA ganzflächig aufgebracht werden, ohne Gefahr eines Lackabrisses an Mesaflanken. Die zu belichtenden Strukturen müssen sich bei diesem Verfahren außerhalb der Relaxationszonen befinden.

Die Herausforderung bei der Entwicklung dieses Prozesses bestand in der Suche nach einem Prozessfenster, bei welchem der zunächst aufgebrachte Lack nicht durch das Lösungsmittel des zweiten Lackes angegriffen wird. Aus diesem Grund ist die Reihenfolge, welche zunächst prinzipiell nicht relevant zu sein scheint, unbedingt einzuhalten. So ist es beispielsweise nicht möglich, auf einen zur Belichtung aufgebrachten PMMA zusätzlich den optischen Photolack aufzubringen, da ansonsten sofort eine Lösung der Schicht

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

eintritt. Des weiteren müssten die Trocknungsparameter für den PMMA nach dem Aufschleudern angepasst werden. Diese liegen standardmäßig bei 170 °C mit einer Dauer von 10 min. Diese Temperatur führt jedoch dazu, dass der bereits aufgebrachte und strukturierte optische Lack durch die thermische Unterstützung so stark vernetzt, dass er im Standard-Lösemittel (Aceton) nicht mehr löslich ist. Aus diesem Grund wurde die Trocknung des PMMA auf 20 min bei 140 °C geändert und somit die Löslichkeit beider Resiste in Aceton erhalten.
Für den Schaltungsprozess wurde auf die trockenchemische Ätzung der Photodetektor-Mesen verzichtet, und diese wurde der Einfachheit halber nasschemisch ausgeführt.
Im Hinblick auf die Strukturierung der oberen RTD-Mesen wird der äußerst strukturtreue ICP-RIE Plasmaprozess für die integrierten Schaltungen vorgesehen (vgl. Kapitel 5.4.1), um eine möglichst präzise Kontrolle über I_{Steuer} zu behalten. Der in Kapitel 5.1.2 vorgestellte Prozess der plasmatauglichen und entfernbaren Hartmasken wird an dieser Stelle benötigt, um die zu diesem Zeitpunkt bereits prozessierten gestapelten Photodetektoren während der trockenchemischen Ätzung zu schützen.
Die für die Schaltungen benötigten ohmschen Widerstände werden mit Hilfe der HFET-Schichtstruktur realisiert. Der Schichtwiderstand wird bei diesem Schichtpaket hauptsächlich durch die hochdotierte InGaAs-Deckschicht vorgegeben und besitzt bei einer InGaAs-Schichtdicke von 35 nm einen Wert von 150 Ω/sq. Damit lassen sich die benötigten Absolutwerte von bis zu 1 kΩ noch kompakt realisieren.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

6.3 Vollständig optisch gesteuertes MoBiLE-Gatter

Ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit liegt in der Weiterentwicklung des durch T. Akeyoshi vorgestellten MoBiLE-Gatters mit optischem Steuereingang [20] (vgl. Kapitel 2.3.2) hin zur vollständig optisch angesteuerten optoelektronischen Empfängerschaltung auf der Eingangsseite [9, 11, 12]. Hierfür ist es notwendig, neben dem Datum auch das Taktsignal für das Gatter optisch bereitzustellen und es entsprechend in ein amplitudenmoduliertes Spannungssignal zu konvertieren. Idealerweise sollen beide optischen Signale durch eine Faser übertragen werden, so dass der HF-Eingang der Schaltung aus einem einzigen zu beleuchtenden Halbleiterelement besteht. Diese Aufgabe übernimmt der in Kapitel 5.3 vorgestellte gestapelte Photodetektor. Dieses Konzept liefert einen sehr kompakten optoelektronischen Empfänger ohne die Notwendigkeit einer Synchronisation auf das Datensignal durch clock-recovery Maßnahmen.

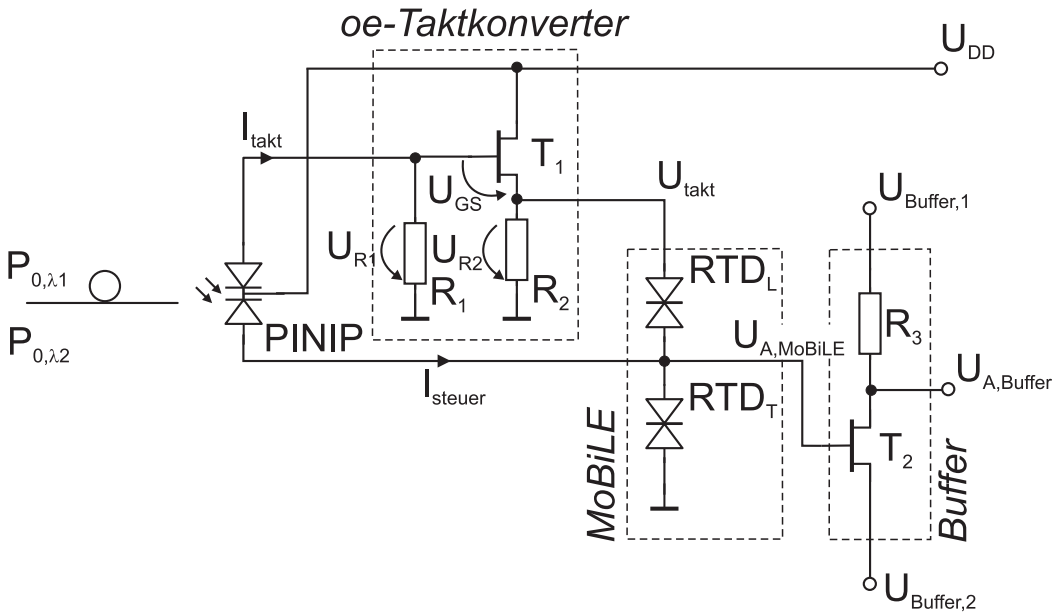


Abb. 6.6: Elektrischer Aufbau des vollständig optisch gesteuerten MoBiLE-Gatters

Das zu Grunde liegende Schaltungskonzept unter Verwendung von Heterostruktur- Feldeffekttransistoren (HFET) als aktive Bauelemente ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Es besteht im Wesentlichen aus vier Komponenten:

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Photodetektor

Der Photodetektor dient dem Empfang des optischen Takt- und Datensignals, sowie der Generation der entsprechenden Photoströme I_{takt} und I_{steuer}. Um der Anforderung eines single-fiber Betriebs gerecht zu werden, kommt hier der bereits vorgestellte gestapelte Detektor zum Einsatz. Wegen der festgestellten Vorteile bezüglich des elektrischen Übersprechens findet der Schaltungseinsatz ausschließlich mit einer PINIP-Schichtsequenz statt.

oe-Taktkonverter

Dieser Schaltungsteil dient der Transformation des modulierten Photostromes I_{takt} in ein periodisches Spannungssignal U_{takt}, welches einen ausreichenden Spannungshub für den Betrieb des MoBiLE-Gatters zur Verfügung stellt. Diese Aufgabe wird von einer einfachen Transistorschaltung bestehend aus T_1, sowie den beiden Widerständen R_1 und R_2 bewerkstelligt. Für die Steuerspannung U_{GS} am Eingang des Transistors T_1 gilt

$$U_{GS} = U_{R1} - U_{R2} \quad . \tag{6.1}$$

Bei Bestrahlung des für den Takt zuständigen Detektors verursacht der Photostrom I_{takt} am Widerstand R_1 einen Spannungsabfall, welcher den Transistor T_1 aufsteuert. Der nun fließende Drain-Strom wiederum erzeugt einen Spannungsabfall am Widerstand R_2, welcher für die Taktung des MoBiLE-Gatters verwendet wird. Hierbei ist bei der Dimensionierung der Widerstände darauf zu achten, dass R_2 groß genug ist, um den geforderten Spannungshub zu erzeugen, er jedoch durch seine gegenkoppelnde Wirkung den Transistor nicht abschnürt. Aus diesem Grund muss dafür gesorgt werden, dass gilt $U_{R1} > U_{R2}$. Hört die Bestrahlung des Taktdetektors auf gilt

$$U_{GS} = -U_{R2} \quad \text{bzw.} \quad U_{GS} = -U_{takt} \quad , \tag{6.2}$$

so dass Transistor T_1 sicher abgeschnürt wird.

MoBiLE-Gatter

Parallel zu R_2 wird das eigentliche MoBiLE-Gatter bestehend aus zwei RTDs geschaltet. Der Eingang wird durch den Photostrom I_{steuer} des zweiten Kanals des gestapelten Detektors gespeist. Das notwendige Taktsignal wird durch den soeben vorgestellten oe-Taktkonverter bereitgestellt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Bufferstufe

Der Ausgangsknoten eines MoBiLE-Gatters ist identisch mit dem Steuereingang. Für eine möglichst hohe Empfindlichkeit ist die Schaltung so dimensioniert, dass der zur Verfügung gestellte Steuerstrom I_{steuer} gerade ausreicht, um einen Schaltvorgang auszulösen (vgl. Kapitel 2.3). Daher ist es notwendig, den Ausgang der Schaltung von nachfolgenden Stufen bzw. von der Messumgebung, welche die Schaltung mit 50 Ω direkt belasten würde, zu entkoppeln.

Um das Ausfallrisiko der Demonstratorschaltungen möglichst gering zu halten, wird die Anzahl der notwendigen Bauelemente durch die Verwendung eines einstufigen Bufferverstärkers auf ein Minimum begrenzt. Die einfachste Möglichkeit einer Impedanzwandlung mit Feldeffekttransistoren besteht im Aufbau einer Source-Schaltung oder eines Source-Folgers.

Untersuchungen in [21] haben gezeigt, dass bei einer Betriebsfrequenz von 1 GHz und einer Flächendifferenz beider RTDs von 1 μm^2 eine Belastung am Ausgang von mindestens 500 Ω notwendig ist, um das Schaltverhalten nicht zu gefährden. Zwar ist der Eingangswiderstand eines Source-Folgers prinzipiell höher, jedoch genügt eine Source-Schaltung in HFET-Technologie dem geforderten Wert in dieser Beziehung. Dafür kann mit dieser Schaltungsvariante eine ausgangsseitige Anpassung an die 50 Ω-Messumgebung über R_3 unabhängig von der Steilheit des Transistors vorgenommen werden, um unerwünschte Reflektionen der elektrischen Leistung zwischen Messinstrument und Schaltung zu minimieren. Des Weiteren bietet die Source-Schaltung eine höhere Spannungsverstärkung und die Möglichkeit, über die Referenzspannung $U_{Buffer,2}$ die Schaltschwelle des Transistors individuell zu beeinflussen. Dadurch können Schaltartefakte für den LOW-Zustand, welche bei RTDs prinzipiell auftreten, sehr gut eliminiert werden. Zu berücksichtigen bleibt, dass die Verwendung einer Source-Schaltung als Bufferelement eine Invertierung des Eingangs- gegenüber dem Ausgangssignal hervorruft.

6.3.1 Simulationsergebnisse zum optisch gesteuerten MoBiLE-Gatter

Die Entwicklung und Dimensionierung der Schaltungen wurde rechnergestützt mit Hilfe der Software Advanced Design System (ADS) der Firma Agilent Technologies durchgeführt. Für den gestapelten Photodetektor wurde das in Kapitel 5.3.8 vorgestellte Modell verwendet. Bezüglich der RTD und des HFET wurde auf die in [21] erarbeiteten Modelle zurückgegriffen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Zunächst ist es notwendig zu klären, in wie weit das Signalübersprechen im gestapelten Detektor die Schaltungsfunktionalität beeinflusst. Durch die Verwendung von PINIP-Schichtsequenzen liegt das elektrische Übersprechen im betrachteten Frequenzbereich von < 5 GHz bei ca. - 40 dB und ist somit vernachlässigbar (vgl. Kapitel 5.3.6.2). In Bezug auf das optische Übersprechen des Takt- auf das Datensignal I_{steuer} ist dieser Aspekt ebenfalls unkritisch. Der Einfluss des optischen Taktsignals auf den MoBiLE-Eingang kann durch ein entsprechendes Heraufsetzen der MoBiLE-Schaltschwelle kompensiert werden. Anders verhält es sich mit einer Störung der Amplitude des Photostroms I_{takt}. Für die Detektion des optischen Taktsignals und damit zur Speisung des oe-Konverters wurde die obere Diode des gestapelten Photodetektors PIN1 gewählt, da hier experimentell mit $C_{opt,PIN1}$ = 1 % das niedrigste optische Übersprechen festgestellt wurde. Damit wird der Takt auf λ_1 = 1300 nm übertragen.

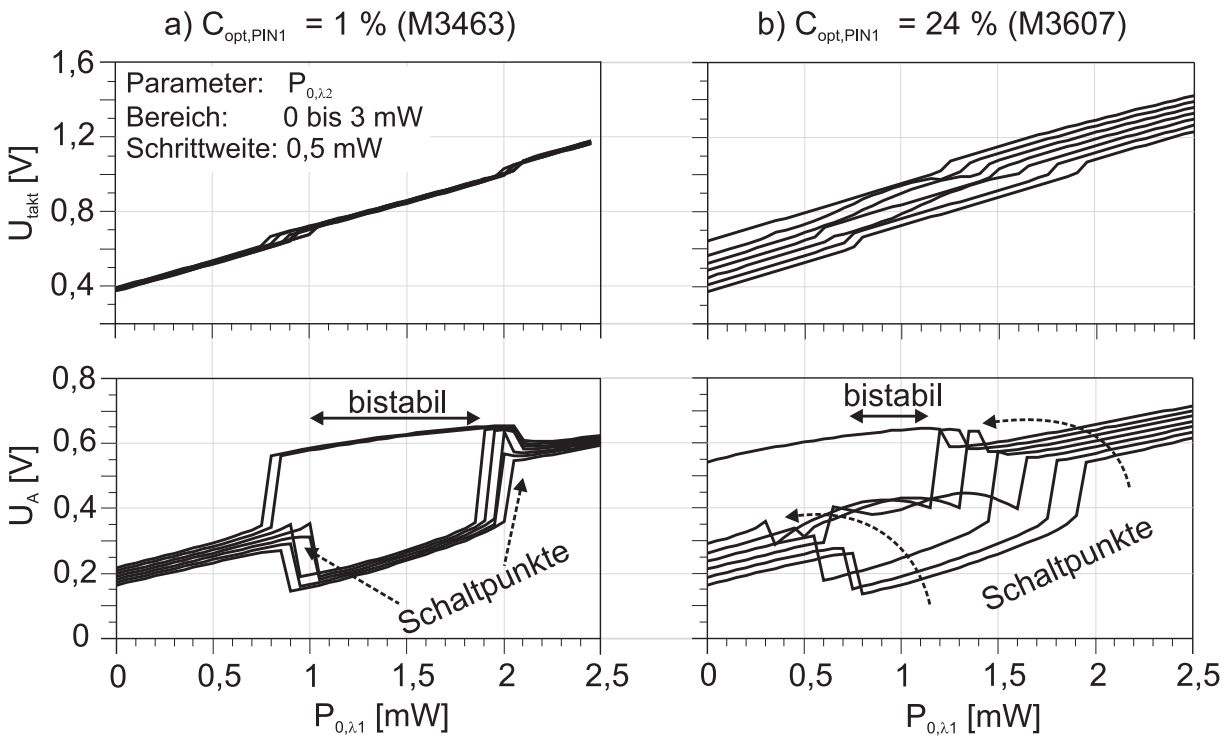


Abb. 6.7: DC-Simulation des oe-Taktkonverters und der MoBiLE-Bifurkationskurve für a) $C_{opt,PIN1}$ = 1 % und b) $C_{opt,PIN1}$ = 24 % mit $P_{0,\lambda 2}$ als Parameter

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

In Abbildung 6.7 ist die simulierte Übertragung des oe-Taktkonverters und der entsprechende Einfluss auf das MoBiLE-Schaltverhalten anhand der Bifurkationskurve für zwei verschiedene optische Übersprechen $C_{opt,PIN1}$ dargestellt, welche den messtechnisch ermittelten Werten entsprechen (vgl. Kapitel 5.3.6.1). Der optimale Spannungshub für U_{takt} ergibt sich simulationstechnisch für eine Dimensionierung von $R_1 = 1$ kΩ und $R_2 = 500$ Ω. Hier zeigt der oe-Taktkonverter eine lineare Übertragungscharakteristik mit einem Hub von ca. 300 mV/mW. Ohne Bestrahlung beträgt die Taktspannung knapp 400 mV, was für den RESET-Zyklus des Gatters völlig ausreicht.
Bei einem Übersprechen auf PIN1 von 1 % zeigt die Simulation keinen nennenswerten Einfluss von P_{0,λ_2} für Werte bis einschließlich 3 mW auf die generierte Taktspannung. Ihr Verlauf bleibt nahezu konstant, so dass die Schaltpunkte des Gatters nicht vom Betrag des Steuerstroms beeinflusst werden. Aus der Bifurkationskurve kann die notwendige optische Leistung für den Takt von $P_{0,\lambda_1} \approx 1{,}5$ mW (etwa Mitte der Augenöffnung) und die optische Schaltschwelle $P_{0,\lambda_2} \geq 2{,}5$ mW bei Verwendung dieses gestapelten Photodetektors entnommen werden.
Wird hingegen ein Übersprechen auf den Taktkanal von 24 % zugelassen, so erfährt die generierte Taktspannung einen deutlichen Zuwachs durch den parasitären Photostrom. Bei einer für den Schaltvorgang notwendigen optischen Leistung $P_{0,\lambda_2} = 2{,}5$ mW steigt hierdurch die generierte Taktspannung um etwa 50 % an. Dadurch verschieben sich die Schaltpunkte des MoBiLE massiv zu geringeren optischen Leistungen für den Takt P_{0,λ_1}. Der gemeinsame bistabile Bereich der Bifurkationskurve für den LOW- und für den HIGH-Zustand wird deutlich vermindert. Diese Problematik verstärkt die Scherung der Bifurkationskurfe beim hochfrequenten Betrieb des MoBiLE auf Grund der Hystereseeigenschaft von RTDs (vgl. Kapitel 2.3.3). Deshalb ist für eine gute Hochfrequenztauglichkeit des MoBiLE-Gatters eine durch Übersprechen hervorgerufene Verschiebung der Schaltpunkte gegeneinander unbedingt zu vermeiden, so dass für die Schaltungen Halbleitermaterial basierend auf dem gestapelten Photodetektor mit $C_{opt,PIN1} = 1$ % gewählt wurde.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde eine Transientensimulation[21] mit einer Taktfrequenz von 2 GHz durchgeführt. Die Flächen der RTDs betragen $A_{RTD,L} = 5$ µm² und $A_{RTD,T} = 4$ µm². Durch die Wahl der Flächendifferenz von 1 µm² wird dem optischen Kanalübersprechen von PIN2 Rechnung getragen.

[21] Analyse der Parameter im Zeitbereich

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

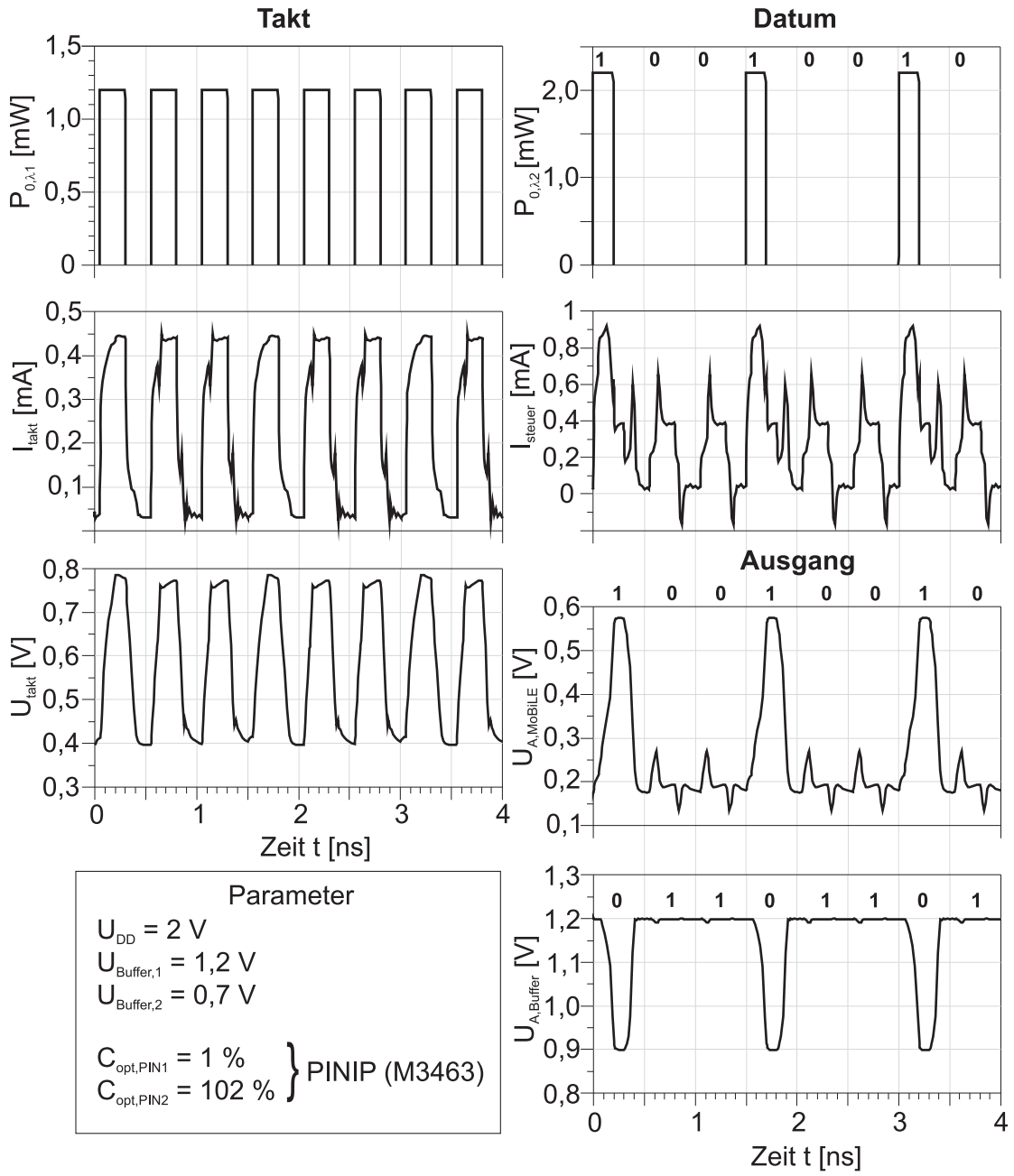


Abb. 6.8: Transientensimulation des vollständig optischen MoBiLE-Gatters bei einer Taktfrequenz von 2 GHz

Die aus der DC-Simulation bereits gewonnenen Absolutwerte für die notwendigen optischen Leistungen für Takt und Datum können mit diesem Analyseverfahren bestätigt und ein korrektes Schaltverhalten sogar für etwas geringere Absolutwerte erreicht werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Ergebnisse einiger relevanter Schaltungsvariablen sind in Abbildung 6.8 zusammengetragen. Die Taktung erfolgt hier mit $P_{0,\lambda_1} = 1{,}2$ mW und erzeugt einen modulierten Photostrom I_{takt} mit einer Amplitude von 0,45 mA. Es ist gut zu erkennen, dass das Datum keinen merklichen Einfluss auf den Takt hat. Somit stellt der oe-Taktkonverter in der Simulation ein periodisches Spannungssignal zwischen 400 mV und knapp 800 mV zur Verfügung. Als Datenstrom wird eine periodische '100'-Bitfolge simuliert. Auf Grund des optischen Übersprechens auf PIN2 von über 100 % erkennt man einen deutlichen Einfluss des Taktsignals auf I_{steuer}. Zum Zeitpunkt der Abtastung einer logischen '0' nimmt der Steuerstrom einen Wert von etwa 0,4 mA an. Wird eine logische '1' abgetastet, so addieren sich die erzeugten Photoströme in PIN2 auf 0,9 mA auf. Die gewählte Flächendifferenz beim MoBiLE von 1 μm^2 sorgt für eine Schaltschwelle von ca. 0,5 mA.
Am Ausgang des MoBiLE kann das korrekt abgetastete Bitmuster $U_{A,MoBiLE}$ nachvollzogen werden. Der simulierte Spannungshub zwischen den beiden logischen Zuständen beträgt etwa 300 mV. Bei der Abtastung einer logischen '0' entstehen am Ausgang Spannungsspitzen, da die Spannung an der Treiber-RTD und damit gleichzeitig am Ausgang kontinuierlich steigt, bevor sie am Schaltpunkt abrupt abfällt. Wie schon erwähnt, lassen sich diese Schaltartefakte effektiv durch eine geeignete Referenzspannung $U_{Buffer,2}$ am Buffer eliminieren. Das Signal am Schaltungsausgang $U_{A,Buffer}$ weist in diesem Bereich einen deutlich glatteren Verlauf auf. Entsprechend der gewählten Bufferschaltung findet eine Invertierung des Bitmusters statt.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

6.3.2 Schaltungsrealisierung und Messergebnisse

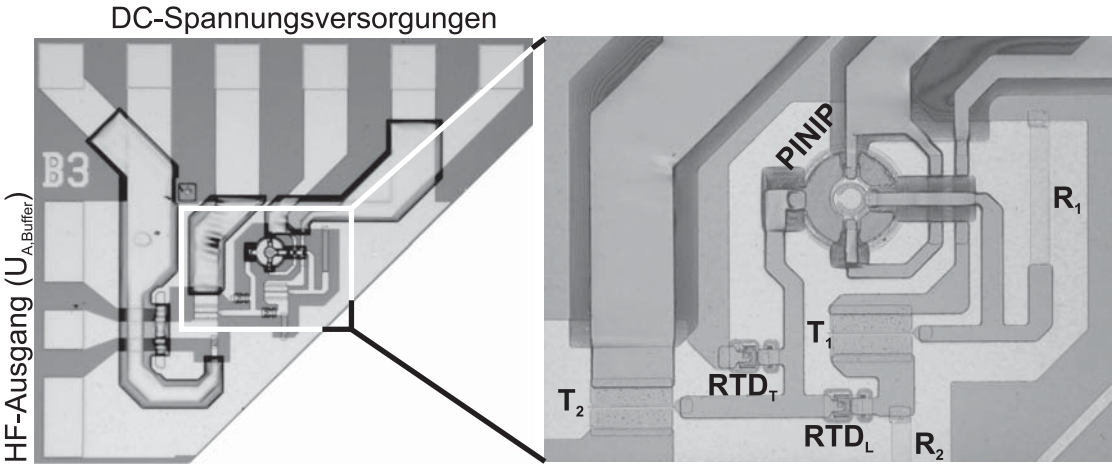


Abb. 6.9: Lichmikroskopaufnahmen eines hergestellten optischen MoBiLE-Gatters

In Abbildung 6.9 ist eine Lichtmikroskopaufnahme eines mittels des MOBILE'08 Maskensatzes hergestellten, vollständig integrierten MoBiLE-Gatters dargestellt. Das besondere Konzept dieser Schaltung, nämlich der Verzicht auf eine elektrische Taktung, hat unübersehbar Einfluss auf das Layout. Man erkennt in der Aufnahme, dass die Schaltung keinen elektrischen Koplanareingang besitzt. Es sind lediglich DC-Versorgungsanschlüsse vorhanden, welche über parallel zum Massepotential geschaltete MIM-Kapazitäten an die intrinsische Schaltung herangeführt werden, sowie der hochfrequenztaugliche elektrische Ausgang zur Auskopplung des Signals nach der Bufferstufe. Das einzige Eingangsterminal der Schaltung stellt die aktive Fläche des gestapelten PINIP-Photodetektors dar, über welche ein einzelner Lichtwellenleiter justiert wird.
Die Funktionalität des oe-Konverters ist durch die in Abbildung 6.10 gezeigte Messung belegt. Es handelt sich hierbei um eine Testschaltung innerhalb einer PCM-Zelle, mit deren Hilfe die Übertragungscharakteristik des Taktkonverters für die jeweilige Probe bestimmt werden kann. Die Messung bescheinigt dem Konverter ein absolut lineares Übertragungsverhalten mit einer Offset-Spannung ohne Bestrahlung von etwa 300 mV. Die Konversion übersteigt mit ca. 600 mV/mW den simulierten Wert um das Doppelte. Der Grund hierfür liegt hauptsächlich in einer 40 %-igen Abweichung der absoluten Widerstandswerte nach oben.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

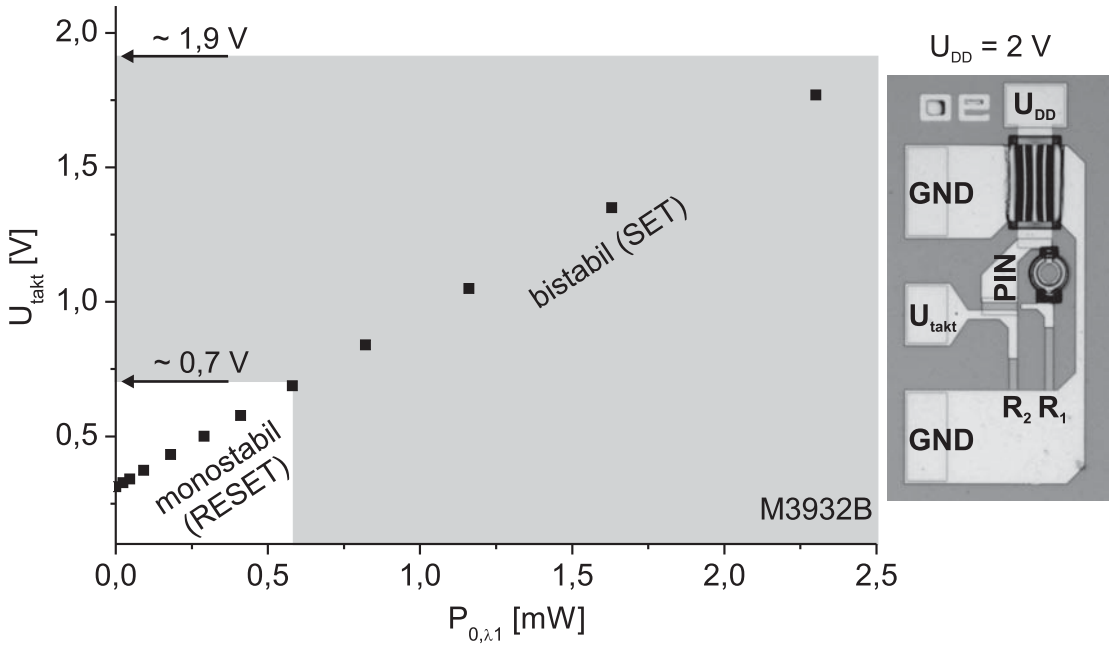


Abb. 6.10: Gemessene Übertragungscharakteristik eines oe-Taktkonverters innerhalb einer PCM-Zelle und eine entsprechende Lichtmikroskopaufnahme

Eine Nachsimulation der Schaltung für eine entsprechende Erhöhung der Widerstände R_1 und R_2 belegt einen abweichenden Übertragungshub des Taktkonverters, welcher dann bei 500 mV/mW liegt. Für die Funktionalität der Schaltung ist dieses Verhalten nicht von Nachteil, da hierdurch lediglich die benötigte optische Leistung für den Takt sinkt. Der mono- bzw. bistabile Arbeitsbereich des Gatters sowie die zugehörigen optischen Leistungen sind in der Abbildung anhand der zuvor simulierten Schaltpunkte hervorgehoben (vgl. Abbildung 6.7).

Zur frequenzabhängigen Analyse des Schaltverhaltens des hergestellten vollständig optischen MoBiLE-Gatters wurde der in Abbildung 6.11 dargestellte Messaufbau verwendet. Er besteht aus einer Dauerstrich-Laserquelle (cw-Laser), welche in der Lage ist, die Wellenlängen λ_1 und λ_2 mit einer maximalen optischen Leistung von ca. 10 dBm an ihrem optischen Ausgang unabhängig voneinander bereitzustellen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

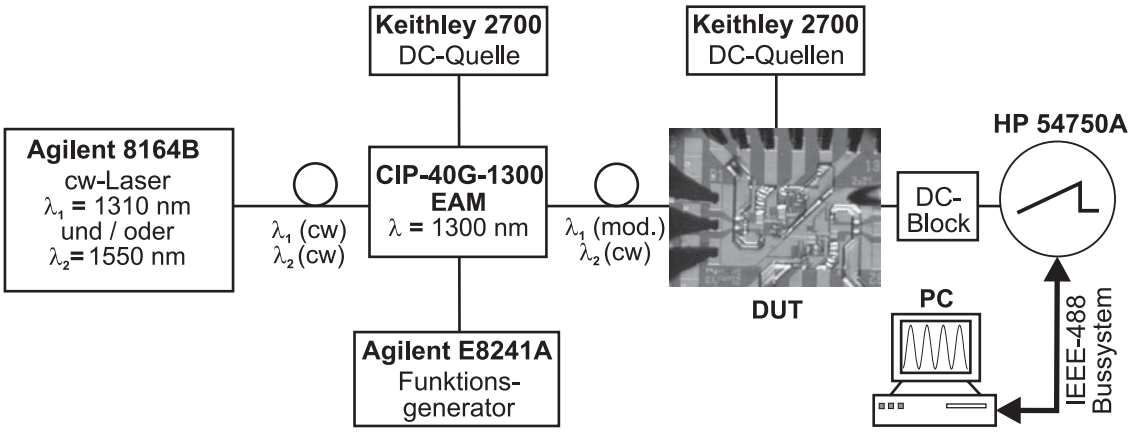


Abb. 6.11: Schematischer Messaufbau zur frequenzabhängigen Großsignalanalyse des vollständig optischen MoBiLE-Gatters im Zeitbereich

Anschließend wird das Licht über einen Lichtwellenleiter zum Elektroabsorptionsmodulator (EAM) geführt, welcher für eine Modulation bei $\lambda_1 = 1310$ nm ausgelegt ist. Das bedeutet, dass das niederenergetische optische Signal $\lambda_2 = 1550$ nm den EAM unmoduliert passieren kann und somit den gestapelten Detektor zur Erzeugung des MoBiLE-Steuerstroms I_{steuer} erreicht. Mangels eines Bit-Pattern-Testsets ist die manuelle An- und Abschaltung von λ_2 am cw-Laser selbst die einzige Möglichkeit zum Test des korrekten Schaltverhaltens des MoBiLE-Gatters. Anders ausgedrückt bedeutet das, dass das Datum lediglich als eine unendliche Folge von logischen '0'-en bzw. '1'-en in einer Non-Return-to-Zero (NRZ) Kodierung bereitgestellt werden kann. Da sich dadurch während der Messung keine Pegeländerungen am Dateneingang ergeben, kann mithilfe dieser Messmethode letztendlich keine genaue Aussage zur verfügbaren Bandbreite der Schaltung oder gar zu komplexen Kenngrößen der Digitaltechnik wie der Bitfehlerrate getroffen werden. Dieser Messaufbau erlaubt eine prinzipielle Untersuchung der getakteten Schaltung auf ihre Funktionalität.

Im Hinblick auf den Takt sind die Modulationseigenschaften des EAM bezüglich λ_1 außerordentlich wichtig. In erster Linie muss der Modulator über eine möglichst hohe Modulationstiefe verfügen, um den nötigen Spannungshub von etwa 1,5 V am oe-Taktkonverter erzeugen zu können. Außerdem muss die Absorption im Modulator zum RESET-Zeitpunkt hoch genug sein, um eine ausreichend niedrige Spannungsamplitude am Ausgang des Taktkonverters sicherzustellen. Gemäß Abbildung 6.10 sollte die Amplitude des optischen Taktsignals $P_{0,\lambda 1}$ bei etwa 1,5 bis 2 mW liegen, um sicher im bistabilen Bereich aus-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

zukommen. Laut Angaben des Herstellers liegt die Modulationstiefe des EAM bei > 10 dB, so dass ausgehend von $P_{0,\lambda 1} = 2$ mW der RESET-Bereich sicher erreicht werden kann.

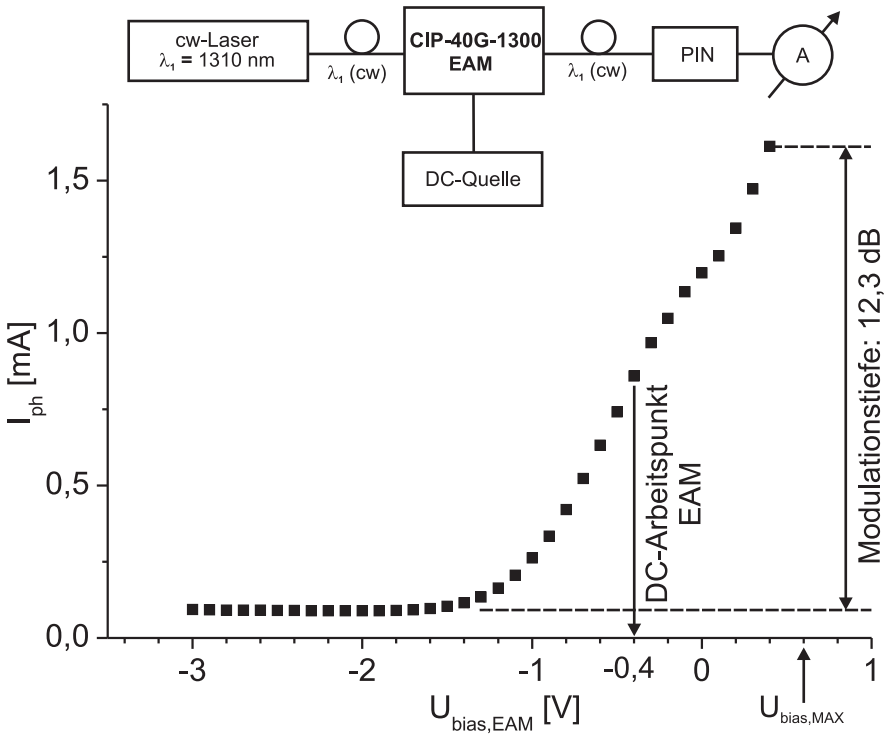


Abb. 6.12: Messaufbau sowie entsprechende Messung der EAM-Übertragungscharakteristik (Modell: CIP-40G-1300)

Um dies jedoch sicher zu verifizieren und um den optimalen EAM-Arbeitspunkt $U_{bias,EAM}$ zu finden, wurde das Übertragungsverhalten des Modulators bestimmt. Das Messergebnis und der zugehörige Messaufbau sind in Abbildung 6.12 dargestellt. Es wurde eine kommerzielle PIN-Photodiode durch den EAM hindurch bestrahlt und der erzeugte Photostrom in Abhängigkeit von der EAM-Biasspannung aufgenommen. Da die maximal zulässige Biasspannung den Wert von 0,6 V nicht übersteigen darf, ist die Messung sicherheitshalber nur bis 0,4 V durchgeführt worden. Der Modulator weist im Bereich von - 1,2 V bis 0,4 V eine lineare Übertragung auf mit einer Modulationstiefe von 12,3 dB auf. Damit ist der Wert aus dem Datenblatt bestätigt und diese Komponente eignet sich zur Erzeugung des optischen Taktsignals mit den geforderten Spezifikationen. Für den Modulationsbetrieb

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

beträgt die optimale Biasspannung $U_{bias,EAM}$ = -0,4 V und die Anregungsamplitude des Funtionsgenerators sollte einen Wert von 800 mV haben, um den vollständigen Arbeitsbereich des EAM auszunutzen.
Die entsprechend aufbereiteten Wellenlängen λ_1 (moduliert) und λ_2 (unmoduliert) werden über einen Lichtwellenleiter in den gestapelten Photodetektor des Device-Under-Test (DUT) eingekoppelt, wobei das gelenste Faserende über einen Mikromanipulator möglichst präzise über dem Photodetektor justiert wird, bis die Amplitude des Ausgangssignals einen Maximalwert annimmt. Zur DC-Spannungsversorgung des DUT werden entsprechend dem Schaltungsdesign in Abbildung 6.6 drei Quellen benötigt. Das Ausgangssignal der Schaltung $U_{A,Buffer}$ wird über einen DC-Blockkondensator auf einem digitalen Samplingoszilloskop dargestellt, dessen Messdaten über einen angeschlossen Rechner ausgelesen werden können.

Wegen des Blockkondensators zum Schutz des Oszilloskops vor zu hohen DC- Spannungspegeln geht die Information über den Gleichanteil des Ausgangssignals bei der Messung verloren. Dies ist in diesem Fall besonders von Nachteil, da das DUT nicht mit einer wechselnden Folge von logischen Zuständen am Steuereingang des MoBiLE beaufschlagt werden kann. Damit ist es nicht möglich, aus einer einzigen Messung den logischen Spannungshub am Ausgang zu bestimmen, da keine Differenzbildung aus der Abtastung einer logischen '0' im Vergleich zur Abtastung einer logischen '1' realisierbar ist. Daher beinhalten die nachfolgenden Abbildungen jeweils zwei Messkurven mit und ohne Bestrahlung des gestapelten Photodetektors mit der Datum-Wellenlänge λ_2. Die Darstellung der beiden Messkurven relativ zueinander wurde um den fehlenden Gleichanteil korrigiert, indem die Eigenschaft des MoBiLE ausgenutzt wurde, dass die Bifurkation des Gatters zum RESET-Zeitpunkt unabhängig vom Datum näherungsweise die gleiche Ausgangsspannung U_A liefert (vgl. Abbildung 2.12 C, Arbeitspunkte 1 und 4). Der Fehler, der durch dieses Verfahren zugelassen wird, ist jedoch klein gegenüber dem nun bestimmbaren logischen Spannungshub und damit zulässig.
Eine entsprechende Messung für ein vollständig optisches MoBiLE-Gatter mit einem gestapelten Detektor der Design-Version V2 und einem aktiven Durchmesser von 12 µm ist für eine Taktfrequenz von 500 MHz in Abbildung 6.13 dargestellt. Sie belegt die korrekte Funktion aller Schaltungsteile. Es kann eindeutig zwischen der SET und der RESET Phase unterschieden werden.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

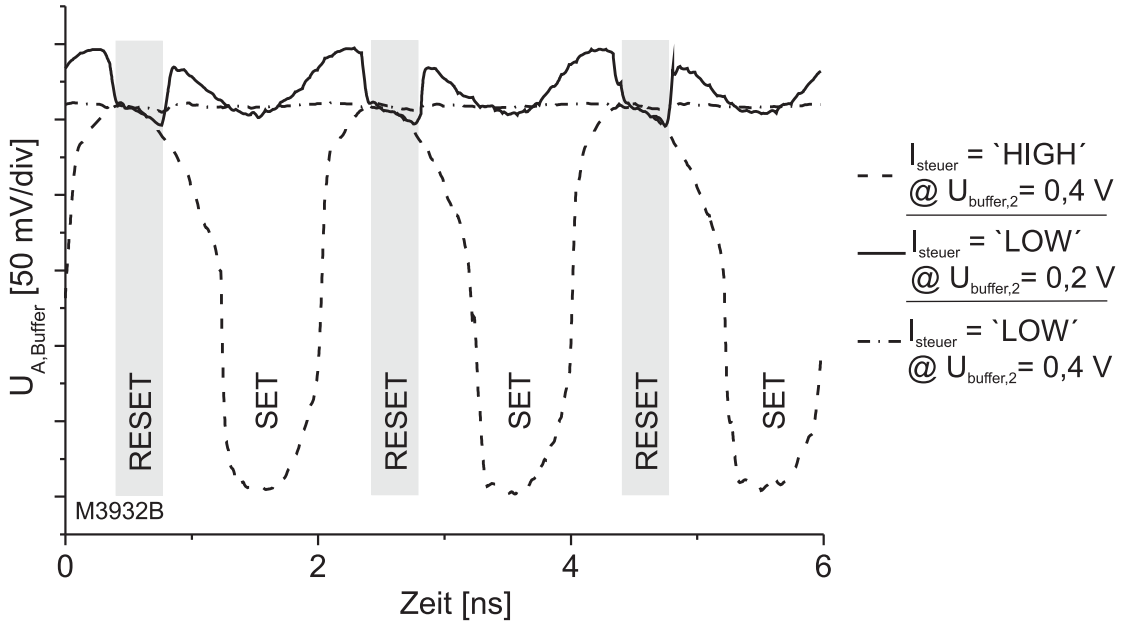


Abb. 6.13: Messergebnis der Testschaltung (gestapelter Detektor: V2, 12 µm) bei f_{takt} = 500 MHz

Das bedeutet, dass der oe-Taktkonverter im Hochfrequenzbetrieb den benötigten Spannungshub für U_{takt} liefert. Des weiteren tastet das Gatter den logischen Zustand am Steuereingang richtig ab. Aufgrund der gewählten MoBiLE-Grundschaltung (vgl. Abbildung 2.13 links), ergibt sich ein nicht-invertiertes logisches Verhalten. Auf Grund der gewählten Bufferstufe (Source-Schaltung) wird das Ausgangssignal der Schaltung in sich invertiert. So liefert die Schaltung ausgangsseitig ohne Bestrahlung durch λ_2 einen hohen logischen Pegel und beim Zuschalten des optischen Datums einen entsprechend niedrigen. Es ergibt sich ein logischer Spannungshub von ca. 250 mV, welcher gut mit dem zuvor simulierten Wert übereinstimmt. Die Filtereigenschaft des Buffers bezüglich der im Kapitel zu den Simulationsergebnissen beschriebenen RTD-Schaltartefakte lässt sich ebenfalls messtechnisch verifizieren. Hierfür wurde das Ausgangssignal ohne Bestrahlung durch λ_2 (logische '0') jeweils bei zwei verschiedenen Buffer-Referenzspannungen $U_{buffer,2}$ aufgenommen. Es wird deutlich, dass eine geeignete Referenzspannung von in diesem Fall $U_{buffer,2}$ = 0,4 V die Schaltartefakte vollständig eliminiert und damit für einen absolut glatten Verlauf des Ausgangssignals sorgt. Schlussendlich ist dieses Messergebnis auch ein Beleg für den erfolgreichen Einsatz des gestapelten Photodetektors in einer integrierten

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Schaltungsumgebung. Die Taktung des MoBiLE-Gatters, sowie die korrekte Abtastung des Steuereingangs zeigen, dass der gestapelte Detektor die beiden ankommenden optischen Signale trennt und auf seinen elektrischen Ausgängen bereitstellt. Des Weiteren bestätigt das Messergebnis die Wirkung der getroffenen Maßnahmen beim Schaltungdesign bezüglich des optischen Kanalübersprechens des gestapelten Detektors. Ohne Kenntnis dieser Größe und einer entsprechenden Auslegung der RTD-Flächen ist keine korrekte Abtastung des Steuereingangs möglich.

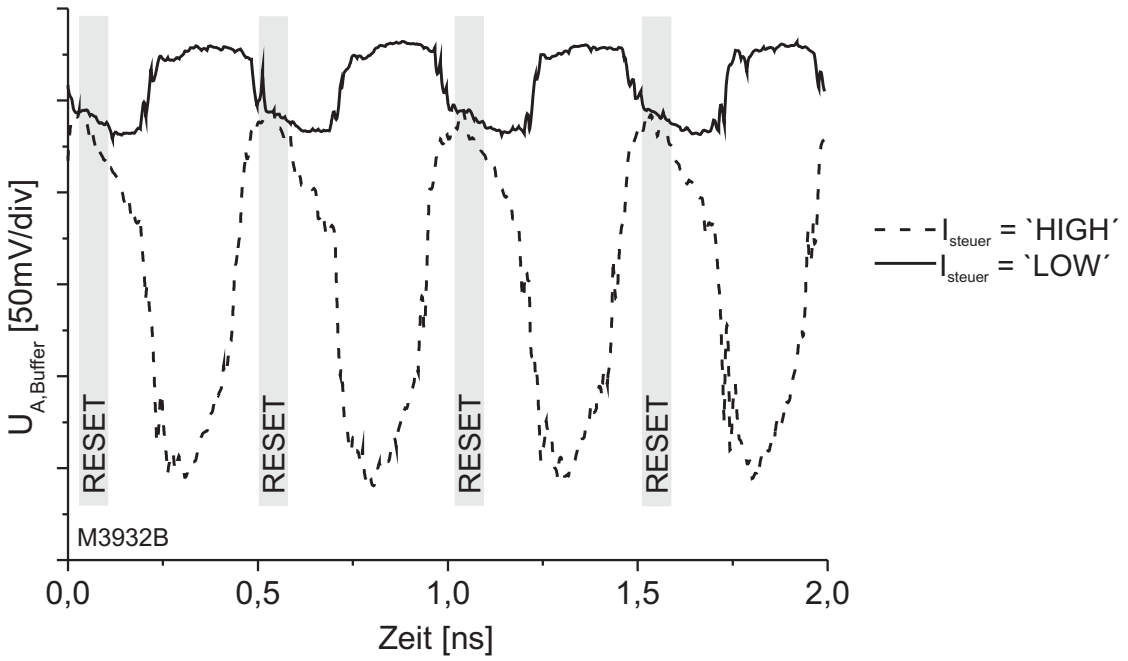


Abb. 6.14: Messergebnis der Testschaltung (gestapelter Detektor: V2, 12 µm) bei $f_{takt} = 2$ GHz

Bis zu einer Modulationsfrequenz von 2 GHz war ein zufriedenstellendes Ausgangssignal der Schaltung messbar. Das entsprechende Messergebnis ist in Abbildung 6.14 dargestellt. Das Schaltverhalten ist zwar auch hier eindeutig erkennbar, jedoch ist der Signalverlauf gegenüber der Messung bei 500 MHz vor allem für die logische '0' verzerrt. Außerdem reduziert sich der logische Spannungshub um knapp 100 mV. Eine ausgangsseitige Unterscheidung der logischen Zustände ist bis zu einer Modulationsfrequenz von ca. 5 GHz möglich, wenn auch mit einer stark gedämpften Amplitude.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die hier messtechnisch ermittelte Bandbreite der Schaltung steht im Einklang mit den Ergebnissen in [21]. Bei beiden Arbeiten wurden für Schaltungsapplikationen RTDs verwendet, deren Epitaxie und Technologie identisch ist. Somit ist auch der frequenzabhängige Verlust des eindeutig bistabilen Bereiches der MoBiLE-Bifurkationskurve auf Grund der RTD-Hysterese vergleichbar (vgl. Abbildung 2.3.3). Dieser Zusammenhang unterstützt die Annahme, dass das MOBiLE-Gatter die Bandbreite begrenzende Komponente darstellt, zumal sowohl der gestapelte Photodetektor als auch der HFET nachweislich über deutlich höhere Grenzfrequenzen verfügen. Damit sind Optimierungsarbeiten zur Erhöhung der Bandbreite MoBiLE-Gatter basierter integrierter Schaltungen im Fachgebiet hauptsächlich auf die Reduzierung der parasitären Komponenten der RTDs (R_S und C_{RTD}) zu konzentrieren. Die beiden aktuell verfolgten Ansätze bestehen in der Erhöhung der RTD Peak-Stromdichte J_P um den Faktor drei, wodurch die Ladezeit der RTD-Kapazität C_{RTD} reduziert wird, und in der Optimierung des Serienwiderstandes R_S durch das Aufspalten der RTD-Mesa in mehrere kleinere [13].

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

6.4 MoBiLE-basierter Demultiplexer für den Wellenlängen- und Zeitbereich (λt-DEMUX)

Ein Nachteil des Arbeitsprinzips eines MoBiLE-Gatters ist die RESET-Phase, welche nicht konstruktiv im Rahmen einer Empfängerschaltung genutzt werden kann. Dadurch kann die Abtastung ankommender Daten lediglich während der halben Taktperiode stattfinden (SET-Phase). Ein Lösungsansatz besteht in der Anordnung zweier MoBiLE-Gatter derart, dass sich die jeweiligen SET- und RESET-Phasen komplementär abwechseln und dadurch zwei Abtastereignisse pro Taktperiode zur Verfügung stehen [14], [21].

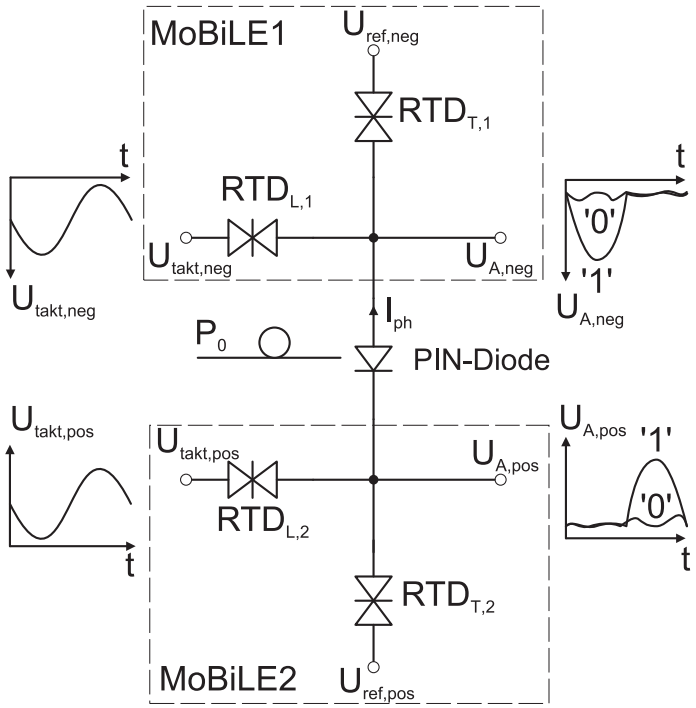


Abb. 6.15: Elektrischer Aufbau eines MoBiLE basierenden Demulitplexers mit optischem Eingang [21]

Das entsprechende Schaltungskonzept ist in Abbildung 6.15 abgebildet. Als zentrales Element ist die PIN-Diode zuständig für die Generation des notwendigen Steuerstroms $I_{steuer} = I_{ph}$ und damit für die abwechselnde Versorgung beider MoBiLE-Gatter. Um die PIN-Diode zu jedem Zeitpunkt im Sperrbereich zu betreiben, sind Referenzspannungen U_{ref} notwendig, welche für einen ständigen positiven Potentialabfall von Kathode zur

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Anode sorgen. Der komplementäre Betrieb der Gatter wird durch eine geeignete Wahl der beiden Taktsignale U_{takt} erreicht, indem diese mit Gleichanteilen unterschiedlicher Polarität beaufschlagt werden. Dadurch wird betragsmäßig in den Scheitelpunkten des Taktsignals ein Gatter mit einer niedrigen und das andere Gatter mit einer hohen Taktspannung betrieben. Auf diese Weise ist diese Schaltung in der Lage, einen optischen Datenstrom zu empfangen und zu verarbeiten, dessen Bitrate der doppelten Frequenz des Taktsignals entspricht. Außerdem wird durch die abwechselnde Abtastung des ankommenden Datenstroms durch diese Empfängerschaltung ein Demultiplexing vorgenommen, da jedes Gatter einen eigenen elektrischen Ausgang U_A besitzt.
Das Konzept des bipolaren Betriebs der Schaltung führt zwangsläufig zu einer gegensinnigen Logik an den beiden elektrischen Ausgängen. Dieser Aspekt kann die weitere Verarbeitung der Daten behindern, so dass ein Ausgang unter Umständen invertiert und der andere zeitlich verzögert werden müsste, um die Daten entsprechend zu synchronisieren.

6.4.1 Schaltungskonzept

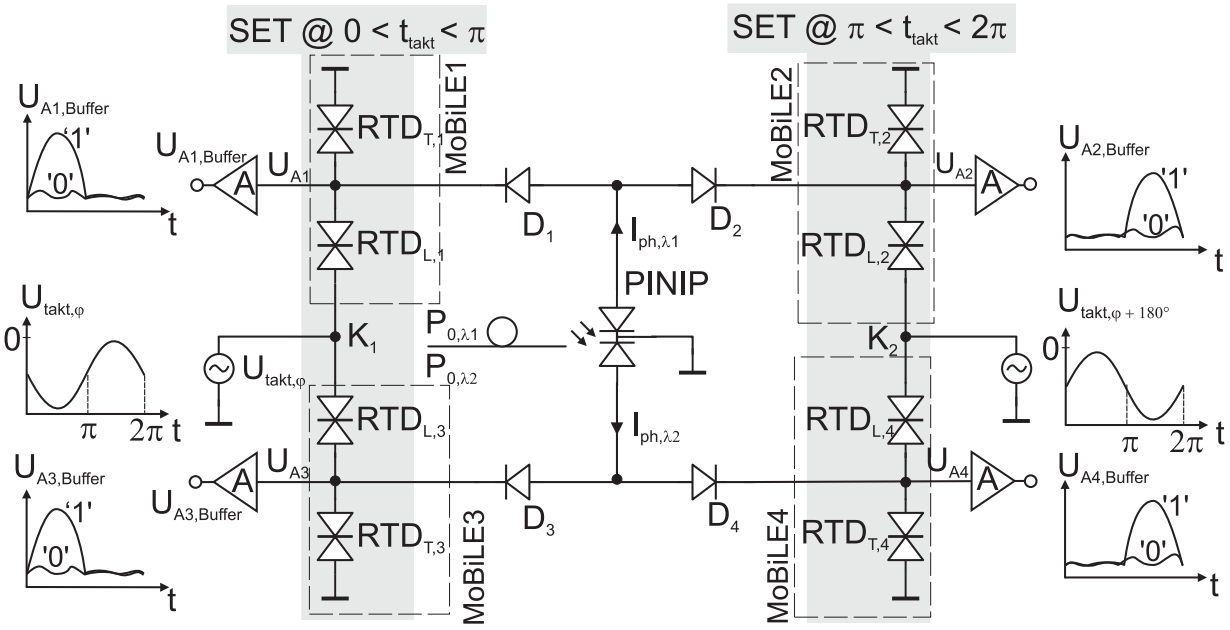


Abb. 6.16: Elektrischer Aufbau eines MoBiLE basierenden Demultiplexers für den Wellenlängen- und Zeitbereich

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die Idee des Demultiplexings im Zeitbereich durch den komplementären Betrieb zweier MoBiLE-Gatter kann durch den Einsatz des gestapelten Photodetektors auf den Wellenlängenbereich ausgeweitet werden [9]. Damit kann ein weiterer Datenstrom, welcher eine andere Wellenlänge als optischen Träger nutzt, parallel über den Lichtwellenleiter übertragen, detektiert und demultiplext werden. Insgesamt können auf diese Weise pro Taktperiode eingangsseitig vier Bit abgetastet werden, welche anschließend an den elektrischen Ausgängen der Schaltung U_{A1} bis U_{A4} ausgelesen werden können. Um dem Arbeitsprinzip dieser optoelektronischen Empfängerschaltung Rechnung zu tragen, wird in dieser Arbeit die Bezeichnung λt-Demultiplexer (kurz: λt-DEMUX) geprägt.
Der elektrische Aufbau des λt-DEMUX ist in Abbildung 6.16 gezeigt. Auch hier ist der gestapelte Photodetektor das zentrale Element und dient der Versorgung der vier MoBiLE-Gatter mit den entsprechenden Steuerströmen. Das Demultiplexing im Wellenlängenbereich wird bereits prinzipiell vom gestapelten Photodetektor vorgenommen. Die generierten Photoströme $I_{ph,\lambda 1}$ und $I_{ph,\lambda 2}$ fließen zu den jeweiligen MoBiLE-Paaren 1 und 2 bzw. 3 und 4.
Anders als bei dem eingangs beschriebenen einfachen Demultiplexer, bei dem zur Erzeugung eines komplementären Betriebs bipolare Taktsignale notwendig sind, werden beim λt-DEMUX die entsprechenden Schaltungsteile (MoBiLE 1 und 3 bzw. 2 und 4) um 180° phasenverschoben zueinander, aber mit der gleichen Polarität getaktet ($U_{takt,\varphi}$ und $U_{takt,\varphi+180°}$). Das hat den entscheidenden Vorteil, dass alle vier Ausgänge der Schaltung über eine gleichsinnige Logik verfügen. Möglich wird dieser Ansatz auf Grund der Eigenschaft des gestapelten Photodetektors, welche es erlaubt, die beiden Kathoden (im Falle der PINIP-Schichtsequenz) über den mittleren Kontakt auf ein Bezugspotential (z. B. Masse) zu schalten. Um in diesem Fall den Betrieb der beiden Dioden des gestapelten Detektors PIN1 und PIN2 in Sperrichtung sicherzustellen, bedarf es Taktsignale mit ausschließlich negativer Polarität. Unter diesen Voraussetzungen muss für alle vier Gatter die Grundschaltung aus Abbildung 2.13 (rechts) gewählt werden. Ein weiterer positiver Nebeneffekt dieser Eigenschaft ist, dass die MoBiLE-Gatter keine Referenzspannungen U_{ref} mehr benötigen, sondern einfach gegen Masse geschaltet werden können.
Für eine erfolgreiche Funktion der Schaltung ist eine strommäßige Entkopplung der komplementär zueinander arbeitenden MoBiLE-Gatter unbedingt erforderlich. Betrachtet man beispielsweise MoBiLE1 während seiner SET-Phase, herrscht am Knoten K_1 im Scheitelpunkt ein maximal negatives Potential, während Knoten K_2 näherungsweise Massepotential besitzt. Ohne eine geeignete Maßnahme würden in diesem Fall, elektrisch betrachtet,

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

beide RTDs von MoBiLE2 parallel zur Treiber-RTD von MoBiLE1 $RTD_{T,1}$ liegen, dieses belasten und das Schaltverhalten des Gatters aufheben. Aus diesem Grund befinden sich die Dioden D_1 bis D_4 in der Schaltung. Sie sind derart orientiert, so dass sie den Strompfad der Steuerströme zu den MoBiLE-Gattern in der SET-Phase öffnen und in der RESET-Phase sperren. Technologisch wurde für die Realisierung der Dioden der Prozessablauf für PIN2 des gestapelten Detektors genutzt.
Die Entkopplung der Gatterausgänge von der Messumgebung wurde, wie auch schon beim vollständig optischen MoBiLE (vgl.: Kapitel 6.3), durch einfache Bufferstufen bestehend aus HFET-Sourceschltungen realisiert. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden diese in Abbildung 6.16 als Symbol kenntlich gemacht. Alles in allem zeigt die Schaltung an allen vier Ausgängen $U_{A1,Buffer}$ bis $U_{A4,Buffer}$ ein nicht-invertierendes logisches Verhalten gleicher Polarität.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

6.4.2 Simulationsergebnisse zum λt-DEMUX

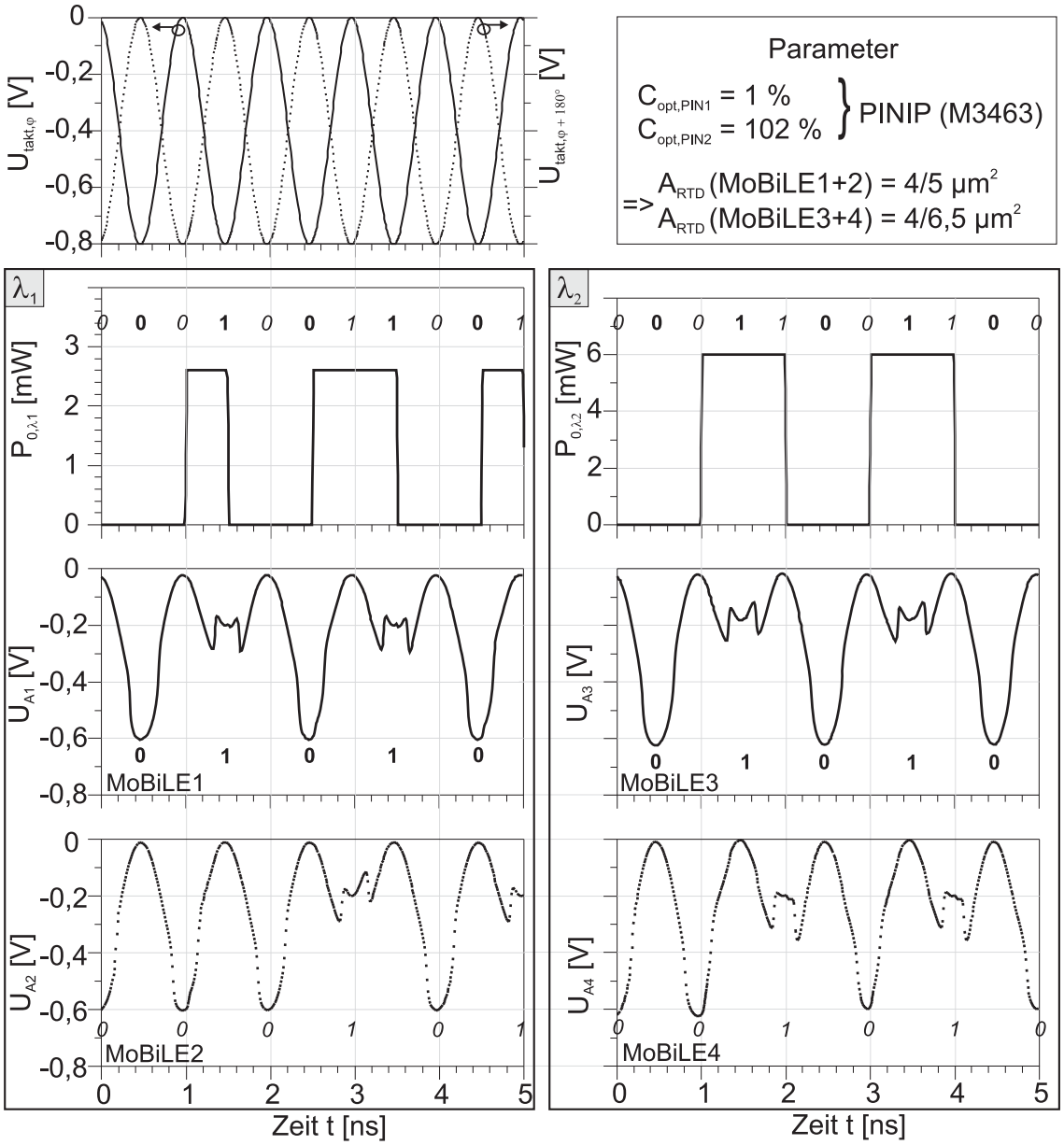


Abb. 6.17: Transientensimulation des λt-DEMUX bei einer Taktfrequenz von 1 GHz

Abbildung 6.17 zeigt eine Transientensimulation der Eingangs- und Ausgangsgrößen des λt-DEMUX bei einer Taktfrequenz von 1 GHz. Für die Arbeiten wurden dieselben Bauelementmodelle verwendet, welche bereits für die rechnergestützte Entwicklung des voll-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

ständig optischen MoBiLE eingesetzt wurden (vgl. Kapitel 6.3.1). Außerdem liegt beiden Schaltungen dieselbe Epitaxie und Technologie zu Grunde, so dass sich manche Schaltungsparameter in ihren Absolutwerten ähneln.
So beträgt zum Beispiel die notwendige spannungsmäßige Auslenkung, um die MoBiLE-Gatter in den bistabilen Bereich zu bringen, auch beim λt-DEMUX etwa 800 mV. Wie beim Schaltungskonzept bereits erläutert, ist bei der vorliegenden Konstellation eine negative Polarität notwendig, so dass ein Taktsignal mit einem Gleichanteil von -400 mV und einer Amplitude von 400 mV verwendet wird. Für den zweiten elektrischen Takteingang der Schaltung wird dieses Signal um 180° phasenverschoben.
Die Photoströme des gestapelten Photodetektors $I_{ph,\lambda 1}$ und $I_{ph,\lambda 2}$ fließen beide in die Steuereingänge der MoBiLE-Gatter. Hierbei ist das ungleiche optische Übersprechen für eine korrekte Abtastung des Steuersignals durch ein geeignetes Design der RTD Flächendifferenzen der jeweiligen Gatter zu berücksichtigen. Im Falle von PIN1 bzw. $I_{ph,\lambda 1}$ ist die Störung durch die andere Wellenlänge mit 1 % relativ gering. Die gewählte RTD-Flächendifferenz beträgt in diesem Fall 1 μm^2 bei absoluten RTD-Flächen von 4 und 5 μm^2 (MoBiLE 1 und 2). Damit ist das Design dieser Gatter identisch mit dem des vollständig optischen MoBiLE. Vergleicht man die simulierten optischen Leistungen, die für das Umschalten des Gatters eingestrahlt werden müssen, so liegt der Wert beim λt-DEMUX mit $P_{0,\lambda 1}$ = 2,6 mW etwa 0,4 mW über dem des vollständig optischen MoBiLE. Der Grund hierfür liegt in der endlich guten Entkopplung der MoBiLE-Gatter an ihren Steuereingängen voneinander. Hierbei ist der Sperrstrom der Dioden D_1 bis D_4 ausschlaggebend, welcher zusätzlich vom gestapelten Photodetektor geliefert werden muss, um die Schaltschwelle zu erreichen. Bei einer Simulation ohne Entkoppel-Dioden ist bei sinnvollen optischen Eingangsleistungen keine Funktion der Schaltung vorhanden.
Betrachten man hingegen PIN2 bzw. $I_{ph,\lambda 2}$, so beträgt das Übersprechen 102 %. Damit die Wellenlänge λ_1 hier sicher keinen unerwünschten Schaltvorgang auslöst, wird die RTD-Flächendifferenz entsprechend größer ausgelegt, nämlich zu 2,5 μm^2 bei Absolutwerten von 4 und 6,5 μm^2 (MoBiLE 3 und 4). Damit skaliert die notwendige optische Leistung $P_{0,\lambda 2}$ für diesen Kanal auf 6 mW.
Die korrekte Funktion der Schaltung wird anhand der vier MoBiLE-Ausgangssignale A_1 bis A_4 bestätigt. Bei den beiden eingestrahlten Datenströmen $P_{0,\lambda 1}$ und $P_{0,\lambda 2}$ wird das gewählte Bitmuster jeweils abwechselnd von den zuständigen MoBiLE-Gattern abgetastet. Hierbei sind die Ausgangssignale, welche der phasenverschobenen Abtastung entsprechen, gestrichelt dargestellt (A_2 und A_4). Die Schaltung arbeitet auf allen MoBile-Ausgängen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

nicht-invertierend, wobei auf Grund der negativen Taktpolarität während der RESET-Phase ein hohes elektrisches Potential eingenommen wird.

6.4.3 Schaltungsrealisierung und Messergebnisse

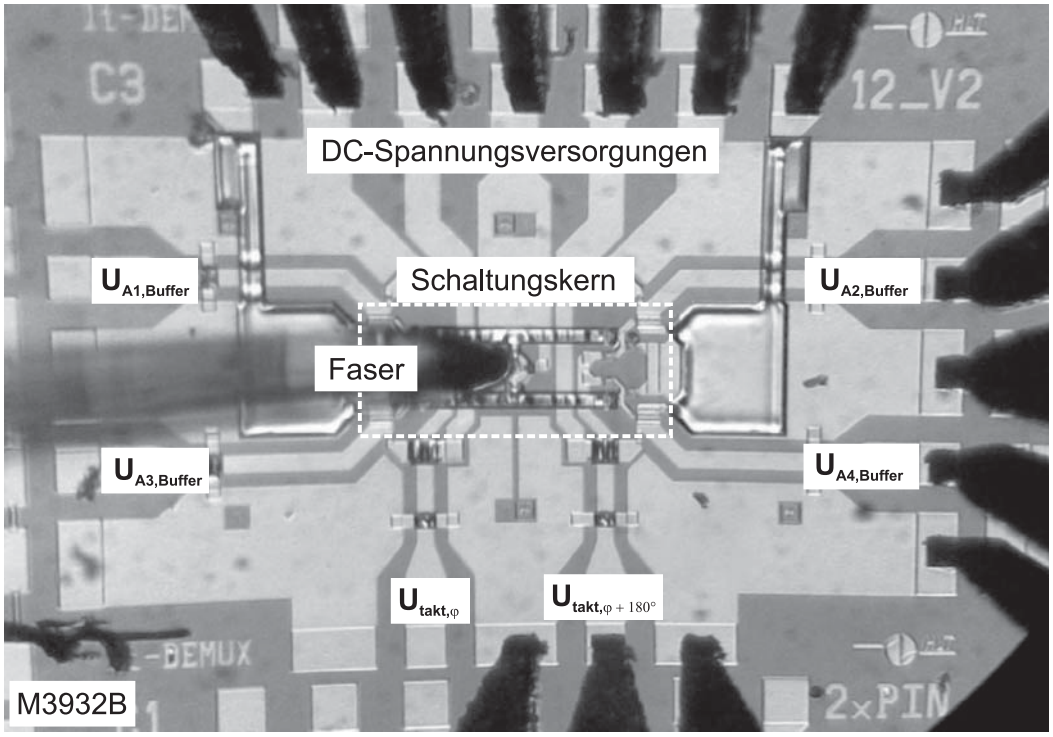


Abb. 6.18: Chipaufnahme des λt-DEMUX während der on-wafer Charakterisierung (gestapelter Detektor: V2, 12 μm)

Der λt-DEMUX ist in einer eigenen Makrozelle auf dem Maskensatz MOBILE08 untergebracht (vgl. Abb. 6.4). Details zum Prozess befinden sich im Kapitel 6.2. Die hergestellten Schaltungen basieren auf dem HFET-Integrationskonzept mit einer PINIP-Schichtsequenz des gestapelten Photodetektors (vgl. Kapitel 6.1). Abbildung 6.18 zeigt eine Lichtmikroskopaufnahme des prozessierten λt-DEMUX während seiner on-wafer Charakterisierung in der Messtechnik. Die Ein- und Ausgänge sind entsprechend den Bezeichnungen im Schaltungskonzept beschriftet. Die Schaltung besitzt zwei koplanare HF-Takteingänge und je zweimal zwei HF-Ausgänge in einer GSGSG-Anordnung. Die DC-Versorgung wird über eine variabel beschaltbare siebenfach Nadel oberhalb der Schaltung vorgenommen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Der optische Eingang der Schaltung ist zentral platziert und die Glasfaser wird von links kommend darüber justiert.

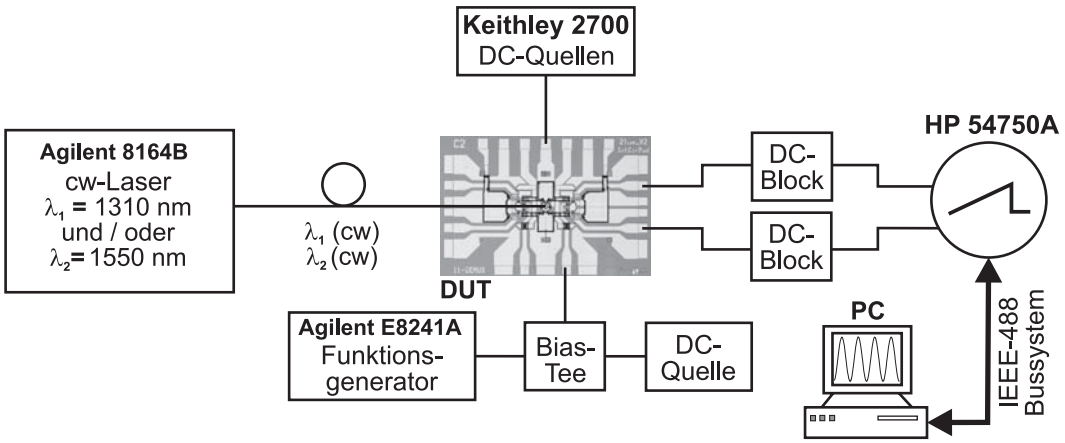


Abb. 6.19: Schematischer Messaufbau zum frequenzabhängigen Funktionstest des λt-DEMUX

Wie auch schon beim vollständig optischen MoBiLE, beschränken sich die messtechnischen Möglichkeiten auf einen grundlegenden Test der getakteten Schaltung. Für einen vollständigen Betrieb des λt-DEMUX wäre es nötig, insgesamt vier Eingangssignale zu erzeugen und aufeinander zu synchronisieren, wovon zwei zusätzlich in die optische Ebene umgesetzt werden müssten. Mit der zur Verfügung stehenden Messtechnik ist es jedoch möglich, jeweils einen Takteingang mit einem Signal zu beaufschlagen und optische Datenströme λ_1 und λ_2 in Form von Dauerstrich-Signalen in den gestapelten Detektor einzustrahlen. Damit ist es möglich, das λ-Demultiplexing und das entsprechende Abtastverhalten messtechnisch zu testen. Der verwendete Messaufbau ist in Abbildung 6.19 dargestellt. Die Erzeugung des Taktsignals erfolgt mit einem 20 GHz Funktionsgenerator. Der negative Gleichanteil wird über ein Bias-Tee und eine DC-Quelle aufaddiert. Die optische Anregung erfolgt über eine cw-Laserquelle, bei welcher sich die beiden benötigten Wellenlängen unabhängig auf eine Faser schalten lassen. Mit Hilfe eines Zweikanal-Samplingoszilloskops lassen sich parallel zwei Ausgänge der Schaltung auslesen. Sinnvollerweise wird dies bei Ausgängen durchgeführt, welche dem selben Takteingang zugeordnet sind (A_1 und A_3 bzw. A_2 und A_4). Das Messergebnis lässt sich über einen angeschlossenen PC auslesen und speichern.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

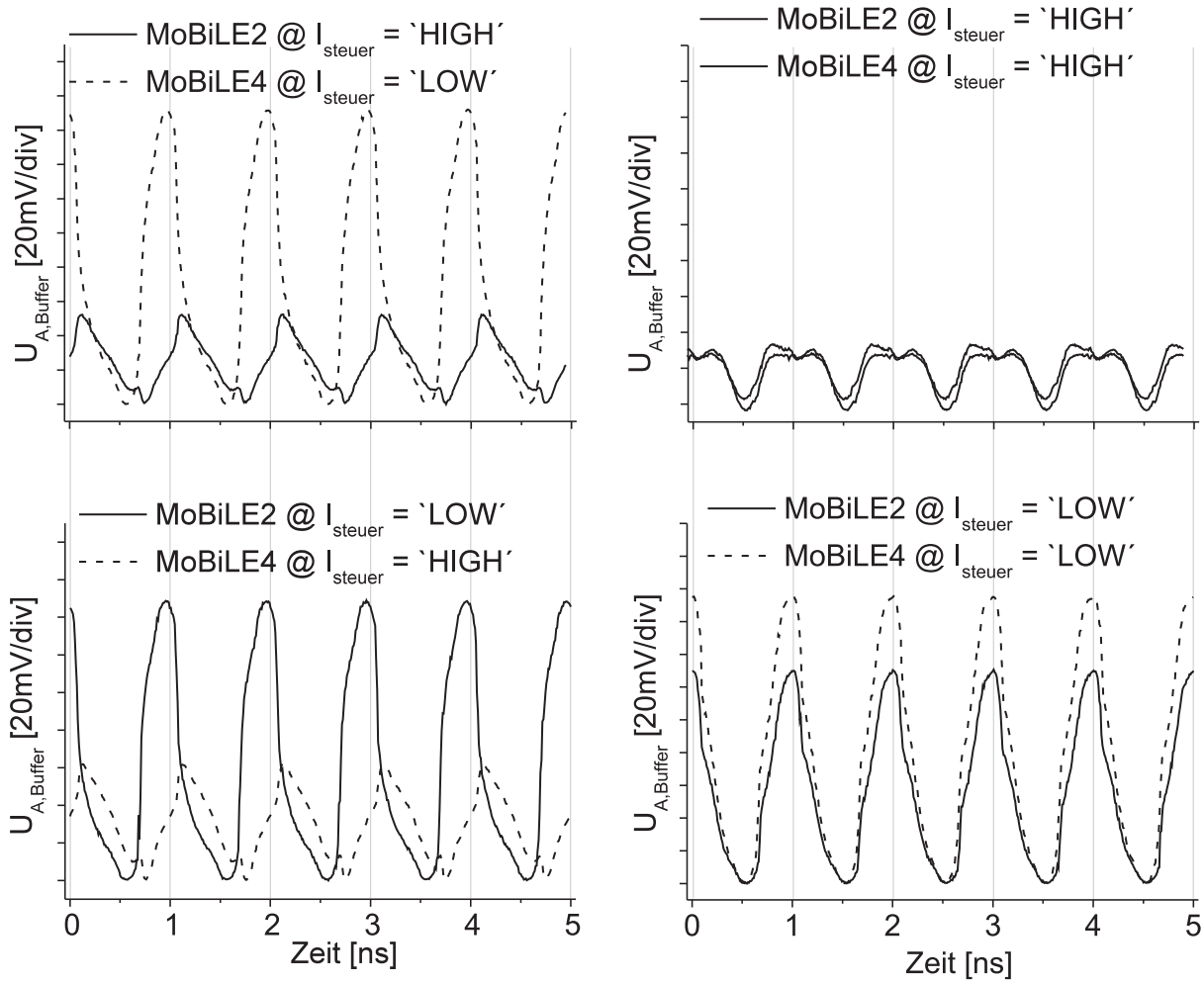


Abb. 6.20: Messergebnis des λt-DEMUX für die Ausgänge A_2 und A_4 (gestapelter Detektor: V2, 12 μm) bei f_{takt} = 1 GHz

Das Messergebnis der Schaltungsausgänge A_2 und A_4 bei einer Anregung des Takteingangs $U_{takt,\varphi+180°}$ ist in Abbildung 6.20 für alle vier möglichen logischen Zustände der Steuereingänge dargestellt. Die Korrektur der Messkurven um den fehlenden Gleichanteil wurde mit der gleichen Begründung wie in Kapitel 6.3.2 nachträglich durchgeführt. Anders als bei den Simulationsergebnissen, sind die gemessenen Ausgangssignale hinter dem Bufferverstärker (Inverter) ausgelesen, so dass sich insgesamt ein invertierendes Verhalten ergibt. Das korrekte Schaltverhalten der MoBiLE-Gatter ist für alle vier möglichen Situa-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

tionen am optischen Eingang klar demonstriert. Damit ist das λ-Demultiplexing durch den gestapelten Photodetektor für den Fall der Speisung der Steuereingänge zweier MoBiLE-Gatter erfolgreich. Des Weiteren ist die Funktionalität der Maßnahmen zur Entkopplung der MoBiLE-Gatter voneinander durch die Dioden D_1 bis D_4 und zur Berücksichtigung des optischen Übersprechens durch Variation der RTD-Flächendifferenzen experimentell bestätigt.

In diesem Zusammenhang sind die unterschiedlichen Amplituden der beiden MoBiLE bei der Abtastung eines 'LOW´-Eingangssignals nachvollziehbar (vgl. Abbildung 6.20 unten rechts). Diese sind auf den sinkenden Serienwiderstand der RTD bei einer Vergrößerung der aktiven Fläche A_{RTD} und damit mit einer leichten Verschiebung der sich einstellenden Pegel am MoBiLE-Ausgang zurückzuführen. In diesem Fall betrifft die Flächenskalierung die Last-RTDs der MoBiLE-Gatter 2 und 4. Das bedeutet, je größer die Fläche der Last-RTD, desto höher ist der Spannungsabfall an der Treiber-RTD, deren Fläche in der gesamten Schaltung konstant bleibt. Diese Abhängigkeit wird bei genauerem Hinsehen bereits bei den simulierten Ausgangssignalen deutlich, jedoch mit einer deutlich geringeren Ausprägung. Ausschlaggebend hierfür ist eine Diskrepanz des realen Schichtwiderstandes der RTD-Kontaktschichten nach oben und dadurch einer Abweichung vom RTD-Model. Die gleiche Tendenz wurde bereits an einer anderen Stelle bei der Untersuchung des vollständig optischen MoBiLE festgestellt, welches auf derselben Probe vorhanden war (vgl. Kapitel 6.3.2).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Dissertation wurde die Funktionalität einer InGaAs PIN-Diode durch die Erweiterung um eine zweite InGaAsP-Absorptionsschicht gesteigert. Der so aufgebaute gestapelte Photodetektor mit der epitaktischen Schichtsequenz PINIP oder NIPIN und drei elektrischen Anschlüssen ist in der Lage, zwei optische Signale (λ_1 = 1,3 µm und λ_2 = 1,55 µm) innerhalb einer einzigen bestrahlten Fläche zu detektieren und auf getrennten elektrischen Ausgängen zur Weiterverarbeitung bereitzustellen. Die Entwicklungsarbeit setzt bereits beim Schichtwachstum an, da experimentell gezeigt werden konnte, dass sich die für herkömmliche PIN-Dioden verwendete kohlenstoffdotierte p-Schicht nicht auf den gestapelten Photodetktor übertragen lässt. Der Grund liegt in der thermischen Belastung der Schicht während des Epitaxieprozesses durch das Überwachsen mit den übrigen Schichten des gestapelten Detektors, was zu einer massiven Passivierung des Dotierstoffs führt. Abhilfe schaffte der Einsatz von Zink als thermisch stabiler Dotierstoff, welcher für eine erfolgreiche Realisierung dieses Bauelements bezüglich der Kontakttechnologie sorgte.

Des Weiteren wurde das Übersprechen der Signale auf den jeweils anderen Kanal untersucht. Da die beiden Signale den gestapelten Detektor als modulierter Photonenstrom erreichen und als elektrisches Signal verlassen, mussten beide Ebenen getrennt auf eine gegenseitige Beeinflussung hin untersucht werden. Bezüglich der optischen Form, konnte durch die Wahl entsprechend gestalteter Bauelementlayouts eine Beeinflussung durch Streulicht ausgeschlossen werden. Außerdem wurde durch eine integrierte Teststruktur die absolute Bestimmung des Absorptionskoeffizienten der eingebetteten InGaAsP-Schicht ermöglicht, wodurch eine Optimierung durch eine Variation der InGaAsP-Stöchiometrie untersucht werden konnte. Das frequenzabhängige elektrische Übersprechen wurde durch Streuparametermessungen bestimmt. Der dominierende Einfluss der mittleren Kontaktschicht auf diesen Parameter konnte durch eine entsprechende Variation der Schichtstruktur und durch Feldsimulationen belegt und optimiert werden.

Messungen des Frequenzgangs bescheinigen dem entwickelten gestapelten Detektor eine elektrische Bandbreite f_{3dB} von 9 GHz für den InGaAs- und 11 GHz für den InGaAsP-Absorber bei einem Bauelementdurchmesser von d_{PIN} = 12 µm. Eine Großsignalmodellierung des gestapelten Photodetektors für die Simulation digitaler Applikationsschaltungen schließt die Arbeiten ab und zeigt erstmalig das Potential solcher Strukturen für den Bereich der Mikrowellenanwendungen auf.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Des Weiteren beinhaltet diese Arbeit zwei neuartige Ansätze für kompakte und funktionale optoelektronische Empfängerschaltungen auf Basis des gestapelten Detektors und eines Monostabilen-Bistabilen-Logik-Elements (MoBiLE), welcher aus der Reihenschaltung zweier RTDs aufgebaut wird. Es handelt sich hierbei einerseits um ein MoBiLE-Gatter mit einem gemeinsamen optischen Eingang für Daten und den Takt und andererseits um einen Demultiplexer, welcher in der Lage ist, auf der zeitlichen und spektralen Ebene gebündelte Daten zu verarbeiten. Die technologisch anspruchsvolle Realisierung beinhaltet die laterale Auflösung von Submikron-Strukturen bei einer Gesamttopologie von etwa 2,5 µm. Die technologischen Voraussetzungen für eine Optimierung der Empfindlichkeit der Empfängerschaltungen wurden durch die Adaption einer hoch präzisen trockenchemischen Mesaätzung bei RTDs gelegt, welche eine kontrollierbare Reduzierung der Eingangsströme am MoBiLE ermöglicht. Digitale Testmessungen an hergestellten Demonstratorschaltungen bei Frequenzen im einstelligen GHz-Bereich bestätigen die Konzepte.
Darüber hinaus leistet diese Arbeit einen Beitrag zur Thematik des III/V-Technologietransfers zur CMOS-kompatiblen Siliziumtechnologie. Ausgehend von einem (001)-Siliziumsubstrat wurde die Gitterkonstante durch epitaktische Maßnahmen auf die des Indiumphosphids transferiert. Anschließend wurde eine InGaAs PIN-Diode gewachsen, prozessiert und messtechnisch einer DC- und HF-Charakterisierung unterzogen. Ein Vergleich der Messergebnisse mit einem nominell identischen Bauelement auf InP-Substrat belegt eine hohe Qualität des untersuchten Ansatzes. Die prinzipielle Möglichkeit zur monolithischen Integration optoelektronischer III/V-Bauelemente auf einem Siliziumsubstrat wird damit demonstriert, und das Potential einer Kointegration mit CMOS-Prozessen wird diskutiert.

Ausblick auf weiterführende Arbeiten

Im Folgenden sollen kurz einige Ansätze angesprochen werden, an welchen die durchgeführten Arbeiten fortgesetzt werden könnten, um die Ergebnisse zu erweitern bzw. zu verbessern.
Das erzielte optische Übersprechen des gestapelten Photodetektors ist mit 100 % bei der unteren PIN-Diode (PIN_2) äußerst unbefriedigend. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Applikationsschaltungen konnten sehr einfach über den Schwellenwert des MoBiLE-Gatters auf diesen Parameter angepasst werden, jedoch ist dieser hohe Wert üblicherweise nicht tolerierbar. Als Optimierungsmaßnahme ist der Einsatz eines Bragg-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Reflektors im Bereich der mittleren Kontaktschicht denkbar, welcher selektiv die Wellenlänge $\lambda_1 = 1{,}3\ \mu m$ zurück in den oberen Absorber reflektiert. Hier kann eine Untersuchung der Abhängigkeit zwischen dem Gewinn im Hinblick auf das optische Übersprechen und der sich ergebenden Bauelementtopologie erfolgen.
Im Zusammenhang mit den ermittelten Grenzfrequenzen des gestapelten Detektors kann davon ausgegangen werden, dass die Verschiebungsströme am parasitären RC-Glied der RTD den limitierenden Faktor für die Bandbreite der gefertigten Schaltungen darstellen. Optimierungsmaßnahmen setzen hier unmittelbar am Schicht- und Bauelementdesign der RTD an und sind Gegenstand aktueller Arbeiten im Fachgebiet. Hierbei wurde bereits die Quantenstruktur so verändert, dass die Stromdichten durch die RTD um den Faktor zehn zu den in dieser Arbeit verwendeten Elementen angestiegen sind. Hierdurch erhofft man sich eine kürzere Ladezeit der Kapazität. Gleichzeitig sind Maßnahmen getroffen worden, um den Serienwiderstand zu reduzieren. Ein vielversprechender Ansatz besteht diesbezüglich in der Aufteilung der RTD-Mesa in mehrere kleinere [13].

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Veröffentlichungen im Rahmen dieser Arbeit

[1] A. Matiss, A. Poloczek, W. Brockerhoff, W. Prost, F.-J. Tegude, "Large-Signal Analysis and AC Modelling of Sub Micron Resonant Tunnelling Diodes", *European Microwave Conference (EuMIC)*, pp. 207–210, 2007.

[2] A. Matiss, A. Poloczek, A. Stöhr, W. Brockerhoff, W. Prost, F.-J. Tegude, "Sub-Nanosecond Pulse Generation using Resonant Tunneling Diodes für Impulse Radio", *International Conference on Ultra-Wideband (ICUWB)*, pp. 354–359, Sep. 2007.

[3] S. Topaloglu, J. Driesen, A. Poloczek, F.-J. Tegude, "Fabrication of Transferred-Substrate HBT with Simple Technology", *IC on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 508–511, 2005.

[4] W. Prost, V. Khorenko, A. C. Mofor, S. Neumann, A. Poloczek, A. Matiss, A. Bakin, A. Schlachetzki, F.-J. Tegude, "High Performance III/V RTD and PIN Diode on a Silicon Substrate", *Applied Physics A, Special Issue: From Surface Science to Device Physics*, vol. A 87, pp. 539–544, 2007.

[5] W. Prost, P. Kelly, A. Guttzeit, V. Khorenko, E. Khorenko, A. Matiss, J. Driesen, A. C. Mofor, A. Bakin, A. Poloczek, S. Neumann, A. Stöhr, D. Jäger, M. McGinnity, A. Schlachetzki, F.-J. Tegude, "Design and Modelling of III/V MOBILE-Gate with Optical Input on a Silicon Substrate", *IC on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 17–20, 2005.

[6] A. Poloczek, M. Weiss, S. Fedderwitz, A. Stöhr, W. Prost, D. Jäger, F.-J. Tegude, "Integrated InGaAs pin-diode on exactly oriented silicon (001) substrate suitable for 10 Gbit/s digital applications", *IEEE 20th Lasers and Electro-Optics Society*, pp. 180–181, 2007.

[7] A. Poloczek, A. Stöhr, W. Prost, I. Regolin, D. Jäger, F.-J. Tegude, "High Performance III/V PIN-Diode on a Silicon (001) Substrate for Optoelectronic Receivers", *European ISIS Summer School and Workshop*, 2006.

[8] A. Poloczek, I. Regolin, W. Prost, F.-J. Tegude, "Wachstum und Anwendung von InGaAsP-Schichten für optoelektronische Detektoren mit gestapelten Absorptionsschichten", *20. DGKK Workshop*, 2005.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[9] A. Poloczek, B. Münstermann, I. Nannen, I. Regolin, F.-J. Tegude, "Wavelength-Selective Receiver for Simultaneous $\lambda = 1.3$ µm and $\lambda = 1.55$ µm RF Optical Transmission", *IC on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 295–297, 2009.

[10] I. Nannen, A. Poloczek, A. Matiss, W. Brockerhoff, I. Regolin, F.-J. Tegude, "InP-HEMT-TIA with Differential Optical Input using Vertical High Topology PIN-Diodes", *IC on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 107–109, 2007.

[11] A. Poloczek, W. Wang, J. Driesen, I. Regolin, W. Prost, F.-J. Tegude, "Concept and Development of a New MOBILE-Gate with All Optical Input", *German Microwave Conference (GeMiC)*, 2006.

[12] W. Prost, A. Poloczek, A. Matiss, J. Driesen, F.-J. Tegude, "High Speed Monostable-Bistable Transition Logic Element Gates with Optical Inputs at 1.3 µm / 1.55 µm", *Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS)*, 2007.

[13] A. Tchegho, B. Muenstermann, C. Gutsche, A. Poloczek, K. Blekker, W. Prost, F.-J. Tegude, "Scalable High-Current density RTDs with low Series Resistance", *IC on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 1–4, 2010.

[14] A. Matiss, A. Poloczek, W. Brockerhoff, W. Prost, F.-J. Tegude, "Monostable-Bistable Threshold Logic Elements in a Fully Complementary Optical Receiver Circuit for High Frequency Applications", *IC on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 1–4, 2008.

[15] A. Matiss, W. Brockerhoff, A. Poloczek, W. Prost, F.-J. Tegude, "On-Waver Parameter Extraction of Resonant Tunneling Diodes with Different Emitter Areas at 15K", *IEEE Electron Devices Workshop*, 2006.

[16] K. Tan, S. Yoon, W. Loke, S. Wicaksono, K. Lew, A. Stöhr, O. Ecin, A. Poloczek, A. Malcoci, D. Jäger, "High-speed picosecond pulse response GaNAsSb p-i-n photodetectors grown by RF plasma-assisted nitrogen molecular beam epitaxy", *Applied Physics Letters*, vol. 90, 2007.

[17] W. Prost, D. Zhang, B. Muenstermann, T. Feldengut, R. Geitmann, A. Poloczek, F.-J. Tegude, "InP-based Unipolar Heterostructure Diode for Vertical Integration, Level Shifting, and Small Signal Rectification", *IEICE Trans. Electron.*, vol. E93 – C, No. 8, pp. 1309 – 1314, 2010.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[18] S. Fedderwitz, A. Stöhr, S. Yoon, K. Tan, M. Weiß, W. Loke, A. Poloczek, S. Wicaksono, D. Jäger, "Multigigabit 1.3 µm GaNAsSb/GaAs Photodetectors", *Applied Physics Letters*, vol. 93, 2008.

[19] K. H. Tan, S. Yoon, S. Fedderwitz, A. Stoehr, W. Loke, S. Wicaksono, T. Ng, M. Weiß, A. Poloczek, V. Rymanov, A. Patra, E. Tangdiongga, D. Jaeger, "14-GHz GaNAsSb Unitraveling Carrier 1.3 µm Photodetectors Grown by RF Plasma Assisted Nitrogen Molecular Beam Epitaxy", *IEEE Electron Device Leters*, vol. 30, no. 6, pp. 590 – 592, 2009.

Zitierte Literaturstellen

[20] T. Akeyoshi, N. Shimizu, J. Osaka, M. Yamamoto, T. Ishibashi, K. Sano, K. Murata, E. Sano, "Optoelectronic logic gate monolithically integrating resonant tunneling diodes and uni-traveling-carrier photo diode", *IC on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 423–426, 1998.

[21] A. Matiss, *Entwurf und Realisierung neuartiger Schaltungskonzepte mit Resonanztunneldioden.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2008.

[22] S. Topaloglu, *Process Technology for High Speed InP Based Heterojunction Bipolar Transistors.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2006.

[23] M. Rocks, W. Kliemsch, *Optische Telekommunikationssysteme.* Damm-Verlag KG (ISBN 3-8733-082-2), 1996.

[24] W. Prost, *Technologie der III/V-Halbleiter.* Springer-Verlag (ISBN 3-540-62804-5), 1997.

[25] P. Velling, *Zur metallorganischen Gasphasenepitaxie (MOVPE) mittels nichtgasförmiger Quellen für elektronische Heterostruktur-Bauelemente basierend auf III/V-Halbleitern.* Dissertation, Gerhard-Mercator Universität/Gesamthochschule Duisburg, 2002.

[26] R. K. Ahrenkiel, R. Ellingson, S. Johnston, W. Wanlass, "Recombination lifetime of $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ as a function of doping density", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 72, no. 26, pp. 3470 – 3472, 1998.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[27] M. Salib, L. Liao, R. Jones, M. Morse, A. Liu, D. Samara-Rubio, D. Alduino, M. Paniccia, "Silicon Photonics", *Intel Technology Journal*, vol. 8, issue 2, pp. 142 – 161, 2004.

[28] V. Brückner, *Optische Nachrichtentechnik*. B. G. Teubner Verlag (ISBN 3-519-00418-6), 2003.

[29] A. Rogers, *Essentials of Optolectronics*. Chapman & Hall (ISBN 0-412-40890-2), 1997.

[30] J. Sjöström, "Measurement and modeling of photodetectors for monolithic optoelectronic receivers for bit rates up to 40 Gb/s", Masterarbeit, Kungl Tekniska Högskolan, 1998.

[31] J. Bowers, C. Burrus, "Ultrawide-band long-wavelength p-i-n photodetectors", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 5, pp. 1339–1350, Oct 1987.

[32] O. Madelung, *Semiconductors: Data Handbook*. Springer-Verlag (ISBN 3-540-4048-80), 2004.

[33] G. Lucovsky, R. F. Schwarz, R. B. Emmons, "Transit-Time Considerations in p-i-n Diodes", *Journal of Applied Physics*, vol. 35, no. 3, pp. 622–628, 1964.

[34] D. W. Winston, "SimWindows." http://www.simwindows.com, University of Colorado, 2010.

[35] L. Esaki, "Long journey into tunneling", *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, pp. 825–831, June 1974.

[36] F. Capasso, S. Sen, F. Beltram, L. M. Lunardi, A. S. Vengurlekar, P. R. Smith, N. J. Shah, R. J. Malik, A. Y. Cho, "Quantum functional devices: resonant-tunneling transistors, circuits with reduced complexity, and multiple valued logic", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 36, no. 10, pp. 2065–2082, 1989.

[37] K. Maezawa, T. Mizutani, "A New Resonant Tunneling Logic Gate Emploing Monostable-Bistable Transition", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 32, pp. L42–L44, 1993.

[38] T. Akeyoshi, H. Matsuzaki, T. Itoh, T. Waho, J. Osaka, M. Yamamoto, "Applications of resonant-tunneling diodes to high-speed digital ICs", *IC on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 405–410, 1999.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[39] K. Arai, H. Matsuzaki, K. Maezawa, T. Otsuji, M. Yamamoto, "Static frequency divider featuring reduced circuit complexity by utilizing resonant tunneling diodes in combination with HEMTs", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 18, no. 11, pp. 544–546, 1997.

[40] T. Akeyoshi, K. Maezawa, T. Mizutani, "Weighted sum threshold logic operation of MOBILE (monostable-bistable transition logic element) using resonant-tunneling transistors", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 14, no. 10, pp. 475–477, 1993.

[41] K. Chen, K. Maezawa, M. Yamamoto, "InP-based high-performance monostable-bistable transition logic elements (MOBILEs) using integrated multiple-input resonant-tunneling devices", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 17, no. 3, pp. 127–129, 1996.

[42] K. Maezawa, "Resonant tunneling diodes and their application to high-speed circuits", *IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSIC)*, pp. 97–100, 2005.

[43] P. Glösekötter, *Resonanz-Tunneldioden und Heterobipolartransistoren in digitalschaltungen hoher Funktionsdichte.* Dissertation, Universität Dortmund, 2002.

[44] K. J. Chen, T. Akeyoshi, K. Maezawa, "Monolithic integration of resonant tunneling diodes and FET's for monostable-bistable transition logic elements (MOBILE's)", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 16, no. 2, pp. 70–73, 1995.

[45] M. Tong, A. A. Ketterson, K. Nummila, I. Adesida, L. Aina, M. Mattingly, "Selective wet etching for InGaAs/InAlAs/InP heterostructure field-effect transistors", *IC on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 298–301, 1992.

[46] J. Driesen, *Design von schnellen Heterostruktur-Bipolar-Transistoren für den Einsatz in Schaltungen mit Resonanz-Tunnel-Dioden.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2008.

[47] Oxford Instruments Plasma Technology Ltd., http://www.oxford-instruments.com.

[48] S. Matuso, M. Kiuchi, "Low Temperature Chemical Vapor Deposition Method Utilizing an Electron Cyclotron Resonance Plasma", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 22, no. 4, pp. L210 – L212, 1983.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[49] M. Yoon, T. Kim, D. Kim, K. Yang, "Effects of thermal stress on the performance of benzocyclobutene-passivated InAlAs/InGaAs high electron mobility transistors", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 4B, pp. 1910–1913, 2004.

[50] M. Rodwell, Q. Lee, D. Mensa, J. Guthrie, Y. Betser, S. C. Martin, R. P. Smith, S. Jaganathan, T. Mathew, P. Krishnan, C. Serhan, S. Long, "Ultra high frequency integrated circuits using transferred substrate heterojunction bipolar transistors", *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, vol. 2, pp. 500–503, 30 May–2 June 1999.

[51] T. Kraemer, C. Meliani, F. Lenk, J. Wuerfl, G. Traenkle, "Transferred substrate DHBT of f_t= 410 GHz and f_{max}= 480 GHz for traveling wave amplifiers", *IC on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM)*, pp. 1–3, 2008.

[52] D. Schmidt, D. Trommer, "Conservation of low dark current of InGaAs photodiodes after NH_3F/HF etch with a BCB passivation layer", *IC on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 302–305, 2000.

[53] H. S. Kim, J. H. Choi, H. M. Bang, Y. Jee, S. W. Yun, J. Burm, M. D. Kim, A. G. Choo, "Dark current reduction in APD with BCB passivation", *Electronics Letters*, vol. 37, no. 7, pp. 455–457, 2001.

[54] Y. C. Zhu, F. Karouta, E. J. Geluk, T. d. Vries, J. J. G. M. v. d. Tol, J. J. M. Binsma, M. K. Smit, "ICP Etching of InP and its Applications in Photonic Circuits", *Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter*, pp. 81–84, 2003.

[55] S. Guilet, S. Bouchoule, C. Jany, C. S. Corr, P. Chabert, "Optimization of a Cl_2-H_2 inductively coupled plasma etchning process adapted to nonthermalized InP wafers for the realization of deep ridge heterostructers", *Journal of Vacuum Science & Technology B*, vol. 24, no. 5, pp. 2381 – 2387, 2006.

[56] R. van der Heijden, C. Carlström, E. van der Drift, R. van der Heijden, R. Nötzel, R. van Veldhoven, F. Karouta, H. Salemink, A. Talneau, "Cl_2/O_2- and Cl_2/N_2-based Inductively Coupled Plasma Etching of Photonic Crystals in InP: Sidewall Passivation", *IC on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 315–318, 2005.

[57] S. M. Sze, *Semiconductor Devices: Physics and Technology.* John Wiley & Sons, Inc. (ISBN 0-471-33372-7), 2002.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[58] F. Wanlass, C. Sah, "Nanowatt Logic Using Field-Effect Metal-Oxide Semiconductor Triodes", *IEEE Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers.*, pp. 32–33, Volume VI, 1963.

[59] M. J. Franco, "Mobile handset power amplifiers", *IEEE Microwave Magazine*, vol. 10, no. 7, pp. 16–19, 2009.

[60] L. Pavesi, "Will silicon be the photonic material of the third millenium?", *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. Condens. Matter 15, pp. R1169–R1196, 2003.

[61] H. K. Zimmermann, *Integrated Silicon Optoelectronics.* Springer-Verlag (ISBN 3-642-01520-4), 2009.

[62] G. Masini, V. Cencelli, L. Colace, F. de Notaristefani, G. Assanto, "Linear array of Si-Ge heterojunction photodetectors monolithically integrated with silicon CMOS readout electronics", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 10, no. 4, pp. 811–815, 2004.

[63] G. Masini, G. Capellini, J. Witzens, C. Gunn, "A 1550nm, 10Gbps monolithic optical receiver in 130nm CMOS with integrated Ge waveguide photodetector", *Proc. 4th IEEE International Conference on Group IV Photonics*, pp. 1–3, 2007.

[64] Z. Huang, J. Oh, C. J. C., "Back-side-illuminated high-speed Ge photodetector fabricated on Si substrate using thin SiGe buffer layers", *Applied Physics Letters*, vol. 85, no. 15, pp. 3286–3288, October 2004.

[65] O. I. Dosunmu, D. D. Cannon, M. K. Emsley, L. C. Kimerling, M. S. Unlu, "High-speed resonant cavity enhanced Ge photodetectors on reflecting Si substrates for 1550-nm operation", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, pp. 175–177, Jan. 2005.

[66] M. Jutzi, M. Berroth, G. Wohl, M. Oehme, E. Kasper, "Ge-on-Si vertical incidence photodiodes with 39-Ghz bandwidth", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, pp. 1510–1512, July 2005.

[67] S. C. Tan, Y. C. Chan, N. S. M. Lui, "The effect of different bonding temperatures on the mechanical and electrical performance of NCF-bonded flip-chip-on-flex packages", *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 29, pp. 570–575, Aug. 2006.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[68] U. Gosele, Q. Y. Tong, "III-V materials integration technologies: wafer bonding approaches", *IC on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 9–12, 2000.

[69] T. Nakahara, H. Tsuda, N. Ishihara, K. Tateno, C. Amano, "High-sensitivity 1 Gbit/s CMOS receiver integrated with GaAs- or InGaAs-photodiode by wafer-bonding", *Electronics Letters*, vol. 37, pp. 781–783, 7 Jun 2001.

[70] B. Yang, M. Yang, D. M. Fried, C. D. Sheraw, A. Waite, K. Nummy, L. Black, S. D. Kim, H. Yin, B. Kim, S. Narasimha, X. Chen, M. Khare, S. Luning, P. Agnello, "CMOS Fabricated by Hybrid-Orientation Technology (HOT)", *International Workshop on Electron Devices and Semiconductor Technology (EDST)*, pp. 8–13, 2007.

[71] L. Chang, M. Ieong, M. Yang, "CMOS circuit performance enhancement by surface orientation optimization", *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 51, pp. 1621–1627, Oct. 2004.

[72] D. Zubia, S. D. Hersee, "Nanoheteroepitaxy: The Application of nanostructuring and substrate compliance to the heteroepitaxy of mismatched semiconductor materials", *Journal of Applied Physics*, vol. 85, no. 9, pp. 6492 –6496, 1999.

[73] A. Bakin, D. Piester, I. Behrens, H.-H. Wehmann, E. Peiner, A. Ivanov, D. Fehly, A. Schlachetzki, "Growth of InP Layers on Nanometer-Scale Patterned Si Substrates", *Crystal Growth and Design*, vol. 3, no. 1, pp. 89 – 93, 2003.

[74] S. F. Fang, K. Adomi, S. Iyer, H. Morkoc, H. Zabel, "Gallium arsenide and other compound semiconductors on silicon", *Journal of Applied Physics*, vol. 68, no. 7, pp. R31 – R58, 1990.

[75] V. Khorenko, A. C. Mofor, A. Bakin, S. Neumann, A. Guttzeit, H. H. Wehmann, W. Prost, A. Schlachetzki, F. J. Tegude, "Buffer optimization for InP-on-Si [001] quasi-substrates", *IC on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 118–121, 2004.

[76] U. Hilleringmann, *Silizium-Halbleitertechnologie*. B. G. Teubner Verlag (ISBN 3-519-30149-0), 2004.

[77] P. Pieters, "Integrating MEMS with standard CMOS using low temperature poly-SiGe technology", *11th Annual Int. KGD Packaging and Test Workshop*, 2004.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[78] K. Ma, R. Urata, D. A. B. Miller, J. S. Harris, "Low-Temperature Growth of GaAs on Si Used for Ultrafast Photoconductive Switches", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 40, no. 6, pp. 800 – 804, 2004.

[79] D. Fehly, A. Schlachetzki, A. S. Bakin, A. Guttzeit, H.-H. Wehmann, "Monolithic InGaAsP Optoelectronic Devices With Silicon Electronics", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 37, no. 10, pp. 1246 – 1252, 2001.

[80] P. Louro, M. Vieira, A. Steiger Garcao, Y. Vygranenko, M. Fernandes, "Optical image recognition using monolithic tandem pinip and pinpin heterojunctions: a comarison", *International Conference on Sensor Technologies and Applications*, pp. 361–365, 2007.

[81] Q. Zhu, S. Coors, B. Schneider, P. Rieve, M. Böhm, "Bias Sensitive α-Si(C):H Multispectral Detectors", *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 45, no. 7, pp. 1393 – 1398, 1998.

[82] S. Neumann, J. Spieler, R. Blache, P. Kiesel, W. Prost, G. Döhler, F.-J. Tegude, "MOVPE growth and polarisation dependence of (dis-)ordered InGaAsP PIN diodes for optical fibre applications", *Journal of Crystal Growth*, vol. 248, pp. 158 – 162, 2003.

[83] J. Campbell, T. Lee, A. Dentai, C. Burrus, "Dual-wavelength demultiplexing InGaAsP photodiode", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 34, pp. 401 – 402, 1979.

[84] J. Campbell, A. Dentai, T. Lee, C. Burrus, "Improved Two-Wavelength Demultiplexing InGaAsP Photodetector", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 16, no. 6, pp. 601 – 603, 1980.

[85] J. Campbell, T. Lee, "Demultiplexing Photodetector", *U.S. Patent*, Appl. No.: 969,346, July 1980.

[86] S. Neumann, *Ein Beitrag zur Eptiaxie von elektro-optischen Doppel-Heterostruktur Bauelementen.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2008.

[87] L. Shantharama, H. Schumacher, H. Leblanc, R. Esagui, R. Bhat, M. Koza, "Evaluation of Single Ohmic Metallisations for Contacting with p- and n-type GaInAs", *Electronics Letters*, vol. 26, no. 15, pp. 1127 – 1129, 1990.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

[88] A. Lindner, *$In_{0,53}Ga_{0,47}As$ p-Dotierung mit Kohlenstoff.* Dissertation, Gerhard-Mercator Universität/Gesamthochschule Duisburg, 1997.

[89] Q. Hartmann, M. Fresina, D. Ahmari, S. Stockman, J. Baker, D. Barlage, H. Hwang-bo, A. Yung, M. Feng, G. Stillman, "Effects of Annealing on the Performance of InP/InGaAs HBTs grown by LP-MOCVD", *IC on Indium Phosphide and Related Materials*, pp. 505–508, 1997.

[90] K. Hong, D. Pavlidis, "Growth and Characterisation of Heavily Carbon Doped InGaAs Lattice Matched to InP by LP-MOCVD Using Liquid CCl_4", *Journal of Electronic Materials*, vol. 25, no. 3, pp. 449 – 455, 1996.

[91] S. Stockman, A. Hanson, S. Lichtenthal, M. Fresina, G. Höfler, K. Hsieh, G. Stillman, "Passivation of Carbon Acceptors during Growth of Carbon-Doped GaAs, InGaAs, and HBTs by MOCVD", *Journal of Electronic Materials*, vol. 21, no. 12, pp. 1111 – 1118, 1992.

[92] C. Caneau, R. Bhat, S. Goswami, M. Koza, "OMVPE Grown GaInAs:C for HBTs", *Journal of Electronic Materials*, vol. 25, no. 3, pp. 491 – 495, 1996.

[93] S. Kim, T. Reimann, "Study of the Anisotropic Etchnig Characteristics for InP-Based HBTs", *Gerhard Mercator Universität, HLT*, pp. 44 – 45, Jahresbericht 1999.

[94] Datenblatt *FEMTO HCA-S-200M-IN High-Speed Photoreceiver with InGaAs PIN Photodiode*, 2007.

[95] G. Torrese, I. Huynen, A. Vander Vorst, "Design Criteria for Increasing the Bandwidth-Efficiency Product of GaAs p-i-n Photodetectors", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 29, no. 3, pp. 150 – 155, 2001.

[96] G. Keller, "Modellbildung für InP Heterostruktur-Bipolar-Transistoren für den Einsatz in monolithisch integrierten Mikrowellenschaltungen", *Diplomarbeit, Universität Duisburg-Essen, HLT*, 2009.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Danksagung

Diese Dissertation umfasst von der Epitaxie bis zur Messtechnik eine große Bandbreite der Mikroelektronik und wäre ohne die tatkräftige Unterstützung und Förderung von entsprechenden Stellen in dieser Form nicht möglich gewesen. An dieser Stelle möchte ich nicht versäumen, folgenden Personen für ihren Beitrag zu danken:

Beim Fachgebietsleiter Herrn Prof. Dr. rer. nat. F.-J. Tegude bedanke ich mich für die Aufgabenstellung und für die Betreuung dieser Arbeit. Der mir großzügig gewährte Freiraum bei der Planung und Durchführung der Arbeiten sowie bei der Nutzung der Infrastruktur sorgte für ein angenehmes und produktives Arbeitsumfeld.

Bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. D. Jäger bedanke ich mich für die Bereitschaft zur Übernahme des Korreferats.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. W. Brockerhoff, welcher durch sein ausgesprochen kollegiales Wesen und durch seinen tatkräftigen Einsatz bei der Bewältigung manch „formaler“ Hürde diese Arbeit unterstützt hat. Sein fachübergreifendes Engagement ist eine tragende Stütze des Fachgebietes HLT und der gesamten Fakultät Ingenieurwissenschaften. Vielen Dank für die Korrektur dieses Manuskripts in der Entstehungsphase.

Herrn Dr.-Ing. W. Prost danke ich für sein stets „offenes Ohr“ und für seine konstruktive Diskussionsbereitschaft. Seine Prinzipien, sein enormer Wissensschatz und nicht zuletzt seine umfangreiche Literatursammlung tragen wesentlich zum sehr hohen wissenschaftlichen Niveau im Fachgebiet bei und waren mir eine große Hilfe bei der Arbeit.

Meinem ehemaligen Kollegen Herrn Dr.-Ing. A. Matiss danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit zur Thematik des MoBiLE-Gatters. Seine exzellenten Vorarbeiten im Bereich der Modellbildung, dem Schaltungsentwurf und der messtechnischen Analyse sind die Grundlage für die in dieser Arbeit erzielten Schaltungsergebnisse.

Basis für funktionierende Hardware ist das verfügbare Halbleitermaterial. In diesem Zusammenhang richtet sich mein Dank an Herrn Dr.-Ing. I. Regolin, welcher durch eine ausdauernde Optimierungsarbeit im Bereich der Epitaxie einen wichtigen Beitrag gelei-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

stet hat. Gerade die Schichtentwicklung für den gestapelten Photodetektor machte eine große Anzahl an zeitintensiven Wachstumsexperimenten notwendig.

Herrn Dipl.-Ing. K. Blekker danke ich für die Realisierung kleinster Strukturen mittels der Elektronenstrahllithografie. Sein besonderer Humor sorgte oft für ein entspanntes Arbeitsklima. Für die Unterstützung in den Bereichen Messtechnik, Simulation und außerdienstlichem Tischfußball bedanke ich mich bei den Kollegen Dipl.-Ing. I. Nannen, Dipl.-Ing. B. Münstermann und Dipl.-Ing. G. Keller.

Frau H. Barbknecht, Frau A. Merz und den ehemaligen sowie aktuellen Auszubildenden danke ich für die intensive Unterstützung beim technologischen Handwerk im Reinstraum. Ihre Hilfe schaffte mir die nötigen Freiräume außerhalb des Labors. Von Ihrer Erfahrung in diesem Bereich konnte ich sowohl bei der Entwicklung neuer Prozessschritte als auch bei der Lösung von auftretenden Problemen sehr profitieren. Herrn U. Doerk danke ich für seine universelle Hilfsbereitschaft, stets gute Laune sowie Organisation der an zahlreichen Wochenenden per Muskelkraft zurückgelegten (Höhen-)Meter. Herrn H. Bathel und Dipl.-Ing. R. Geitmann danke ich für Ihre handwerkliche Unterstützung rund um den Betrieb von Prozessanlagen.

Für den zuverlässigen Betrieb der komplexen Infrastruktur des Reinstraums sowie für die verantwortliche Aufsicht über alle sicherheitsrelevanten Aspekte der III/V-Technologie bedanke ich mich bei Herrn Ing. (grad.) R. Tilders und Herrn Dipl.-Ing. W. Molls.

Dem Fachgebiet Optoelektronik und insbesondere Herrn Dr.-Ing. A. Stöhr danke ich für die aufschlussreichen Diskussionen und die durchgeführten Messungen im Bereich der Photodetektoren.

Der ehemaligen Arbeitsgruppe von Prof. Dr. rer. nat. A. Schlachetzki an der TU Braunschweig danke ich für die Zusammenarbeit bezüglich des Wachstums von III/V Material auf Siliziumsubstraten.

Allen nicht namentlich genannten Kollegen, Mitarbeitern und Freunden danke ich für ihre fachliche und mentale Unterstützung und die gute Stimmung während der letzten sechs Jahre.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie, welche mich durch die nicht immer einfache Zeit des Studiums und der Promotion begleitet und für den nötigen Rückhalt im privaten Bereich gesorgt hat.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.