

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter im Fachgebiet Optoelektronik der Gerhard-Mercator-Universität - Gesamthochschule Duisburg. Das dieser Arbeit zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie im Rahmen des Verbundprojektes "Photonik II" unter dem Förderkennzeichen 01 BP 420A als Unterauftrag der Alcatel SEL AG, Stuttgart, gefördert.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Professor Dr. D. Jäger, dem Leiter des Fachgebietes Optoelektronik, für die Unterstützung und die Betreuung dieser Arbeit, sowie bei Herrn Professor Dr. F.-J. Tegude für die Zusammenarbeit im Rahmen des durchgeführten Projektes. Bei Herrn Professor Dr. P. Laws bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferates.

Den Herren Dipl.-Phys. T. Braasch, Dipl.-Ing. D. Kalinowski, Dipl.-Phys. R. Hülsewede danke ich für die kollegiale und intensive Zusammenarbeit, für die stets vorhandene Bereitschaft zur Hilfe bei technischen und wissenschaftlichen Problemen und für die vielen wissenschaftlichen Diskussionen.

Bei sämtlichen Mitarbeitern des Fachgebietes Optoelektronik bedanke ich mich für die Hilfsbereitschaft. Besonders hervorheben möchte ich den Einsatz von Frau V. Schedwill für ihre Arbeiten in der Reinraumtechnologie des Fachgebietes Optoelektronik.

Für die Unterstützung bei Aufbau und Inbetriebnahme der Meßplätze und bei der Erstellung von Simulationsprogrammen danke ich Herrn Dipl.-Ing. Oliver Berger, Herrn Dipl.-Ing. Michael Heinsdorf, Herrn Dipl.-Ing. André Lüdecke, Herrn Dipl.-Ing. Bernd Ponnellis und Frau Dipl.-Ing. Veronique Wendrix. Ihre Mitarbeit in Form von Studien- und Diplomarbeiten hat mich sehr unterstützt.

Wesentlich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen hat die Zusammenarbeit mit anderen Instituten und Fachgebieten. Besonderer Dank gebührt den Mitarbeitern des Fachgebietes Halbleitertechnik/Halbleitertechnologie, Herrn Dipl.-Phys. U. Auer, Frau S. Franke und Frau A. Osinski für die wertvolle technologische Unterstützung.

Bei Frau B. Brox vom Fachgebiet Nachrichtentechnik möchte ich mich für die Unterstützung bei der Maskenherstellung bedanken.

Den Mitarbeitern der Firma Alcatel SEL AG, Stuttgart, Herrn Dipl.-Ing. W. Kuebart und Herrn Dr. G. Veith danke ich für die Zusammenarbeit, die wissenschaftlichen Diskussionen und die Unterstützung im Rahmen dieses Projektes.

Bei Herrn Dr. W. Pascher von der FernUniversität Hagen möchte ich mich für die Simulation der Hochfrequenzeigenschaften bedanken.

Für die Geduld und die Unterstützung möchte ich allen danken, die im privaten Bereich von dieser Arbeit betroffen waren. Insbesondere bedanke ich mich bei meinen Eltern und bei meiner Frau Birgit und meiner Tochter Svenja für die Geduld und das Verständnis zur Durchführung dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Formelzeichen	7
Konstanten	13
Abkürzungen	14
Abbildungsverzeichnis	15
Tabellenverzeichnis	20
1 Einleitung	22
2 Hochgeschwindigkeits-Photodetektoren	29
2.1 Photodetektoren.....	30
2.2 Wanderwellen-Prinzip und Phasenanpassung.....	39
2.3 Materialien	46
2.4 Halbleitereigenschaften.....	49
3 Simulation	52
3.1 Halbleitersimulation.....	53
3.2 Optische Simulation.....	56
3.2.1 Methode des effektiven Brechungsindex	56
3.2.2 BPM-Verfahren.....	61
3.2.3 Simulation optischer Signale	64
3.3 Hochfrequenzersatzschaltbild	69
3.3.1 Analytische Lösung der Wellengleichungen	78
3.3.2 Numerische Lösung der Wellengleichungen.....	83
3.4 Optoelektronische Konversion: Simulationsergebnisse.....	88
3.5 Bauelemententwurf.....	93
4 Bauelement-Herstellung	97
4.1 Maskenlayout	98
4.2 Halbleiterschichtstrukturen	101
4.3 Prozessierung	105
5 Charakterisierung	112
5.1 Strom-Spannungs- und Kapazitäts-Spannungs-Messungen.....	113
5.2 Netzwerkanalyse	116
5.3 Optoelektronische Messungen	126

5.4 Bewertung der Ergebnisse 139

6 Zusammenfassung..... 142

Literatur 144

Formelzeichen

Die Seitenzahlen und die Gleichungs- bzw. Abbildungsnummern verweisen auf die erste Verwendung des Formelzeichens in dieser Arbeit.

Formelzeichen	Bedeutung	Seite / Nummer
a	Gitterkonstante	48, Tabelle 2.2
a	Dicke des hochdotierten Bereiches in der Mesa	72, Abb. 3.12
a	Fleckradius eines optischen Strahls	92, (3.94)
\underline{a}_i	komplexe hinlaufende Welle	58, Abb. 3.3
$\underline{a}_1, \underline{a}_2$	komplexe zulaufende Wellen eines Zweitorts	116, Abb. 5.3
A	Fläche	36, (2.6)
A	Richardsonkonstante	74, (3.35)
A^{**}	modifizierte Richardsonkonstante	75, (3.39)
b	Dicke des hochdotierten Bereiches unterhalb der Mesa	72, Abb. 3.12
B	Breite eines opt. Wellenleiters	55
\underline{b}	komplexe rücklaufende Welle	57, Abb. 3.3
$\underline{b}_1, \underline{b}_2$	komplexe ablaufende Wellen eines Zweitorts	115, Abb. 5.3
B_{eff}	effektive Breite eines opt. Wellenleiters	56
C'	Kapazitätsbelag einer Raumladungszone	79, (3.54)
C'_{kp}	Kapazitätsbelag einer koplanaren Leitung	44, (2.16)
C'_B	Kapazitätsbelag einer hochdotierten Schicht	70, Abb. 3.10
C'_L	Kapazitätsbelag der Metallisierung	70, Abb. 3.10
C	Kapazität einer Raumladungszone	114, (5.1)
C_{PD}	Kapazität eines Photodetektors	36, (2.5)
d	Substratdicke	72, Abb. 3.12
d	Abstand	113, Abb. 5.1
D	Dicke einer Halbleiterschicht	34, (2.2)
D_c	Besetzungsdichte im Leitungsband	55, (3.5)
D_p	Dicke einer p-dotierten Schicht	34, (2.4)
D_v	Besetzungsdichte im Valenzband	55, (3.6)

E	elektrische Feldstärke	75, (3.38)
\underline{E}_{opt}	komplexes elektrisches Feld einer optischen Feldverteilung	59, (3.12)
\underline{E}^0	komplexes elektrisches Feld einer optischen Feldverteilung	62, (3.19)
$\hat{E}, \hat{E}_A, \hat{E}_B$	Amplitude der elektrischen Feldkomponente eines optischen Signals	40, (2.7)
\hat{E}_M	komplexe Amplitude eines elektrisches Feldes einer optischen Mode M	65, (3.22)
\underline{E}_s	komplexe elektrische Feldkomponente eines optischen Signals	77, (3.49)
e_z	Einheitsvektorkomponente in z-Richtung	62, (3.18)
f	Frequenz	32, (2.1)
f_B	Bandbreite	42, (2.15)
f_n	Fermiverteilungsfunktion der Elektronen	55, (3.5)
f_p	Fermiverteilungsfunktion der Löcher	55, (3.6)
G	Generationsrate	89, (3.90)
G'	Leitwertsbelag der Raumladungszone	69, Abb. 3.9
G'_B	Leitwertsbelag der hochdotierten Schicht	70, Abb. 3.10
h	Höhe des niedrigdotierten Bereiches unterhalb des Mittelleiters	72, Abb. 3.12
h	Abstand zweier Gitterpunkte eines Diskretisierungsgitters	87, (3.88)
i	Zählvariable	58, Abb. 3.3
\underline{i}	komplexe elektrische Stromstärke	80, (3.57)
\underline{i}_A	komplexe elektrische Stromstärke	80, Abb. 3.13
\underline{i}_B	komplexe elektrische Stromstärke	84, Abb. 3.15
I	optische Intensität (auf die Fläche bezogene Strahlungsleistung)	77, (3.50)
\underline{I}	komplexer Stromphasor	83, (3.74)
\underline{I}_A	komplexer Stromphasor	83, (3.75)
\underline{I}_B	komplexer Stromphasor	83, (3.76)
\underline{I}'_{ph}	komplexe verteilte Photostromquelle	71, Abb. 3.11

I_{Photo}	Photostrom	88
J_0	Sättigungsstromdichte	74, (3.34)
J_D	Diffusionsstromdichte	74, (3.37)
J_E	Emissionsstromdichte	74, (3.34)
\vec{J}_n	Elektronenstromdichte, vektoriell	55, (3.7)
\vec{J}_p	Löcherstromdichte, vektoriell	55, (3.8)
k	Zählvariable	58, Abb. 3.3
k	Modul bei elliptischen Integralen	72, (3.25)
k	Wirkungsgrad einer optischen Einkopplung	91, (3.92)
\vec{k}	Wellenvektor	53, (3.1)
k_0	Vakuumwellenzahl	62, (3.15)
$K'(k)/K(k)$	elliptisches Integral des Moduls k	72, (3.25)
l	Weite einer Raumladungszone	76, (3.45)
l_D	Länge einer Verzögerungsleitung (Delay-Line)	119, (5.9)
l_T	Länge einer Verbindungsleitung (Thru-Line)	119, (5.9)
l_W	Länge einer Wechselwirkungsstrecke	42, (2.15)
L	Bauelementlänge	35, Abb. 2.4
L	Länge eines Absorptionsbereiches	82
L'	Induktivitätsbelag	44, (2.16)
m^*	effektive Masse eines Ladungsträgers	53, (3.1)
M	optische Mode	65
m_e	effektive Elektronenmasse	75, (3.42)
m_e^*	relative Elektronenmasse	74, (3.35)
m_{hh}^*	relative Masse der schweren Löcher	47, Tabelle 2.2
m_{lh}^*	relative Masse der leichten Löcher	47, Tabelle 2.2
n	Elektronenladungsträgerdichte	54, (3.4)
n	Brechungsindex	57, Abb. 3.2
n_0	Referenzbrechungsindex	62, (3.17)
N_A^-	Akzeptor-Dotierungsdichte	54, (3.4)
N_C	effektive Zustandsdichte der Elektronen im Leitungsband	48, Tabelle 2.2
N_D^+	Donator-Dotierungsdichte	54, (3.4)
n_{eff}	effektiver Brechungsindex	60, Abb. 3.4

n_i	Eigenleitungsdichte	48, Tabelle 2.2
N_V	effektive Zustandsdichte der Löcher im Valenzband	48, Tabelle 2.2
p	Löcherladungsträgerdichte	54, (3.4)
P_{el}	elektrische Leistung	88, (3.89)
$P_{opt}, \underline{P}_{opt}$	optische Leistung	77, (3.51)
$P_{Träger}, \underline{P}_{Träger}$	optische Leistung eines Trägers	77, (3.51)
Q	elektrische Ladung	114, (5.1)
R	Rekombinations- bzw. Generationsrate	55, (3.7)
R	Reflexionsfaktor	89, (3.90)
R'	Halbleiterwiderstandbelag	70, Abb. 3.10
R_{PD}	Serienwiderstand eines Photodetektors	36, (2.5)
s	Spaltbreite	72, Abb. 3.12
S	Wirkungsgrad eines Photodetektors	88, (3.89)
\underline{s}_{11}	komplexer Streuparameter	116, (5.3)
\underline{s}_{12}	komplexer Streuparameter	117, (5.6)
\underline{s}_{21}	komplexer Streuparameter	116, (5.4)
\underline{s}_{22}	komplexer Streuparameter	117, (5.5)
t	Dicke einer Metallisierung	72, Abb. 3.12
t, t_0	Zeit	40, (2.7)
T	Temperatur	74, (3.34)
$\underline{\vec{T}}$	komplexe Transfermatrix	58, (3.9)
$\underline{\vec{T}}_D$	komplexe Transfermatrix einer Verzögerungsleitung (Delay-Line)	119, (5.8)
$\underline{\vec{T}}_T$	komplexe Transfermatrix einer Durchverbindung (Thru-Line)	119, (5.7)
$\underline{\vec{T}}'_T$	modifizierte Transfermatrix einer Durchverbindung (Thru-Line), komplex	121, (5.10)
u, \underline{u}	elektrische Spannung, auch komplex	41, (2.9)
$\underline{u}_1, \underline{u}_2$	komplexe Spannung	84, Abb. 3.15
U	Gleichspannung	74, (3.34)
\underline{U}	komplexer Spannungsphasor	83, (3.71)
\underline{U}_1	komplexer Spannungsphasor	83, (3.72)

\underline{U}_2	komplexer Spannungsphasor	83, (3.73)
\hat{u}	Spannungsamplitude	41, (2.9)
U_0	Gleichspannung	70, Abb. 3.10
U_D	Diffusionsspannung	114, (5.1)
v_D	Driftgeschwindigkeit	74, (3.37)
v_E	Elektronengeschwindigkeit	75, (3.40)
$v_{g,opt}$	optische Gruppengeschwindigkeit	41, (2.8)
v_n	Geschwindigkeit der Elektronen	34, (2.2)
$v_{n,max}$	Sättigungsgeschwindigkeit der Elektronen	47, Tabelle 2.2
v_p	Geschwindigkeit der Löcher	34, (2.3)
$v_{p,el}$	elektrische Phasengeschwindigkeit	41, (2.10)
$v_{p,max}$	Sättigungsgeschwindigkeit der Löcher	47, Tabelle 2.2
v_{th}	thermische Geschwindigkeit	75, (3.41)
w	Mittelleiterbreite	72, Abb. 3.12
W	Energie	53, (3.1)
W	Widerstand	113, Abb. 5.1
W', \underline{W}'	Widerstandsbelag, auch komplex	69, Abb. 3.9
W_B	Energie einer Potentialbarriere	74, (3.35)
W_g	Bandlückenenergie	54
W'_M	Widerstandsbelag der Metallisierung	70, Abb. 3.10
W_{ph}	Photonenenergie	32, (2.1)
w_x	Fleckradius in x -Richtung	92, (3.94)
w_y	Fleckradius in y -Richtung	92, (3.94)
x	Ortskoordinate	87, (3.88)
\vec{X}	komplexe Fehlermatrix	119
\vec{Y}	komplexe Fehlermatrix	119
\underline{Y}'	komplexer Leitwertbelag	79, (3.54)
\underline{Y}'_1	komplexer Leitwertbelag	84, (3.78)
\underline{Y}'_2	komplexer Leitwertbelag	84, (3.79)
\underline{Y}'_3	komplexer Leitwertbelag	84, (3.80)
z	Ortskoordinate in Ausbreitungsrichtung	40, (2.7)
Z, \underline{Z}	Wellenwiderstand, auch komplex	36, (2.5)
\underline{Z}_0	komplexer Wellenwiderstand am Anfang	

	einer Leitung	80, (3.62)
\underline{Z}_L	komplexer Wellenwiderstand am Ende einer Leitung	80, (3.63)
α_A, α_B	elektrischer Absorptionskoeffizient	40, (2.7)
α_{el}	elektrischer Absorptionskoeffizient	83
$\underline{\alpha}_{i,i}$	Koeffizienten für Transfer-Matrix-Verfahren	58, (3.9)
α_{opt}	optischer Absorptionskoeffizient	34, (2.4)
$\alpha_{opt,eff}$	effektiver optischer Absorptionskoeffizient	61, (3.14)
β_A, β_B	optischer Phasenkoeffizient	40, (2.7)
β_{el}	elektrischer Phasenkoeffizient	41, (2.10)
β_M	optischer Phasenkoeffizient einer Mode	65, (3.22)
β_{opt}	optischer Phasenkoeffizient	41, (2.8)
γ_{el}	komplexer elektrischer Ausbreitungs- koeffizient	79, (3.61)
γ_{opt}	komplexer optischer Ausbreitungskoeffizient	77, (3.52)
γ_{cal}	komplexer elektrischer Ausbreitungskoeffizient einer Kalibrationsleitung	119, (5.8)
δ	Eindringtiefe aufgrund des Skineffektes	73, (3.29)
ΔE_C	Leitungsbanddiskontinuität	47, Tabelle 2.2
ΔE_V	Valenzbanddiskontinuität	47, Tabelle 2.2
$\Delta\beta$	Phasenfehlانpassung	41, (2.13)
$\Delta\beta_{norm}$	normierte Phasenfehlانpassung	41, (2.14)
ϵ_r	relative elektrische Dielektrizitätszahl	40, (2.7)
η	interner Quantenwirkungsgrad	34, (2.4)
η_k	Koppeleffektivität	91, (3.92)
η_n	Transmissionskoeffizient der Luft-Halbleiter-Grenzfläche	91, (3.92)
φ	elektrisches Potential	54, (3.3)
φ	Nullphasenwinkel	40
φ_A, φ_B	Nullphasenwinkel	77, (3.49)
λ_a, λ_b	optische Wellenlänge eines Heterodynsignals	76
λ_{opt}	optische Vakuumwellenlänge	62, (3.16)

μ_n	Elektronenbeweglichkeit	73, (3.32)
μ_r	relative Permeabilitätskonstante	40, (2.7)
μ_p	Löcherbeweglichkeit	73, (3.32)
ξ	Kehrwert der Bandlücke	54, (3.2)
ρ	Raumladungsdichte	54, (3.3)
ρ	spezifischer Widerstand	73, (3.29)
ρ_{HL}	spezifischer Widerstand einer hochdotierten Halbleiterschicht	76, (3.47)
ρ_M	spezifischer Widerstand der Metallisierung	73, (3.28)
ρ_S	spezifischer Widerstand des Halbleitermaterials	48, Tabelle 2.2
σ_S	Leitfähigkeit eines Halbleiters	73, (3.31)
τ_n	Transitzeit der Elektronen	34, (2.2)
τ_p	Transitzeit der Löcher	34, (2.3)
τ_{WL}	Zeitkonstante einer Wellenleiter-Photodiode	36, (2.5)
χ	Elektronenaffinität	47, Tabelle 2.2
ω_{opt}	optische Kreisfrequenz	41, (2.8)
ω_A, ω_B	optische Kreisfrequenz eines optischen Trägers	40, (2.7)
ω_{el}	Kreisfrequenz einer elektrischen Welle	41, (2.10)
Γ	Füllfaktor	61, (3.13)
Ψ_l, Ψ_s	optische Feldverteilungen	91, (3.93)

Konstanten

Konstante	Zahlenwert	Bezeichnung
e	2,7182818	Eulersche Zahl
h	$6,6260755 \cdot 10^{-34}$ Js	Plancksches Wirkungsquantum
\hbar	$1,05459 \cdot 10^{-34}$ Js	Plancksches Wirkungsquantum
j		imaginäre Einheit
k	$1,380658 \cdot 10^{-23}$ J/K	Boltzmann-Konstante
m_0	$9,1093897 \cdot 10^{-31}$ kg	Ruhemasse des Elektrons
q	$1,60217733 \cdot 10^{-19}$ C	Elementarladung
ϵ_0	$8,854187817 \cdot 10^{-12}$ F/m	Dielektrizitätskonstante
π	3,14159265	Kreiszahl
μ_0	$1,2566370614 \cdot 10^{-6}$ H/m	Permeabilitätskonstante

Abkürzungen

<u>Abkürzung</u>	<u>Bedeutung</u>
BPM	Beam Propagation Method
MBE	Molecular Beam Epitaxy
MJB	Maskenjustier- und belichtungsgerät
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit
MSM	Metal-Semiconductor-Metal
Nd:YAG	Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat
PC	Personalcomputer
PLL	Phase Locked Loop
RHEED	Reflected High Energy Electron Diffraction
TE	transversal elektrisch
TEM	transversal elektromagnetisch
TM	transversal magnetisch
TRL	Thru-Reflect-Line
TLM	Transmission Line Model

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 1.1	Optisches Millimeterwellensystem zur Übertragung von Verkehrs- informationen. 24
Abb. 1.2	Schematische Funktionsweise des Wanderwellen-Photo- detektors. 27
Abb. 2.1	Schematische Struktur eines unbeleuchteten pn-Übergangs (a), berechnetes Bändermodell (b) und Betrag der elektrische Feldstärke (c). 31
Abb. 2.2	Schematische Struktur (a) einer oberflächenbeleuchteten pin- Dioden-Struktur (unbeleuchtet), berechnetes Bändermodell (b) und Betrag der elektrische Feldstärke (c). 32
Abb. 2.3	Schematische Darstellung einer oberflächenbeleuchteten pin- Photodiode. 34
Abb. 2.4	Schematische Darstellung einer Wellenleiter-pin-Photodiode. 35
Abb. 2.5	Vereinfachtes Kleinsignal-Ersatzschaltbild einer konzentrierten Photodiode. 36
Abb. 2.6	Schematische Darstellung der Wellenausbreitung und der opto- elektronischen Konversion im Wanderwellen-Photodetektor. 40
Abb. 2.7	Berechnete Millimeterwellen-Ausgangsleistung in Abhängigkeit der normierten Phasenfehlanpassung. 42
Abb. 2.8	Schematische Wellenleiter-Struktur des Wanderwellen-Photo- detektors. 43
Abb. 2.9	Koplanarer, kapazitiv belasteter Wellenleiter. 44
Abb. 2.10	Schichtstruktur des Wanderwellen-Photodetektors. 49
Abb. 3.1	Bandstruktur von InP. Gekennzeichnet sind das Leitungsband (c) und das Valenzband für leichte (lh) bzw. schwere Löcher (hh). 54
Abb. 3.2	Schematische Darstellung der Wellenausbreitung (Pfeile) nach dem Zick-Zack-Modell in einem optischen Wellenleiter. 57

- Abb. 3.3 Schematische Darstellung des Transfermatrix-Verfahrens zur Berechnung optischer Feldverteilungen im eindimensionalen Fall für die x - bzw. y -Richtung. 58
- Abb. 3.4 Methode des effektiven Brechungsindex: (a) optischer Wellenleiter, (b) Berechnung des Phasenkoeffizienten bzw. des effektiven Brechungsindizes und des optischen Feldes in y -Richtung, (c) Berechnung der Feldkomponenten in x -Richtung, (d) Bildung des zweidimensionalen Feldes aus den einzelnen Feldkomponenten. 60
- Abb. 3.5 Simulation der Ausbreitung eines divergierenden Gaußstrahles im Freiraum. Für Teilbild (a) wurde die Berechnung der elektrischen Feldstärke des optischen Signals mit der Randbedingung der transparenten Wände, für Teilbild (b) mit einer parabelförmigen Dämpfungsfunktion als Randbedingung durchgeführt. 64
- Abb. 3.6 Berechnete Lichtintensität I nach Gleichung (2.7) eines optischen Heterodynsignals (Differenzfrequenz: 60 GHz) in einem einmodigen Wellenleiter für einen festen Zeitpunkt $t=t_0$. Die Simulation wurde in Abhängigkeit des Ortes x und z durchgeführt. 65
- Abb. 3.7 Optische Intensität I eines mehrmodigen Wellenleiters für harmonische Zeitabhängigkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt $t=t_0$ in Abhängigkeit des Ortes x und z nach Gleichung (2.7). In (a) ist die Intensität nur mit der jeweiligen Grundmode berechnet worden. Für (b) wurden jeweils beide ausbreitungsfähigen Moden berücksichtigt. Der Simulationsbereich beträgt in x -Richtung $50\ \mu\text{m}$ und in z -Richtung $3\ \text{mm}$. 66
- Abb. 3.8 BPM-Simulation der Lichtintensität innerhalb eines einmodigen Wellenleiters für ein optisches Heterodynsignal. Dargestellt ist die Intensität I in Abhängigkeit des Ortes x und z zu einem festen Zeitpunkt $t=t_0$. Die Simulation wurde für einen absorptionsfreien Wellenleiter (a) und für einen absorptiven Wellenleiter (b) durchgeführt. 68

Abb. 3.9	Verteiltes Hochfrequenzersatzschaltbild für ein kleines Teilstück Δz einer Leitung.	69
Abb. 3.10	Ersatzschaltbildelemente eines Leitungsstückes Δz des unbeleuchteten Wanderwellen-Photodetektors.	70
Abb. 3.11	Komplettes Hochfrequenzersatzschaltbild des Wanderwellen-Photodetektors. G'_B (grau dargestellt) wird üblicherweise vernachlässigt.	71
Abb. 3.12	Querschnittsabmessungen des Wanderwellen-Photodetektors.	72
Abb. 3.13	Vereinfachtes Ersatzschaltbild zur analytischen Beschreibung der Wellenausbreitung entlang der koplanaren Schottky-Kontaktleitung.	79
Abb. 3.14	Ausgangsspannung eines Wanderwellen-Photodetektors an einem reellen Abschlußwiderstand von 50Ω in Abhängigkeit der Länge des absorbierenden (aktiven) Bereiches.	82
Abb. 3.15	Ströme und Spannungen im Ersatzschaltbild eines infinitesimalen Teilstücks dz der koplanaren Schottky-Kontaktleitung (beleuchtet) zur numerischen Berechnung der Wellenausbreitung.	84
Abb. 3.16	Wellenwiderstand des koplanaren Wellenleiters des Wanderwellen-Photodetektors in Abhängigkeit der effektiven optischen Absorption für eine konstante optische Eingangsleistung.	86
Abb. 3.17	(a): Leitungs- und Valenzband eines Wanderwellen-Photodetektors basierend auf der Schichtstruktur DU572 ohne angelegte Vorspannung. Der Ladungsträgertransport aus der Absorptionsschicht heraus ist schematisch angedeutet. (b): Zugehöriger Betrag des statischen elektrischen Felds ohne angelegte Vorspannung (Leerlauf zwischen Innen- und Außenleiter).	94
Abb. 3.18	Berechnetes Bändermodell für die Schichtstruktur DU551 für eine Vorspannung von $U_0 = -0,5V$. Dargestellt ist das Leitungs- und das Valenzband (a) und der Betrag der statischen elektrischen Feldstärke (b).	96
Abb. 4.1	Verwendete Justiermarken zur Prozessierung der Wanderwellen-Photodetektoren.	99

Abb. 4.2	Prinzipielle Darstellung der Molekularstrahlepitaxie.	101
Abb. 4.3	Schematische Darstellung des Wanderwellen-Photodetektors.	105
Abb. 4.4	Darstellung des Maskensatzes mit Angabe der wesentlichen technologischen Prozeßschritte zur Herstellung von Wanderwellen-Photodetektoren.	106
Abb. 4.5	Photo eines Wanderwellen-Photodetektors nach Isolation der geätzten Mesakante mit einem Polyimidstreifen. Der Bereich entspricht einer Aufsicht von Abb. 4.3	107
Abb. 4.6	Prinzip der Luftbrückentechnik: (a) Aufsicht, (b) Schnitt, nicht maßstabsgetreu.	108
Abb. 4.7	Photo eines prozessierten Wanderwellen-Photodetektors. Die Metallisierung ist hellgrau dargestellt. Der senkrechte Polyimidstreifen ist an der dunklen Umrandung erkennbar.	110
Abb. 4.8	Detailansicht der Mesakante mit der Polyimid-Isolation.	110
Abb. 4.9	Struktur des modifizierten Wanderwellen-Photodetektors.	111
Abb. 5.1	Messung des Kontakt- und des Schichtwiderstands der n^+ -dotierten InGaAlAs-Schicht der Struktur DU551. Aufgetragen ist der gemessene Widerstand W in Abhängigkeit des Abstands d der Kontaktflächen.	113
Abb. 5.2	Kapazitäts-Spannungs-Messung (a), und Leitwert-Spannungsmessung (b) der koplanaren Schottky-Kontaktleitung des Wanderwellen-Photodetektors der Struktur DU551.	115
Abb. 5.3	Schematischer Aufbau eines Netzwerkanalysators.	116
Abb. 5.4	Verwendetes Kalibrationssubstrat Tek CAL 96. Für die Kalibration werden die Leitungen LT (Thru-Line, Länge 148 μm) und L1 (Delay-Line, Länge 1560 μm) benötigt.	118
Abb. 5.5	Kontaktierung der Thru-Line.	119
Abb. 5.6	Messung der Thru-Line.	120
Abb. 5.7	Messung der Delay-Line.	120
Abb. 5.8	Netzwerkanalyse der koplanaren Schottky-Kontaktleitung eines Wanderwellen-Photodetektors der Struktur DU551. Dargestellt ist der Absorptions- und Phasenkoeffizient (a) und der Wellenwiderstand mit Real- und Imaginärteil (b).	122

- Abb. 5.9 Schematische Darstellung des Frequenzgangs des Längswiderstandes $\underline{W}'dz$ (durchgezogene Linie) bezogen auf 50Ω im Smithdiagramm. 123
- Abb. 5.10 Messung des Längswiderstandsbelages $\underline{W}'dz$ (a) und des Querleitwertbelages $\underline{Y}'dz$ (b) mit Hilfe der Netzwerkanalyse im Frequenzbereich bis 40 GHz bezogen auf 50Ω . 124
- Abb. 5.11 $1,3 \mu\text{m}$ Meßplatz für optoelektronische Messungen in Freistrahntechnik bei einer Wellenlänge von $1,3 \mu\text{m}$. 127
- Abb. 5.12 Frequenzverhalten der $1,3 \mu\text{m}$ Nd:YAG-Laser in Abhängigkeit der Temperatur des Laserkopfes. 129
- Abb. 5.13 $1,55 \mu\text{m}$ Meßplatz für optoelektronische Messungen in Glasfasertechnik bei einer Wellenlänge von $1,55 \mu\text{m}$. 130
- Abb. 5.14 Frequenzgang eines Wanderwellen-Photodetektors, gemessen mit dem $1,3 \mu\text{m}$ Meßplatz an der 50Ω Abschlußimpedanz. Die gestrichelte Linie stellt zum Vergleich den Frequenzgang eines Bauelementes mit einer RC-Konstanten von $2,5 \text{ GHz}$ dar. 132
- Abb. 5.15 Optoelektronisch generierte Millimeterwellenleistung an der 50Ω Abschlußimpedanz bei 40 GHz , gemessen mit dem $1,3 \mu\text{m}$ Meßplatz, als Funktion der Sperrspannung U_0 . 133
- Abb. 5.16 Mit dem $1,3 \mu\text{m}$ Meßplatz gemessene Nichtlinearität des Wanderwellen-Photodetektors. (a): Optoelektronisch generiertes Signal bei $14,45 \text{ GHz}$. (b): Durch die Nichtlinearität generierte Harmonische bei $28,9 \text{ GHz}$. 135
- Abb. 5.17 Optoelektronisch generierte Millimeterwellenleistung an der 50Ω Abschlußimpedanz bei 60 GHz mit dem $1,55 \mu\text{m}$ -Meßplatz. 137
- Abb. 5.18 Optoelektronisch generierte Millimeterwellenleistung an der 50Ω Abschlußimpedanz bei 60 GHz bei hoher optischer Eingangsleistung. Verwendet wurde der $1,55 \mu\text{m}$ -Meßplatz. 138

Tabellenverzeichnis

	Seite	
Tabelle 2.1	Typische Werte für Gewinn und Ansprechzeit verschiedener Photodetektoren.	30
Tabelle 2.2	Materialdaten der Halbleiter InP, InGaAs und InAlAs.	47
Tabelle 3.1	Berechnete Werte der Ersatzschaltbildelemente für Wanderwellen-Photodetektoren des Halbleitersystems DU572.	88
Tabelle 4.1	Grundlegende Schichtstruktur DU551 für einen Wanderwellen-Photodetektor.	103
Tabelle 4.2	Schichtstruktur DU572 mit reduziertem Kapazitätsbelag für Wanderwellen-Photodetektoren.	103
Tabelle 4.3	Schichtstruktur DU578 mit Wachstumsübergang für Wanderwellen-Photodetektoren.	104
Tabelle 5.1	Mit Hilfe der Netzwerkanalyse gemessenes Ersatzschaltbild eines Wanderwellen-Photodetektors der Schichtstruktur DU551 im Frequenzbereich bis 40 GHz.	125
Tabelle 5.2	Hochgeschwindigkeits-Photodetektoren.	139