

Erzeugung ultrakurzer elektrischer Impulse auf nichtlinearen Leitungsstrukturen

Vom Fachbereich Elektrotechnik der
Gerhard-Mercator-Universität - Gesamthochschule Duisburg

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation

von

Diplom-Physiker
Ralf Walter Hülsewede

aus

Münster

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

Datum der mündlichen Prüfung: 29.09.1998

Vorbemerkung

Den wissenschaftlichen Arbeiten der vorliegenden Dissertation liegen Aktivitäten des Sonderforschungsbereich 254 (SFB 254) „Höchstfrequenz- und Höchstgeschwindigkeitsschaltungen aus III-V-Halbleitern“ der Gerhard-Mercator-Universität - Gesamthochschule Duisburg zugrunde. Der SFB 254 ist ein Schwerpunkt-Forschungsprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und hat als Zielsetzung die Erarbeitung der physikalischen und technologischen Voraussetzungen sowie der rechnergestützten Entwurfsverfahren und der Meßverfahren für den Aufbau monolithisch integrierter Schaltungen im Mikrowellen- und Millimeterwellenbereich bis zu höchsten Frequenzen. Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten erstrecken sich dabei auf die vier Projektbereiche

- Materialcharakterisierung und Schichtherstellung,
- Simulation aktiver und passiver Bauelemente und ihre Herstellung,
- Schaltungsentwurf und Realisierung,
- Bauelement- und Schaltungsmeßtechnik,

in denen jeweils einzelne Teilaspekte in Form von fächerübergreifenden Teilprojekten in den beteiligten Fachgebieten erarbeitet werden. Im Hinblick auf die Zielsetzung nimmt dabei die intensive Kooperation der beteiligten Fachgebiete eine besonderen Stellenwert ein.

Diese Dissertation entstand im Rahmen der wissenschaftlichen Arbeiten zum Teilprojekt „Erzeugung von Pico- und Femtosekundenimpulse mit nichtlinearen Leitungen für Anwendungen in der On-Wafer-Meßtechnik“, das in einer Kooperation der Fachgebiete Optoelektronik, Halbleitertechnik/Halbleitertechnologie und Allgemeine und Theoretische Elektrotechnik im Fachbereich Elektrotechnik der Gerhard-Mercator-Universität - Gesamthochschule Duisburg erfolgreich abgeschlossen wurde.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Konstanten	IV
Abkürzungen	VII
1 Einleitung	1
2 Nichtlineare Leitungen	6
3 Simulation der Signalausbreitung auf nichtlinearen Leitungen	18
3.1 Simulationsmodell.....	19
3.2 Impulserzeugung und -kompression	24
3.2.1 Parametrische Verstärkung.....	34
3.2.2. Resonante Tunneldiodenleitung.....	41
3.2.3. Sättigbarer Absorber	44
4 Technologie nichtlinearer Leitungen	48
4.1 Epitaxie	49
4.2 Vom Leitungsentwurf zum Maskenlayout	51
4.3 Herstellung von GaAs- und InP-HFET- NLTL.....	61
5 Experimentelle Charakterisierung nichtlinearer Leitungen	66
5.1 Quasistatische Untersuchungen.....	67
5.2 Hochfrequenz-Untersuchungen	75
5.2.1 Messungen im Frequenzbereich	76
5.2.1.1 Netzwerkanalyse.....	76
5.2.1.2. Elektrooptische Messungen.....	82
5.2.1.3. Feldsondenmessungen.....	89
5.2.2 Messungen im Zeitbereich	93
6 Zusammenfassung und Ausblick	106
Anhang.....	112
7 Literaturverzeichnis	116
Danksagung.....	128

Formelzeichen und Konstanten

Die folgende Tabelle listet die in dieser Arbeit verwendeten Formelzeichen und Konstanten auf.

Symbol	Bezeichnung	Einheit
a	Abstand von Ohm- zur Schottkymetallisierung	m
b	Breite der Massemetallisierung	m
c	Länge einer Schottkydiode (in Ausbreitungsrichtung)	m
d	Abstand der Massemetallisierungen einer Koplanarleitung	m
d_s	Sperrschichtweite	m
e	Elementarladung ($1,60219 \cdot 10^{-19}$ As)	As
f	Frequenz	Hz
$f(x', t')$	normierte Funktion zur Beschreibung einer harmonischen Pumpwelle	
f_p	Frequenz der Pumpwelle	Hz
f_{max}	maximale Frequenz der sich auf nichtlinearen Leitungen ausbreitenden Wellen	Hz
$g(U)$	Nichtlinearitätsfunktion	
h	Schrittweite in der Zeit (transformiert)	s
h_d	Halbleiterschichtdicke	m
h_M	Metallisierungsdicke	m
i	Zählindex für Schritte in der Zeit	
j	Zählindex für Schritte im Ort	
k	Schrittweite im Ort (transformiert)	s
	Boltzmann-Konstante ($8,6176 \cdot 10^{-5}$ eV/K)	eV/K
k'	Verhältnis von Innenleiterbreite zum Abstand der Massemetallisierungen von Koplanarleitungen (Modul des elliptischen Integrales)	
m	Zählindex für Perioden	
n	Idealitätsfaktor	
p	Länge einer Periode	m
r_s	Schichtwiderstand	Ω/sq
s	Innenleiterbreite der Koplanarleitung	m
$\underline{S}_{11}, \underline{S}_{22}$	komplexe Streuparameter (Reflexionsmessung)	
$\underline{S}_{21}, \underline{S}_{12}$	komplexe Streuparameter (Transmissionsmessung)	
t	Zeit	s

t'	transformierte Zeit	s
t_s	Impulsweite (Halbwertsbreite) eines Solitons	s
t_{smin}	minimale Impulsweite eines Solitons	s
v_0	Kleinsignalphasengeschwindigkeit	m/s
w	Spaltbreite der Koplanarleitung	m
x	Ort	m
x'	transformierter Ort	s
A	Kontaktfläche	m ²
B	normierter Verlustparameter	A/V ³
C	Kapazität	As/V
C_s	Sperrschichtkapazität	As/V
C_{KPL}	Kapazität eines Koplanarleitungsstückes der Länge p	As/V
C_0	Kapazität im Arbeitspunkt	As/V
G	Leitwert	S
$G_p(U)$	spannungsabhängiger Leitwert	S
H	normierter Verlustparameter	V ⁻¹
I	elektrische Stromstärke	A
I_D	elektrische Stromstärke einer Diode	A
I_s	Sättigungsstrom	A
I_{sd}	Sättigungsstromdichte	A/cm ²
$K(k')$	vollständiges elliptisches Integral erster Ordnung mit dem Modul k' als Argument	
L	Induktivität	Vs/A
M	Anzahl der Perioden	
N_d	Donatorkonzentration	cm ⁻³
P_{in}	Leistung des Eingangssignales	dBm
R	Widerstand	Ω
R_k	Kontaktwiderstand	Ω
R_s	Strahlungswiderstand	Ω
R_0	Widerstand der Halbleiterschicht	Ω
T	absolute Temperatur	K
U	elektrische Spannung	V
U_b	Durchbruchspannung	V
U_G	Generatorspannung	V
U_d	Diffusionsspannung	V
U_{hf}	Momentanwert der hochfrequenten Wechselspannung	V
U_i^j	Spannung am Ort $j-k$ und zur Zeit $i-h$	V
U_L	Leerlaufwechselspannung der Sonde	V
U_0	Vorspannung (eingepögte Gleichspannung)	V

U_{max}	Maximalwert aller Spannungen U_i^j	V
\hat{U}_{in}	Spannungsamplitude des Eingangssignales	V
\hat{U}_s	Spannungsamplitude eines Solitons	V
\hat{U}_p	Spannungsamplitude der Pumpwelle	V
\hat{U}_{pth}	Grenzwert der Pumpwellen-Spannungsamplitude	V
W_L	Energieniveau der Leitungsbandunterkante	eV
W_V	Energieniveau der Valenzbandoberkante	eV
W_F	Fermi-Energie	eV
X_A	Reaktanz der Sonde	As/V
\underline{Z}_N	komplexer Kleinsignalwellenwiderstand einer nichtlinearen Leitung	Ω
Z_{Kette}	reeller Kleinsignalwellenwiderstand eines L-C-Kettenleiters	Ω
α	Dämpfungskoeffizient	m ⁻¹
β	Phasenkoeffizient	m ⁻¹
δ	Nichtlinearitätsparameter	V ⁻¹
ϵ_r	relative Permittivität	
$\epsilon_{r,eff}$	relative effektive Permittivität	As/Vm
ϵ_0	elektrische Feldkonstante (8,854·10 ⁻¹² As/Vm)	As/Vm
$\underline{\gamma}$	komplexer Wellenausbreitungskoeffizient	m ⁻¹
φ	Phase der Pumpwelle	
κ	normierter Amplitudenparameter	V ⁻¹
λ	Wellenlänge	m
μ_r	relative Permeabilität	
μ_0	magnetische Feldkonstante (1,256·10 ⁻⁶ Vs/Am)	Vs/Am
θ_b	Potential der Barriere	V
ρ_M	spezifischer Widerstand	Ωm
σ	Normierungsfaktor des transformierten Ortes	s ⁻¹
ω	Kreisfrequenz	Hz
ω_c	Tiefpassgrenzfrequenz	Hz
ω_p	Kreisfrequenz der Pumpwelle	Hz
(x,y,z)	kartesisches Koordinatensystem	

Abkürzungen

In der folgenden Tabelle sind in dieser Arbeit verwendeten Abkürzungen aufgelistet.

Au/Ge/Ni	Gold/Germanium/Nickel
CAD	Computer Aided Design
FDTD	Finite Differences in Time-Domain
G-KdV	Generalisierte Korteweg-de Vries-Gleichung
GaAs	Gallium-Arsenid
GSG	Ground-Signal-Ground (Anschlußbelegung der Kontaktfinger eines Milrowellenprobers)
HEMT	High Electron Mobility Transistor
HFET	Heterostruktur-Feldeffekt-Transistor
im	Imaginärteil einer komplexen Größe
InAlAs	Indium-Aluminium-Arsenid
InGaAs	Indium-Gallium-Arsenid
InGaAlAs	Indium-Gallium-Aluminium-Arsenid
InP	Indium-Phosphid
KdV	Korteweg-de Vries-Gleichung
LN ₂	Liquid Nitrogen (flüssiger Stickstoff)
MBE	Molecular Beam Epitaxy
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit
MMMIC	Monolithic Millimeterwave Integrated Circuit
Nd:YAG	Neodym-Yttrium-Aluminium-Glas
NDR	Negative Differential Resistance
NLTL	Nonlinear Transmission Line (nichtlineare Leitung)
NWA	Netzwerkanalysator
PLL	Phase Lock Loop (phasenstarre Kopplung)
Pt/Ti/Pt/Au	Platin/Titan/Platin/Gold
re	Realteil einer komplexen Größe
RHEED	Reflection High-Energy Electron Diffraction
RTD	Resonante Tunneldiode
SL	Super-Lattice (kristalline Übergitterstruktur)
TLM	Transmission Line Method
TEM	transversal elektromagnetisch
UHV	Ultrahochvakuum
w.E.	willkürliche Einheit
2-DEG	zweidimensionales Elektronengas