

**Optische Meßverfahren
für den
Mikro- und Millimeterwellenbereich**

Dipl.-Phys. Thorsten Braasch

**Optische Meßverfahren
für den
Mikro- und Millimeterwellenbereich**

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

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Phys. Thorsten Braasch

aus

Orsoy, j. Rheinberg, Ndrh.

Referent: Prof. Dr. rer. nat. D. Jäger

Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. F.-J. Tegude

Datum der mündlichen Prüfung: 24. November 1999

für mich

Danksagung

Wolfgang, Friedel, Jakob, Peter, die Reihenfolge ist strenggenommen egal, doch ohne Euer stetes Drängen und Eure sanften Tritte in rückwärtige Körperpartien hätte ich wohl nie angefangen, diese Arbeit zusammenzuschreiben. Der erste und größte Dank geht also an Euch und Eure Freundschaft.

Dirk, der Dank an Dich ist mindestens genauso groß, fußt aber auf ganz anderen Dingen und wird daher an dieser Stelle gesondert erwähnt. Ich danke Dir, daß Du ein so treuer und hilfsbereiter Kollege warst und Freund bist. Was hätte ich ohne Dich gemacht? 1000 Dank.

Ebenso wichtig war und ist die Unterstützung und Geduld, der Trost, die Ermutigung und das Aufgefangenwerden durch Dich, liebe Frauke, und durch Euch, meine lieben Eltern, Sylvia, Aunty, Oma & Opa, Lilo & Heiko, Ulrich & Monika. Ohne Euch wäre ich nie soweit gekommen, und ohne Euch, liebe Eltern, hätte ich nie anfangen können. Dankeschön.

Gerd, Du hast mich nach Kräften eingearbeitet in Deinen Meßaufbau und versucht, trotz des großen Teichs als Gesprächs- und Diskussionspartner weiterhin zur Verfügung zu stehen. Dafür danke ich Dir sehr herzlich.

Rudi, Manuel, Martin, Stefan, Michael, Frank, Holger, Heinz, Vroni und Ulrike, es wurde viel gelacht und es hat z.T. unheimlich viel Spaß gemacht, mit Euch zu arbeiten. Habt vielen Dank dafür. Bei Dir, Rudi, kommt natürlich noch die permanente Soft- und Hardwareunterstützung hinzu, die Du mir immer mit sehr viel Geduld zukommen ließest. Manuel und Dirk, es war schööööön mit Euch in KA 82a (das Türschild habe ich sogar noch).

Schließlich möchte ich noch ganz herzlich Herrn Prof. Dr. F.-J. Tegude danken für die Übernahme des Korreferats sowie Ihnen, Herr Professor Jäger, daß Sie mich als wissenschaftlichen Mitarbeiter in den Jahren 1995 bis 1998 an Ihrem Fachgebiet *Optoelektronik* beschäftigt und mir so die Möglichkeit gegeben haben zu promovieren.

Inhaltsverzeichnis

Liste der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Konstanten III

1. Einleitung	1
1.1 Zielsetzung der Arbeit	4
1.2 Struktur der Arbeit	5
2. Methoden zur kontaktlosen Charakterisierung integrierter Hoch- und Höchstfrequenz-Bauelemente und -Schaltungen – ein Überblick	7
2.1 Nichtoptische Meßverfahren	8
2.2 Optische Meßverfahren	11
3. Physikalische Grundlagen optischer Meßverfahren	17
3.1 Der elektrooptische Pockels-Effekt	17
3.2 Der elektroabsorptive Franz-Keldysh-Effekt	23
3.3 Weitere optoelektronische Effekte im Vergleich	25
4. Technische Grundlagen optischer Meßverfahren	28
4.1 Die direkte und die indirekte elektrooptische Meßtechnik	28
4.2 Die Sampling-Methode	31
4.3 Die Heterodyn-Meßtechnik	36
4.4 Das Prinzip der OBIC-Messungen	40
5. Realisierung der Meßverfahren und Meßergebnisse	43
5.1 Der Meßaufbau für die elektrooptische Meßtechnik mit einem gepulsten Lasersystem	44
5.1.1 Meßaufbau	44
5.1.2 Meßergebnisse	46
5.2 Das heterodyn-elektrooptische Meßsystem	48
5.2.1 Meßaufbau	48
5.2.2 Photodektoren für die Heterodyn-Meßtechnik	59

5.2.3	Meßergebnisse	63
5.3	Das Heterodyn-Meßsystem für OBIC-Messungen	69
5.3.1	Meßaufbau	69
5.3.2	Meßergebnisse	71
6.	Zusammenfassung und Ausblick	79
	Literaturverzeichnis	84

Liste der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Konstanten

Abkürzungen

Al	Aluminium
As	Arsen
BSO	Wismuthsilikat
CD	Compact Disc
CPW	Koplanarleitung (<i>coplanar waveguide</i>)
cw Laser	kontinuierlich Licht emittierender Laser (<i>continuous wave</i>)
DFB-Laser	<i>distributed feedback</i> -Laser
DUT	untersuchtes Bauelement oder Schaltung (<i>device under test</i>)
EDFA	Glasfaserverstärker (<i>Erbium-doped fiber amplifier</i>)
EDFL	Erbium-dotierter Glasfaserlaser (<i>Erbium-doped fiber laser</i>)
Er	Erbium
FC/PC	Norm für Glasfasterstecker
FSR	freier Spektralbereich (<i>free spectral range</i>)
Ga	Gallium
GaAs	Galliumarsenid
GRIN	Glasfaser mit graduellem Verlauf des Brechungsindex (<i>graded index</i>)
HF-...	Hochfrequenz-...
IC	integrierte Schaltung (<i>integrated circuit</i>)
IEEE-Bus	elektronische Schnittstelle
In	Indium
InP	Indiumphosphid
KDP	Kaliumdihydrogenphosphat

LF-...	Niedrigfrequenz-... (<i>low frequency</i>)
LiNbO ₃	Lithiumniobat
LiTaO ₃	Lithiumtantalat
MBE	Molekularstrahlepitaxie (<i>molecular beam epitaxy</i>)
MMIC	monolithisch integrierte Mikrowellenschaltung (<i>monolithic microwave integrated circuit</i>)
MW-...	Mikrowellen-...
NA	Numerische Appertur
Nd:YAG	Neodym-Yttrium-Aluminium-Granulat
NLTL	nichtlineare Transmissionsleitung (<i>nonlinear transmission line</i>)
NWA	Netzwerkanalysator (<i>network analyzer</i>)
OBIC	optisch induzierter Photostrom (<i>optical beam induced current</i>)
PLL	phasenstarre Kopplung (<i>phase-locked loop</i>)
QCSE	quantenunterstützter Stark-Effekt (<i>quantum confined Stark-effect</i>)
QW	Quantenfilm (<i>quantum well</i>)
RBW	Auflösungsbandbreite (<i>resolution bandwidth</i>)
REM	Rasterelektronenmikroskop
RS 232	elektronische Schnittstelle
RTD	resonante Tunneldiode
SFM	Rasterkraftmikroskop (<i>scanning force microscope</i>)
SHG	Frequenzverdoppelung der Laserstrahlung (<i>second harmonic generation</i>)
Si	Silizium
SNR	Signal-Rausch-Abstand (<i>signal to noise ratio</i>)
SNOM	optisches Nahfeldmikroskop (<i>scanning near field optical microscope</i>)
Ti:Saphir	Titan-Saphir
TWPD	Wanderwellen-Photodetektor (<i>travelling wave photodetector</i>)
V	Symbol für Spannungsmeßgerät

VBW Videobandbreite (*video bandwidth*)

Formelzeichen

d	Abstand der Spiegel im Fabry-Perot-Resonator
d_0	minimaler Fokusbereich
\vec{E}	Vektor der elektrischen Feldstärke
E	Betrag der elektrischen Feldstärke
E_x, E_y, E_z	Komponenten des elektrischen Feldes
$E(t)$	zeitlich veränderliche, skalare elektrische Feldstärke einer Lichtwelle
$\tilde{E}_{1,2}(t)$	elektrische Feldstärke der Lichtwelle des Lasers 1, 2
$E_{1,2}$	Amplitude der Lichtwelle des Lasers 1, 2
f	Frequenz einer elektromagnetischen Welle
f_{if}	Meß- oder Zwischenfrequenz (<i>intermediate frequency</i>)
f_m	Frequenz des Mikrowellensignals
f_{rep}	Pulswiederholfrequenz eines gepulsten Lasers
$f_{1,2}$	optische Frequenz des Lasers 1, 2
Δf	Heterodynfrequenz oder Differenzfrequenz zwischen den Lichtwellen zweier Moden eines Dual-mode Lasers bzw. zwischen den Lichtwellen zweier cw Laser
f_{3dB}	maximale Frequenzbandbreite (3dB-Frequenz)
h	Dicke des elektrooptischen Kristalls bzw. des Substrates
$I(t)$	zeitlich veränderliche Lichtintensität
I_0	reflektierte optische Leistung ohne anliegendes elektrisches Feld
I_{aus}	optische Ausgangsleistung / -intensität
$I_{aus}(t)$	Zeitabhängigkeit der optischen Ausgangsleistung
I_{ein}	optische Eingangsleistung / -intensität

I_t	transmittierte optische Intensität
ΔI	Modulation der optischen Intensität
i_{ph}	induzierter Photostrom
$i_{ph}(t)$	Photostrom mit Betrachtung der Zeitabhängigkeit
m	natürliche Zahl
m_e	relative effektive Masse eines Elektrons in einem Halbleiter
n_x, n_y, n_z	Komponenten des optischen Brechungsindex
n	skalarer optischer Brechungsindex
n_0	skalarer optischer Brechungsindex ohne anliegendes elektrisches Feld
Δn	Änderung des optischen Brechungsindex
\vec{P}	Vektor der Polarisation
P_{el}	Mikrowellenleistung
P_{opt}	optische Leistung
R	Reflektivität
R_m	Meßwiderstand
\vec{r}	elektrooptischer Tensor
r_{ij}	lineare elektrooptische Komponenten oder elektrooptische Module
$s_m(t)$	zeitabhängige elektrische Feldstärke des Mikrowellensignals
U	elektrische Spannung
U_{0h}	Potentialdifferenz zwischen der Substratvorder- und -rückseite
U_π	Halbwellenspannung
V_{dc}	Versorgungsgleichspannung
V_{ph}	optisch induzierte elektrische Spannung
v	Phasengeschwindigkeit
W	potentielle Energie
W_g	Bandabstand (Bandlücke) eines Halbleiters
x, y, z	Koordinaten des gedrehten Koordinatensystems

x', y', z'	Koordinaten des ausgezeichneten Koordinatensystems
Z_w	komplexer Wellenwiderstand
α	Absorptionskoeffizient
$\vec{\chi}$	Tensor der elektrischen Suszeptibilität
χ	skalare isotrope elektrische Suszeptibilität
$\vec{\epsilon}_r$	Tensor der elektrischen Permittivität
ϵ_r	isotrope elektrische Permittivitätszahl
$\Delta\phi$	Phasenverschiebung
$\Delta\phi_{\text{mod}}$	feldinduzierte Phasenverschiebung
γ	materialabhängige Konstante beim Kerr-Effekt
$\Delta\varphi$	Differenz der Phasen zweier Lichtwellen
κ	Transmittivität (nur beim Fehlen von Absorption)
λ	Wellenlänge
λ_g	Bandkantenwellenlänge
θ, φ	Raumwinkel
σ	Winkel zwischen der Orientierung des Eingangspolarisators und den optischen Achsen des doppelbrechenden Kristalls
τ	zeitliche Linienbreite eines Laserpulses
τ_{eo}	Ansprechzeit des Pockels-Effektes
τ_{ji}	zeitlicher Mittelwert des Phasenrauschens
τ_{min}	minimale Zeitauflösung
τ_{ww}	Wechselwirkungszeit des Lichts mit dem elektrooptischen Kristall
$\omega_{1,2}$	Kreisfrequenz der Lichtwelle des Lasers 1, 2
$\Delta\omega$	Differenz der Kreisfrequenzen der beiden cw Laser

Konstanten

c_0	Vakuumlichtgeschwindigkeit	$2,9979 \cdot 10^8$ m/s
h	Planck'sches Wirkungsquantum	$6,626 \cdot 10^{-34}$ Js
q	Elementarladung	$1,602 \cdot 10^{-19}$ As
ε_0	dielektrische Konstante	$8,854 \cdot 10^{-12}$ As/(Vm)