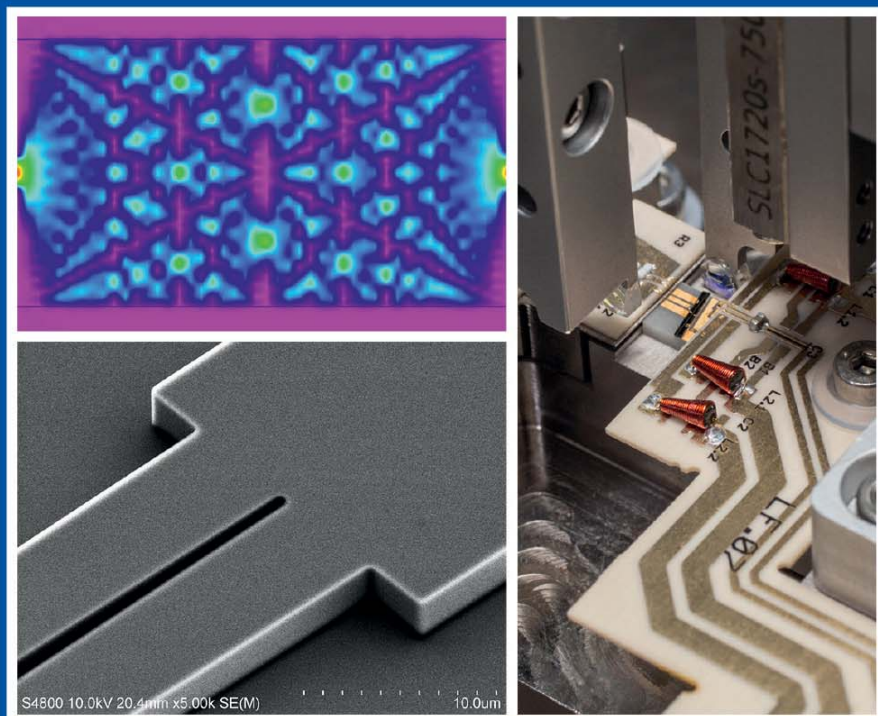


Forschungsberichte aus dem
Ferdinand-Braun-Institut,
Leibniz-Institut
für Höchstfrequenztechnik

GaAs-based components for photonic integrated circuits









aus der Reihe:

Innovationen mit Mikrowellen und Licht

**Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut,
Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik**

Band 50

Bassem Arar

GaAs-based components for photonic integrated circuits

Herausgeber: Prof. Dr. Günther Tränkle, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich

Ferdinand-Braun-Institut
Leibniz-Institut
für Höchstfrequenztechnik (FBH)
Gustav-Kirchhoff-Straße 4
12489 Berlin

Tel. +49.30.6392-2600
Fax +49.30.6392-2602

E-Mail fbh@fbh-berlin.de
Web www.fbh-berlin.de

Innovations with Microwaves and Light

Research Reports from the Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik

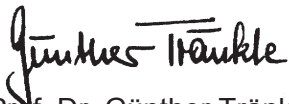
Preface of the Editors

Research-based ideas, developments, and concepts are the basis of scientific progress and competitiveness, expanding human knowledge and being expressed technologically as inventions. The resulting innovative products and services eventually find their way into public life.

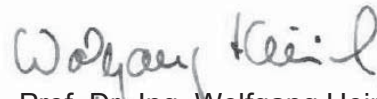
Accordingly, the *“Research Reports from the Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik”* series compile the institute’s latest research and developments. We would like to make our results broadly accessible and to stimulate further discussions, not least to enable as many of our developments as possible to enhance everyday life.

To bring quantum optical sensors out of quantum optics labs, compactness, robustness, and reliability of the existing hardware have to be improved significantly. Whereas state-of-the-art hybrid micro-integration provides laser modules that are sufficiently compact, essential building blocks (e.g. phase modulators, fiber couplers) of a quantum sensor’s optical setup are still not available with the required form factor. Miniaturization of passive components is therefore a prerequisite for field and space deployment. In this work, building blocks for photonic integrated circuits targeting applications at 780 nm and 1064 nm were developed. Modelling, manufacturing, and testing of GaAs-based phase modulators and waveguide couplers are presented. Further, a novel experimental method for investigating the electro-optic properties of phase modulators is demonstrated.

We wish you an informative and inspiring reading



Prof. Dr. Günther Tränkle
Director



Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich
Deputy Director

The Ferdinand-Braun-Institut

The Ferdinand-Braun-Institut researches electronic and optical components, modules and systems based on compound semiconductors. These devices are key enablers that address the needs of today’s society in fields like communications, energy, health and mobility. Specifically, FBH develops light sources from the visible to the ultra-violet spectral range: high-power diode lasers with excellent beam quality, UV light sources and hybrid laser systems. Applications range from medical technology, high-precision metrology and sensors to optical communications in space. In the field of microwaves, FBH develops high-efficiency multi-functional power amplifiers and millimeter wave frontends targeting energy-efficient mobile communications as well as car safety systems. In addition, compact atmospheric microwave plasma sources that operate with economic low-voltage drivers are fabricated for use in a variety of applications, such as the treatment of skin diseases.

The FBH is a competence center for III-V compound semiconductors and has a strong international reputation. FBH competence covers the full range of capabilities, from design to fabrication to device characterization.

In close cooperation with industry, its research results lead to cutting-edge products. The institute also successfully turns innovative product ideas into spin-off companies. Thus, working in strategic partnerships with industry, FBH assures Germany’s technological excellence in microwave and optoelectronic research.



GaAs-based components for photonic integrated circuits

vorgelegt von
Master of Science

Bassem Arar
geb. in Daraa

von der Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. Bernd Tillack
Gutachter: Prof. Dr. Günther Tränkle
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Petermann
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Michalzik (Universität Ulm)

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 25. Januar 2019

Berlin, 2019



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten
sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2019

Zugl.: (TU) Berlin, Univ., Diss., 2019

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2019

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, 2019

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier
aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9976-3

eISBN 978-3-7369-8976-4

Abstract

Semiconductor lasers based on GaAs/AlGaAs double heterostructures have recently received increasing interest for atomic spectroscopy applications. For example GaAs/AlGaAs double heterostructure laser radiation at the wavelengths of 780 nm and 1064 nm is used for rubidium spectroscopy, and for molecular iodine spectroscopy (at 532 nm using frequency-doubling techniques), respectively. Optical systems used for these applications should feature compact, mechanically stable, and highly efficient components in order to be suitable for operation in harsh environments (e.g. quantum optic precision experiments in drop towers or in space). State-of-the-art optical systems use micro-integrated laser modules with a small footprint. However, passive components that are necessary for the manipulation of the laser light such as phase and amplitude modulators, fiber couplers, and beam splitters are only commercially available on macro-scales. These components are then integrated into the laser systems platforms where additional opto-mechanical components are indispensable. Because of their excessive request for space, commercially available laser systems and electro-optic setups are not suitable for deployment in the field or in space. The miniaturization of passive components for reduction of mass and form factor of electro-optical systems as well as for improving the overall robustness and reliability of the latter is a prerequisite for field- and space deployment of quantum sensors.

This work presents GaAs/AlGaAs double heterostructure electro-optic phase modulators for the first time at the wavelength of 780 nm and at the wavelength of 1064 nm. The specifications of the phase modulators meet the micro-integration requirements into hybrid laser modules and spectroscopy modules with respect to optical aperture and electrical interface. Details related to design and fabrication of the phase modulators are included. The characterization of the electric and electro-optic properties of the phase modulators is then presented. The GaAs/AlGaAs double heterostructure of the phase modulators is further used to develop, design, and realize waveguide couplers. Multi-mode interference (MMI) couplers for applications at the wavelength of 780 nm are presented for the first time. MMI couplers can replace fiber-based couplers in complex optical systems and are core building blocks for photonic integrated circuits (PICs). The compatibility of the double heterostructure phase modulators and MMI couplers for implementation of PICs is then demonstrated through a monolithically-integrated Mach-Zehnder-intensity modulator at 780 nm for the first time.

Further, a method based on heterodyne interferometry is developed for the in-depth investigation of phase modulators including phase and amplitude modulation response, including modulation efficiency, residual amplitude modulation, and signal distortion in GaAs-based phase modulators. During hybrid integration of a phase

modulator chip into an electro-optical hybrid system, this method can be applied to optimize the coupling efficiency in real time while at the same time reducing the residual amplitude modulation. The method further provides the means to separate linear and the non-linear effects in the phase modulation signal. It is shown how this provides the means to determine separately linear and quadratic electro-optics in GaAs/AlGaAs double heterostructures. For the first time, the quadratic electro-optic coefficient is determined without having to calculate the contribution of free carriers effects to phase modulation.

This thesis work is organized as follows:

First, the fundamentals of guided wave optics are presented (chapter 2). Electro-magnetic wave propagation in planar waveguides is described, conditions for guided optical modes are provided, and concepts for waveguide couplers are discussed. Then the electro-optic properties of GaAs are presented and phase modulation in GaAs/AlGaAs double heterostructures due to electro-optic effects is introduced (chapter 3).

Next, the design of GaAs/AlGaAs double heterostructure phase modulators (chapter 4) and waveguide couplers (chapter 5) is presented. For the design of the phase modulators we study the state-of-the-art GaAs-based electro-optic phase modulators at the wavelength of 1.31 μm and transfer these concepts to the wavelengths of 780 nm and 1064 nm. Efficient GaAs/AlGaAs double heterostructures with phase modulation efficiencies larger than $15 \text{ deg}/(\text{V} \cdot \text{mm})$ are designed. The design of low loss and polarization maintaining waveguide couplers and phase modulators then allows for the development of a Mach-Zehnder intensity modulator (chapter 6) at the wavelengths of 780 nm.

In the experimental part of this work, after fabrication (chapter 7), the electro-optic performance of these devices is characterized experimentally. The performance of phase modulators, waveguide couplers, and MZI modulators is determined (chapter 8). The modulation efficiency of $16 \text{ deg}/(\text{V} \cdot \text{mm})$ is demonstrated for phase modulators at 780 nm and at 1064 nm. The propagation losses amount to 1.2 dB/cm at 780 nm and to 4.3 dB/cm at 1064 nm (which corresponds to an improvement beyond state-of-the-art for GaAs-based phase modulators at 1064 nm). For the Mach-Zehnder-intensity modulator, the extinction ratio of more than 10 dB and excess loss of less than 3 dB are demonstrated. Further, the novel heterodyne analysis method for in-depth characterization of the electro-optic performance of phase modulators is developed and implemented (chapter 9). As an application of the heterodyne analysis method, the linear and the quadratic electro-optic coefficients of GaAs/AlGaAs double heterostructures are determined. For the linear electro-optic coefficient we find results that are in agreement with literature. However, the results for the quadratic electro-optic coefficients differ from values given in the literature. The discrepancy is discussed and suggestions to solve it are provided.

Kurzfassung

Halbleiterlaser auf Basis von GaAs/AlGaAs Doppelheterostrukturen erhalten in letzter Zeit zunehmend Interesse für Anwendungen in quantenoptischen Experimenten, z.B. in der Atomspektroskopie. Zum Beispiel wird mit GaAs/AlGaAs Diodenlasern erzeugte, kohärente Strahlung bei den Wellenlängen von 780 nm und 1064 nm für die Rubidium- und Iodspektroskopie eingesetzt. Elektro-optische Systeme für diese Anwendungen müssen aus kompakten, mechanisch stabilen, und hocheffiziente Komponenten aufgebaut sein, um den Einsatz in rauen Umgebungen (z.B. in Falltürmen oder im Weltraum) zu erlauben. In aktuellen optischen Lasersystemplattformen werden mikointegrierte Lasermodule mit geringem Platzbedarf eingesetzt. Jedoch sind passive Komponenten, die für die Manipulation des Laserlichts notwendig sind, wie z.B. Phasen- und Amplitudenmodulatoren, Faserkoppler und Strahlteiler, kommerziell nur auf Makroskalen verfügbar. Diese Komponenten werden dann in die Lasersystemplattformen integriert, was zusätzliche opto-mechanische Komponenten erforderlich macht. Aufgrund ihres erheblichen Platzbedarfs sind State-of-the-Art Lasersysteme für den Einsatz im Feld oder im Weltraum nicht geeignet. Die Miniaturisierung von passiven Bauelementen zur Reduzierung von Masse und Formfaktor von elektrooptischen Systemen sowie zur Verbesserung der Robustheit und Zuverlässigkeit der Systeme ist eine Voraussetzung für den Einsatz von Quantensensoren im Feld oder im Weltraum.

Im Rahmen dieser Arbeit werden GaAs/AlGaAs Doppelheterostruktur elektro-optische Phasenmodulatoren zum ersten Mal für die Wellenlänge von 780 nm und für die Wellenlänge von 1064 nm realisiert. Die Entwicklung, Herstellung, und anschließend die Charakterisierung der elektrischen und elektrooptischen Eigenschaften der Phasenmodulatoren wird in Details präsentiert. Die GaAs/AlGaAs Doppelheterostruktur der Phasenmodulatoren wird außerdem verwendet, um Wellenleiterkoppler zu entwickeln und zu realisieren. Multi-Mode-Interferenz (MMI) Koppler und Richtkoppler für Anwendungen bei der Wellenlänge von 780 nm werden zum ersten Mal vorgestellt. MMI Koppler können Faser-basierte Koppler in komplexen, Optischen Systemen ersetzen und sind Kernbausteine für photonische integrierte Schaltungen. Die Kompatibilität der Doppelheterostruktur Phasenmodulatoren und MMI-Koppler für die Realisierung photonischer integrierter Schaltungen wird außerdem durch die Realisierung eines Mach-Zehnder-Intensitätsmodulators bei der Wellenlängen von 780 nm zum ersten Mal demonstriert.

Darüber hinaus wird ein auf heterodyner Interferometrie basierendes Messverfahren zur Untersuchung der Modulationseffizienz, der Restamplitudenmodulation, und der nichtlineare Signalverzerrung in Phasenmodulatoren entwickelt. Während der hybriden Integration eines Phasenmodulatorchips in ein elektrooptisches Hybridsystem

kann dieses Verfahren angewendet werden, um in Echtzeit die Kopplungseffizienz zu optimieren und gleichzeitig die Restamplitudenmodulation zu reduzieren. Außerdem können mit diesem Verfahren linearer und nicht-linearer Response im Phasenmodulationssignal getrennt werden. Es wird gezeigt, wie dies die Möglichkeit bereitstellt, lineare und quadratische elektro-optische Koeffizienten in GaAs/AlGaAs Doppelheterostrukturen unabhängig voneinander zu bestimmen: zum ersten Mal kann der quadratische elektrooptische Koeffizient bestimmt werden, ohne dass der Beitrag der freier Ladungsträger zur Phasenmodulation ab initio berechnet werden muss.

Diese Arbeit ist wie folgt strukturiert:

Zunächst wird die Physik der geführten Wellenoptik vorgestellt (Kapitel 2). Die elektromagnetische Wellenausbreitung in planaren Wellenleitern wird beschrieben, Bedingungen für geführte optische Moden werden bereitgestellt, und Konzepte für Wellenleiterkopplern werden diskutiert. Schließlich werden die elektrooptischen Eigenschaften von GaAs vorgestellt und die elektrooptischen Effekte in GaAs/AlGaAs Doppelheterostrukturen beschrieben (Kapitel 3).

Im Anschluss werden Phasenmodulatoren (Kapitel 4) und Wellenleiterkoppler (Kapitel 5) basierend auf GaAs/AlGaAs Doppelheterostruktur entworfen. Für das Design der Phasenmodulatoren wird der Stand der Technik bei GaAs-basierten elektrooptische Phasenmodulatoren analysiert und ausgehend davon die Übertragung der für $1.31\text{ }\mu\text{m}$ bestehenden Konzepte auf die Wellenlängen 780 nm und 1064 nm vorgenommen. Das Design von Phasenmodulatoren basierend auf einer GaAs/AlGaAs Doppelheterostruktur wird erarbeitet. Die Simulationen versprechen eine Modulationseffizienz von mehr als $15\text{ deg}/(\text{V} \cdot \text{mm})$. Schließlich wird das Design der Doppelheterostruktur genutzt, um das Design von Wellenleiterkoppler zu erstellen, so dass diese Komponenten zusammen mit dem Phasenmodulator für das Design eines Mach-Zehnder Intensitätsmodulator (MZI) genutzt werden können. Das Design des MZIs folgt in Kapitel 6.

Im experimentellen Teil werden die Strukturen nach der Herstellung (Kapitel 7) charakterisiert. Die Phasenmodulatoren, die Wellenleiterkoppler, und die MZI Modulatoren werden experimentell untersucht (Kapitel 8). Die für 780 nm und 1064 nm realisierten Phasenmodulatoren zeigen eine Phasenmodulationseffizienz von $16\text{ deg}/(\text{V} \cdot \text{mm})$. Die Ausbreitungsverluste betragen 1.2 dB/cm bei 780 nm und 4.3 dB/cm bei 1064 nm und stellen daher eine Verbesserung gegenüber dem Stand der Technik (12 dB/cm für GaAs/AlGaAs Phasenmodulatoren bei $1.06\text{ }\mu\text{m}$.) dar. Mit dem Mach-Zehnder-Intensitätsmodulator werden ein Extinktionsverhältnis von mehr als 10 dB und zusätzliche Verluste (*excess loss*) von weniger als 3 dB demonstriert. Ferner werden die Phasenmodulatoren mit dem Heterodynalanalyseverfahren untersucht (Kapitel 9). Mit Hilfe des neuartigen Messverfahrens werden lineare und nichtlineare Effekte in dem Phasenmodulationssignal getrennt. Daraus können der lineare elektro-optischen (LEO) und der quadratische elektro-optische (QEO) Koeffizienten der GaAs/AlGaAs Doppelheterostrukturen bestimmt werden. Für den LEO Koeffizienten finden wir Ergebnisse, die in guter Übereinstimmung mit der Literatur stehen. Die Ergebnisse für den QEO Koeffizienten unterscheiden sich jedoch von den in der Literatur beschriebenen Werten. Die Diskrepanz wird diskutiert und Vorschläge zu ihrer Lösung werden skizziert.



وَقُلْ اَعْمَلُوا فَسَيَرَى اللّٰهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ

To my Parents, then to Rima

إِلَى أَبِي وَأُمِّي، ثُمَّ إِلَى رِيْمَا



Acknowledgments

First and foremost I want to express my sincere gratitude to Professor Günther Tränkle who gave me the opportunity to accomplish this thesis at the Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) which has been of a great value for me, both, academically and personally. I also thank him for his generous professional supervising and constant support.

It has been a great honor for me to work with Dr. Andreas Wicht, an exceptional scientist whose commitment to research have inspired me every day. I greatly appreciate his personal qualities and his openness and I thank him for his constant support, his patience, and his contribution to this work. I also thank his invaluable help proofreading my thesis.

I am grateful to Dr. Hans Wenzel for sharing his robust experience in the theory of semiconductor lasers and his valuable contribution to this work.

I thank Dr. Reiner Güther for the valuable discussions and for his contribution to understanding the electro-optic properties of GaAs.

I would like to thank Dr. Harendra H. J. Fernando from Leibniz Institute for Astrophysics Potsdam, for introducing me to the simulation software RSoft CAD.

I deeply thank Dr. Olaf Brox for the wafer layout design and processing, Dr. Andre Maaßdorf for growing the structures, Dr. Peter Ressel for the AR-coating, Arnim Ginolas and Sabrina Kreutzmann for mounting of the passive waveguide chips.

My warm gratitude goes to all members of the group "Lasermetrologie" for the motivating, inspiring, and warm working atmosphere. I thank my colleagues Christian Kürbis and Christoph Pyrlik for the valuable discussions at different stages in this work. I also thank Heike Christopher, Max Schiemangk, Dr. Ahmad Bawamia, and Robert Smol for their support and continuous willingness to help whenever required.

Thank you Rashed ALToma, my friend, for your support and encouragement.

I gratefully acknowledge the funding sources that made my Ph.D. work possible. I would like to thank the DLR for the funding under the grant number 50WM1141.

My deepest thanks to my family who have always encouraged me and believed in me. Words can not express how grateful I am to my father Mohammad Arar and my mother Fatima Kewan. My two brothers and best friends, Moammer and Thabet whose unconditional support have always accompanied me. My sisters Samah, Hiba, Wafa, and Rawda. And finally, thank you my dear wife Doaa, with love.





Contents

Motivation	1
Preamble	1
Micro-integrated laser systems, state of the art	3
1 Introduction	6
1.1 Developments in III-V semiconductor phase modulators	6
1.2 Thesis objectives: GaAs-based passive photonic components	7
1.2.1 Objective: GaAs-based phase modulators	8
1.2.2 Objective: GaAs-based couplers	9
1.2.3 Application: GaAs-based amplitude (intensity) modulator	10
1.3 Structure of the thesis	11
2 Fundamentals of guided-wave optics	13
2.1 Electro-magnetic wave propagation in planar waveguides	14
2.1.1 Planar electro-magnetic waves	14
2.1.2 Reflection of planar waves	15
2.1.3 Planar waveguides	17
2.1.4 Ridge waveguides	20
2.1.5 Bent waveguides	21
2.2 Planar waveguide couplers	21
2.2.1 Concepts for ridge waveguide couplers	22
2.2.2 Self-imaging in multi-mode interference couplers	24
2.2.3 Interference mechanisms of self-imaging	27
2.2.4 Characteristics of waveguide couplers	28
3 Theory of GaAs-based electro-optic phase modulators	29
3.1 Electro-optic effects in GaAs	30
3.1.1 Linear and quadratic electro-optic effects	30
3.1.2 The index ellipsoid	30
3.2 Free carrier effects (carrier density-related effects)	34
3.3 GaAs-based double heterostructures	34
3.3.1 The p-n junction and the heterojunctions	35
3.3.2 GaAs/AlGaAs double heterostructures phase modulators	35
3.3.3 Phase modulation efficiency in double heterostructures	36