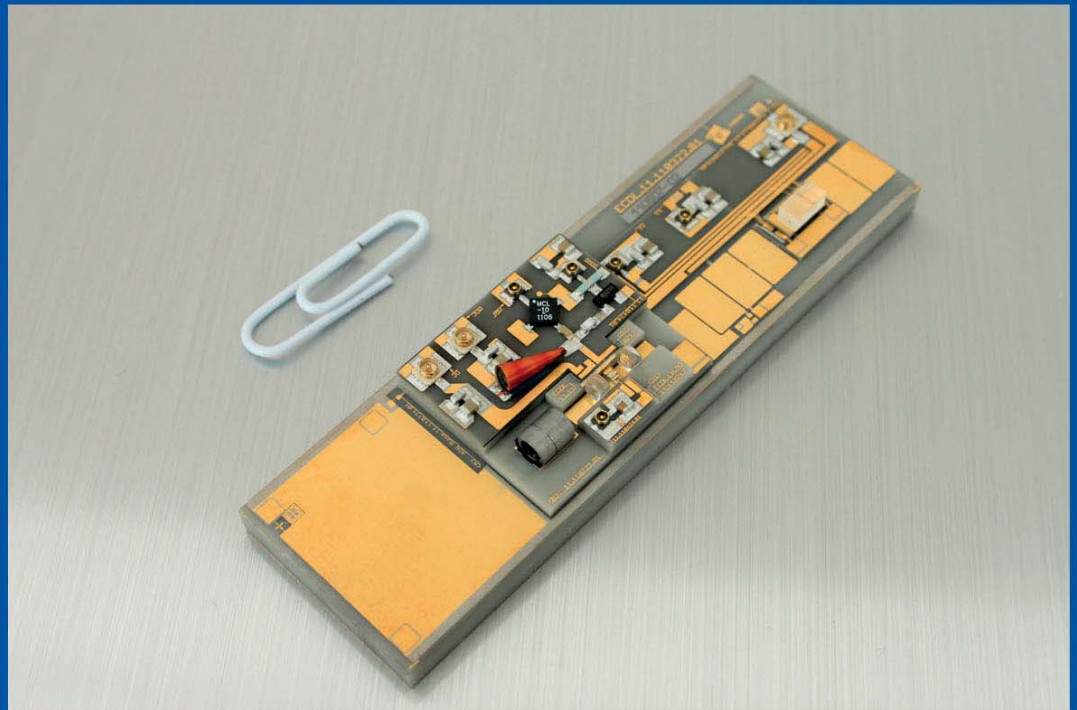


40

Innovationen mit Mikrowellen & Licht

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

Development of micro-integrated diode
lasers for precision quantum optics
experiments in space









aus der Reihe:

Innovationen mit Mikrowellen und Licht

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

Band 40

Erdenetsetseg Luvsandamdin

Development of micro-integrated diode lasers for precision
quantum optics experiments in space

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 compiles 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.

Quantum optical sensors based on ultra-cold atoms are about to leave atomic physics laboratories to be used in the field or even in space. Such applications require the corresponding lasers to be sufficiently compact, robust, and energy efficient. Two types of diode lasers – distributed feedback (DFB) lasers and extended cavity diode lasers (ECDLs) – are investigated and compared in this report with respect to their applicability to experiments on ultra-cold samples of potassium (767 nm) and rubidium (780 nm) atoms. The development of a hybrid micro-integrated ECDL suitable for operation on board a sounding rocket is described. For both DFB lasers and ECDLs the electro-optic performance is investigated in detail, with emphasis on the characterization of the tuning behavior and on the spectral stability.

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.



Development of micro-integrated diode lasers for precision quantum optics experiments in space

vorgelegt von
Master of Science
Erdenetsetseg Luvsandamdin
aus Ulaanbaatar, Mongolei

Von der Fakultät IV Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Naturwissenschaften
- Dr. rer. nat. -
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich, Technische Universität Berlin
Berichter: Prof. Dr. Günther Tränkle, Technische Universität Berlin
Prof. Achim Peters, Ph.D., Humboldt-Universität zu Berlin
Prof. Dr. Bernhard Roth, Universität Hannover

Tag der wissenschaftlichen Aussprache:

Berlin, 2015
D 83



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, 2017
Zugl.: (TU) Berlin, Univ., Diss., 2015

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2017
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 2017

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9479-9
eISBN 978-3-7369-8479-0



ABSTRACT

The subject of this thesis is the development of micro-integrated diode lasers for precision quantum optics experiments in space. Precision quantum optics applications in space or in a micro-gravity environment require not only a laser system with a good electro-optical performance such as an excellent short-term frequency stability of a few kHz and a wide continuous frequency tuning range but also an exceptionally compact design which provides reliable mechanical and thermal stabilities.

Recently, the activities have been moving towards carrying out quantum optics precision experiments under micro-gravity conditions of a drop tower or in space. The German Space Agency DLR is currently supporting a sounding rocket mission that will lead to a Bose-Einstein-Condensate (BEC) onboard a sounding rocket in 2017. At the time when the research and technical developments described in this thesis work were initiated, there were no commercial nor lab-based laser technologies that did not meet the requirements regarding compactness and reliability.

This thesis work is therefore devoted to develop the laser technologies that allows an implementation of the diode laser systems that are required for the sounding rocket mission. A realization of this technology will provide a demonstration of BEC and atomic interferometry in space, for the first time ever.

This research was carried out as a part of the project "LASUS" which provided the technology development for the sounding rocket mission "MAIUS". During this project monolithic diode lasers were electro-optically characterized and optimized for Rb and K spectroscopy. Further, hybrid integration concepts were developed for the realization of micro-integrated extended cavity diode lasers, again for Rb and K spectroscopy. These concepts were then employed for the realization of such devices. In this thesis, the basics of semiconductor diode lasers is briefly introduced. The structures of monolithic diode lasers as distributed feedback (DFB) lasers are described which are used for the micro-integration concepts of a master oscillator power amplifier. The basics of the extended cavity diode laser (ECDL) and volume holographic Bragg grating (VHBG) are explained with the corresponding theoretical models. The simulations of the continuous frequency tuning of an ECDL and diffraction efficiency of a VHBG are performed.

The electro-optical properties of the DFB lasers, macroscopic-ECDLs and micro-integrated ECDLs for both wavelengths are investigated. The corresponding measurement methods and setups for the standard and advanced characterizations are introduced. Linewidth measurements as beat note measurements are carried out by the self-heterodyne and heterodyne methods depending on laser types. Rb-DFB lasers provide single mode emission with an output power of more than 180 mW. The Rb and K-DFB lasers provide a short term (10 μ s) FWHM linewidth of 500 kHz and 320 kHz, respectively. The intrinsic linewidth of the most stable Rb-DFB laser



corresponds to 14 kHz, whereas the corresponding K-DFB laser features an excellent spectral stability with an intrinsic linewidth of 5 kHz.

The electro-optical properties of the macroscopic-ECDLs are optimized for micro-integrated modules. The micro-integrated ECDL modules contain only non-moveable components and they are integrated on a micro-optical bench (MIOB) with a footprint of either $50 \times 10 \text{ mm}^2$ or $80 \times 25 \text{ mm}^2$. The ECDLs are based on a Littrow configuration with an external cavity length of approximately 30 mm. The Rb- and K-ECDLs provide a stable single mode operation with the side mode suppression ratios of more than 55 dB and 45 dB, respectively. A Rb-ECDL exhibits an output power exceeding 50 mW, whereas the output power of a K-ECDL corresponds to at least 35 mW. In both case, the output powers are measured behind a micro-optical isolator with an isolation of 30 dB. The lasers can be coarsely tuned by approximately 50 GHz with a continuous tuning range of more than 30 GHz. The micro-integrated ECDLs feature a short-term (170 μs) FWHM linewidth of significantly less than 100 kHz and an intrinsic linewidth (FWHM) that corresponds to only 260 Hz.

To qualify the micro-integrated ECDLs for future quantum optics precision experiments in space, vibration tests (8.1 g_{RMS} and 21.4 g_{RMS}) and mechanical shock tests (1500 g) were carried out. No degradation of the electro-optical performance was observed. Therefore, we strongly believe, that the micro-integrated ECDL modules are suitable and reliable for precision quantum optics applications in space.

Furthermore, the micro-integration technology concepts can be transferred to any other wavelength accessible similar or closely related technology with diode lasers in the IR, VIS or UV.



ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieser Doktorarbeit ist die Entwicklung von mikro-optisch integrierten Diodenlasern für quantenoptische Präzisionsexperimente im Weltraum. Quantenoptische Präzisionsanwendungen im Weltraum oder unter Schwerelosigkeit erfordern nicht nur ein Lasersystem mit guten elektro-optischen Eigenschaften wie einer exzellenten Kurzzeit-Frequenzstabilität von einigen kHz und einem weiten kontinuierlichen Frequenzdurchstimmbereich, sondern auch ein außerordentlich kompaktes Design, das eine zuverlässige mechanische und thermische Stabilität bietet.

Das Deutsche Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR) unterstützt derzeit eine Höhenforschungsraketenmission, die im Jahr 2017 ein Bose-Einstein-Kondensat (BEC) an Bord einer Höhenforschungsrakete erzeugen wird. Als die Forschungen und technischen Entwicklungen, die in dieser Doktorarbeit beschrieben werden, initiiert wurden, gab es keine kommerziellen oder labor-basierten Lasertechnologien, die die Anforderungen in Bezug auf Kompaktheit und Zuverlässigkeit erfüllen konnten.

Diese Doktorarbeit widmet sich daher der Entwicklung von Lasertechnologien für die Realisierung der Diodenlasersysteme, die für die Höhenforschungsraketenmission erforderlich sind. Die Realisierung dieser Lasertechnologien wird erstmals die Demonstration eines BEC und von Atominterferometrie im Weltraum ermöglichen. Diese Forschungsarbeit wurde als ein Teil des Projekts "LASUS" durchgeführt, das die Entwicklung der Technologie für die Höhenforschungsraketenmission "MAIUS" durchgeführt hat.

Im Rahmen des Projektes wurden monolithische Diodenlaser elektro-optisch charakterisiert und für die Rb- und K-Spektroskopie optimiert. Darüber hinaus wurden hybride Integrationskonzepte für die Realisierung von mikro-integrierten *extended cavity* Diodenlasersystemen entwickelt, wieder zur Rb- und K-Spektroskopie. Diese Konzepte wurden dann für die Realisierung solcher Systeme verwendet.

In dieser Arbeit werden die Grundlagen der Halbleiterdiodenlaser kurz vorgestellt. Die Struktur von monolithischen Diodenlasern wird anhand von *distributed feedback* (DFB) Lasern beschrieben, welche für die Mikrointegrationskonzepte von Master-Oszillator-Leistungsverstärker-Systemen verwendet werden. Die Grundlagen von *extended cavity diode laser* (ECDL) und von volumenholographischen Bragg-Gittern (VHBG) werden mit den entsprechenden theoretischen Modelle erläutert. Simulationen der kontinuierlichen Frequenzdurchstimmung eines ECDL und der Beugungseffizienz eines VHBG werden durchgeführt.

Die elektro-optischen Eigenschaften von DFB-Lasern, makroskopischen ECDL und mikro-integrierten ECDL werden für beide Wellenlängen untersucht. Die entsprechenden Messverfahren und -aufbauten für die standardmäßige und erweiterte Charakterisierungen werden eingeführt. Die Linienbreitenmessungen werden als die Schwebungsmessungen mit der *self-heterodyne* und der *heterodyne* Methode in Abhängigkeit vom Lasertyp durchgeführt. Die Rb-DFB Laser zeigen *single-mode* Betrieb mit



Ausgangsleistungen von mehr als 180 mW. Die Rb- und K-DFB Laser bieten eine Kurzzeit-Linienbreite ($10 \mu\text{s}$) von 500 kHz bzw. 320 kHz (FWHM). Die intrinsische Linienbreite des stabilsten Rb-DFB Lasers erreicht 14 kHz, während der entsprechende K-DFB Laser eine exzellente spektrale Stabilität mit einer intrinsischen Linienbreite von 5 kHz besitzt.

Die elektro-optischen Eigenschaften der makroskopischen ECDL werden für die mikro-integrierten Module optimiert. Die mikro-integrierten ECDL-Module enthalten nur unbewegliche Komponenten, welche auf einer mikro-optischen Bank (MIOB) mit einer Grundfläche von entweder $50 \times 10 \text{ mm}^2$ or $80 \times 25 \text{ mm}^2$ integriert werden. Die ECDL basieren auf der Littrow-Konfiguration mit einer externen Kavität von ungefähr 30mm. Die Rb- und K-ECDL stellen einen stabilen single-mode Betrieb mit Seitenmodenunterdrückungsverhältnissen von mehr als 55 dB bzw. 45 dB bereit. Ein Rb-ECDL zeigt eine Ausgangsleistung von mehr als 50 mW, während die Ausgangsleistung eines K-ECDL mindestens 35 mW entspricht. In beiden Fällen werden die Ausgangsleistungen hinter einem mikro-optischen Isolator mit einer Isolation von 30 dB gemessen. Die Laser können grob um ca. 50 GHz durchgestimmt werden, mit einem kontinuierlichen Abstimmbereich von mehr als 30 GHz. Die mikro-integrierten ECDL verfügen über eine Kurzzeit-Linienbreite ($170 \mu\text{s}$) von deutlich weniger als 100 kHz (FWHM) und ihre intrinsische Linienbreite (FWHM) entspricht nur 260 Hz. Um die mikro-integrierte ECDL für zukünftige quantenoptische Präzisionsexperimente im Weltraum zu qualifizieren, wurden Vibrationstests ($8.1 \text{ g}_{\text{RMS}}$ and $21.4 \text{ g}_{\text{RMS}}$) und mechanische Schocktests (1500 g) durchgeführt. Keine Degradierung der elektro-optischen Eigenschaften wurde beobachtet. Deshalb sind wir davon überzeugt, dass die mikro-integrierten ECDL-Module geeignet und zuverlässig für quantenoptische Präzisionsanwendungen im Weltraum sind. Darüber hinaus lassen sich die Technologiekonzepte für die Mikrointegration auf andere Wellenlängen übertragen, die mit dieser oder ähnlicher Technologie mit Diodenlasern im IR, VIS oder UV erreichbar sind.



ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to take this chance to express my deepest appreciations to people who offered me tremendous help and support in the past several years.

First, I would like to express my sincere gratitude to my Professor Dr. Günther Tränkle, who has given me a great opportunity to do the research in the motivating environment of the FBH. I have been always motivated by his encouragement and constant support in the research works. I would like to acknowledge his professional suggestions and guidance, and many valuable discussions.

I wish to convey my gratitude Dr. Gözt Erbert, Head of Optoelectronics Department for his leadership and kindness and fruitful discussions.

I would like to send my deepest appreciation to Dr. Andreas Wicht for his suggestions and guidance, useful supports in experiments and helpful comments. His profound knowledge about extended cavity diode lasers was of great value for this research work to be accomplished successfully.

I highly appreciate Dr. Stefan Spießberger and Max Schiemangk for their valuable supports, advices and kind help in the daily work, especially for the linewidth measurement as well as for the assembly of the micro-integrated modules.

I would like to thank Alexander Sahm for the assembly of the micro-optical base plate.

I would like to thank to Dr. Olaf Brox and Dr. Hans Wenzel for useful discussions, particularly for their professional guidance and advices for potassium DFB laser performance.

I would like to acknowledge with much appreciation the crucial role of the staff of "Aufbau Technik". Namely, I greatly thank to Dr. Arnim Ginolas and Sabrina Kreuzmann for their variable and helpful collaboration, and professional advices to complete my research work.

My thanks also go to all members of the group "Lasermetrology" for their help and collaboration.

My warm regards also go to the staffs of "EDV", "Werkstatt" and "Haustechnik" for providing necessary technical and mechanical supports, and comfortable environment.



Acknowledgements

I would like to thank the German Space Agency DLR for fundings under grant number: 50WM1240 and 50WM1132

Finally, I thank to my beloved son Batkhaan Erdenetsetseg. Words cannot express how grateful I am to my son who has always encouraged me and supported me with his love and by well taking care of himself in his daily life and study. I have always sincere gratitude to my mother and my sibling, who live in Mongolia, for their love, supports and encouragements.