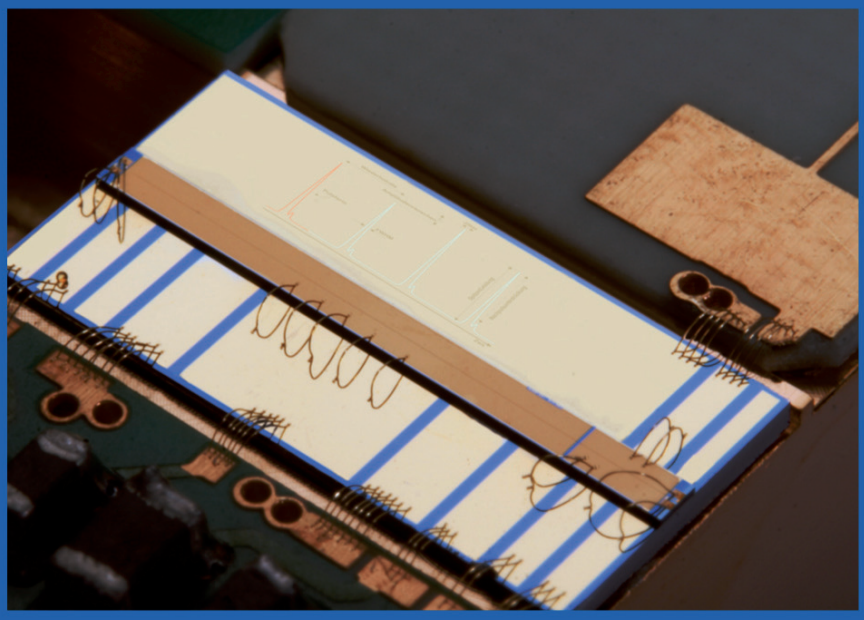
Leibniz
Ferdinand-Braun-Institut

26

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

Innovationen mit Mikrowellen & Licht

Experimentelle Untersuchung der Modensynchronisation in Multisegment-Laserdioden zur Erzeugung kurzer optischer Pulse bei einer Wellenlänge von 920 nm



Sven Schwertfeger

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

aus der Reihe:

Innovationen mit Mikrowellen und Licht

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

Band 26

Sven Schwertfeger

Experimentelle Untersuchung der Modensynchronisation in Multisegment-Laserdioden zur Erzeugung kurzer optischer Pulse bei einer Wellenlänge von 920 nm

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

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Innovationen mit Mikrowellen und Licht

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

Vorwort der Herausgeber

Neue Ideen, Entwicklungen und Konzepte aus der Forschung sind die Basis von Fortschritt und Wettbewerbsfähigkeit. Als Inventionen erweitern sie den Stand des Wissens und der Technik, als innovative Produkte und Dienstleistungen schließlich findet ein Teil von ihnen Eingang in unsere Alltagswelt.

In diesem Sinne dokumentiert die Reihe *„Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik“* aktuelle Forschungen und Entwicklungen aus dem Institut. Wir möchten Ihnen diese Ergebnisse zugänglich machen und zur weiteren Diskussion anregen – nicht zuletzt, damit möglichst viele Entwicklungen zu einem Teil unseres Alltags werden.

Der vorliegende Beitrag zeigt durch theoretische und experimentelle Untersuchungen den gegenwärtigen Stand bei der Kurzpulserzeugung durch modengekoppelte Diodenlaser auf Galliumarsenid-Basis. Die Ergebnisse führen zu einem Leitfaden für die Entwicklung dieser Halbleiterlaser.

Eine anregende Lektüre wünschen

Prof. Dr. Günther Tränkle
Direktor

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Heinrich
stellvertretender Direktor

Das Ferdinand-Braun-Institut

Das Ferdinand-Braun-Institut erforscht elektronische und optische Komponenten, Module und Systeme auf der Basis von Verbindungshalbleitern. Diese sind Schlüsselbausteine für Innovationen in den gesellschaftlichen Bedarfsfeldern Kommunikation, Energie, Gesundheit und Mobilität. Leistungsstarke und hochbrillante Diodenlaser, UV-Leuchtdioden und hybride Lasersysteme entwickelt das Institut vom sichtbaren bis zum ultravioletten Spektralbereich. Die Anwendungsfelder reichen von der Medizintechnik, Präzisionsmesstechnik und Sensorik bis hin zur optischen Satellitenkommunikation. In der Mikrowellentechnik realisiert das FBH hocheffiziente, multifunktionale Verstärker und Schaltungen, unter anderem für energieeffiziente Mobilfunksysteme und Komponenten zur Erhöhung der Kfz-Fahrsicherheit. Kompakte atmosphärische Mikrowellenplasmaquellen mit Niederspannungsversorgung entwickelt es für medizinische Anwendungen, etwa zur Behandlung von Hauterkrankungen.

Das FBH ist ein international anerkanntes Zentrum für III/V-Verbindungshalbleiter mit allen Kompetenzen: vom Entwurf, über die Fertigung bis hin zur Charakterisierung von Bauelementen.

Seine Forschungsergebnisse setzt das FBH in enger Zusammenarbeit mit der Industrie um und transferiert innovative Produktideen und Technologien erfolgreich durch Spin-offs. In strategischen Partnerschaften mit der Industrie sichert es in der Höchstfrequenztechnik die technologische Kompetenz Deutschlands.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Experimentelle Untersuchung der Modensynchronisation in Multisegment-Laserdioden zur Erzeugung kurzer optischer Pulse bei einer Wellenlänge von 920 nm

vorgelegt von
Diplom Physiker
Sven Schwertfeger
aus Berlin

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. Boit
Berichter 1:	Prof. Dr. Günther Tränkle (TU-Berlin)
Berichter 2:	Prof. Dr. Hofmann (Ruhr-Universität Bochum)

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 19.12.2011

Berlin 2012

D 83

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

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, 2013
Zugl.: (TU) Berlin, Univ., Diss., 2012

978-3-95404-471-9

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2013
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 2013
Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

978-3-95404-471-9

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Inhaltsverzeichnis

0 Executive Summary **1**

1 Einleitung **3**

2 Grundlagen **5**
2.1 Halbleiterlaser 5
2.2 Beschreibung kurzer Pulse 7
2.3 Methoden zur Pulserzeugung 10
2.3.1 Gewinn-Schaltung 10
2.3.2 Güte-Schaltung 11
2.4 Modenkopplung 12
2.4.1 Modengekoppelte Halbleiterlaser 19

3 Mehrsegment-Laser **21**
3.1 Modellierung mit LDSL 22

4 Herstellung und Montage der Proben **35**
4.1 Probenherstellung 35
4.2 Laserlayout 37
4.3 Bestimmung der Materialparameter 37
4.3.1 Epitaxiestruktur 37
4.3.2 Gruppenindex 39
4.3.3 DBR-Gitter für selektive Rückkopplung 40
4.4 Facettenbeschichtung 41
4.5 Absorber - Sektion 44
4.6 Montage und Ansteuerung der Proben 46

5 Experimenteller Aufbau und Techniken zur Charakterisierung von Kurzpulslasern **49**
5.1 Messplatzbeschreibung 49
5.2 Leistungsmessung 50
5.3 Optische Spektrenmessung 51
5.4 Strahlqualität 52
5.5 Autokorrelation 52
5.6 Streakkamera 54
5.7 RF-Analyse 56
5.8 Rauschmessungen (Phasenrauschen und Amplitudenrauschen) . . 57
5.9 Synchronisation mit externer HF - Quelle 60

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

6 Ergebnisse passiv modengekoppelter Laser **63**
6.1 Leistungsmessung unter Gleichstromanregung 63
6.2 Optische Spektren 70
6.3 Elektrische Leistungsspektren 74
6.4 Autokorrelationsmessung 83
6.5 Zeit-Bandbreiten Produkt 92
6.6 Strahlcharakteristik 94
6.7 Fazit passives Modenkoppeln 96

7 Hybride Modenkopplung **97**
7.1 Elektrische Anpassung 97
7.2 Durchstimmbereich 98
7.3 Stabilität 100

8 DBR Sektion mit Strom in Durchlassrichtung **106**

9 Zusammenfassung **115**

A Travelling-Wave-Modell **118**

B Häufig verwendete Abkürzungen und Symbole **121**

C Eigene Arbeiten **123**

Literaturverzeichnis **125**

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

0 Executive Summary

This work deals with the development and experimental investigation of a high-power short laser-pulse source that emits at a wavelength of 920 nm. The laser source consists of a monolithic multi-section mode-locked laser based on the GaAs material system. The main focus lies on the achievement of high pulse energies at pulse durations below 20 ps.
First, simulations of a four section DBR laser were carried out with the software tool LDSL in order to determine their potential in terms of pulse duration and output power. Based on the simulation results four section lasers with a waveguide thickness of 3.6 μm and a double quantum well acting as active region were realized. The four sections of the laser work as follows: The section at the front facet acts as a saturable absorber allowing the synchronization of the resonator modes and thus enable passive mode-locking. The second section, the gain section, provides the required power. The third section is a long active cavity section (length approx. 8000 μm) which is required to reach an overall laser length of 10 mm. The round trip time for the overall length of 10 mm corresponds to 250 ps resulting in the desired repetition rate of 4 GHz. The fourth section adjacent to the rear facet is a DBR section that defines the emission wavelength. The length of the gain section was varied while keeping the overall laser length fixed by a corresponding variation of the cavity section length.
The lasers were grown by a two step metal organic vapor phase epitaxy (MOVPE). In order to characterize the laser devices an appropriate mount including the driving electronics was developed. Furthermore a measurement setup consisting of a streak camera, an autocorrelator, and an electrical spectrum analyzer was realized and a corresponding controlling and evaluation software has been developed. These DBR lasers were systematically analyzed by measuring the average power and the spectral and temporal behavior of the generated pulses. In order to obtain hybrid mode-locking a high frequency sinusoidal shaped voltage was applied to the absorber section. The extensive experimental investigations showed that the lasers feature passive mode locking for nearly all operating parameters. The emission power scaled with the injection current through the gain as well as the cavity section. An increased voltage at the absorber section leads to shorter pulses and reduced phase noise. In order to reach laser emission the current through the cavity section is required to exceed the transparency current density. A further increase of the current through the cavity section increases the pulse energy, however, the pulse duration and the noise level are also increased. For very high cavity currents modelocking will finally be instable. The length of

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

the gain section influences the achievable pulse energy and pulse duration directly and thus influences the peak pulse level as well. For lasers with a 1500 μm long gain section the achieved pulse energy was 25 pJ. With a shorter gain section of 1000 μm a pulse energy of 12 pJ was reached. The lasers with the shortest gain section of 750 μm delivered a maximum pulse energy of 10 pJ. For pulse energies below 3.7 pJ the measured pulses are transform limited with a pulse duration below 10 ps and a $sech^2$ pulse shape. The $sech^2$ shape is observed for pulse energies up to 7 pJ, however these pulses are not transform limited any more. The maximum achievable peak power at these power levels corresponds to 900 mW. For higher powers an increase of the pulse duration is observed and a definite determination of the pulse shape with the autocorrelation function can no longer be obtained. As a result, the calculated pulse parameters like peak power and time-bandwidth product become defective.
Besides passive mode-locking, hybrid mode-locking, realized by applying a high frequency AC voltage to the absorber section, has been investigated as well. If the frequency of the external voltage source lies in the range of the roundtrip time of the mode-locked laser, then the laser locks to the high frequency signal. Under hybrid mode-locking the round trip time of the laser is fixed to the external frequency and thus the long term frequency stability is increased. For a maximum external RF-power of 30 dBm the timing jitter measured by a phase noise measurement was reduced to about 1 ps. The specific design of these laser chips with the active region extending over all sections allows for an electrical pumping of the Bragg-grating section. The pumping of the Bragg grating with a current up to 100 mA leads to a significant increase of the output power and a reduction of phase noise for all three geometries presented. With this method the pulse peak power of a 1000 μm device was increased to values beyond 2 W corresponding to twice the power obtained without pumping of the Bragg grating section. The pulse energy corresponds to 16.5 pJ. The pulse length of 7 ps was well below the aim of 20 ps. The timing jitter was reduced to 1.5 ps at passive operation. With hybrid mode-locking the timing jitter was even below 1 ps. The results reached in this work regarding pulse energies and maximum pulse power, shows the potential of the GaAs material system. Compared to the monolithic lasers presented in the literature the pulse energies were significantly increased. Electrical pumping of the Bragg-section resulted in an increased emission power and a significant reduction of the timing jitter. This work provides a deep insight into the physics and performance of GaAs based mode-locked lasers and can be used as a groundwork for the realization of mode-locked lasers at other wavelengths.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

1 Einleitung

Das von Albert Einstein Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelte Arbeitsprinzip der stimulierten Emission bildet die Grundlage aller Laserentwicklungen. Die erste technische Realisierung eines Lasers gelang im Jahre 1960 durch Maiman [1], unter Verwendung eines optisch gepumpten Rubinkristalls. Bereits im Jahre 1962 wurde der erste Laser auf Basis einer Halbleiterlaserdiode gleich von mehreren Gruppen demonstriert (z.B. [2]). Durch ständige Weiterentwicklung auf diesem Gebiet haben sich bis heute die optischen Technologien zu einer Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts entwickelt. Aktuell ist bei Laseranwendungen ein bevorzugter Trend hin zu möglichst kompakten Strahlquellen zu beobachten.
Es ist jedoch nicht nur die Verwendung des Lasers als Dauerstrichlichtquelle von Bedeutung, sondern es werden häufig kurze Laserpulse hoher Leistung mit einer schmalen Linienbreite und einer Wiederholrate von bis zu einigen Gigahertz für viele Einsatzgebiete benötigt: z.B. zeitaufgelöste Mikroskopie [3], in der Telekommunikation zur Datenübertragung [4] und zur Frequenzkonversion für Laserdisplays [5, 6] oder optisch parametrische Oszillatoren (OPOs) [7] und zur Takterzeugung [8].
Üblicherweise erfolgt die Erzeugung von kurzen Lichtpulsen hoher Spitzenleistung unter Verwendung modengekoppelter Hochleistungs-Scheibenlaser [9] oder Festkörperlaser mit integriertem sättigbaren Absorber [10]. Diese haben jedoch oft einen niedrigen Wirkungsgrad, sind schlecht zu handhaben und kostenintensiv im Unterhalt.
Die wesentlichen Vorteile, die sich aus der Verwendung von Halbleiterlasern zur Pulserzeugung ergeben, sind eine kleinere Bauweise, wesentlich höhere Effizienzen, hohe Zuverlässigkeit und eine einfache Handhabung. Des Weiteren sind Halbleiterlaser zur Erzeugung kurzer Laserpulse mittlerweile wohl etabliert[11, 12]. Da die minimal erreichbare Pulslänge invers von der Verstärkungsbandbreite abhängt sind Halbleiterlaser mit einem breiten Gewinnprofil von bis zu 88 nm [13] hervorragend zur Erzeugung kurzer Pulse geeignet. Zusätzlich können sie direkt elektrisch angeregt und moduliert werden.
Für die meisten Anwendungen wird eine wohl bestimmte Wellenlänge der emittierten Laserstrahlung benötigt. Hierzu wird normalerweise zur Frequenzstabilisierung ein externes Gitter und ein kantenemittierender Laser in externer Resonatorkonfiguration verwendet. Die vorherrschenden geometrischen Anordnungen sind nach Littrow [14] und Littmann benannt. Allerdings besitzen diese Aufbauten den Nachteil der mechanischen Instabilität und erfordern zumeist eine aufwendige Justage. Auch sind die maximalen Ausgangsleistungen auf einige

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Milliwatt beschränkt [15] und müssen deshalb in einer Master Oszillator Power Amplifier (MOPA) Konfiguration [16] verstärkt werden.
Eine Möglichkeit, diese Nachteile zumindest teilweise zu kompensieren, besteht darin, dass optische Gitter in einem technologisch aufwendigen Prozess direkt in die Wellenleiterschicht des Lasers zu implementieren. Diese so genannten DBR[1] Laser bieten die Möglichkeit, kompakte frequenzstabile gepulste Laserquellen im Leistungsbereich einiger mW zu realisieren. Sowohl die spektrale Lage der Emission als auch die spektrale Breite können hierbei durch die Eigenschaften des Gitters gezielt eingestellt werden.
Ziel dieser Arbeit ist die Realisierung und experimentelle Charakterisierung von monolithischen modengekoppelten Mehrsektionshalbleiterlasern zur Erzeugung von Laserpulsen mit einer Pulslänge unter 20 ps bei einer Wiederholfrequenz von 4 GHz. Jedoch ist nicht nur die Pulslänge von Interesse, gleichzeitig wird besonderes Augenmerk auf eine möglichst hohe Pulsenergie gelegt. So kann z.B. eine MOPA-Konfigurationen wie sie von Fuchs [17] demonstriert wurde, auch ohne optischen Vorverstärker betrieben werden, was wiederum eine wesentliche Vereinfachung des experimentellen Aufbaus zur Folge hätte. In der vorliegenden Arbeit werden die theoretischen Grundlagen zur Erzeugung kurzer Pulse in Halbleiterlasern vorgestellt, sowie die verwendeten Messverfahren erläutert. Anschließend folgt ein Abschnitt, der sich mit der Herstellung sowie der Ansteuerung der Mehrsegmentlaser beschäftigt. Abschließend werden die Messergebnisse präsentiert und diskutiert.

[1] engl. **d**istributed **b**ragg **r**eflector

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden einige Grundlagen zu Halbleiterlasern beschrieben. Es wird kurz dargestellt, was man unter kurzen Lichtpulsen versteht und wie diese unter Verwendung von Halbleiterlasern erzeugt werden können. Für weiterführende Theorie zur Physik von Halbleiterlasern sei auf die entsprechende Fachliteratur z.B.[18, 19, 20] verwiesen.

2.1 Halbleiterlaser

Die Abbildung 2.1 zeigt ganz allgemein den Aufbau einer Halbleiterlaserdiode mit allen notwendigen Elementen, wie sie seit Ende der 70iger Jahre als einfache Schichtstruktur von Halbleitermaterialien mit unterschiedlichen Bandlücken realisiert werden. Die Laserstrahlung wird hier in einer 100 nm bis 200 nm dicken aktiven Schicht durch Rekombination von Elektron-Loch-Paaren generiert. Die Front- und die Rückfläche des Halbleiterstückes bilden durch ihre endliche Reflektivität den für Laseraktivität notwendigen Resonator. Das optische Feld ist bei diesen Lasern auf den Bereich der aktiven Zone beschränkt, dies wiederum führt zu einem relativ großen vertikalen Abstrahlwinkel von mehr als 40°.
Verringert man die Dicke der aktiven Zone, beginnen ab einer Dicke von ca. 50 nm quantenmechanische Effekte eine dominierende Rolle zu spielen. Die aktive Schicht stellt nun für die Ladungsträger in z-Richtung einen Potentialtopf (*engl. Quantum well*) dar, d.h. die Ladungsträger sind durch die Potentialbarrieren regelrecht "eingesperrt". In der x-y-Ebene können sich die Elektronen weiterhin frei bewegen, während ihre Bewegung senkrecht dazu durch den Verlauf des Potentials bestimmt wird. Es bildet sich ein quasi 2-dimensionales Elektronengas aus, mit einer Quantisierung der Zustandsdichte in z-Richtung [21]. Laser mit diesem Design werden als Quantum-Well-Laser bezeichnet. Die Anzahl der Quantum-Wells in der aktiven Zone ist nicht auf einen beschränkt und variiert je nach Design typischerweise zwischen 1 und 8 [22]. Laser mit mehr als einem Quantum-Well werden dann als Multiquantum-Well Laser bezeichnet. Die Bandstruktur in solch einer Laserdiode wird maßgeblich durch das vertikale Schichtdesign bestimmt.
Das optische Feld in einem Quantum-Well Laser ist nicht nur auf die aktive Zone beschränkt. Um die dadurch entstehenden Verluste in den Barriereschich-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

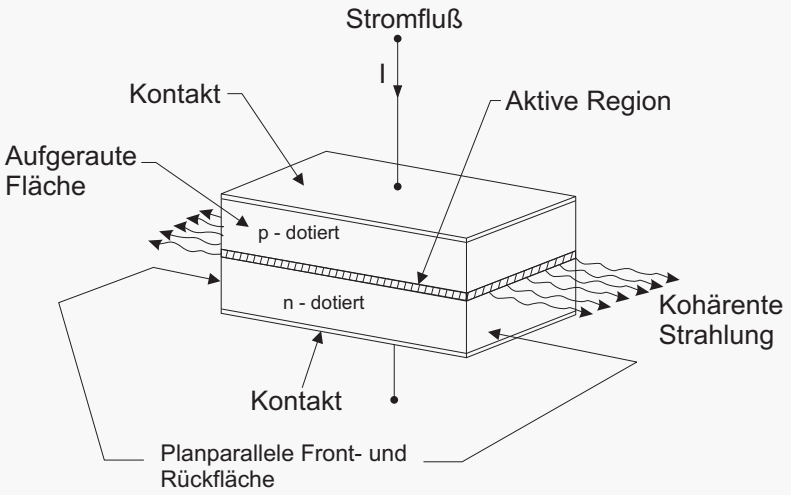


Abbildung 2.1: Grundlegende doppelhetero Struktur einer Laserdiode mit Fabry-Perot- Resonator

ten zu verringern, wird in modernen Halbleiterlasern zusätzlich ein dielektrischer Wellenleiter eingebracht. Die Lichtwelle in einer solchen Struktur wird damit in einer separaten Wellenleiterschicht geführt (*engl. SCH - separate confinement heterostructure*). Der Überlapp des elektrischen Feldes mit der aktiven Zone wird als Füllfaktor (*engl. Confinement factor*) bezeichnet und errechnet sich für die Richtung senkrecht zur aktiven Zone zu:

$$\Gamma_z = \frac{\int_{-d/2}^{+d/2} |E(z)|^2 \, dz}{\int_{-\infty}^{+\infty} |E(z)|^2 \, dz},$$

wobei d die Dicke der aktiven Zone darstellt und $E(z)$ das elektrische Feld in vertikaler Richtung beschreibt.
Für die laterale Begrenzung der Ladungsträger wird der stromdurchflossene Bereich der Laserdiode geometrisch begrenzt. Dies kann man durch Implantation oder durch Ätzen eines wenige μm breiten Steges in die Oberfläche erreichen.
Die laterale Führung des Lichtfeldes, wird dann durch einen Sprung des effektiven Brechungsindex in lateraler Richtung erreicht. Bei richtiger Wahl der Parameter emittiert der Laser in vertikaler und transversaler Richtung in der Grundmode. Ein typischer Vertreter, der alle beschriebenen Techniken in sich vereint, ist der Rippenwellenleiterlaser, wie er in Abbildung 2.2 links dargestellt ist. Auf der

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

rechten Seite sieht man die zugehörige vertikale Feldverteilung mit dem zugehörigen Brechzahlprofil.
Durch eine Strukturierung der p-Metallisierung in Längsrichtung erhält man einen Mehrsegmentlaser, wie er auch in dieser Arbeit verwendet wird.

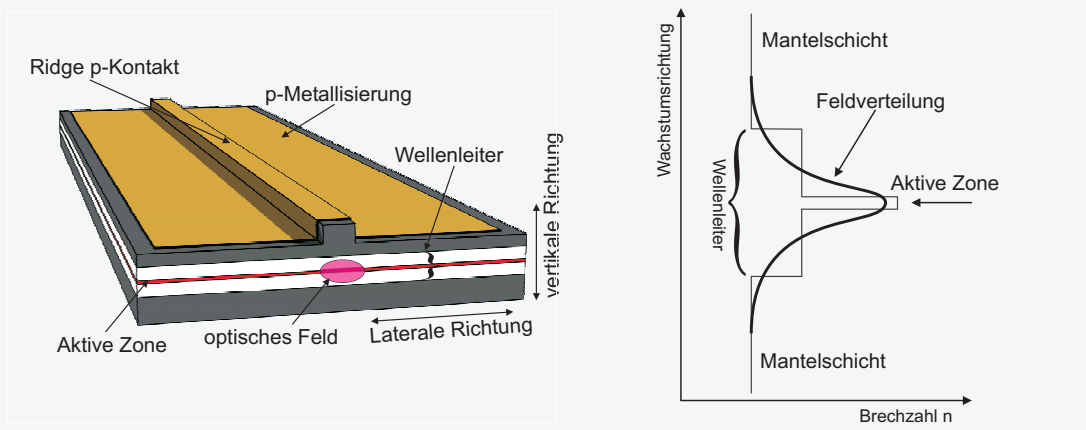


Abbildung 2.2: links: Rippenwellenleiterlaser mit separater Wellenleiter-Heterostruktur, rechts: Verlauf der Brechzahl über der Wachstumsrichtung und zugehörige Feldverteilung

2.2 Beschreibung kurzer Pulse

Ganz allgemein betrachtet sind Laserlichtpulse beliebiger Länge elektromagnetische Wellenpakete. Diese werden somit vollständig durch das zeit- und raumabhängige elektrische Feld beschrieben. Wobei die Beschreibung im Zeitbild $E(t)$ und im Frequenzbild $E(\omega)$ äquivalent sind, da diese über die Fouriertransformation miteinander verknüpft sind [23]. Für einen festen Punkt im Ortsraum ergibt sich das reelle elektrische Feld $E(t)$ zu:

$$E(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \widetilde{E}(\omega) e^{i\omega t} d\omega. \tag{2.1}$$

Durch Zerlegung in Ebene Wellen erhält man dann das komplexwertige Spektrum $\widetilde{E}(\omega)$. Da die Variation der Feldamplitude ($E(t)$) mit einer Frequenz im Bereich von $10^{14}\,\mathrm{s}^{-1}$ nicht ohne weiteres direkt observabel ist, werden zur Bestimmung der Pulsgrößen der zeitliche Verlauf der Einhüllenden der optischen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.