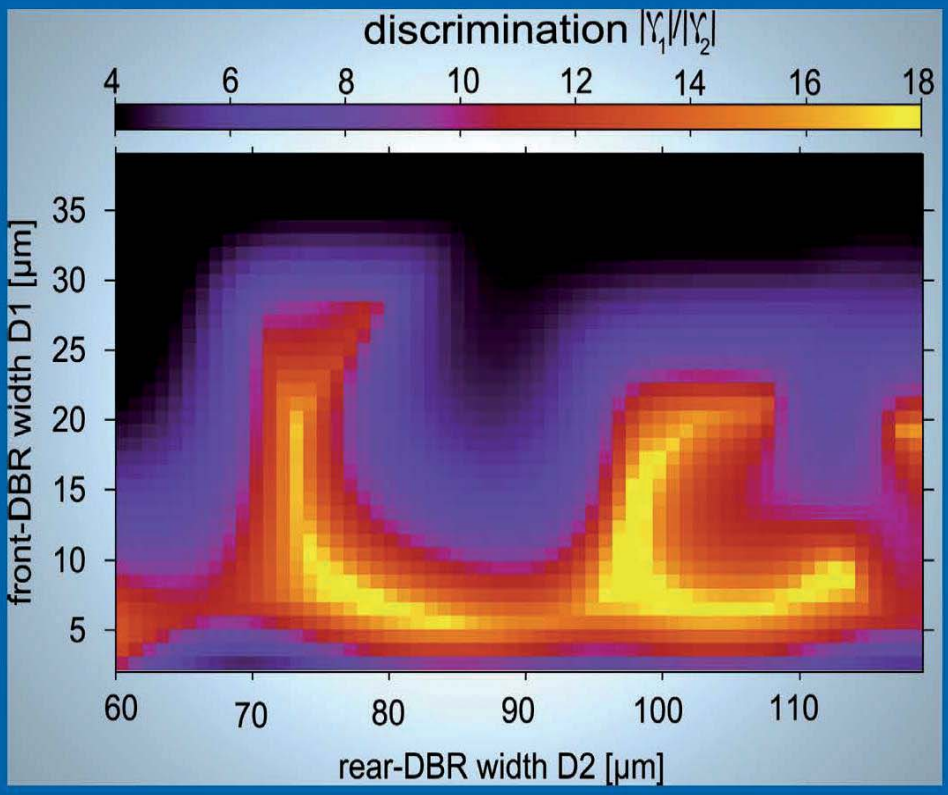
Leibniz
Ferdinand-Braun-Institut

29

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

Innovationen mit Mikrowellen & Licht

Resonatorkonzepte für Hochleistungs-Diodenlaser mit ausgedehnten lateralen Dimensionen



Martin Spreemann

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 29

Martin Spreemann

Resonatorkonzepte für Hochleistungs-Diodenlaser mit ausgedehnten lateralen Dimensionen

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

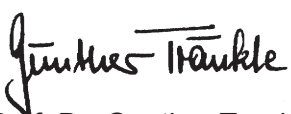
Vorwort der Herausgeber

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.

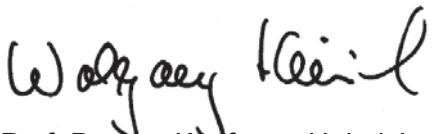
In diesem Sinne dokumentiert die Reihe *„Forschungsberichte aus dem Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik“* aktuelle Forschungen und Entwicklungen aus dem Institut. Wir möchten Ihnen diese Ergebnisse zugänglich machen und zur weiteren Diskussion anregen – nicht zuletzt,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

Der vorliegende Beitrag behandelt theoretische und experimentelle Untersuchungen neuartiger Resonatorkonzepte von Halbleiterlasern auf Galliumarsenid-Basis. Die Ergebnisse helfen, die Faktoren besser zu verstehen, die die Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlasern begrenzen. Dies ist die Voraussetzung, um die Brillanz von Diodenlasern weiter zu steigern.

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.

Resonatorkonzepte für Hochleistungs-Diodenlaser mit ausgedehnten lateralen Dimensionen

vorgelegt von
Dipl.-Phys. Martin Spreemann
aus
Kyritz

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. W. Heinrich
Berichter: Prof. Dr. rer. nat. G. Tränkle
Berichter: Prof. Dr. rer. nat. R. Menzel

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 10. Juli 2013

Berlin 2013
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 Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.
1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2014
Zugl.: (TU) Berlin, Univ., Diss., 2013

978-3-95404-628-7

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2014
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, 2014
Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

978-3-95404-628-7

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

Abstract

This work investigates resonator designs for high-power diode-lasers with very large lateral dimensions that emit in the spectral range around 1060 nm.

In the first part of the work, gain-guided laser arrays with 400 μm total aperture width are investigated from threshold to high-optical output power levels of $P > 50$ W. It is shown that the lateral coupling of the single emitters within the array is reducesd with increasing power by thermal rise of the refractive index. At sufficiently high power levels, the single emitters within the array become de-coupled and the emitted light is the incoherent superposition of the single emitters individual emission, whereas the overall beam properties are noticeable degraded by higher order lateral modes of the single emitters.

In the second part of the work, a novel approach on unstable resonator configurations, formed by Bragg-reflectors of finite width, is developed and experimentally approved. Configurations with a geometry-dependent equivalent Fresnel-number $N_{\mathrm{eq}} \approx 1$ show in simulations an increased discrimination of higher order resonator modes and in experimental measurements a minimal beam parameter M^2. The optical intensity distribution inside the unstable resonator is inhomogeneous which leads, with increasing power levels, to spatial hole-burning in the carrier density distribution and to self-focussing of the light. These effects are shown to lead to a geometry-independent degradation of the beam parameter M^2 at higher power levels.

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

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt Resonatorkonzepte für Hochleistungsdiodenlaser mit ausgedehnten lateralen Dimensionen im Wellenlängenbereich um 1060 nm.

Im ersten Teil der Arbeit werden gewinngeführte Laser-Arrays mit 400 μm lateraler Aperturbreite und Ausgangsleistungen von über 50 W im Quasi-CW Betrieb untersucht. Es wird gezeigt, dass mit steigender Ausgangsleistung die Kopplung der einzelnen Emitter durch die thermische Brechzahlerhöhung abnimmt. Bei hohen Leistungen ist das vom Array abgestrahlte Licht die inkohärente Überlagerung der Abstrahlungen der einzelnen Emitter, wobei die lateralen Obermoden der einzelnen Streifen die Abstrahlcharakteristik des Arrays maßgeblich verschlechtern.

Im zweiten Teil der Arbeit wird ein vollkommen neuer Ansatz zur Verringerung der Strahldegeneration bei lateraler Skalierung entwickelt und experimentell erprobt. Er basiert auf einer instabilen Resonatorkonfiguration, welche durch Bragg-Reflektoren im Laserchip erzeugt wird. Für Resonatorgeometrien mit einer äquivalenten Fresnelzahl von $N_{\mathrm{eq}} \approx 1$ wird in Simulationen eine Diskriminierung höherer Moden und experimentell eine minimale Beugungsmaßzahl des abgestrahlten Lichts nachgewiesen. Mit steigender Ausgangsleistung bewirkt die stark inhomogene laterale Intensitätsverteilung im Resonator jedoch räumliches Lochbrennen in der Ladungsträgerverteilung und eine Selbstfokussierung des Lichts. Dieser Effekt führt geometrieunabhängig zur Degradation der Beugungsmaßzahl mit steigender Ausgangsleistung.

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

Inhaltsverzeichnis

Einleitung und Übersicht **1**

1 Grundlagen und Simulation der Lichtausbreitung in Diodenlaser-Resonatoren **5**

1.1 Laterale Wellenleitung 6

1.1.1 Wellenleiter mit longitudinal homogenem lateralen Brechzahlprofil 8

1.1.2 Freiraumpropagation 9

1.2 Resonatoren mit longitudinal homogenem, lateralen Wellenleiter 11

1.3 Offene Resonatoren 13

1.3.1 Stabile und instabile Resonatoren 14

1.3.2 Resonatoren mit finiten Spiegelausdehnungen 17

1.4 Optische Effekte in Diodenlasern 19

1.4.1 Eingeprägter Indexsprung 20

1.4.2 Ladungsträgereffekte 20

1.4.3 Filamentierung 21

1.4.4 Thermische Brechzahländerung 22

2 Konzepte und Methoden der Strahlcharakterisierung **25**

2.1 Kohärente-Moden Representation des optischen Feldes 25

2.2 Kohärenz von Resonatormoden 27

2.3 Wigner Verteilung 28

2.3.1 Momente der Wigner Verteilung 30

2.3.2 Experimentelle Rekonstruktion 33

2.4 Beugungsmaßzahl M^2 35

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

3 Longitudinal homogene Diodenlaser-Resonatoren 37
3.1 Breitstreifenlaser 38
3.2 Gewinngeführte Laser-Arrays 43
3.2.1 Elektro-optische Eigenschaften 44
3.2.2 Emitterkopplung in gewinnngeführten Diodenlaser-Arrays . . 45
3.2.3 Starke Kopplung 48
3.2.4 Schwache Kopplung 53
3.3 Zusammenfassung 56

4 Neuartiger instabiler Diodenlaser-Resonator mit Oberflächengittern 59
4.1 Oberflächengitter als Resonatorspiegel 62
4.2 Elektro-optische Eigenschaften 65
4.3 Laterale Modendiskriminierung 69
4.3.1 Passives Resonatormodell 70
4.3.2 Aktives Resonatormodell 74
4.3.3 Experimentelle Ergebnisse 76
4.4 Filamentierung 77
4.5 Thermische Effekte 80
4.6 Optimierung der Kontaktgeometrie 84

Zusammenfassung 87

A Epitaxiestruktur, Materialparameter und Montage der untersuchten Diodenlaser 91

B Verwendete numerische Werkzeuge und Simulationsparameter 95
B.1 Bidirektionale Eigenmodenentwicklung: CAMFR 95
B.1.1 Simulation von Oberflächengittern 96
B.1.2 Simulation gewinngeführter Arrays 97
B.2 Zeitabhängige paraxiale Wellengleichung: WIAS-LASER 98
B.3 Propagator-Methode: Matlab/Python-Skript 101

Veröffentlichungen 105

Literaturverzeichnis 107

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

Einleitung und Übersicht

Diodenlaser zeichnen sich gegenüber anderen Laserstrahlquellen durch eine hohe Konversionseffizienz von elektrischer in optische Leistung sowie der Möglichkeit einer preiswerten Massenproduktion aus. Abhängig von der vorgesehenen Anwendung muss eine Strahlquelle jedoch auch spezifische Anforderungen an Leistung, spektrale Bandbreite und Abstrahlcharakteristik erfüllen. Der größte Markt für Lasertechnologie ist die Materialbearbeitung [1]. Der Schlüssel, um CO_2-Laser und diodengepumpte Festkörperlaser dabei in Teilbereichen durch Diodenlasersysteme zu ersetzen ist einerseits die Erhöhung der Ausgangsleistung, andererseits die Verbesserung der Abstrahlcharakteristik der einzelnen Emitter des Diodenlasersystems. Derart verbesserte Emitter sind auch für die Entwicklung kompakterer und effizienterer diodengepumpter Lasersysteme relevant.

Die Leistung von Diodenlasern im Dauerstrich oder Quasi-Dauerstrichbetrieb wird vor allem durch die Zerstörung der Facetten und den nichtlinearen Effekt der thermischen Gewinnreduktion, sog. thermisches Überrollen der Leistung-Strom-Kennlinie, begrenzt [2].

Die Länge eines Lasers und sein thermischer Widerstand sind antiproportional [3]. Somit reduziert sich bei konstanter dissipierter Leistung auch die Erwärmung mit zunehmender Laserlänge. Die mögliche Leistungsskalierung mit der Laserlänge ist bei kantenemittierenden Lasern jedoch begrenzt. Für Laserlängen L, größer als die von den internen Absorptionsverlusten α_i bestimmte Absorptionslänge $1/\alpha_i$, sättigt die erzielbare Ausgangsleistung und lässt sich bei weiterer Verlängerung nicht weiter steigern. Sinnvolle Längen für GaAs basierte Diodenlaser liegen im Bereich $L < 1\,\mathrm{cm}$ [4].

Andererseits kann die Ausgangsleistung von Diodenlasern auch durch die Skalierung der Laserbreite erhöht werden. Ein für viele Anwendungen bedeutender Punkt ist dabei jedoch die Auswirkung auf die Feldverteilung im Laserresonator und die

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

Strahlcharakteristik des emittierten Laserstrahls. Aufgrund des gleichzeitigen Anschwingens höherer lateraler Modenordnungen und der Selbstfokussierung des Lichts durch lokale Sättigung der Ladungsträgerdichte (Filamentierung) nimmt die Fokussierbarkeit des Laserstrahls mit zunehmender Streifenbreite stark ab [5–11]. Je nach Anwendung ist dadurch die laterale Ausdehnung von streifenförmigen Diodenlasern auf wenige Mikrometer für optimale, beugungsbegrenzte Strahleigenschaften [12] oder einige zehn- bis hundert Mikrometer mit entsprechend schlechteren Strahleigenschaften begrenzt [13].

Jedoch ist auch die Ausgangsleistung mit der Streifenbreite nicht beliebig steigerbar. Bei Streifenbreiten von einigen hundert Mikrometern kann es zur Ausbildung von sog. Ringmoden kommen. Diese breiten sich nicht-paraxial im Laserchip aus und werden nicht nur an Front- und Rückfacette sondern auch an den seitlichen Facetten reflektiert. Ringmoden können durch Streulicht, das durch die Oberseite des Laserchips austritt, nachgewiesen werden. Ihr Anschwingen ist mit einem starken Abfall der Ausgangsleistung verbunden [14].

Eine Möglichkeit Ringmoden zu unterdrücken ist die Unterteilung des Breitstreifenlasers in eine Vielzahl schmalerer Einzelstreifen mit geringem Abstand zueinander. Die Abstrahlcharakteristik solcher Laser-Arrays ist maßgeblich von der Kopplung der einzelnen Emitter untereinander abhängig. In den 80'er und 90'er Jahren wurden Arrays mit unterschiedlichsten Kopplungskonzepten intensiv untersucht [4, 15]. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der gegenphasigen Kopplung der Emitter und kohärenter Abstrahlung in nur eine Fernfeldkeule. Die Ausgangsleistung der Arrays betrug damals jedoch nur wenige Watt.

Seitdem ist die erzielbare Ausgangsleistung aufgrund technologischer Fortschritte auf $P > 50\,\mathrm{W}$ deutlich angestiegen [16]. Für viele Anwendungen in diesem Leistungsbereich, wie z.B. das Pumpen von Scheibenlasern mittels Multimodefasern großer Durchmesser, ist eine vollständig kohärente Abstrahlung nicht erforderlich. Die Untersuchung der die Emitterkopplung und somit die Abstrahlcharakteristik bestimmenden physikalischen Effekte von Laserdioden-Arrays im Hochleistungsbereich ist ein Kernthema dieser Dissertation. Dafür werden leistungsabhängig die experimentell bestimmten Kohärenzeigenschaften des abgestrahlten Lichts mit numerischen Simulationen der optischen Feldstruktur verglichen.

Neben der Untersuchung dieses etablierten Resonatorkonzepts für Hochleistungsdiodenlaser wurde im Rahmen der Dissertation jedoch auch ein vollkommen neuer

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