Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays

Von Dr.-Ing. Bernd Lücke
Universität Stuttgart

Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

D 93

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Manfred Berroth

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2002

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2003

ISBN 3-8316-0224-7

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

Inhalt

Kurzfassung **5**

Inhalt **7**

Verzeichnis der Symbole **9**

Extended Abstract **13**

1 Einleitung **17**
1.1 Hintergrund und Zielsetzung 17
1.2 Aufbau der Arbeit 20

2 Methoden der kohärenten Kopplung von Diodenlasern **21**
2.1 Kantenemitter und Vertikalemitter 21
2.2 Selbstorganisierte Kopplung 25
2.2.1 Externe Resonatoren 26
2.2.2 Interne Kopplung 27
2.3 Hierarchische Kopplung 29
2.3.1 Master-Oscillator Power-Amplifier (MOPA) 29
2.3.2 Injection-Locking 30
2.4 Alternative Methoden 32
2.5 Auswahlkriterien 33

3 Theoretische Grundlagen des Injection-Lockings von VCSELs **34**
3.1 Allgemeine Grundlagen 34
3.2 Numerische Simulationen des Injection-Lockings 41

4 Leistungsdichteverteilung im Fokus von kohärenten Emitter-Arrays **48**
4.1 Berechnung der Fernfeldverteilung eines Arrays 48
4.2 Leistungsinhalt des zentralen Maximums 54
4.3 Strahlqualität 60
4.4 Toleranzberechnungen 63
4.4.1 Leistungs- und Phasenvariationen 63
4.4.2 Justagefehler 66

4.4.3 Aberrationen der Mikrolinsen 69

5 Systemaufbau und experimenteller Funktionsnachweis 71

5.1 Charakteristische Daten der VCSELs 71

5.1.1 Elektrooptische Eigenschaften 71

5.1.2 Thermische Eigenschaften 76

5.2 Kohärente Einzelemitter 78

5.2.1 Frequenz-Locking 79

5.2.2 Phaseneinstellung 84

5.3 Kohärente Emitterarrays 87

5.3.1 Experimenteller Aufbau 87

5.3.2 Leistungsdichte-Verteilungen 92

5.4 Stabilität der kohärenten Kopplung 100

6 Kohärenzmodulation 102

6.1 Grundlagen der Kohärenzmodulation 103

6.1.1 Frequenzmodulation des Master-Lasers 103

6.1.2 Simulation der Kohärenzmodulation eines Slave-Lasers 106

6.2 Kohärenzmodulation eines VCSEL-Arrays 108

7 Zusammenfassung und Ausblick 113

Literatur– und Quellenverzeichnis 116

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Zielsetzung

Laser sind als Schlüsselkomponenten aus fast allen Bereichen der modernen Technik nicht mehr wegzudenken. Haupteinsatzgebiete sind die Materialbearbeitung, die Informations- und Kommunikationstechnik und die Messtechnik. Dabei spannt sich der Bogen vom Laserschweißen von Aluminium-Autokarosserien über optische Hochgeschwindigkeits-Datennetze, DVD-Laufwerke oder Laserdrucker bis hin zur Umweltanalytik mittels Laserspektroskopie.

Eine spezielle Art von Laser wird immer wichtiger: der Halbleiterlaser oder Diodenlaser. Bei den Anwendungen, die nur eine geringe Ausgangsleistung erfordern, ist er ohnehin dominierend, aber auch bei Hochleistungsanwendungen wie Schweißen oder Oberflächenbehandlung von Metallen kommt er seit einiger Zeit zum Einsatz. In diesen Leistungsbereichen zwischen 1 W und einigen Kilowatt werden heute mit zunehmender Tendenz Festkörperlaser eingesetzt. Moderne Festkörperlaser, bei denen Diodenlaser als Pumpquellen eingesetzt werden, haben allerdings einen gravierenden Nachteil: zuerst wird die elektrische Leistung in inkohärente Pump-Diodenlaserstrahlung umgesetzt, die in einem zweiten Schritt dann zur Anregung des Festkörpermediums wie Nd:YAG oder Yb:YAG eingesetzt wird. Unabhängig von der Bauform ist bei solchen Stab-, Scheiben- oder Faserlasern die Effizienz niedriger als bei einem Direkteinsatz der Strahlung von Diodenlasern, denn die zusätzliche Transformationsstufe erzeugt immer auch zusätzliche Verluste. Daher ist ein Direkteinsatz der Diodenlaser prinzipiell günstiger und bringt ihre Vorteile - hoher Wirkungsgrad, lange Lebensdauer, wartungsfreier Betrieb, Wellenlängenflexibilität und günstige Herstellung - ohne Einschränkung zur Geltung.

Problematisch ist, dass einzelne Diodenlaser mit ausreichend hoher Leistung bis heute nicht verfügbar sind. Daher werden bei Anwendungen, bei denen es vorrangig auf höhere Leistung ankommt, Arrays von vielen inkohärenten Breitstreifen-Emittern verwendet. Solche Diodenlaserstacks mit mehreren Kilowatt Ausgangsleistung sind kommerziell standardmäßig erhältlich [1]. Allerdings ist die Strahlqualität oder Fokussierbarkeit für viele Anwendungen zu gering, bei denen es auf höchste Leistungsdichte ankommt. In der Materialbearbeitung ist das Bearbeitungsergebnis nicht nur von der

Leistung am Werkstück abhängig, sondern auch vom Fokusdurchmesser, also von der Strahlqualität [2]. Auch im Bereich der Kommunikationstechnik spielen Singlemode-Emitter eine große und weiter wachsende Rolle, so haben Singlemode-Emitter für die Datenübertragung über weite Entfernungen das größte Marktvolumen für Diodenlaser überhaupt [3]. Die Leistung von Singlemode-Diodenlasern ist bis heute relativ klein. Obwohl schon vor einigen Jahren in der Literatur von Grundmode-Diodenlasern mit Leistungen von bis zu 5 W berichtet wurde [4], sind Laser mit Leistungen von mehr als 500 mW im lateralen Grundmode entweder gar nicht oder nur unter großen Schwierigkeiten und Kosten erhältlich. Und selbst wenn sie verfügbar wären, wäre ihre Leistung für viele Anwendungen immer noch zu gering.

Der einzige Weg zu einer Leistungssteigerung ist demnach die Verwendung von vielen Einzeldiodenlasern. Die schlechte Strahlqualität der schon erwähnten Diodenlaserstacks hat zwei Ursachen: die schlechte Strahlqualität der Einzeldiodenlaser und die inkohärente Überlagerung der Strahlung dieser Einzellaser.

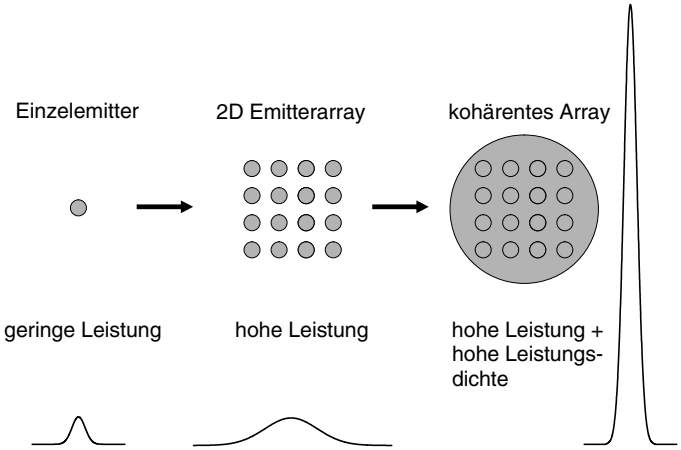

Bild 1.1: Einfluss der kohärenten Kopplung auf die Strahlung von Emitterarrays.

Bei inkohärenten Lichtquellen wie Glühbirnen oder auch Diodenlaser-Stacks treten destruktive und konstruktive Interferenzphänomene zwischen den vielen einzelnen Wellenzügen des Lichts auf. Grund dafür ist das Vorhandensein unterschiedlicher Wellenlängen und das Fehlen fester Phasenbeziehungen zwischen den Lichtwellenzügen. Wie in Bild 1.1 skizziert, hat das zur Folge, dass auch bei Verwendung von Singlemode-Emittern die fokussierte Leistungsdichte eines Arrays (bei gegebener Numerischer Apertur) nicht über die eines Einzelemitters hinausgeht. Durch die kohärente Kopplung vieler

Einzellaser hingegen werden destruktive Interferenzen verhindert, es tritt im Wesentlichen nur verstärkende, konstruktive Interferenz auf, so dass die Leistungsdichte - bei gleicher mittlerer Gesamtleistung - deutlich gesteigert werden kann. Bei dem in dieser Arbeit untersuchten System wird das durch die Verwendung von Grundmodeemittern erreicht, die mittels eines so genannten Master-Lasers frequenz- und phasensynchron stabilisiert werden. Zielsetzung ist dabei, gleichzeitig eine hohe Leistung, eine gute Strahlqualität und einen hohen elektro-optischen Wirkungsgrad zu erreichen.

Das hier beschriebene System ist eine Weiterentwicklung eines früheren Systems mit separat aufgebauten kantenemittierenden Diodenlasern [5, 6]. Mit diesem System konnte die grundlegende Eignung kohärent gekoppelter Diodenlaser für die Leistungsskalierung demonstriert werden, für eine praktische Anwendungen ist es jedoch zu komplex. Es erfordert für jeden Einzellaser mehrere aktive Regelungen, nämlich für die Temperatur, den Strom, die Phase und die Kohärenz. Daher wurde nach Möglichkeiten gesucht, um auf die aktiven Regelungen weitestgehend zu verzichten, den Aufbau zu miniaturisieren und eine kostengünstige Herstellbarkeit zu gewährleisten.

Dazu bot es sich an, statt kantenemittierender Diodenlaser solche mit vertikaler Emission, abgekürzt VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser), zu verwenden. Diese Laserstrukturen wurden erstmalig 1979 in Japan vorgeschlagen [7] und haben nach der experimentellen Realisierung des Laserbetriebs bei Raumtemperatur etwa 10 Jahre später [8] ihren Durchbruch erfahren. Anders als die herkömmlichen kantenemittierenden Diodenlaser senden sie die Strahlung nicht in der Ebene der aktiven Halbleiterschichten aus, sondern senkrecht dazu, also senkrecht auch zur Chipoberfläche. Sie haben ein rundes Strahlprofil bei kleinem Divergenzwinkel, was die Anforderungen an die verwendeten Optiken verringert. Sie lassen sich kostengünstig und in großen Stückzahlen fertigen, außerdem ist die Herstellung von homogenen, zweidimensionalen Arrays sehr einfach. Ein Nachteil ist zur Zeit noch die geringe Ausgangsleistung von Singlemode-Emittern. Dieser Nachteil kann durch eine Leistungsskalierung über die Zahl der Emitter kompensiert werden, außerdem gibt es intensive Bemühungen, die Einzelemitterleistung zu erhöhen.

Gegenstand dieser Arbeit ist, die prinzipielle Eignung eines Systems kohärent gekoppelter Vertikalemitter zur Leistungsskalierung bei gleichzeitig guter Strahlqualität zu untersuchen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Grundlagen und Systemaspekten. Die Aufbautechnik für die VCSEL-Arrays (Mikrostrukturierung, Löten, Bonden etc.), die wesentliche Voraussetzung der experimentellen Arbeiten waren, wird an anderer Stelle ausführlich beschrieben [9]. Eine entscheidende Randbedingung bei den Untersuchungen ist, dass nur ein Minimum an aktiven Regelmechanismen verwendet wird. Dahinter

steht auch die Hoffnung, auf diese Weise den Weg für ein System zu ebnen, das einmal über den Status eines Labormusters hinauskommt, denn trotz weltweiter intensiver Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet sind kohärent gekoppelte Diodenlaser bisher noch nie zu einem kommerziellen Produkt geworden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick gegeben über Diodenlaser und die prinzipiellen Methoden, die zur Erzeugung von Kohärenz zwischen vielen einzelnen Diodenlasern verwendet werden können. Wegen der Konzentration dieser Arbeit auf Vertikalemitter liegt der Schwerpunkt dabei auf der Kopplung von VCSEL-Arrays. Im Vordergrund stehen hier die selbstorganisierte, interne Kopplung und die Kopplung durch Injection-Locking.

Im dritten Kapitel wird die in dieser Arbeit angewandte Methode des Injection-Locking genauer dargestellt. Grundlage sind phänomenologische Ratengleichungen unter Berücksichtigung der Phase und der von außen eingekoppelten Strahlung. Daraus werden für die experimentelle Realisierung wesentliche Beziehungen wie der maximale Locking-Range und der Phasenschiebebereich abgeleitet und ihre numerische Lösung für die in den Experimenten verwendeten Emitter beschrieben.

Gegenstand des 4. Kapitels ist die theoretische Behandlung der Leistungsdichteverteilung der kohärenten VCSEL-Arrays im Fokus einer Sammellinse, der erreichbaren Strahlqualität und der experimentellen Einflüsse, die zu einer Verringerung der Spitzenleistungsdichte führen können.

In Kapitel 5 werden die experimentellen Ergebnisse zum Injection-Locking von VCSELs dargestellt. Auf der Ebene der Einzelemitter steht dabei der Bereich des stabilen Lockings und die Möglichkeit des Phasenschiebens im Vordergrund. Der experimentelle Aufbau für die Kopplung von VCSEL-Arrays mit 16 und 76 Emittern und die entsprechenden Leistungsdichteverteilungen im Fokus werden vorgestellt.

Kapitel 6 hat die Kohärenzmodulation von VCSEL-Arrays zum Thema. Hier werden die theoretischen Grundlagen behandelt und experimentelle Ergebnisse zur Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung präsentiert.

Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und es wird ein kurzer Ausblick gegeben, wie das System kompakter und stabiler aufgebaut werden kann und welche Strategien es für eine Erhöhung des Leistungsanteils im zentralen Maximum gibt.