

1 Einleitung

1.1 Motivation

Hochleistungslaserdioden stellen aufgrund ihrer herausragenden Eigenschaften eine Schlüsselkomponente in der Photonik des 21. Jahrhunderts dar. Der hohe elektro-optische Wirkungsgrad mit Rekordwerten von über 70 % für Einzelemitter [1] und über 60 % für Laserdioden-Barren im Kilowatt-Bereich [2] macht diese zur mit Abstand energieeffizientesten Lichtquelle [3]. Darüber hinaus ermöglicht die große Verstärkung der Halbleiterquantenfilme als aktive Zone einer Laserdiode den Aufbau äußerst kompakter Bauelemente mit Abmessungen zwischen einigen 100 Mikrometern und wenigen Millimetern für Einzelemitter. Die hohe Zuverlässigkeit von Laserdioden mit Lebensdauern von über 25.000 Stunden [4] stellt einen weiteren Vorteil gegenüber anderen Lasersystemen dar. Die Entwicklung der erzielbaren Strahldichte und der Kosten bei konstanter Strahldichte ist in den letzten drei Jahrzehnten exponentiell verlaufen und lässt sich damit wie ein Mooresches Gesetz der Laserdioden interpretieren [5].

Die Ausgangsleistung einzelner Laserdioden-Emitter im Dauerstrichbetrieb ist derzeit auf Werte von etwa 25 W begrenzt [6]. Um die insbesondere in der Materialbearbeitung erforderlichen Leistungen im Kilowatt-Bereich erreichen zu können, muss die Strahlung mehrerer Emitter überlagert werden. Wird dies durch eine räumliche Überlagerung der einzelnen Teilstrahlen in Form von Laserdioden-Barren oder Laserdioden-Stapeln realisiert, lässt sich die Gesamtleistung des Systems zwar erhöhen, die Strahldichte bleibt jedoch im besten Fall konstant [7]. Eine Skalierung der Strahldichte ist durch die inkohärente Überlagerung der Strahlung von Laserdioden unterschiedlicher Wellenlängen mithilfe von dielektrischen Kantenfiltern möglich [8]. Die spektrale Breite der Laserdioden mit Werten zwischen 3 nm und 6 nm sowie die thermische Drift der Zentralwellenlänge von 0,3 nm/K [9] führen jedoch dazu, dass für die einzelnen Kanäle spektrale Abstände von mindestens 20 nm [10] gewählt werden müssen (Coarse Wavelength Division Multiplexing, CWDM). Durch spektrale Stabilisierung der Einzelemitter kann die Breite des Emissionsspektrums auf weniger als 120 pm reduziert [11, 12] und so eine hohe Kanaldichte innerhalb des vorgesehenen Wellenlängenintervalls ermöglicht werden (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM).

Die spektrale Stabilisierung lässt sich monolithisch mithilfe von resonatorinternen Gittern [13, 14] oder durch eine externe Rückkopplung von Volumenbeugungsgittern (VBG) [15-17], Faser-Bragg-Gittern (FBG) [18] oder Oberflächengittern [19, 20] erzielen. Während die resonatorinternen Gitter zwar den Vorteil einer vollständig integrierten Lösung bieten, wird die Effizienz durch die beim Einbringen des Gitters stattfindenden Ätzprozesse und die daraus resultierenden Verluste um mehr als 5 % gegenüber herkömmlichen Fabry-Perot Laserdioden verringert [21]. Weiterhin ist die thermische Drift der Zentralwellenlänge größer im Vergleich zur externen spektralen Stabilisierung [11, 22], sodass die externe Rückkopplung beim DWDM häufig

bevorzugt wird. Letztere weist jedoch neben dem aufwändigeren und größeren Optiksistem den Nachteil einer deutlich reduzierten Lebensdauer und einer verringerten Schwelle für katastrophale optische Degradation (Catastrophic Optical Damage, COD) auf [23-25].

Spektral stabilisierte Hochleistungsdiodenlaser-Systeme auf DWDM-Basis werden derzeit in der Materialbearbeitung einerseits als Pumpquellen für Faser- und Scheibenlaser verwendet [26], wobei die enge Abstimmung des Emissionsspektrums auf die Absorptionslinien von Ytterbium eine entscheidende Voraussetzung für ein effizientes Gesamtsystem darstellt. Andererseits werden auch zunehmend sogenannte direkte Diodenlaser-Systeme eingesetzt [27, 28], bei denen die Strahlung der Laserdioden ohne eine weitere Umwandlung durch ein anderes laseraktives Medium zur Materialbearbeitung genutzt wird. Dadurch versprechen diese Systeme höchste Effizienzen [29] für eine grüne Produktion der Zukunft. Der Marktanteil der direkten Diodenlaser-Systeme am gesamten Markt für Lasersysteme in der Materialbearbeitung ist im Zeitraum von 2013 bis 2018 von 8,5 % auf 11,2 % gestiegen, Bild 1.1. Eine größere Marktdurchdringung wird jedoch unter anderem durch die genannte Reduktion der Zuverlässigkeit infolge externer optischer Rückkopplung verhindert.

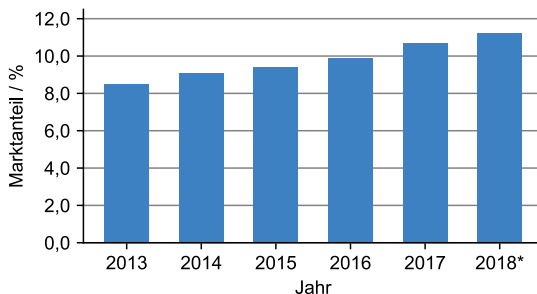


Bild 1.1: Anteil direkter Diodenlaser-Systeme am Markt für Lasersysteme in der Materialbearbeitung (Daten extrahiert aus [29], Originaldaten aus [30]). * Prognose für 2018

Durch den plötzlichen Ausfall einzelner Emittter infolge eines COD kann in Hochleistungsdiodenlaser-Systemen der Austausch eines gesamten Laser-Moduls erforderlich sein, was in der Produktion mit erheblichen Ausfallzeiten und Kostensteigerungen verbunden ist. Um dennoch die im industriellen Umfeld zugesicherten Lebensdauern einhalten zu können, werden die Laserdioden häufig an einem Arbeitspunkt weit unterhalb der maximal möglichen Ausgangsleistung betrieben, wodurch die Anzahl der benötigten Emittter erhöht und die resultierende Strahlqualität des Gesamtsystems verringert wird. Dies gilt insbesondere für spektral stabilisierte Laserdioden mit externer optischer Rückkopplung, bei denen die Ursachen der erhöhten Anfälligkeit für den COD noch weitgehend unerforscht sind. Die zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen sind dabei einerseits im Rahmen experimenteller Untersuchungen nur begrenzt und mit großem Aufwand zugänglich.

Andererseits liegt bisher auch keine konsistente Beschreibung dieser Effekte in einem numerischen Modell einer Laserdiode vor. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit eine Abbildung der Auswirkungen von externer optischer Rückkopplung auf die katastrophale Degradation von Laserdioden mit einem multiphysikalischen Modell angestrebt, um das Verständnis der Einflussfaktoren beim Auftreten des COD zu erweitern und entsprechende Gegenmaßnahmen entwickeln zu können.

Die Aktivitäten zur Modellierung von Hochleistungslaserdioden gehen dabei auf eine mehrjährige, enge Kooperation des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik (ILT), des Lehrstuhls für Lasertechnik (LLT) der RWTH Aachen und der TRUMPF Photonics Inc. zurück. In einer ersten Projektphase wurde dabei das Grundgerüst der Diodenlaser-Simulationssoftware SEMSIS (**S**emiconductor **L**aser **S**imulation **S**oftware) entwickelt und zur Beschreibung des lateralen Emissionsverhaltens von Breitstreifenemittern genutzt [31]. Die Fragestellungen zur erhöhten COD-Anfälligkeit von Laserdioden durch externe optische Rückkopplung, die Gegenstand der vorliegenden Dissertation sind, wurden im Verlauf einer zweiten gemeinsamen Projektphase untersucht.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die physikalischen Effekte, die die zuvor angesprochene Verringerung der Lebensdauer und der COD-Schwelle von Laserdioden durch externe optische Rückkopplung zur Folge haben, mit einem modelltheoretischen Ansatz systematisch analysiert werden. Bisher liegen zu diesem Problem ausschließlich experimentelle Studien vor [23, 25, 32-34], die eine Absorption der rückgekoppelten Strahlung in den Metallschichten der Laserdiode durch Dejustage des externen optischen Systems und die daraus resultierende Temperaturzunahme feststellen. Durch welche Effekte genau dieser Temperaturanstieg zu katastrophaler Degradation führen kann, ist derzeit nicht bekannt. Eine Erweiterung des Verständnisses der Mechanismen, die zum COD im Allgemeinen sowie zum Rückreflex-induzierten COD im Speziellen führen, stellt das erste Ziel dieser Dissertation dar und wird durch die Entwicklung eines geeigneten multiphysikalischen Modells einer Laserdiode unter Berücksichtigung der externen optischen Rückkopplung umgesetzt.

Die dazu in den folgenden Kapiteln vorgestellten Algorithmen und Modelle werden in die Diodenlaser-Simulationssoftware SEMSIS integriert, die am Fraunhofer ILT entwickelt wurde. Sie stellen damit einen digitalen Prototyp einer Laserdiode mit externer optischer Rückkopplung dar, der die Auswirkungen dieser Rückkopplung auf die Tendenz zu katastrophaler Degradation abbilden kann. Im Rahmen des Technology Computer Aided Design (TCAD) wird dieser digitale Prototyp dann zu einem prädiktiven Design von neuartigen Halbleiterstrukturen bzw. von externen Resonatoren verwendet, die eine höhere Resilienz gegenüber Dejustagen der optischen Elemente aufweisen. Dadurch können zeit- und kostenaufwändige Parameterstudien an real gefertigten Laserdioden reduziert werden. Hierbei ist das erwartete Potential einer Optimierung der Laserdioden sehr groß, da diese bisher nicht gezielt für den Betrieb mit optischer Rückkopplung ausgelegt werden. Diese

Entwicklung und Bewertung von Laserdiodenstrukturen mit verringerter Rückreflex-Empfindlichkeit stellen das zweite Ziel dieser Arbeit dar.

Die Gliederung der Arbeit erfolgt dabei folgendermaßen, Bild 1.2: In Kapitel 2 wird zunächst der aktuelle Stand der Technik in Bezug auf Hochleistungslaserdioden im Allgemeinen, sowie im Speziellen auf deren Modellierung und Degradation wiedergegeben. Die Definition der im Rahmen dieser Arbeit zu beantwortenden Forschungsfragen erfolgt in Kapitel 3. Das multiphysikalische Modell zur Beschreibung einer External-Cavity Laserdiode (ECDL) wird in Kapitel 4 erläutert. Dabei wird insbesondere auf das wellenoptische Modell des externen Resonators und dessen beschleunigte Berechnung mithilfe von Grafikprozessoren eingegangen. Weiterhin wird das Modell des elektrischen Transports für inhomogene Temperaturverteilungen, dessen numerische Diskretisierung und die Kopplung an optische und thermische Modelle diskutiert. Abschließend wird das Modell anhand einer Beispielstruktur aus der Literatur verifiziert. Dieses Modell wird in Kapitel 5 genutzt, um Simulationsrechnungen zum COD durchzuführen und den Einfluss verschiedener physikalischer Effekte zu analysieren. Dabei werden unterschiedliche Varianten zur Triggerung des COD untersucht, wie die Einführung einer zusätzlichen Wärmequelle, ein erhöhter Überhang des Halbleiterchips über die Wärmesenke oder dejustierte externe optische Rückkopplung. Weiterhin wird das Modell anhand experimenteller Daten validiert. Eine Evaluation verschiedener Ansätze zur Reduktion der Rückreflex-Empfindlichkeit von Laserdioden bzw. der Sensitivität des externen Resonators erfolgt in Kapitel 6. Schließlich werden in Kapitel 7 die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf zukünftige Fragestellungen in diesem Themengebiet gegeben.

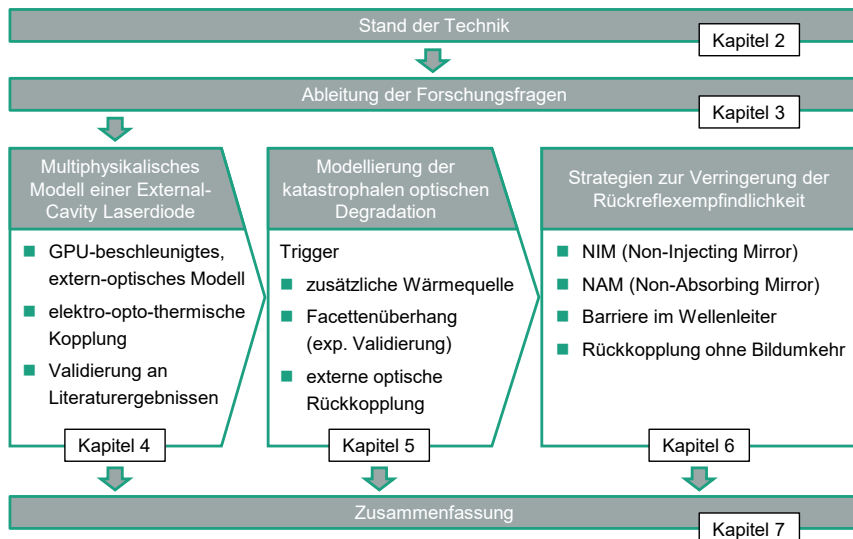


Bild 1.2: Vorgehensweise in dieser Arbeit und Zuordnung zu den jeweiligen Kapiteln.