

# Verbesserung des Strahlprofils von Lasern durch resonatorinterne Strahlformung



Hans-Christoph Eckstein



Uwe D. Zeitner



Andreas Bräuer

## Einleitung

Die Strahlqualität eines Lasersystems wird durch Form und Anzahl der transversalen Resonatormoden bestimmt. Können mehrere Transversalmoden in einem Laser anschwingen, verschlechtern sich die Strahldivergenz und die Fokussierbarkeit. Für viele Anwendungen ist es erforderlich, die optischen Elemente des Resonators so zu konzipieren, dass sich ein Laserbetrieb in der transversalen Grundmode einstellt. In diesem Fall verlässt das Laserbündel den Resonator als Gauß-Strahl und besitzt eine optimale Fokussierbarkeit bei kleinstmöglicher Strahldivergenz. Als klassische Verfahren zur Unterdrückung höherer Moden sind Verlustmechanismen gebräuchlich, die z. B. in Form von harten Aperturen (z. B. Lochblenden) in den Resonator eingebaut werden. Eine verbesserte Variante dieser Anordnung stellen Aperturen dar, bei denen sich der Verlust örtlich kontinuierlich ändert, wobei eine höhere Strahlqualität erzielt werden kann /1/.

Als neues Verfahren wurden in den letzten Jahren unter anderem am Fraunhofer IOF Resonatoren mit mikrostrukturierten Phasenelementen untersucht. Mit diesem Verfahren ist es möglich, neben einer Erhöhung der Diskriminierung höherer Moden auch die Amplitudenverteilung des ausgekoppelten Strahlprofils zu beeinflussen /2/.

Zuletzt wurde mit diesem Prinzip ein instabiler Freiraumresonator mit einem phasenstrukturierten Spiegel aufgebaut, der ein gaußförmiges Auskoppelfeld zeigt (Abb. 1) /4/. Als technisch bedeutendste Anwendung wurde in diesem Jahr intensiv an der Erprobung des Verfahrens bei Halbleiterlasern gearbeitet. Mit geeigneten Strukturierungstechniken ließen sich mikrooptische Elemente in den Wellenleiter eines Breitstreifenlasers einbringen, die als Phasenelemente und zusätzlich als graduelle Aperturen wirken können.

## Instabiler VECSEL Resonator mit gaußförmigem Auskoppelfeld

Die stärkste Diskriminierung höherer Transversalmoden lässt sich mit geometrisch instabilen Resonatoren erzielen. Dabei wird das Feld nicht wie üblich durch eine teildurchlässige Beschichtung aus dem Resonator ausgekoppelt, sondern an einer Apertur, die z. B. als Loch in einen der Resonatorspiegel eingebracht werden kann. Typischerweise ist diese Anordnung bei sphärischen Spiegeln mit einer geringen Qualität des ausgekoppelten Strahlprofils verbunden. Mit Phasenstrukturen bzw. oberflächenstrukturierten Spiegeln lässt sich die Form der Mode auch bei instabilen Resonatoren so beeinflussen, dass das Auskoppelfeld eine hohe Strahlqualität erreicht /3/. Für diesen Zweck wurden seit einigen Jahren am Fraunhofer IOF wellenoptische Simulationstools entwickelt, mit denen das Design solcher Systeme möglich ist (Abb. 2) /4/.

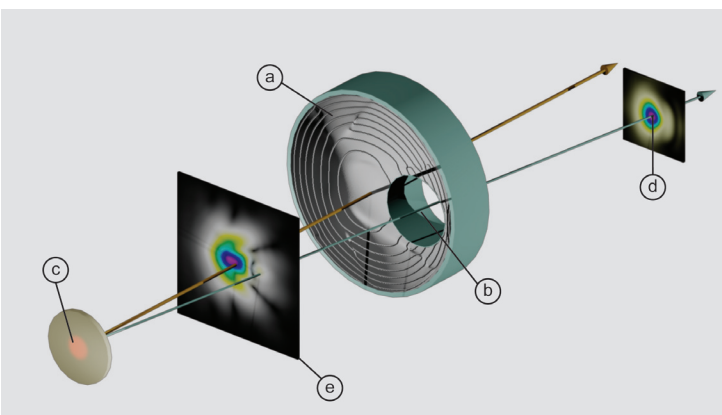


Abb. 1: Aufbau des instabilen diffraktiven VECSEL Resonators: (a) Resonatorspiegel mit diffraktiver Struktur, (b) Loch zur Auskopplung, (c) Vertical External Cavity Surface Emitting Laser (Halbleiter Scheibenlaser), (d) ausgekoppeltes Strahlprofil, (e) resonatorinternes Feld.

Fig. 1: Schematic view of a diffractive VECSEL: (a) resonator mirror with diffractive structure, (b) hole for outcoupling, (c) Vertical External Cavity Surface Emitting Laser (semiconductor disc laser), (d) outcoupling beam profile, (e) resonator internal field distribution.



## Introduction

The beam quality of a laser system is determined by the shape and number of transverse resonator modes. If several transversal modes exist in a laser, the beam divergence and the spot size of the focus will not be optimal. For many applications it is necessary to design the optical elements of the resonator so that the laser is operating in single fundamental mode. In this case, the laser light leaves the resonator as a Gaussian beam with optimal focusing properties and the smallest possible radiation divergence. As a typical method to suppress higher order modes, internal loss mechanisms are used. For example hard apertures such as pinhole apertures can be implemented into the resonator. An improved concept of this arrangement is to use apertures at which the loss is locally varying, thus making possible a higher beam quality /1/.

As a new concept, micro structured phase elements in laser resonators have been investigated in recent years at IOF. With this method it is possible to influence the amplitude distribution of the output beam profile and at the same time increase the discrimination of higher modes /2/.

Based on this principle an unstable free space resonator with a phase structured mirror was developed, which shows a Gaussian-shaped outcoupling field (Fig. 1) /4/. To cover the technically most important application we worked intensely on the use of this concept to improve the beam quality of diode lasers this year. With suitable structuring techniques micro-optical elements were inserted into the waveguide of a broad area laser. These structures can work as phase elements and additionally as gradual apertures.

## Unstable VECSEL resonator with Gaussian shaped outcoupling field

The highest discrimination of higher order modes can be obtained with geometrically unstable resonators. In this case the field is coupled out from the resonator, not as is usual by a partially transmitting coating, but through an aperture e.g. a hole in one of the resonator mirrors. Typically, this arrangement with spherical mirrors implies a low quality of the outcoupled beam profile. With phase structures or surface-structured mirrors one can tailor the modal behavior in such a way that the outcoupling field achieves a high beam quality /3/. For this purpose, wave-optical simulation tools were developed at the IOF in recent years, enabling the modeling and design of such systems (Fig. 2) /4/.

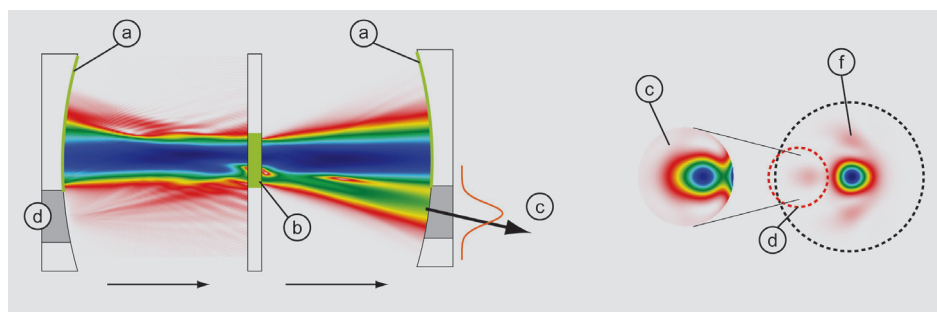


Abb. 2:  
Simulierte Intensitätsverteilung der Resonatormode:  
(a) Resonatorspiegel mit diffraktiver Struktur, (b) Halbleiter-Scheibe, (c) ausgekoppeltes Strahlprofil, (d) Loch zur Auskopplung, (f) Feld auf dem Resonatorspiegel.

Fig. 2:  
Simulated intensity distribution of the resonator mode:  
(a) resonator mirror with diffractive structure, (b) semiconductor disc laser, (c) outcoupling beam profile, (d) hole for outcoupling, (f) field distribution on the resonator mirror.

Das Strahlparameterprodukt des aufgebauten Lasersystems wurde bis zur höchsten möglichen Verstärkungsleistung bei  $M^2 = 1,2$  gemessen. Dieser Wert bezeichnet das Produkt von Strahldivergenz und Fokussdurchmesser, wobei  $M^2 = 1$  das theoretische Optimum des idealen Gaußstrahls darstellt. Abbildung 3 zeigt das Strahlprofil des aufgebauten Lasers.

### Phasenstrukturierter Breitstreifenlaser

Zum Aufbau von diffraktiven Freiraumresonatoren ist ein hoher Justageaufwand nötig, da eine größere Zahl von Freiheitsgraden genau eingestellt werden muss. Eine industrielle Anwendung ist hier also Spezialfällen vorbehalten. In Wellenleiterresonatoren hingegen können die Phasenelemente durch einen zusätzlichen lithographischen Schritt mit sehr großer Fertigungsgenauigkeit eingebaut werden. Ziel der aktuellen Forschung ist es, die Eigenschaften von Hochleistungshalbleiterlasern mit dieser Technologie zu optimieren. Wird ein monomodiger Betrieb solcher Laser möglich, erschließen sich daraus eine Vielzahl von neuen Anwendungen.

Weiterhin wäre eine erhebliche Reduktion der Kosten bei fasergekoppelten Systemen und Pumpoptiken möglich.

Zur Erzeugung der Phasenstrukturen wird die obere Mantelschicht des Halbleiters bis an den Wellenleiterbereich herunter geätzt. Der Schichtaufbau des Wellenleiters wird dabei so verändert, dass die propagierende Fast-Axis-Mode einen anderen effektiven Brechungsindex erfährt als in ungeätzten Bereichen. Die eingeschriebenen Strukturen können so optimiert werden, dass sich die Zahl der möglichen Transversalmoden in Slow-Axis-Richtung drastisch reduziert. In Halbleiterlasern kommt es wegen des örtlich selektiven Abbaus der Besetzungsinversion zu starken Schwankungen in der Ladungsträgerdichte, was örtliche Variationen des Brechungsindex und der Verstärkung zur Folge hat. Gelingt es, die umlaufende Mode so zu formen, dass der gepumpte Bereich optimal ausgefüllt wird, kann ein Anschwingen höherer Moden verhindert werden. Außerdem können Phasenstrukturen die Auswirkungen der Brechzahlinhomogenität kompensieren. Abbildung 4 zeigt das Schema eines phasenstrukturierten Breitstreifenlasers und Abb. 5 die Messung der Strahlqualität.

### Bisherige Ergebnisse

Im Rahmen des BMBF-Projekts »ROLAS« wurden strukturierte Breitstreifenlaser mit einer Emissionswellenlänge von 650 nm in Kooperation mit der Firma OSRAM OS gefertigt. Die in diesem ersten Versuch hergestellten Emittoren zeigten eine deutliche Reduktion der auftretenden Transversalmoden. Besonders große Auswirkungen ergaben sich bei Emittoren, in denen Verluststrukturen verwendet wurden. Die Strahldivergenz konnte bei einem Emittor mit einem ca. 50 µm breiten Auskoppelfeld um mehr als einen Faktor 5 verbessert werden. Um die Effizienz der Laser weiter zu steigern, werden zurzeit einige technologische Parameter optimiert. Weiterhin wurden neue Designs entworfen, bei denen eine genauere Modellierung des Verstärkungsprozesses verwendet wurde.

Ein spezieller Dank gilt dem BMBF für die Förderung des Projekts »ROLAS« (FKZ 13N8957) im Verbund »BRIOLAS« zur Untersuchung von phasenstrukturierten Breitstreifenlasern.

Abb. 3: Strahlprofil des aufgebauten Lasers mit instabilem diffraktiven Resonator: (a) Nahfeld, (b) Fernfeld, (c) 3D-Plot Fernfeld.

Fig. 3: Beam profile of the laser system with instable diffractive resonator: (a) nearfield, (b) farfield, (c) 3D plot farfield.

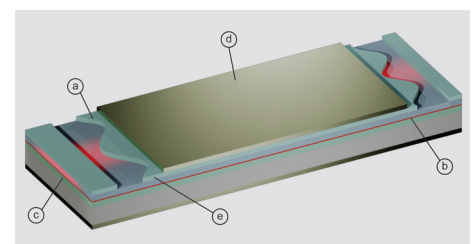
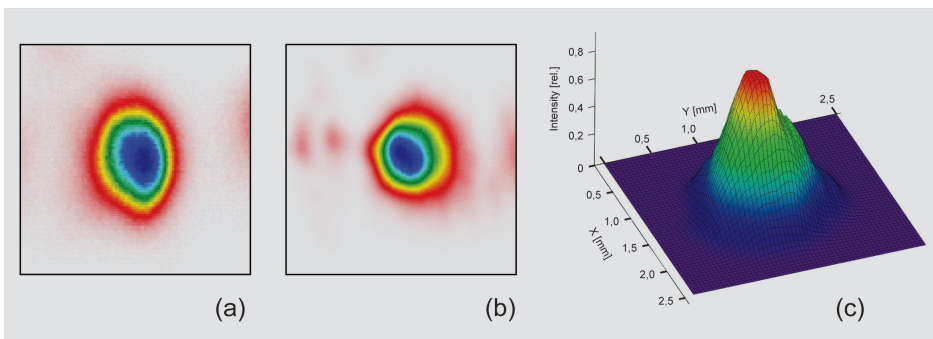


Abb. 4: Schema eines phasenstrukturierten Breitstreifenlasers: (a) Phasenstruktur, (b) aktive Schicht, (c) Auskoppelfacet, (d) Elektrode, (e) geätzte Mantelschicht.

Fig. 4: Schematic view of a structured broad area laser: (a) phase structure, (b) active layer, (c) outcoupling facet, (d) electrode, (e) etched cladding layer.



The beam parameter product of the developed laser system was measured with  $M^2 = 1.2$  up to the highest possible gain of the VECSEL amplifier. This value designates the product of radiation divergence and focus diameter, whereby  $M^2 = 1$  represents the theoretical optimum of the ideal Gaussian beam.



### Phase structured broad area laser

To arrange a diffractive free space resonator, high alignment expenditure is necessary to handle the large number of degrees of freedom. Therefore, an industrial application is only possible in very special cases. In case of waveguide resonators, however, phase elements can be created directly within the active waveguide by an additional lithographic step with high fabrication accuracy. A goal of the current research is to optimize the characteristics of high power diode lasers with this technology. If a single mode operation of such lasers becomes possible, a variety of new applications can be covered. Further, a substantial reduction of the costs would be possible in fiber-coupled systems and pumping optics.

To produce the phase structure, the upper cladding layer of the semiconductor has to be etched down to the waveguide area. The layer composition is thereby changed such that the effective refractive index for the fast-axis mode in the structured region differs from the unstructured area. By optimizing the design of the etched structures, the number of the possible transversal modes within the slow axis can be reduced significantly. The active media of semiconductor lasers are affected by a strongly varying fluctuation of the carrier density distribution, because of the non-uniform spatial reduction of the population inversion. Hence, the refractive index and the

amplification is strongly spatial dependent and fluctuates within the active region. If it succeeds to shape the slow axis mode in such a way that the pumped range is optimally filled out, an amplification of higher modes can be prevented. In addition phase structures can compensate the effects of inhomogeneities in the refractive index. Figure 4 shows a schematic view of a structured broad area laser, figure 5 the measurement of beam quality.



### Latest results

In the context of the BMBF project "ROLAS", structured broad area lasers with an emission wavelength of 650 nm were manufactured in association with the company OSRAM OS. The emitters manufactured in this first attempt showed a clear reduction in the number of transverse laser modes. Particularly large effects resulted in the case of emitters, in which loss structures were used. The radiation divergence of an emitter with an approx. 50  $\mu\text{m}$  broad outcoupling field could

be decreased by more than a factor of 5. To improve the efficiency of the structured lasers some technological parameters are presently being optimized. Further new designs were made with an accurate modelling of the gain process.

We would like to thank the BMBF for supporting the project "ROLAS" (FKZ 13N8957) in the group "BRIOLAS" to investigate phase structured broad area lasers.

#### References:

- /1/ Belanger, P. A.; Pare, C.: Unstable laser resonators with a specified output profile using a graded-reflectivity mirror: Geometrical optics limit" Optics Commun. 109, 553–555 Nov. 1985.
- /2/ Leger, J. R.; Chen, D.; Mowry, G.: Design and performance of diffractive optics for custom laser resonators. Applied Optics 34 2498-2508, Mai 1995.
- /3/ Zeitner, U. D.; Wyrowski, F.: Design of Unstable Laser Resonators with User-Defined Mode Shape. IEEE Journal of Quantum Electronics 37, 1594–1595, Dezember 2001.
- /4/ Eckstein, H.-C.; Zeitner, U. D.: CLEO 2008 Technical Digest (Optical Society of America, Washington, DC, 2008), CW5.

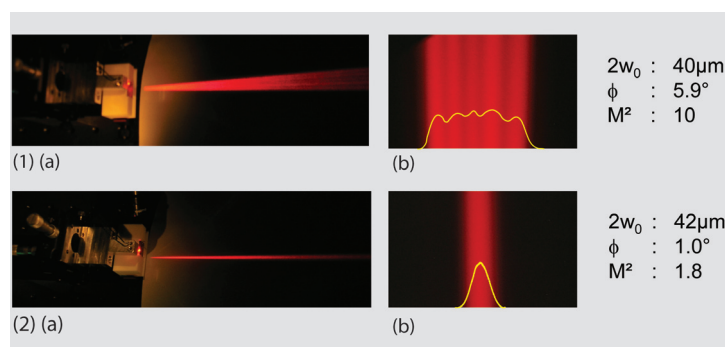


Abb. 5: Messung der Strahlqualität ohne (1) und mit (2) Strukturierung: (a) Strahldivergenz in Draufsicht, (b) Fernfeld.

Fig. 5: Beam Quality and divergence of an unstructured (1) and a structured (2) broad area laser: (a) radiation divergence as top view, (b) farfield.