

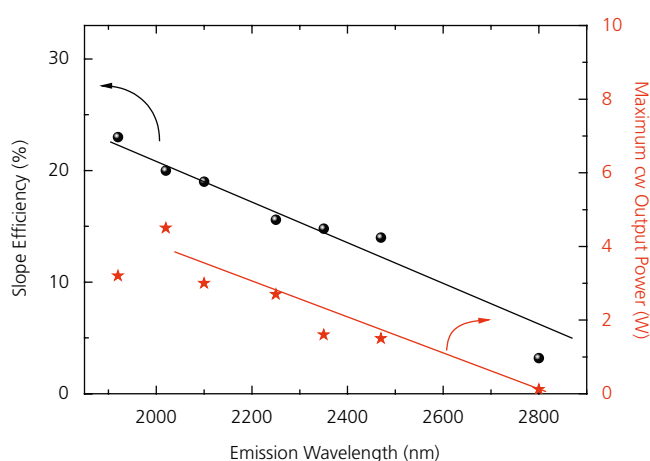
EFFICIENT SEMICONDUCTOR DISK LASERS FOR WAVELENGTHS > 2 μm

EFFIZIENTE HALBLEITER-SCHEIBENLASER FÜR WELLENLÄNGEN > 2 μm

MARCEL RATTUNDE
marcel.rattunde@iaf.fraunhofer.de

For GaSb-based interband lasers, all reports show a decrease in laser performance with increasing emission wavelength so far. By optimizing the internal structure of semiconductor disk lasers, we are able to realize high-power, high-efficient devices with a uniform performance over a broad wavelength range from 2.0 to 2.5 μm.

By exploiting the (AlGaIn)(AsSb) material system, light emitting devices in the 2 – 3 μm wavelength range can be fabricated. Several groups and companies, including the Fraunhofer IAF, have worked on diode-lasers, electrically-pumped VCSELs (vertical cavity surface emitting lasers) as well as optically-pumped SDLs (semiconductor disk lasers) using GaSb-based quantum well structures. The different semiconductor devices have distinct characteristics concerning e. g. output power, beam quality or spectral properties, but throughout the literature, one common feature can be found for all of them: The



1 Slope efficiency (black points) and maximum output power (red stars) vs. the emission wavelength of standard semiconductor disk lasers fabricated at Fraunhofer IAF.

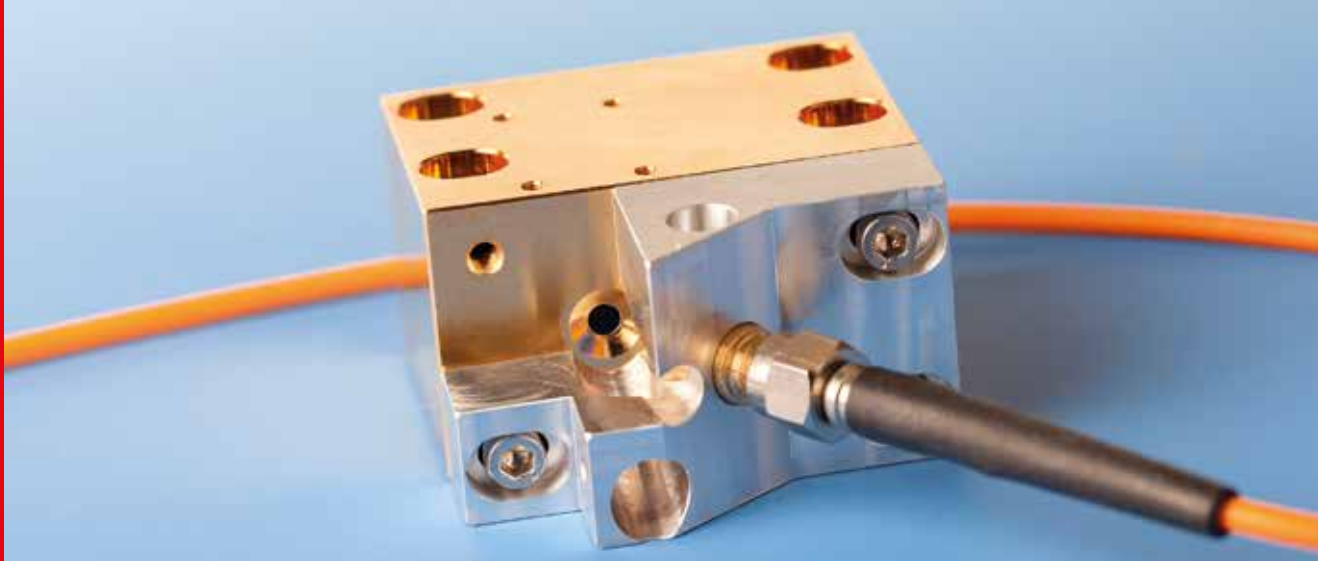
Kennlinien-Steigung (schwarze Punkte) sowie maximale Ausgangsleistung (rote Sterne) gegenüber der Emissionswellenlänge der Standard-Scheibenlaser-Strukturen.

»sweet spot« for the optimum laser performance of these GaSb-based lasers seems to be around 2.0 μm with the laser performance degrading severely when increasing the emission wavelength to 2.5 μm and above. For diode-lasers for example, this finding is reported independently by several groups [C. Lin et al., Appl. Phys Lett. 84, 5088, 2004; L. Shterengas et al., Semicond. Sci. Technol. 19, 655, 2004]. And also for the optically-pumped SDLs, the results at Fraunhofer IAF matched with the findings at the University of Tampere and with the IES group in Montpellier [M. Guina et al., Adv. in Opt. Technol. 2012, 265010, 2011; A. Laurain et al., IEEE Photon. Technol. Lett. 24, 246, 2012], showing a decrease in laser performance with increasing emission wavelength.

This is illustrated in Fig. 1, where the slope efficiency (black points) and maximum output power in continuous-wave (cw) operation (red stars) is plotted versus the emission wavelength of the semiconductor disk lasers fabricated at Fraunhofer IAF. All these devices are based on the same design (standard design) optimized for 980 nm diode-laser pumping, with GaInAsSb quantum wells as the active region. After MBE-growth, individual chips are cleaved from the wafers and bonded to an intracavity heatspreader made from silicon carbide (SiC) for heat-removal. All data shown here are recorded at 20 °C heatsink temperature in cw-operation. A linear-cavity with a 50 mm radius of curvature out-coupling mirror is used for characterization and the pump spot diameter is optimized for maximum output power. The lines in Fig. 1 (guide to the eyes) illustrate that the slope efficiency as well as the maximum output power are degrading almost linearly when increasing the emission wavelength from around 2.0 μm to 2.8 μm.

Novel laser design to eliminate roll-off at longer wavelength

With a new design of the GaSb-based SDL structure developed recently, we are able to change this behavior drastically. This patent-pending structure is based on a different barrier-



2

2 Compact semiconductor disk laser gain-mirror setup at 2.5 μm .

Kompakter Aufbau des Scheibenlasers mit einjustierter Pumpoptik.

In Veröffentlichungen zu GaSb-basierten Interband-Lasern wird bisher übereinstimmend ein allgemeiner Trend beschrieben: Erhöht sich die Emissionswellenlänge, so sinkt die Effizienz dieser Laserstrukturen. Mithilfe eines optimierten aktiven Bereichs können am Fraunhofer IAF nun GaSb-Halbleiter-Scheibenlaser realisiert werden, die eine gleichbleibend hohe Effizienz sowie hohe Ausgangsleistung im gesamten Wellenlängenbereich von 2,0 – 2,5 μm aufweisen.

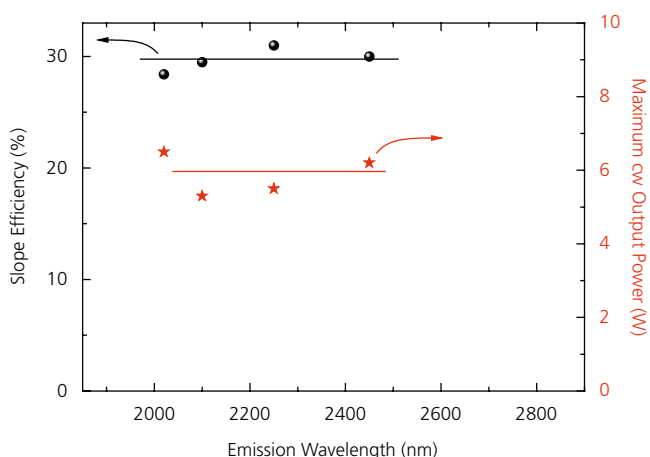
Mithilfe des (AlGaIn)(AsSb) Materialsystems können Interband-Laser im Bereich von 2 – 3 μm realisiert werden. Verschiedene Firmen und Forschungseinrichtungen, darunter das Fraunhofer IAF, arbeiten an Diodenlasern, elektrisch gepumpten VCSELs (vertical cavity surface emitting laser) sowie optisch gepumpten Halbleiter-Scheibenlasern (semiconductor disk laser, SDL) basierend auf diesem Materialsystem. Die verschiedenen Bauformen der Laser unterscheiden sich dabei in spezifischen Details der Ausgangsleistung, Strahlqualität oder den spektralen Eigenschaften. Allen gemeinsam ist der generelle Trend, dass die Leistung und Effizienz der Laser bei einer Emissionswellenlänge um 2,0 μm am höchsten ist und dass diese Charakteristika für längerwellige Laser bei 2,5 μm und darüber hinaus deutlich abnehmen. Für Diodenlaser wurde dieses Verhalten von mehreren Gruppen beschrieben [C. Lin et al., Appl. Phys Lett. 84, 5088, 2004; L. Shterengas et al., Semicond. Sci. Technol. 19, 655, 2004]. Auch für optisch gepumpte Halbleiter-Scheibenlaser decken sich die Ergebnisse am Fraunhofer IAF mit denen der Universität von Tampere sowie der Gruppe am IES in Montpellier [M. Guina et al., Adv. in Opt. Technol. 2012, 265010, 2011; A. Laurain et al., IEEE Photon. Technol. Lett. 24, 246, 2012].

Die Abnahme der Leistungsfähigkeit mit zunehmender Emissionswellenlänge ist in Abb. 1 für SDL-Strukturen gezeigt, die alle mit demselben Design (Standard-Design, optimiert für 980 nm Pumpdioden) realisiert wurden, nur mit unterschiedlicher Zusammensetzung der GaInAsSb-Quantentöpfe und daher unterschiedlicher Emissionswellenlänge. Nach dem MBE-Wachstum und dem Vereinzeln des Wafers werden die Chips mit Silizium-Carbid (SiC)-Wärmespreizern verbunden und in eine Kupfer-Wärmesenke integriert. Die SDL-Strukturen werden in einem linearen Resonator (50 mm Krümmungsradius des externen Spiegels) bei 20 °C Wärmesenktemperatur im Dauerstrichbetrieb (continuous wave, CW) betrieben und der Resonator sowie der Pumpspot-Durchmesser werden auf maximale Ausgangsleistung optimiert. Abb. 1 zeigt, dass sowohl die Leistungseffizienz (schwarze Punkte) als auch die maximale Ausgangsleistung (rote Sterne) annähernd linear mit der Emissionswellenlänge der SDL-Strukturen sinken.

Neues Laser-Design für eine gleichbleibend hohe Effizienz

Mit einem neuen Ansatz im Design des aktiven Bereichs der SDL-Strukturen konnten wir dieses Verhalten drastisch verbessern. Die Laserstrukturen (zum Patent angemeldet) basieren auf einem geänderten Barrieren-Material sowie stark verspannten Quantentöpfen. Bisher wurden

material and highly strained quantum-wells. So far, SDLs emitting up to 2.5 μm are realized with this new design and the results are shown in Fig. 3. The mounting technology (SiC heatspreader) and operation conditions were the same as for the previous samples shown in Fig. 1. The slope efficiency reaches a high value of around 30 % and is independent of the emission wavelength and also the maximum output power shows no sign of decrease with increasing wavelength. Besides that, the absolute values for both parameters are much higher for this new design than those achieved with the standard design shown in Fig. 1 (note that both figures share the same absolute scale). It waits to be seen if this excellent performance can be maintained also for emission wavelength above 2.5 μm , as the fundamental limitations of the long-wavelength GaInAsSb quantum well emitters (reduced valence band offset and increasing Auger coefficient) cannot be suppressed completely.



3 Results of the novel design for the semiconductor disk laser structure. In contrast to the results in Fig. 1, the slope efficiency and output power are almost independent of emission wavelength and the absolute values are much higher.

Laserstrukturen mit dem optimierten Scheibenlaser-Design: In Gegensatz zu Abb. 1 ist die Steigung sowie die maximale Ausgangsleistung unabhängig von der Emissionswellenlänge der Laser.

First modules under evaluation

These results are of relevance not only for a better understanding of the underlying physical mechanisms inside the semiconductor structure but also for the application oriented current European research project NovIRLas (Novel IR-laser source for active spectroscopy and medical applications). One research stand within this project is the efficient pumping of ZGP (zinc germanium phosphide), a non-linear optical material used for parametric generation of mid-infrared radiation. This material is usually pumped at 2 μm , simply because efficient pump sources are available there. But there is a distinct benefit going to higher pump wavelengths, as the residual absorption inside ZGP drops with wavelength (e. g. at 2.5 μm the absorption coefficient is less than half of the value at 2.0 μm). With our new SDL structures we can offer now pump sources for ZGP at the preferred wavelength of 2.5 μm without compromising pump-laser efficiency or maximum power. A UK-based company is incorporating these new SDL structures as gain-mirrors inside a laser cavity in order to develop a novel type of Optical Parametric Oscillator (OPO) based on ZGP for the 5 – 10 μm wavelength range. The compact setup for the SDL gain-mirror (i. e. SDL chip with adjusted pump-optics) at 2.5 μm emission wavelength can be seen in Fig. 2.

Apart from this application, Fraunhofer IAF is in close contact with other companies and research organizations in order to exploit the use of these new SDL structures for airplane security as well as for long-range optical measurement techniques. Further laser modules and test-setups have already been provided to partners for prototype demonstrations.

SDLs im Wellenlängenbereich bis 2,5 μm mit diesem neuen Design realisiert. In Abb. 3 sind die dazugehörigen Ergebnisse zu sehen, wobei die Proben sowohl mit der gleichen Aufbautechnik montiert als auch unter den gleichen Bedingungen wie die Proben in Abb. 1 charakterisiert wurden. Die Leistungseffizienz erreicht mit 30 % einen sehr hohen Wert und ist unabhängig von der Emissionswellenlänge. Ebenso zeigt auch die maximale CW-Ausgangsleistung keine Abnahme mit zunehmender Wellenlänge. Darüber hinaus sind die absoluten Werte in diesem Fall deutlich höher als bei den SDLs der Standard-Struktur (Abb. 1; beide Abbildungen sind gleich skaliert). Die für die Zukunft geplanten weiteren SDL-Strukturen werden zeigen, ob sich diese hervorragenden Leistungsdaten auch im noch längerwelligen Bereich $> 2,5 \mu\text{m}$ realisieren lassen. Komplett unterdrückt wird sich die Leistungs- und Effizienzabnahme mit zunehmender Wellenlänge auch mit dem neuen Design nicht; ab einem gewissen Punkt werden die fundamentalen physikalischen Verlustmechanismen (Auger-Rekombination sowie thermische Reemission von Ladungsträgern auf Grund des zu geringen Ladungsträgereinschlusses) auch hier einen messbaren Einfluss auf die Laserdaten zeigen.

Erste Module bei externen Partnern

Diese Ergebnisse sind nicht nur für ein besseres Verständnis der zugrundeliegenden physikalischen Mechanismen im aktiven Bereich der Laserstruktur von Bedeutung, sondern auch für das aktuelle anwendungsbezogene Europäische Projekt NovIRLas (Novel IR-laser source for active spectroscopy and medical applications). Ein Arbeitspaket innerhalb von NovIRLas ist die Entwicklung eines kompakten optisch-parametrischen Oszillators (OPO) basierend auf dem nichtlinear-optischen Material Zink-Germanium-Phosphid (ZGP). Auf Grund der bisherigen limitierten Auswahl an geeigneten Anregungslaserquellen wird ZGP bisher bei 2 μm optisch gepumpt. Allerdings wären größere Pumpwellenlängen vorteilhaft, da die intrinsischen Verluste von ZGP mit der Wellenlänge abnehmen (so ist bei 2,5 μm der Absorptionskoeffizient dieser Verluste um mehr als die Hälfte reduziert gegenüber dem Wert bei 2,0 μm). Durch unsere neuen SDL-Strukturen können wir nun Pumplaser für ZGP bei der bevorzugten Pumpwellenlänge von 2,5 μm anbieten ohne Kompromisse bei der Ausgangsleistung oder Effizienz eingehen zu müssen. Eine als Projektpartner an NovIRLas beteiligte Firma in Großbritannien arbeitet momentan an der Integration der SDL-Strukturen, die vom Fraunhofer IAF in Form aufgebauter SDL-Chips mit einjustierter Pumpoptik bereit gestellt werden (Abb. 2), um effiziente OPOs für den Bereich von 5 – 10 μm zu realisieren.

Neben dieser Anwendung ist das Fraunhofer IAF in Kontakt mit einem weiteren industriellen Partner sowie einer Forschungseinrichtung, um diese neuen SDLs im Bereich der Luftfahrtsicherheit sowie IR-Messtechnik einzusetzen. Erste Lasermodule und Prototypen wurden auch hier bereits den Partnern zur weiteren Entwicklung zur Verfügung gestellt.