

Abstract

Modern High Power Broad Area Diode Lasers (BAL) are an important building block of the materials processing industry, exhibiting high optical output power P_{opt} with high power conversion efficiency η_c . However, their use in direct diode systems, e.g. for sheet metal cutting, is limited due to poor lateral (in-plane) beam quality, parameterized via the beam parameter product $BPP_{lat} = 0.25 \times \Theta_{95\%} \times w_{95\%}$, with $\Theta_{95\%}$ and $w_{95\%}$ denoting the full divergence angle and the beam waist width at 95% power content, respectively. High BPP_{lat} limits the power density of focused BAL radiation, an important industry measure, expressed via the linear radiance $B_{lin} = P_{opt}/BPP_{lat}$.

The main objective of this doctoral thesis is an analysis of the factors that influence BPP_{lat} . Therefore, a series of diagnostic experiments is conducted, each aiming on a specific potential influence in order to assess its importance. The list of considered effects encompasses the thermal lens shape, the epitaxial laser design, the lateral carrier profile, process induced index guiding via dry etched trenches, filamentation and mechanical strain. The analysis is supported by a simple linear model of the BPP_{lat} growth with active zone temperature increase ΔT_{AZ} that is introduced as an analytic tool: $BPP_{lat}(\Delta T_{AZ}) = BPP_0 + S_{th} \cdot \Delta T_{AZ}$. Here, the ground level BPP_0 and the thermal slope S_{th} are important indicators for successful BPP_{lat} reduction. The analysis revealed that the epitaxial layer design and the chip geometry have a considerable impact on the thermal lens bowing, which is directly correlated to the thermal slope S_{th} . In addition, the suppression of lateral carrier accumulation with deep proton implantation at the BAL emitter edges led to a 33% decrease in thermal slope, revealing that one third of S_{th} is regulated by the current driven gain supply to higher order modes, while the remaining two thirds is regulated by the thermal lens shape. Proton implanted devices show good linear radiance of $B_{lin} = 3.5 \text{ W/mm mrad}$, but suffer from an implantation induced efficiency loss of 7%-points. The application of index guiding trenches with an effective index step of $\Delta n_{eff} = 1.5 \times 10^{-3}$ yielded stabilized near field dimensions as function of current, but also a 1.5 mm mrad increase in BPP_0 . Filamentation and mechanical strain were found to marginally affect BPP_{lat} in modern strained quantum well BALs.

The second part of this thesis is devoted to the assessment of techniques that aim to reduce BPP_{lat} via a reduction of the number of active lateral modes. First, measurements on BALs with varying stripe width w showed increased efficiency and higher output power for broad injection stripes. However, the growth in output power is overcompensated by a growth in BPP_{lat} , yielding for highest radiance in narrow stripe ($w = 30 \mu\text{m}$) BALs with $B_{lin} = 4 \text{ W/mm mrad}$ at $P_{opt} = 4 \text{ W}$. A simulation of thermal waveguides showed that the BPP_{lat} deterioration rate can be emulated with simple uniform mode overlap and amounts to $\Delta BPP_{lat}/\Delta w = (0.044 \pm 0.002) \text{ mm mrad}/\mu\text{m}$ due to an increase in the number of guided lateral modes with increasing w (fixed thermal waveguide with $\Delta T_{AZ} = 15 \text{ K}$ assumed). This result is in good agreement with the measured BPP_{lat} increase for stripe widths up to $w = 70 \mu\text{m}$. Second, a lateral mode filter approach based on the resonant coupling of two congruent vertical waveguides was tested. Here, the out-coupling waveguide (germanium filled, dry etched trenches beside injection stripe) exhibits strong optical absorption that introduces a near-field-width-selective loss mechanism for the modes in the central (lasing) waveguide. The conversion efficiency is heavily compromised by the mode filter and is limited to $\eta_c \leq 45\%$, leaving room for design optimizations. However, the mode filter showed promising results in terms of linear radiance, yielding $B_{lin} = 4.4 \text{ W/mm mrad}$, which exceeds the radiance of commercially available broad area lasers.

Kurzfassung

Moderne Breitstreifen-Hochleistungsdiodenlaser (BALs) sind ein wichtiger Grundbaustein der material-verarbeitenden Industrie, denn sie erreichen hohe optische Ausgangsleistungen P_{opt} bei gleichzeitig hoher Konversionseffizienz η_c . Dennoch sind sie für die direkte Anwendung, zum Beispiel beim Laser-Schneiden, ungeeignet, da sie eine geringe laterale (senkrecht zur Wachstumsrichtung und zur Achse der Lichtausbreitung) Strahlqualität aufweisen. Letztere wird durch das Strahlparameterprodukt quantifiziert: $BPP_{lat} = 0.25 \times \Theta_{95\%} \times w_{95\%}$, wobei $\Theta_{95\%}$ den vollen Divergenzwinkel und $w_{95\%}$ die volle Strahltaile bei 95% Leistungsinhalt beschreiben. Ein hohes Strahlparameterprodukt limitiert die Leistungsdichte, die ein BAL erreichen kann. Diese Leistungsdichte ist eine wichtige Kennzahl für industrielle Lasersysteme und wird durch die lineare Brillanz $B_{lin} = P_{opt}/BPP_{lat}$ ausgedrückt.

Das Hauptziel dieser Doktorarbeit ist eine Analyse der Einflussfaktoren auf die laterale Strahlqualität BPP_{lat} . Hierzu wird eine Reihe von Diagnose-Experimenten durchgeführt, die jeweils darauf zugeschnitten sind, den Einfluss eines bestimmten Effekts zu untersuchen. Im Rahmen dieser Arbeit werden auf diese Weise die folgenden Faktoren untersucht: die Form der thermischen Linse, die Epitaxiestruktur, das laterale Ladungsträgerprofil, trocken geätzte Indexgräben, Filamentierung und mechanische Verspannungen. Zur Analyse wird dabei ein einfaches empirisches Modell eingeführt das die Veränderung von BPP_{lat} mit der Erwärmung der aktiven Zone ΔT_{AZ} als linearen Anstieg beschreibt: $BPP_{lat}(\Delta T_{AZ}) = BPP_0 + S_{th} \cdot \Delta T_{AZ}$. Hierbei stellen der Ordinatenabschnitt BPP_0 (BPP 'Grundlevel') und der thermische Anstieg S_{th} zwei wichtige Indikatoren für die Veränderung des Strahlparameterprodukts BPP_{lat} dar. Die Analyse ergab, dass die Epitaxiestruktur im Speziellen und die Laserchip-Geometrie im Allgemeinen einen starken Einfluss auf die Form der thermischen Linse haben, wobei Letztere direkt mit S_{th} korreliert. Zusätzlich zeigte sich, dass eine Unterdrückung der lateralen Ladungsträger-Ansammlung mit Hilfe von tiefer Protonenimplantation den thermischen Anstieg um 33% senkt, so dass ein Drittel des Betrags von S_{th} durch den vom Pumpstrom induzierten Gewinn für Moden höherer Ordnung bestimmt wird und die verbleibenden zwei Drittel durch die Form der thermischen Linse bestimmt werden. Die implantierten BALs zeigten

eine lineare Brillanz von $B_{lin} = 3.5 \text{ W/mm mrad}$, erleiden durch die Implantation aber einen Effizienzverlust von 7 Prozentpunkten. Die Anwendung von Indexgräben mit einem effektiven Indexsprung von $\Delta n_{eff} = 1.5 \times 10^{-3}$ führte zu einer Stabilisierung der Nahfeldbreite bei steigenden Pumpströmen, aber gleichzeitig wurde das BPP Grundlevel BPP_0 um 1.5 mm mrad angehoben. Filamentierung und mechanische Verspannungen zeigten in dieser Untersuchung nur einen minimalen Einfluss auf das Strahlparameterprodukt.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wurden Techniken untersucht, die BPP_{lat} über eine Reduzierung der Anzahl lateraler Moden verbessern. Hierbei wurden zunächst BALs mit unterschiedlicher Breite des Injektionsstreifens w untersucht, wobei Laser mit großen Streifenbreiten höhere Effizienzen und höhere optische Leistungen zeigten. Da das Strahlparameterprodukt jedoch schneller mit w wächst als die Ausgangsleistung, wird die höchste Brillanz in BALs mit schmalen Streifen ($w = 30 \mu\text{m}$) erzielt: $B_{lin} = 4 \text{ W/mm mrad}$ bei $P_{opt} = 4 \text{ W}$. Eine Simulation der thermischen Wellenleiter (bei festem $\Delta T_{AZ} = 15 \text{ K}$) ergab, dass die Degradationsrate von BPP_{lat} mit einer einfachen, gleich-gewichteten Überlagerung der geführten Moden nachgebildet werden kann.

Die ermittelte Rate $\Delta BPP_{lat}/\Delta w = (0.044 \pm 0.002) \text{ mm mrad}/\mu\text{m}$ wird durch den Zuwachs in der Anzahl geführter Moden mit zunehmender Streifenbreite bestimmt und stimmt sehr gut mit den gemessenen BPP_{lat} -Werten bis zu $w = 70 \mu\text{m}$ überein. Die zweite untersuchte Technik ist ein lateraler Modenfilter, der auf der resonanten Kopplung zweier kongruenter vertikaler Wellenleiter basiert. Hierbei gibt es einen Auskoppel-Wellenleiter (realisiert durch trocken geätzte, mit einer Germaniumschicht versehene, Indexgräben neben dem Injektionsstreifen) der eine starke optische Absorption aufweist und einen Verlust für die lateralen Moden des Zentralbereichs (Laserbereich) einführt, dessen Stärke von der Nahfeldausdehnung der Moden abhängt. Der Einsatz des Modenfilters führt zu starken Einbußen in der Konversionseffizienz, die auf $\eta_c \leq 45\%$ beschränkt ist, so dass die Technologie als Ganzes noch Verbesserungspotential aufweist. Dennoch zeigten die BALs mit Modenfilter vielversprechende Brillanz-Ergebnisse, mit einem Bestwert von $B_{lin} = 4.4 \text{ W/mm mrad}$. Dieses Ergebnis übersteigt die Brillanzwerte, die von kommerziell verfügbaren Breitstreifenlasern erreicht werden.