



Andreas Tünnermann

Einleitung

Die ersten Faserlaser wurden zu Beginn der sechziger Jahre mit Wellenlängen von rund einem Mikrometer und einer Ausgangsleistung von einigen Milliwatt betrieben. Aufgrund jüngster Entwicklungen verlässlicher Festkörper-Pumpquellen mit hoher Leuchtkraft und der Benutzung des Claddingpumpens sind Faserlaser nicht länger auf einen Niedrigleistungsbetrieb beschränkt. Für diodengepumpte Systeme im cw-Betrieb konnten Ausgangsleistungen von mehr als 100 W erreicht werden. Darüber hinaus können Pulsenergien von einigen mJ bei Pulsbreiten in der Größenordnung von 10 ns erzielt werden, was kürzlich anhand von Yb-dotierten Fasern gezeigt wurde.

Mittels der Chirped-Puls Verstärkungstechnik können Pulse so weit gestreckt werden, dass nichtlineare Störungen minimiert und Energien im Bereich der Sättigungsfluenz von seltenerd-dotierten Fasern selbst bei Verwendung ultrakurzer Pulse erreicht werden.

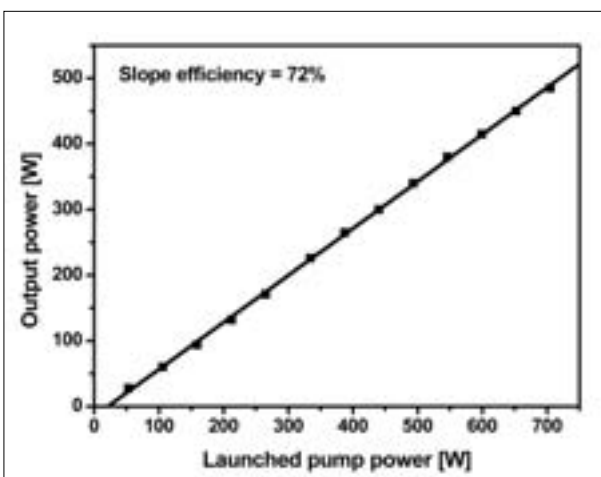
Entwicklung eines Hochleistungs-Faserlasers

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena (IAP) wurde am IOF ein diodengepumptes Doppelkern-Faserlasersystem entwickelt, welches Ausgangsleistungen von bis zu 500 W mit einer beugungsbegrenzten Strahlqualität ($M^2 < 1,3$) erreicht /1/. Der Laser basiert auf einem neuartigen Faserdesign, welches durch einen im Vergleich zu herkömmlichen Fasern vergrößerten Modenfelddurchmesser die Kompensation nichtlinearer Effekte erlaubt.

Für die Experimente wurde eine Yb-/Nd-dotierte Faser mit einer Länge von 35 m, einem Kerndurchmesser von 24 μm und einer numerischen Apertur von 0,086 benutzt. Der Pumpkern-durchmesser betrug 400 μm . In Bezug auf die Pumpleistung konnte ein Wirkungsgrad von mehr als 70 % erreicht werden, was einer thermischen Belastung von ca. 5 W/m entspricht. Obwohl keine aktive Kühlung verwendet wurde, können thermooptische Effekte selbst bei höchsten Ausgangsleistungen vernachlässigt werden, was durch die Linearität der Responsekurve selbst für hohe Ausgangsleistungen belegt wird.

Abb. 1: Input/Output Charakteristik eines Hochleistungs-Faserlasers mit beugungsbegrenztem Strahl.

Fig. 1: input – output characteristics of a high power fiber laser, operating with diffraction limited beam quality.



High power fiber and waveguide lasers

Andreas Tünnermann, Thomas Peschel, Ulf Peschel*, Jens Limpert*

*Friedrich Schiller University Jena

Introduction

The first fiber lasers were operated in the beginning of the sixties at wavelengths around one micron with output powers in the order of a few milliwatts. Owing to recent developments of reliable high brightness all solid state pump sources and the use of cladding pumping these devices are no longer restricted to low-power operation. Output powers of more than 100 W have been achieved for diode pumped systems in cw-operation. The capability of fiber systems for extracting pulse energies as high as several millijoules at pulse durations in the range of 10 ns has been demonstrated most recently in Yb-doped fibers.

Additional sufficient pulse stretching in the time domain using the chirped pulse amplification technique enables to reduce nonlinear pulse distortions in the fiber and to extract energies in the order of the saturation fluence limit of rare-earth doped fibers even in ultra-short pulse operation.

Development of the a high power fiber laser

In collaboration with the Institute of Applied Physics at the Friedrich-Schiller-University Jena (IAP) at the IOF a diode pumped double clad fiber laser system has been developed, delivering output powers up to 500 W with diffraction limited beam quality ($M^2 < 1.3$) /1/. The laser is based on a novel fiber design, which allows for the compensation of nonlinear effects due to an increased mode field diameter of the active doped core compared to conventional step index fibers. For the experiments, an Yb-/Nd-doped fiber of 35 m length has been used with a core diameter of 24 μm and a numerical aperture of 0.086. The pump core diameter was 400 μm . A slope efficiency of more than 70 percent has been measured with respect to the launched pump power, which corresponds to a heat loading of the fiber of about 5 W/m. No active cooling was applied in the experiments. Because of the linearity of the slope even at the highest output powers thermo-optical effects can be neglected.



Thomas Peschel



Ulf Peschel



Jens Limpert

Um das Potenzial zur Leistungssteigerung dieser Fasergeräte zu bestimmen, wurden die thermo-optischen Limits von Faserlasern untersucht. Basierend auf der in Abb. 2 gezeigten Fasergeometrie wurde die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung gelöst. Bei einer thermischen Belastung von 5 W/m erhöht sich die Fasertemperatur um weniger als 50 K in Bezug auf die Umgebung. Unter diesen Bedingungen beträgt die Temperaturdifferenz zwischen Faserkern und Faseroberfläche weniger als 5 K, was bedeutet, dass keine wesentliche zusätzliche Spannung innerhalb der Faser durch den Pumpprozess entsteht. Selbst bei einer thermischen Belastung im Bereich von 20 W/m befinden sich die auftretenden Spannungen weit unterhalb der Bruchgrenze von Quarzglas. Aus diesen Daten kann man schlussfolgern, dass beugungsbegrenzte Faserlaser ohne aktive Kühlung mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich betrieben werden können (Abb. 3).

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden ultraschnelle Faserverstärker entwickelt. Bei Anwendung der Chirped-Puls Verstärkungstechnik in Verbindung mit neuartigen Faserdesigns wurden kürzlich durchschnittliche Ausgangsleistungen im Bereich von 100 W gemessen. Dies eröffnet großartige neue Möglichkeiten zur praktischen Anwendung von ultraschnellen Lasern /2/, /3/. Eine weitere Leistungssteigerung von Faserlasern und Verstärkern im cw- und gepulsten Betrieb ist in der Entwicklung.

Danksagung

Dieses Projekt ist teilweise finanziert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Literatur:

- /1/ Limpert, J.; Liem, A.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.: „500 W continuous-wave fibre laser with excellent beam quality“, *Electron. Lett.* 39, 645 (2003).
- /2/ Limpert, J.; Clausnitzer, T.; Schreiber, T.; Liem, A.; Zellmer, H.; Fuchs, H. J.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.: „76 W average power femtosecond fiber CPA system“, in: *Trends in Optics and Photonics, Optical Advanced Solid-State Lasers*, Editor: John J. Zayhowski, TOPS 83, 414 (2003).
- /3/ Limpert, J.; Liem, A.; Schreiber, T.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.: „Power and energy scaling of fiber laser systems based on ytterbium-doped large-mode-area fibers“, *Advances in Fiber Devices*, L. N. Durvasula, ed., *Proceedings SPIE 4974*, 135 (2003).
- /4/ Limpert, J.; Schreiber, T.; Liem, A.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Peschel, T.; Guyenot, V.; Tünnermann, A.: „Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation“, *In: Optics Express* 11 (2003) 22 p. 2982, ISSN 1094-4087

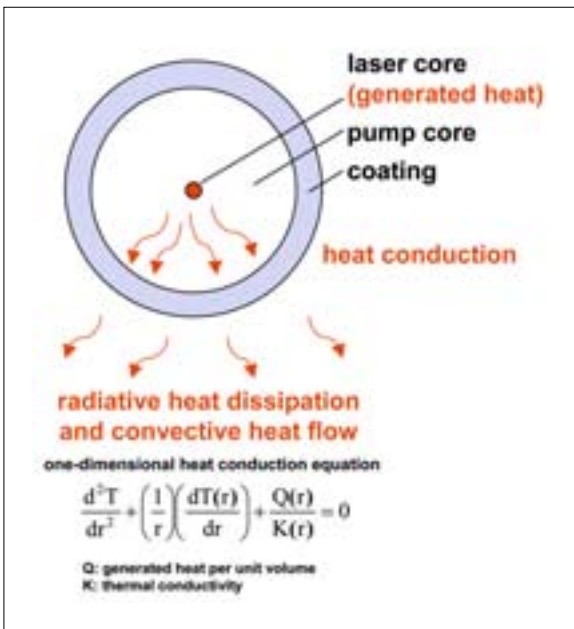


Abb. 2: Doppel-Kern-Faserlasergeometrie. Die Wärme wird in dem dotierten Laserkern erzeugt, welcher von dem Pumpkern und der Beschichtung umgeben ist. Wärmeabstrahlung und -konvektion können an der Faseroberfläche beobachtet werden. Die Temperaturverteilung der Faser $T(r)$ ist durch die eindimensionale Wärmeleitungsgleichung bestimmt.

Fig. 2: Double-clad fiber laser geometry. The heat is generated in the doped laser core, which is surrounded by the pump core and the coating. Radiative heat dissipation and convective heat flow is observed at the fiber surface. The temperature distribution of the fiber $T(r)$ is determined by the one-dimensional heat conduction equation.

In order to determine the power scaling potential of these fiber devices, the thermo-optical limits of fiber lasers have been analyzed. Based on a fiber geometry as illustrated in Fig. 2, the one-dimensional heat conduction equation has been solved. At a thermal loading of 5 W/m the temperature of the fiber is increased by less than 50 K with respect to the ambient air. Under these conditions, the temperature difference between the core and the fiber surface is less than 5 K, indicating, that no significant additional stress is introduced in the fiber due to the pumping process. Even at a thermal loading in the range of more than 20 W/m, the introduced stress is well below the fracture limit of fused silica. From these data it can be concluded, that diffraction limited fiber lasers can be operated without active cooling devices up to output powers in the kW-range (Fig. 3).

Based on this knowledge, ultrafast fiber amplifiers have been developed by us. Applying the chirped pulse amplification technique in combination with novel fiber designs, output powers in the range of 100 W average power have been measured most recently, offering novel avenues for real world applications of ultrafast lasers /2/, /3/. A further power scaling of fiber lasers and amplifiers in cw and pulsed operation is presently under progress.

Acknowledgements

This project is partly funded by the German federal ministry of education and research.

References:

- /1/ Limpert, J.; Liem, A.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.: „500 W continuous-wave fibre laser with excellent beam quality”, *Electron. Lett.* 39, 645 (2003).
- /2/ Limpert, J.; Clausnitzer, T.; Schreiber, T.; Liem, A.; Zellmer, H.; Fuchs, H. J.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.: „76 W average power femtosecond fiber CPA system”, in: *Trends in Optics and Photonics, Optical Advanced Solid-State Lasers*, Editor: John J. Zayhowski, TOPS 83, 414 (2003).
- /3/ Limpert, J.; Liem, A.; Schreiber, T.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.: „Power and energy scaling of fiber laser systems based on ytterbium-doped large-mode-area fibers”, *Advances in Fiber Devices*, L. N. Durvasula, ed., *Proceedings SPIE 4974*, 135 (2003).
- /4/ Limpert, J.; Schreiber, T.; Liem, A.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Peschel, T.; Guyenot, V.; Tünnermann, A.: „Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation”, *In: Optics Express* 11 (2003) 22 p. 2982, ISSN 1094-4087

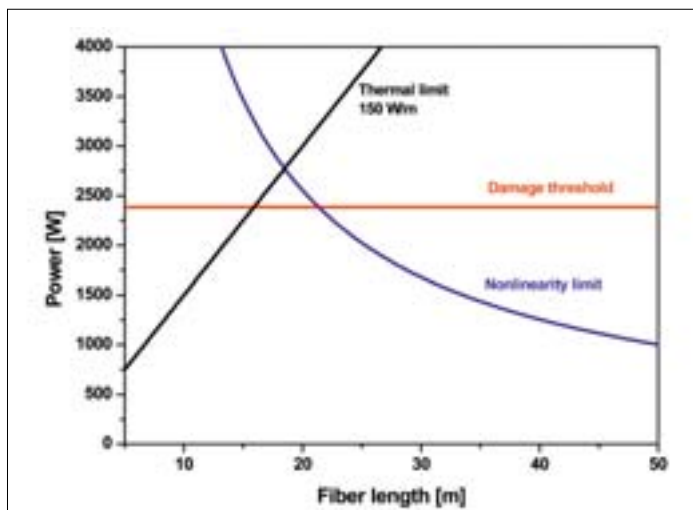


Abb. 3: Leistungsgrenzen eines passiv gekühlten 400 μm cladding-gepumpten Faserlasers mit einem Modenfelddurchmesser von 25 μm . Die nicht-lineare Grenze wird durch auftretende Ramanstreuung festgelegt, während die Zerstörschwelle durch die Beschädigung der Faserendflächen bestimmt wird.

Fig. 3: Power scaling limits of a passively cooled 400 μm pump cladding fiber laser with a mode field diameter of 25 μm . The nonlinearity limit is determined by the stimulated Raman-scattering. The damage threshold is determined by the optical break down of the fiber endfacets.