

Faserlaser – Neue Möglichkeiten durch Mikrostrukturierung



Jens Limpert¹



Fabian Röser¹



Andreas Liem¹



Thomas Schreiber¹



Oliver Schmidt¹



Andreas Tünnermann

Einleitung

In den letzten Jahren haben sich mit Seltenen Erden dotierte Faserlaser und -verstärker als leistungskalierbares Festkörperlaser-Konzept bewährt. Im cw Betrieb wurden Leistungen im Kilowattbereich bei gleichzeitig sehr hoher Strahlqualität erreicht. Diese Ergebnisse sind aufgrund von einigen besonderen Eigenschaften aktiver Fasern möglich geworden. Der hauptsächliche Vorteil dieser Fasern liegt in der Möglichkeit, gleichzeitig sowohl Pump- als auch Laserstrahlung in Wellenleiterstrukturen zu führen. Die Qualität der vom Laser abgegebenen Strahlung wird durch das Brechzahlprofil des dotierten Kerns bestimmt und ist daher leistungsunabhängig. Des Weiteren wird durch das große Verhältnis zwischen Oberfläche und aktivem Volumen eine sehr gute Wärmeableitung garantiert, wodurch der Faserlaser prinzipiell unanfällig gegenüber thermo-optischen Problemen wird.

Durch Führung der Pumpstrahlung wird ein hohes Produkt von Intensität der Pumpstrahlung und Interaktionslänge garantiert, weshalb schon bei einmaligem Durchlauf einer mit Seltenen Erden dotierten Faser eine hohe Verstärkung erreicht wird. Allerdings treten in konventionellen monomodigen Stufenindexfasern nichtlineare Effekte auf, da das Laserlicht in Kernen mit Durchmessern von $\sim 10 \mu\text{m}$ über große Längen von mehreren Metern mit dem Fasermaterial wechselwirkt.

Diese nichtlinearen Effekte, insbesondere inelastische Ramanstreuung und der intensitätsabhängige Brechungsindex, begrenzen im Allgemeinen die Möglichkeiten der Skalierung von Faserlasern und -verstärkern. Die Nichtlinearität einer Faser skaliert mit ihrer Länge und ist indirekt proportional zur Modenfeldfläche. Daher werden kurze Fasern mit großer Modenfeldfläche für eine signifikante Leistungskalierung genutzt.

Photonische Kristallfasern geringer Nichtlinearität

Unsere Arbeit konzentrierte sich auf neue Faserdesigns, mit denen die Beschränkungen konventioneller Faserlaser und -verstärker aufgehoben werden sollen. Durch die Mikrostrukturierung einer Faser kann ihre Funktionsvielfalt erhöht werden. Eines unserer Ergebnisse ist der Entwurf einer photonischen Kristallfaser mit den Außendimensionen eines Stab-Lasers und den Funktionseigenschaften einer Faser. Die Grundidee dieses Faserdesigns ist, die Außendimensionen eines Stab-Lasers, also einen Durchmesser im Bereich von einigen wenigen Millimetern und eine Länge von nur wenigen zehn Zentimetern, mit den zwei wichtigen Wellenleiterstrukturen, eine für die Pump- und eine zweite für die Laserstrahlung, zu verbinden. Die Nichtlinearität einer solchen Faser ist dadurch extrem reduziert und macht somit eine signifikante Leistungs- und Energieskalierung möglich /1/.

¹ Friedrich-Schiller-Universität Jena,
Institut für Angewandte Physik

Fiber Laser – Microstructures open new possibilities

Introduction

Over the past few years rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers have proved to be a power-scalable solid-state laser concept. Continuous-wave output powers in the kilowatt range with excellent beam quality have been demonstrated. These results are possible because of several inherent properties of active fibers. Their main performance advantages arise from the fact that they can simultaneously guide pump and laser radiation through waveguide structures. The refractive-index profile of the doped core determines the mode quality of the laser output, which is therefore power independent. Furthermore, the large ratio of surface to active volume ensures excellent heat dissipation, which makes a fiber laser basically immune to thermo-optic problems.

The guidance of pump radiation guarantees a large product of pump intensity and interaction length, which is the reason for the high single-pass gain of rare-earth-doped fiber. However, nonlinear optical effects arise in conventional single-mode fibers due to high intensities created by the tight confinement of the laser radiation in typical core diameters of $\sim 10 \mu\text{m}$ together with the extended length of material over which the laser interacts, which can be up to several tens of meters.

These nonlinear effects, in particular inelastic Raman scattering and self-phase modulation resulting from the intensity dependent refractive index, are in general the main performance limitations of fiber lasers and amplifiers. The nonlinearity of a fiber scales with the fiber length and is inversely proportional to the mode-field area. Therefore, the employment of short, large-mode-area fibers allows for significant power scaling.

Rod-type photonic crystal fibers – Low-nonlinearity fibers

Our work focused on novel fiber designs to overcome the conventional limitations of fiber lasers and amplifiers. By microstructuring a fiber, new functionality can be added. As a result we designed a large-mode-area photonic crystal fiber with the outer dimensions of a rod laser and the performance of a fiber laser. The basic idea of this fiber design is to have the outer dimensions of a rod laser; meaning a diameter in the range of a few millimeters and a length of just a few tens of centimeters, but to include two important waveguide structures; one for pump radiation and one for laser radiation. Finally, such a fiber has a radically reduced nonlinearity and therefore allows for significant power and energy scaling /1/.

Durch eine Verkleinerung des Verhältnisses zwischen der Pumpkernfläche und der aktiven Kernfläche wird die Pumplichtabsorption erhöht, was eine Reduzierung der Faserlänge zur Folge hat. Der Mantel zur Führung des Pumplichtes der beschriebenen Faser wird von Luftlöchern umgeben, wie in Abb. 1 zu sehen ist. Der Durchmesser dieses so geformten Pumplichtmantels beträgt $\sim 180 \mu\text{m}$ mit einer numerischen Apertur von 0,6. Der Ytterbium-dotierte Kern besitzt einen Durchmesser von $\sim 60 \mu\text{m}$, was zu einer Pumplichtabsorption dieser Struktur von $\sim 30 \text{ dB/m}$ bei 976 nm führt. Hierbei sollte erwähnt werden, dass aufgrund des nicht veränderten Produktes von Pumpintensität und Faserlänge verglichen mit anderen Doppelkerndesigns die hohe Verstärkung bei einmaligem Durchlauf selbst bei extrem kurzen Faserlängen beibehalten wird. Daher besitzt diese (Stab-)Faser sowohl eine geringe Laserschwelle sowie hohe Effizienz wie im Fall der konventionellen Faserdimensionen.

Normalerweise ist die Erzeugung von hohen Leistungsniveaus mit kurzen Fasern durch thermo-optische Probleme begrenzt. Eine detaillierte Analyse des thermo-optischen Verhaltens von Hochleistungs-Faserlasern (unter Einbeziehung von photonischen Kristallfasern) [2] hat gezeigt, dass Leistungskalierung durch die Schädigung des Polymer-Schutzmantels begrenzt wird, was bei Temperaturen zwischen $100 \text{ }^\circ\text{C}$ und $200 \text{ }^\circ\text{C}$ auf der Faseroberfläche auftritt. Diese Temperaturen treten leicht auf, wenn Leistungen im Bereich von 100 W/m gewonnen werden. In einer konventionellen Doppelkernfaser hat der Schutzmantel eine optische Funktion.

Er muss einen kleineren Brechungsindex als Quarzglas besitzen und bildet somit den Wellenleiter für die Pumpstrahlung. In einer mikrostrukturierten Faser dient dieser Mantel jedoch nur dem Schutz der Faser gegen mechanische oder chemische Zerstörung. Der direkteste Weg das Polymer vor Zerstörung zu schützen ist, es zu entfernen. Dies ist möglich, wenn die Faser selber mechanisch stabil genug ist, d. h. wenn sie z. B. eine genügende Dicke besitzt. Der Außendurchmesser der in Abb. 1 dargestellten Faser beträgt 2 mm , wobei diese keinen Polymer-Schutzmantel mehr besitzt. Zusätzlich verbessert der größere Außendurchmesser die Wärmeabfuhr [2] und reduziert die Propagationsverluste schwach geführter Strahlung aufgrund erhöhter Steifigkeit der Faser.

Ein Faserlaser in seiner einfachsten Form wird mit einem 50 cm langen Stück dieser $60 \mu\text{m}$ Ytterbium-dotierten (Stab-)Faser gebaut. Verglichen mit konventionellen Stufenindex-Fasern ist die Nichtlinearität um einen Faktor $2\,000$ kleiner. Der Laser wird von zwei Seiten gepumpt und die Faserenden sind gerade poliert.

Der Resonator wird durch einen hochreflektierenden Spiegel an der einen und $\sim 4 \%$ Fresnel-Reflexion an der anderen Seite gebildet. Abbildung 2 zeigt ein Photo des experimentellen Aufbaus. Bei einem differentiellen Wirkungsquerschnitt von 75% erhielten wir 260 W monomodiger Laser Ausgangsleistung. Die zugehörige mittlere extrahierte Leistung beträgt $> 500 \text{ W/m}$, welches nach unserem Wissen den höchsten Wert für Faserlaser überhaupt darstellt [3].

Polarisierende photonische Kristallfasern

Aufgrund der Erhöhung nichtlinearer Grenzen, die durch die größeren monomodigen Kerne und die hohe Absorption von photonischen Kristallfasern mit Luftmantel erzielt wurden, ist eine dramatische Skalierung der Ausgangsleistung von Faserlasern erreicht worden. Normalerweise stellt man in solchen Hochleistungsexperimenten einen Einbruch des Polarisationsgrades fest.

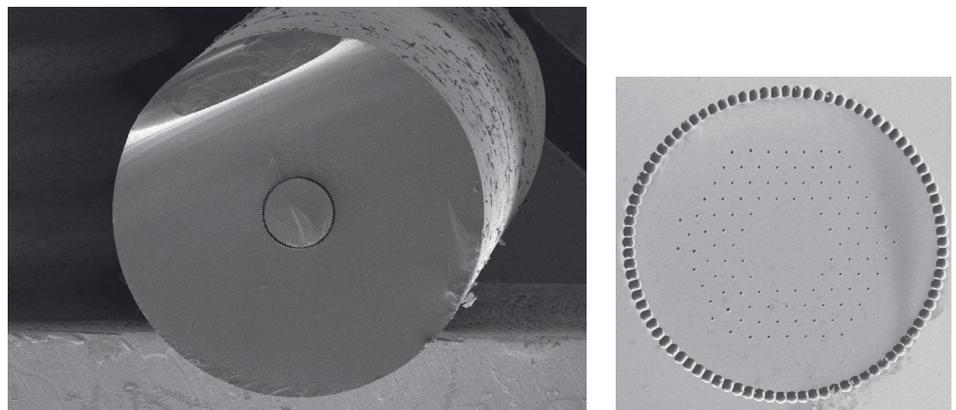


Abb. 1: Mikroskopaufnahme der Stab-Faser (links) und eine Nahaufnahme der Kernregion (rechts).

Fig. 1: Microscope image of a rod-type photonic crystal fiber (left) and close-up view of the inner cladding and core regions (right).

One can achieve the reduction of fiber length by reducing the ratio of pump core area to active core area, which increases the pump light absorption of the double-clad fiber. The inner cladding of this fiber is surrounded by an air – cladding region, as shown in Fig. 1. The inner cladding has a diameter of $\sim 180 \mu\text{m}$ with a numerical aperture as high as 0.6. The ytterbium-doped core has a diameter of $\sim 60 \mu\text{m}$, leading to pump light absorption by this structure of $\sim 30 \text{ dB/m}$ at 976 nm. It is important to note that, because of the unchanged product of pump intensity and fiber length compared with other double-clad fiber designs, the high single-pass gain of the fiber is maintained even over an extremely short fiber length. Therefore, this rod-type fiber also features a low lasing threshold and high efficiency as is the case for conventional fiber dimensions.

Usually, the extraction of high-power levels from short fiber lengths is limited by thermo-optic problems. A detailed analysis of the thermo-optic behavior of high-power fiber lasers (including photonic crystal fibers) /2/ has revealed that power scaling is restricted by damage to the polymer coating, which occurs at fiber surface temperatures between 100 and 200 °C. These temperatures are easily reached if power levels in the 100 W/m range are extracted. In a conventional double-clad fiber the coating has an optical function.

The coating has to have a lower refractive index than fused silica and therefore forms the waveguide for pump radiation. But in a micro-structured air-clad fiber, it just serves to protect the fiber from mechanical damage and chemical attack. The most straightforward way of avoiding coating damage is to remove the coating. This can be done if the fiber itself has enough mechanical stability, i.e., if the fiber is thick enough.

The fiber shown in Fig. 1 has an outer cladding diameter amounting to 2 mm and possesses no coating. In addition, the larger outer diameter improves the heat dissipation capabilities of this fiber /2/ and also reduces the propagation loss of weakly guided radiation that is due to the increased rigidity. A fiber laser in its simplest form is built by use of just a 50-cm length of the 60 μm ytterbium-doped core rod-type fiber discussed here. Compared to conventional step-index fibers the nonlinearity is reduced by a factor of 2000. The laser is pumped from two sides, and the fiber ends are perpendicularly polished.

The cavity is formed by a high reflecting mirror on one side and $\sim 4\%$ Fresnel reflections on the other side. Figure 2 shows a photograph of the experimental setup. We obtained 260 W of single-transverse-mode laser output power from this fiber sample with a slope efficiency of 75 %. This corresponds to an extracted power greater than 500 W/m, which to our knowledge is the highest value ever reported for fiber lasers /3/.

Single-polarization photonic crystal fiber

Due to the up-scaling of the nonlinear limits, which are greatly reduced due to the larger single-mode cores and shorter absorption of air-clad large mode area photonic crystal fibers, as described above, a dramatic scaling of the output of fiber laser systems is achieved. Usually, in these high power experiments a degradation of the degree of polarization is observed.

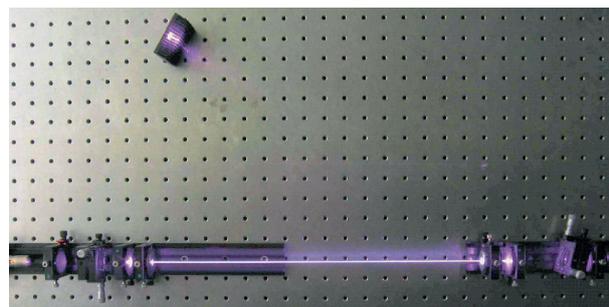


Abb. 2:
Experimenteller Aufbau des Hochleistungslasers mit Stab-Faser als Verstärkermedium.

Fig. 2:
Experimental setup of a short-length high-power fiber laser.

Um dieses Problem zu lösen und speziell den Laseraufbau in Hinsicht auf Kontrolle der Polarisation zu vereinfachen, interessierten wir uns für die Kombination von mikrostrukturierten Fasern mit großem Modenfelddurchmesser und polarisationserhaltenden Elementen.

Unsere Bemühungen zielten dabei auf polarisationserhaltende photonische Kristallfasern auf der Basis von spannungserzeugenden Elementen ab. Wir konnten zeigen, dass die Mikrostrukturierung der Faser die Anwendung von spannungsinduzierten Elementen zur Erzeugung von Doppelbrechung nicht limitieren, aber die Kombination von spannungsinduzierter Doppelbrechung und großen Kernen schwer zu erreichen ist /4/. Deshalb entwickelten wir ein neues Faserdesign, welches spannungsinduzierende Elemente als Teil des mikrostrukturierten Mantels beinhaltet /5/. Diese Elemente schaffen einerseits genügend Doppelbrechung, sind andererseits aber mit ihrer Brechzahl an die Mikrostrukturierung angepasst und damit auch für die Führung des Lichts verantwortlich. Solch eine Faser ist in Abb. 3 zu sehen. Es zeigte sich, dass die durch ein solches Design erzeugte Doppelbrechung ausreicht, um die zwei degenerierten Polarisationsmoden der Fundamentalen aufzuspalten. Dabei liegt der effektive Index einer der beiden Moden unterhalb des Mantelindex und wird daher nicht geführt. Die Faser wirkt demnach polarisierend. Die Modenfeldfläche beträgt $\sim 700 \mu\text{m}^2$ und ist damit deutlich größer als die jeder vergleichbaren polarisationserhaltenden grundmodigen Stufenindexfaser.

Die Faser wurde bei kleinen Leistungen getestet und zeigte vergleichbare Leistungsmerkmale wie eine nicht polarisationserhaltende Faser mit dem Unterschied, dass die Polarisation nicht zufällig, sondern perfekt linear war /5/. In einem weiteren Experiment konnten bis zu 147 W mittlere Leistung bei einem differentiellen Wirkungsquerschnitt von 66 % aus der Faser extrahiert werden. Die Daten sind in Abb. 4 zusammengefasst und waren nur durch die Leistung der Pumpdiode beschränkt. Der Polarisationsgrad betrug 95 % ($> 16 \text{ dB}$ Auslöschungsverhältnis) bis zu einer Leistung von 50 W. Bei der höchsten Leistung betrug der Polarisationsgrad immer noch 82 %. Neben dem demonstrierten Potential einer solchen Faser für hohe linear polarisierte Leistungen kann die Faser als Verstärker eingesetzt werden. Speziell durch die geringe Nichtlinearität ist die Faser prädestiniert für Ultrakurzpuls-Verstärker-Systeme als polarisationserhaltendes Verstärkermittel. Die polarisationserhaltenden Eigenschaften wurden auch experimentell bestimmt und zeigten ein Auslöschungsverhältnis der Polarisierungen von mehr als 24 dB (1:250).

Gefördert im Rahmen der internen Programme der FhG, Fördernummer MAVO 814970.

References:

- /1/ Limpert, J.; Liem, A.; Reich, M.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.; Broeng, J.; Petersson, A.; Jakobsen, C.: „Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier“, *Opt. Express* 12, 1313–1319 (2004).
- /2/ 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“, *Opt. Express* 11, 2982–2990 (2003).
- /3/ Limpert, J.; Deguil-Robin, N.; Manek-Hönniger, I.; Salin, F.; Röser, F.; Liem, A.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.; Broeng, J.; Petersson, A.; Jakobsen, C.: “High-power rod-type photonic crystal fiber laser“, *Opt. Express* 13, 1055–1058 (2005).
- /4/ Schreiber, T.; Schultz, H.; Schmidt, O.; Röser, F.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: “Stress-induced birefringence in large-mode-area micro-structured optical fibers“, *Opt. Express* 13, 3637–3646 (2005).
- /5/ Schreiber, T.; Röser, F.; Schmidt, O.; Limpert, J.; Iliev, R.; Lederer, F.; Petersson, A.; Jacobsen, C.; Hansen, K. P.; Broeng, J.; Tünnermann, A.: “Stress-induced single-polarization single-transverse mode photonic crystal fiber with low nonlinearity“, *Opt. Express* 13, 7621–7630 (2005).

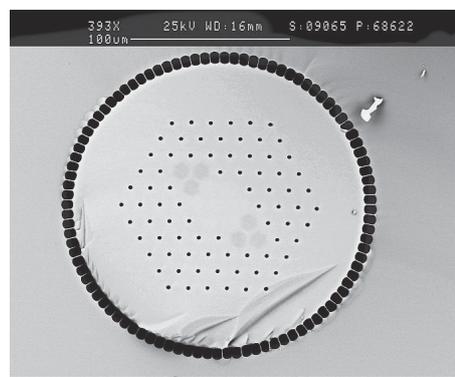


Abb. 3: Mikroskopaufnahme der Yb-dotierten photonischen Kristallfaser mit sechs brechzahlangepassten spannungsinduzierenden Elementen.

Fig. 3: SEM image of the Yb-doped air-clad photonic crystal fiber with six index-matched stress applying parts.

To overcome this problem and especially to simplify the laser setup in terms of polarization control, there is considerable interest in combining large mode area microstructured fibers and polarization maintaining elements.

Our investigations focused on polarization maintaining fibers based on stress-induced birefringence in photonic crystal fibers. We found that the microstructure itself does not limit the application of stress applying parts (SAPs) to achieve birefringence but that a fiber with low nonlinearity is difficult to achieve /4/. Therefore, we developed a novel design of photonic crystal fiber that includes stress-applying elements as part of the photonic cladding /5/. Beside the stress-induced birefringence, the light is confined by both parts of the photonic cladding: the air holes and the index matched regular array of SAPs. Such a fiber is shown in Fig. 3. We found that the birefringence is enough to split two polarization states of the weakly guided fundamental mode in such a way that the effective index of one polarization is below the cladding index, thus, resulting in a single polarization, large mode area fiber. The mode field area of $\sim 700 \mu\text{m}^2$ is larger than that of any step-index single mode fibers.

The fiber was tested in low power operation and showed a very similar performance to a comparable non-polarization maintaining fiber, but of course with almost perfectly polarized output /5/. In a new experiment, up to 147 W of output power could be extracted, as shown in Fig. 4, which was again limited by the available pump power. The slope efficiency with respect to the launched pump power was 66 %.

The degree of polarization is above 95 % (>16 dB extinction ratio) for output powers up to 50 W. At the highest power level, the degree of polarization is still 82 %. Besides the potential of such a new fiber design of high power lasers with polarized output, the fiber can be used as an amplifier. The low nonlinearity in particular predestines this fiber to be a polarization maintaining gain medium in ultra-short pulse amplifier systems. The polarization maintaining properties have also been experimentally verified and showed an extinction ratio of the amplifier output of more than 24 dB (1:250).

Supported by the internal programs of the FhG, Grant number MAVO 814970.

References:

- /1/ Limpert, J.; Liem, A.; Reich, M.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.; Broeng, J.; Petersson, A.; Jakobsen, C.: „Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier”, *Opt. Express* 12, 1313–1319 (2004).
- /2/ 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”, *Opt. Express* 11, 2982–2990 (2003).
- /3/ Limpert, J.; Deguil-Robin, N.; Manek-Hönninger, I.; Salin, F.; Röser, F.; Liem, A.; Schreiber, T.; Nolte, S.; Zellmer, H.; Tünnermann, A.; Broeng, J.; Petersson, A.; Jakobsen, C.: “High-power rod-type photonic crystal fiber laser”, *Opt. Express* 13, 1055–1058 (2005).
- /4/ Schreiber, T.; Schultz, H.; Schmidt, O.; Röser, F.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: “Stress-induced birefringence in large-mode-area micro-structured optical fibers”, *Opt. Express* 13, 3637–3646 (2005).
- /5/ Schreiber, T.; Röser, F.; Schmidt, O.; Limpert, J.; Iliew, R.; Lederer, F.; Petersson, A.; Jacobsen, C.; Hansen, K. P.; Broeng, J.; Tünnermann, A.: “Stress-induced single-polarization single-transverse mode photonic crystal fiber with low nonlinearity”, *Opt. Express* 13, 7621–7630 (2005).

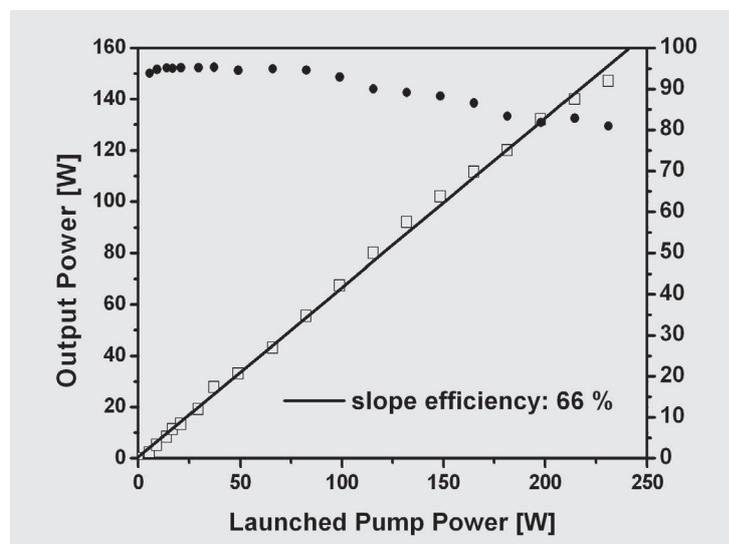


Abb. 4: Ausgangsleistung und Polarisationsgrad der polarisierenden Faser.

Fig. 4: Output characteristics of a free running laser using the single polarization Yb-doped LMA fiber.