

Faserlaser – Innovative Strahlquellen für Forschung und Industrie

Holger Zellmer¹, Matthias Reich¹, Andreas Liem¹,
Thomas Schreiber¹, Jens Limpert¹, Andreas Tünnermann

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



Holger Zellmer



Matthias Reich



Andreas Liem



Thomas Schreiber



Jens Limpert



Andreas Tünnermann

Einleitung

Mehr als 40 Jahre Entwicklung haben Festkörperlaser zu attraktiven Strahlquellen für Forschung und Industrie gemacht. Ihr Anwendungsbereich erstreckt sich von der Grundlagenforschung über Life Science und Metrologie bis in die industrielle Fertigung. Die meisten der heutigen Anwendungsfelder erfordern kompakte Laserquellen mit hohem Wirkungsgrad, exzellenter Strahlqualität und geringem Wartungsaufwand. Diese Anforderungen können in idealer Weise mit diodengepumpten Festkörperlaser erfüllt werden.

Jedoch wird durch die Stokes-Shift, der Energiedifferenz zwischen Anregungs- und Emissionswellenlänge, Wärme im aktiven Material deponiert, was die maximal erzielbare Ausgangsleistung und Strahlqualität eines Lasers beeinträchtigt. Da die Wärme im gesamten Volumen des Laserkristalls entsteht, die Wärmeableitung aber nur über die Mantelflächen erfolgen kann, entsteht innerhalb des Kristalls ein Temperaturgradient von innen nach außen, welcher aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex zu einem Brechzahlgradienten und somit zu einer thermischen Linse führt.

Ferner führt der Temperaturgradient zu mechanischem Stress, der zum einen über den fotoelastischen Effekt zum Brechzahlgradienten beiträgt und zum anderen Spannungsdoppelbrechung hervorruft. Thermische Linsenwirkung und Spannungsdoppelbrechung führen zur Verschlechterung der Strahlqualität bzw. zur Depolarisation der erzeugten Laserstrahlung. Ein wichtiges Kriterium beim Design moderner Festkörperlaser ist daher das Reduzieren bzw. die Kontrolle thermischer Effekte.

Neue Laserkonzepte

Neuartige Konzepte, wie der Scheibenlaser und der Faserlaser (Abb. 1), zielen vor allem auf die Umgehung thermischer Effekte. Im Gegensatz zu Scheibenlasern, die ein kurzes aktives Medium mit großem Durchmesser zur Verminderung thermischer Effekte verwenden, basieren Faserlaser auf einem aktiven Medium mit nur wenigen Mikrometern Durchmesser, aber mehreren Metern Länge. Die Strahlqualität des Faserlasers wird dabei allein von der Brechzahlstruktur bestimmt, die durch die Faserherstellung fest vorgegeben wird. Brechzahländerungen durch thermische Effekte sind vergleichsweise klein gegenüber den durch die Glaszusammensetzung eingestellten Brechzahlen und haben somit keinerlei Einfluss auf die Strahlqualität. Zusätzlich sorgt das große Verhältnis von Oberfläche zu aktivem Volumen für eine gute Wärmeabfuhr, so dass selbst bei hohen Ausgangsleistungen keine aktive Kühlung der Faser erforderlich ist.

Fiber lasers – Novel light sources in research and industry

Holger Zellmer¹, Matthias Reich¹, Andreas Liem¹,
Thomas Schreiber¹, Jens Limpert¹, Andreas Tünnermann

¹Friedrich Schiller University Jena, Institute of Applied Physics

Introduction

In more than forty years of development solid state lasers became attractive light sources for use in research and industry. Their applications range from basic research over life science and metrology to industrial production. Most of the modern applications require compact laser sources with high plug efficiency, excellent beam quality, and low maintenance costs. This demands can be ideally fulfilled by diode pumped solid state lasers.

However, heat is deposited in the active material of the lasers owing to the Stokes shift between the pump and laser wavelength. This affects the accomplishable output power and beam quality. Because heat is deposited in the total volume of the active medium and the heat is removed via the barrel faces of the laser rod only, a temperature gradient builds up inside the laser crystal. Owing to the temperature dependence of the refractive index this temperature gradient causes a refractive index gradient and thus a thermal lens. In addition, the temperature gradient causes mechanical stress which adds to the thermal lensing effect by the elasto-optic properties of the active material. Furthermore, stress induced birefringence leads to the depolarization of the laser radiation. Hence, the reduction and the control of the thermal effects in the active medium is one of the main issues in the design of modern diode pumped solid state lasers.

Novel laser concepts

Novel laser concepts like the thin disk laser or the fiber laser (Fig. 1) aim to avoid or workaround thermal effects. In contrast to the thin disk laser which utilizes a short active medium with large diameter to avoid thermal distortion of the wavefront, fiber lasers are based on an active medium with only a few micron diameter but a length of several meters. The beam quality of the fiber laser is solely determined by the refractive index profile of the fiber which is given by the fiber's fabrication process. Thermal induced changes of the refractive index are small compared to the refractive index profile of the glass composition and will not influence the beam profile of a fiber laser. Moreover, the advantageous ratio of surface to active volume ensures an excellent heat removal from the fiber. Hence, no active cooling of the fiber is required even at high power laser operation.

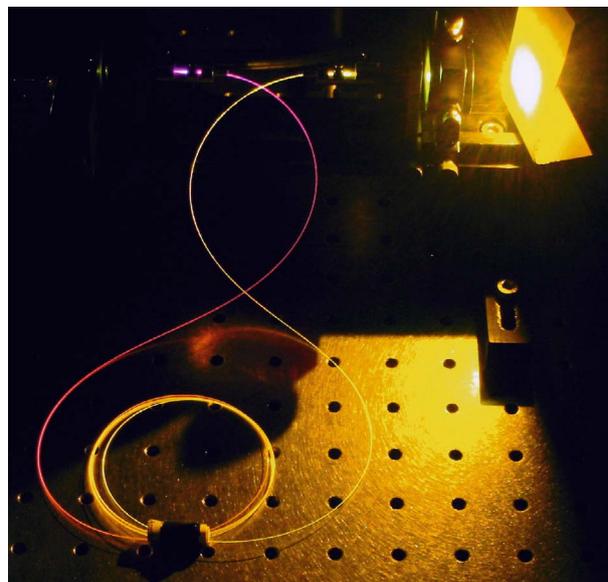


Abb. 1:
Erzeugung eines Superkontinuums in einer photonischen Kristallfaser.

Fig. 1:
Super continuum generation in a photonic crystal fiber.

Hochleistungs-Faserlaser

Für den Hochleistungs-Laserbetrieb wird das Doppelkernkonzept angewendet, um Pumplicht geringer Strahlqualität aus Laserdioden-Stacks in die Faser einkoppeln zu können (Abb. 2). Dabei ist der aktive Kern der Faser von einem Multimodekern umgeben, der in Durchmesser und numerischer Apertur an gängige Hochleistungs-Diodenlaser angepasst ist. Das Pumplicht propagiert in diesem Pumpkern, wird im Verlauf der Faser im aktiven Kern absorbiert und regt dort den Laserprozess an. Eine besonders effiziente Pumplichtabsorption lässt sich erhalten, indem die Zylindersymmetrie des Pumpkerns gebrochen wird. Besonders geeignet dazu sind rechteckige, D-förmige und sechseckige Querschnittsflächen des Pumpkerns. Die Wellenleiterstruktur des aktiven Faserkerns hat einen Durchmesser von typisch 10 μm . Das führt bei hohen Laserleistungen zu extrem hohen Leistungsdichten im Faserkern, die einen Wert von 100 MW/cm^2 überschreiten können. Hierdurch können zum einen störende nichtlineare Effekte

auftreten, zum anderen besteht bei solch hohen Leistungsdichten die Gefahr, dass die Faserendflächen zerstört werden. Um die Leistungsdichte zu verringern, wurden Fasern mit großem Modenfelddurchmesser entwickelt, so genannte Large Mode Area (LMA) Fasern, die Modenfelddurchmesser von 20–30 μm haben. Mit solchen Fasern wurden Ausgangsleistungen um 0,5 kW im Grundmodebetrieb demonstriert. Im Multimodebetrieb wurden 1,3 kW bei guter Strahlqualität ($M^2 < 3$) erreicht.

Die große Länge der aktiven Fasern führt in Verbindung mit der geringen Querschnittsfläche des Faserkerns zu einer sehr hohen Durchgangsverstärkung, die im Bereich von 30–40 dB liegen kann. Sie kann zur Verstärkung sowohl von kontinuierlichen als auch von gepulsten Signalen ausgenutzt werden. Spektrale und zeitliche Eigenschaften von Laseroszillatoren mit geringer Leistung können mit solchen Master Oscillator Fiber Power Amplifier (MOFPA) Systemen in den Hochleistungsbereich übertragen werden. Im schmalbandigen Einfrequenzbetrieb

konnten Leistungen von über 150 W mit sehr geringem Amplitudenrauschen erreicht werden, im Pulsbetrieb wurden 2 mJ bei einer mittleren Leistung von 100 W bei 50 ns Pulsdauer demonstriert. Eine Verringerung der Wiederholrate erlaubt Pulsenergien von 4 mJ. Ferner stellen Faserverstärker eine einfache Lösung zur Erzeugung von kurzen Pulsen mit hoher Energie und großer Repetitionsrate dar. Dabei wird das Prinzip der Chirped Pulse Amplification (CPA), (Abb. 3), angewendet, bei dem die Pulse vor der Verstärkung zeitlich gestreckt und anschließend wieder auf ihre ursprüngliche Dauer komprimiert werden, um die Pulsspitzenleistung im Inneren des Faserverstärkers klein zu halten. Mit solchen Faser-CPA-Systemen lassen sich bei hohen Repetitionsraten mittlere Leistungen um 100 W und Pulsdauern um 80 fs erreichen. Eine Verringerung der Repetitionsrate erlaubt Pulsenergien $> 100 \mu\text{J}$, was den Faserlaser zu einer idealen Quelle für die Materialbearbeitung von Dielektrika und Metallen macht.

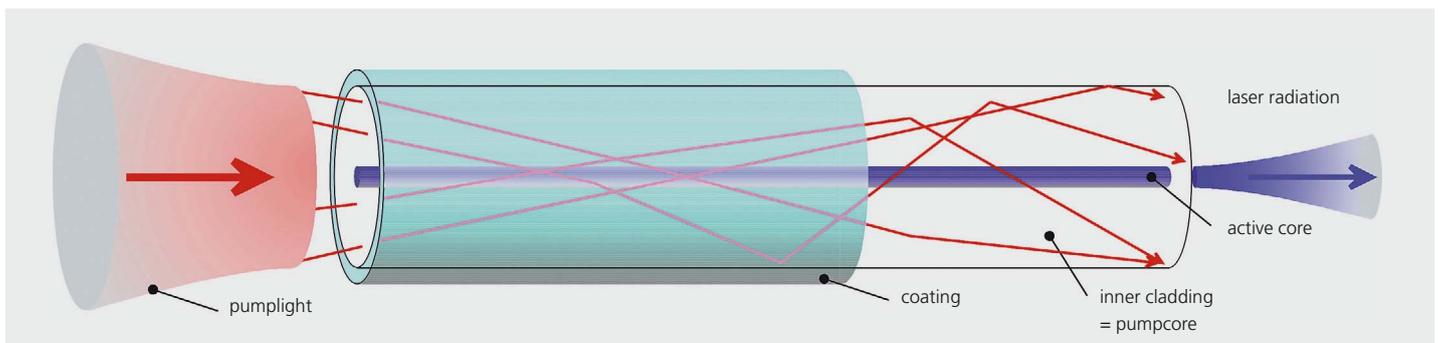


Abb. 2: Prinzipieller Aufbau eines Faserlasers. Die koaxiale Doppelkernstruktur mit einem Monomodekern für die erzeugte Laserstrahlung und einem Multimodekern für das Pumplicht erlaubt transversalen Grundmodebetrieb bei Verwendung von Hochleistungs-Multimode-Diodenlasern als Pumpquelle.

Fig. 2: Schematic of a fiber laser. The coaxial double clad structure consisting of a single mode core for the generated laser radiation and a multi mode core for the pump radiation enables single transverse mode laser operation applying multi mode pump radiation by high power diode laser pump sources.

High power fiber lasers

To accomplish high power operation the double clad fiber design is applied (Fig. 2). This allows to couple high power laser radiation from a stacked array laser diode to the active fiber. The pump light is launched into an inner cladding of the fiber which acts as a waveguide for the pump light. The pump light propagates in the pump cladding and is gradually absorbed in the active fiber core over the entire fiber length. The pump absorption becomes more efficient with a broken symmetry of the pump cladding. Suitable geometries are D-shaped and hexagonal cross sections of the pump cladding. The dimension of the active fiber core is in the range of $10\ \mu\text{m}$, typically. In high power operation this causes high power densities which can exceed $100\ \text{MW}/\text{cm}^2$. On one hand the high power densities give rise to

nonlinear effects in the fiber and on the other hand there is the risk of damaging the fiber end facets. To reduce the power density special fibers with a large mode field diameter have been developed, the so called large mode area (LMA) fibers. These fibers have a mode field diameter of $20\text{--}30\ \mu\text{m}$ for the fundamental mode. With such fibers a single mode output power of $500\ \text{W}$ was demonstrated. In multimode operation an output power of $1.3\ \text{kW}$ was accomplished with an $M^2 < 3$.

The long interaction length of a fiber in combination with the small geometrical cross section results in a very high single pass gain in the range of up to $30\text{--}40\ \text{dB}$. This can be applied to amplify continuous or pulsed laser radiation. Spectral and temporal properties of low power laser oscillators can be transferred to high power levels applying such master oscillator fiber power amplifier (MOFPA) systems.

In narrow linewidth single frequency operation an output power of $150\ \text{W}$ was achieved with extremely low amplitude noise. In pulsed operation ($50\ \text{ns}$ pulse duration) a pulse energy of $2\ \text{mJ}$ was accomplished at an average power of $100\ \text{W}$. By reducing the repetition rate a pulse energy of $4\ \text{mJ}$ was achieved. Furthermore, fiber lasers offer a straight forward design for the generation of ultrashort pulses with high energy and high repetition rate. Applying the chirped pulse amplification technique (CPA), (Fig. 3) the pulses are stretched in the time domain by a dispersive delay line, amplified, and recompressed to their original duration after amplification. With fiber CPA systems average output powers of $100\ \text{W}$ have been demonstrated at high repetition rates. By reducing the repetition rate high pulse energies $> 100\ \mu\text{J}$ can be achieved. This makes a fiber laser an ideal light source for short pulses material processing of metals and dielectrics.

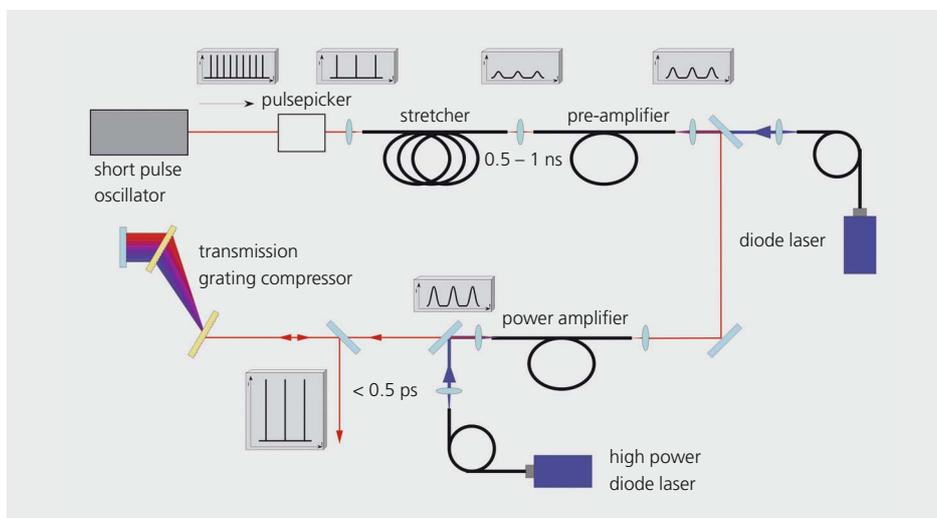


Abb. 3: Prinzipieller Aufbau eines Kurzpuls-Faser-CPA-Systems. Femtosekunden-Laserpulse hoher Folgefrequenz aber geringer Leistung werden mit Hilfe eines schnellen optischen Schalters (Pulspicker) auf die in der Anwendung gewünschte Wiederholrate gebracht und in einem dispersiven Faser- oder Gitterstreckter auf eine Dauer von $0,5\text{--}1\ \text{ns}$ gestreckt. Dadurch verringert sich die Spitzenintensität der Pulse und sie können in einem zweistufigen Faserverstärker die gewünschte Pulsenergie erlangen. In einem Gitterkompressor, der eine zum Streckter komplementäre Dispersion hat, werden die Pulse wieder in den Femtosekundenbereich komprimiert und gelangen dann zur Anwendung.

Fig. 3: Setup of a short pulse fiber CPA-system. Femtosecond pulses of high repetition rate but low pulse energy are divided to the desired repetition rate with a fast optical switch, the so called pulse picker. In a dispersive delay line the pulse are stretched to $0.5\text{--}1\ \text{ns}$ in time domain. The peak intensity is reduced by the stretching and the pulses can be amplified in a 2 stage amplifier to the required pulse energy. In a grating compressor that has complementary dispersion to the stretcher the pulses are recompressed to the femtosecond regime.