

# 1 mJ Ultrakurzpuls-Faserverstärker hoher Leistung



Jens Limpert



Fabian Röser



Tino Eidam



Jan Rothhardt



Oliver Schmidt



Damian Schimpf

Institut für Angewandte Physik,  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Ultrakurzpulslaser haben sich in den letzten Jahrzehnten als Basis für viele wichtige Anwendungen in der fundamentalen Forschung wie auch in der alltäglichen Praxis etabliert. Möglich wurde dies durch die rapide Entwicklung der Festkörperlaser-Technologie. Durch neuartige Designs des Verstärkungsmediums in Form des Scheiben- oder des Faserkonzepts konnten thermo-optische Probleme bewältigt und neue Leistungsklassen erreicht werden. Zusätzlich dazu müssen zur Erzeugung intensiver kurzer Pulse einige grundlegende Limitierungen überwunden werden. An der Entwicklung von Lasersystemen mit hohen Ausgangsleistungen und hohen Pulsenergien auf Basis des Faserkonzepts hatte das Institut für Angewandte Physik in den letzten Jahren einen signifikanten Anteil /1/.

Grundlage dieser Systeme ist die Reduzierung der Pulsspitzenintensität während der Verstärkung zur Vermeidung von nichtlinearen Effekten, die zu Einbußen in der Pulsqualität führen. Einerseits geschieht das über eine zeitliche Streckung der Pulse mit Hilfe dispersiver Elemente (chirped pulse amplification = CPA), andererseits kann die Pulsintensität in der Verstärkerfaser auch über eine größere Modenfläche reduziert werden. Besonders große Modenflächen können über spezielle Designs sogenannter photonischer Kristallfasern erzeugt werden. Den schematischen Aufbau des Faser-CPA-Systems zeigt Abb. 1.

Mit diesem Konzept wurde ein Kurzpulsfasersystem mit 100  $\mu\text{J}$  Pulsenergie am Institut für Angewandte Physik aufgebaut /2/. Die Pulse des »long-cavity« Kurzpulsoszillators werden mit Hilfe dielektrischer Gitter auf ca. 2,0 ns gestreckt. Ein akustooptischer Modulator bietet die Möglichkeit, die Pulsfrequenz flexibel zwischen 10 kHz und 10 MHz einzustellen. Ein Vorverstärker basierend auf einer polarisationserhaltenden photonischen Kristallfaser mit einem Modenfelddurchmesser von 35  $\mu\text{m}$  erhöht die mittlere Leistung auf bis zu 6 W, welche als Seed-Signal für den Hauptverstärker desselben Fasertyps dient. Die 100  $\mu\text{J}$  Pulsenergie wurde bei einer Pulsfrequenz von 0,9 MHz demonstriert, wodurch sich eine hohe mittlere Leistung von 90 W ergibt. Die Pulsdauer betrug dabei 500 fs. Der negative Einfluss der Nichtlinearität auf die Pulsqualität wurde hier schon deutlich und somit eine weitere Steigerung der Pulsenergie nicht möglich. Ziel der weiteren Untersuchungen war eine Auslotung der maximal extrahierbaren Pulsenergie des Faser-CPA-Systems /3/. Ein Teil des hierfür verwendeten Aufbaus ist in Abb. 2 dargestellt.

Dazu wurde die Hauptverstärkerfaser durch eine »rod-type« photonische Kristallfaser ersetzt. Dieses am IAP mitentwickelte Faserdesign /4/ zeichnet sich dadurch aus, dass die eigentliche Faserstruktur mit einem dicken Glas-mantel umgeben ist.

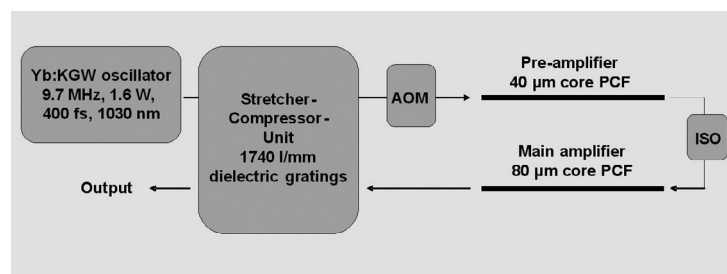
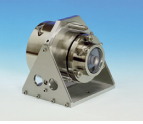


Abb. 1: Schematischer Aufbau des Faser-CPA-Systems.

Fig. 1: Schematic setup of the fiber CPA system.

# 1 mJ ultra-short pulse fiber amplifier with high average power



In recent decades ultra-short pulse lasers have been established as the basis for many important applications in fundamental research as well as in everyday practice. This was possible due to the rapid development of solid-state laser technology. Through innovative designs of the gain medium in the form of the disc or the fiber concept thermo-optical problems could be overcome and new performance classes could be achieved. In addition to this a couple of fundamental limitations have to be overcome to produce intense short pulses. A significant proportion of the development of laser systems with high output power and high pulse energies on the basis of the fiber concept was contributed by the Institute of Applied Physics in the last years /1/.

The basis of these systems is the reduction of the pulse peak intensity during amplification to avoid non-linear effects which lead to losses in the pulse quality. Firstly, this is done through a temporal elongation of the pulses using dispersive elements (chirped pulse amplification = CPA), on the other hand, the pulse intensity in the fiber amplifier can be reduced through a larger mode area. Particularly large mode areas can be achieved with specific designs of so-called photonic crystal fibers (Fig. 1).

Following this approach, a short-pulse fiber laser system with 100  $\mu\text{J}$  pulse energy was developed at the Institute of Applied Physics /2/. The pulses of the „long-cavity“ ultrashort pulse oscillator are stretched to about 2.0 ns using dielectric gratings. An acousto-optical modulator enables a flexible pulse repetition rate between 10 kHz and 10 MHz. A preamplifier based on a polarization maintaining photonic crystal fiber with a mode field diameter of 35  $\mu\text{m}$  increases the average power up to 6 W, which serves as seed signal

for the main amplifier consisting of the same fiber type. The 100  $\mu\text{J}$  pulse energy was demonstrated at a pulse repetition frequency of 0.9 MHz, resulting in a high average power output of 90 W. The pulse duration was 500 fs. The negative influence of non-linearity on the pulse quality was already considerable and therefore a further increase in pulse energy not possible. The goal of further investigations was to explore the maximum extractable pulse energy of the fiber CPA system /3/.

For this purpose the main amplifier fiber was substituted with a „rod-type“ photonic crystal fiber. This fiber design /4/, co-developed at the IAP, is characterized by the fact that the actual fiber structure is surrounded by a thick glass cladding.

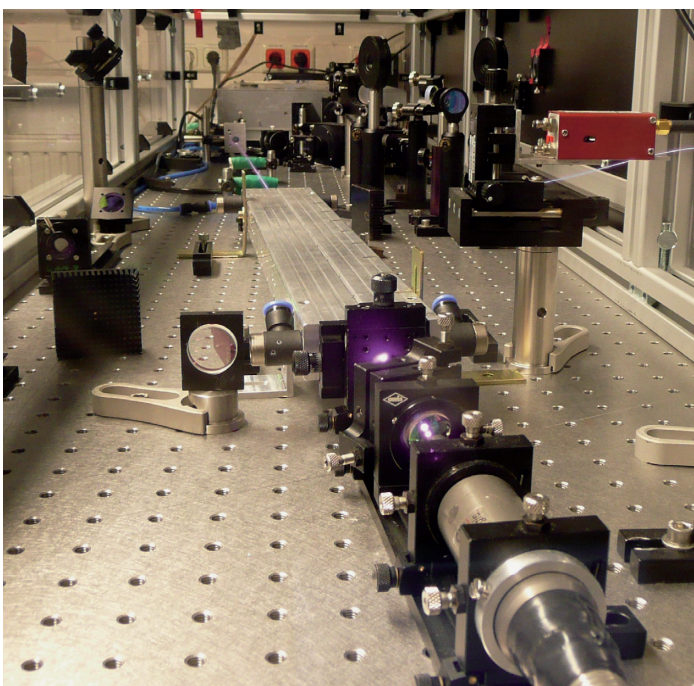


Abb. 2:  
Ultrakurzimpuls-Faserverstärkersystem  
am IAP.

Fig. 2:  
Ultra-short pulse fiber amplifier  
system at the IAP.

Zum Einen führt das zu einer erhöhten mechanischen Stabilität, es wird kein Polymerschutzmantel mehr benötigt, was im Hochleistungsbetrieb thermische Vorteile hat. Zum anderen wird durch die erhöhte Steifigkeit eine Biegung verhindert und die Propagationsverluste für den nur schwach geführten Lasermode werden minimiert.

Die Faser ist durch folgende Parameter gekennzeichnet:

- Kerndurchmesser: 80  $\mu\text{m}$ ,
- Pumpkerndurchmesser: 200  $\mu\text{m}$ ,
- Außendurchmesser: 1,5 mm,
- Pumplichtabsorption @ 976 nm:  $\sim 30$  dB/m,
- Genutzte Faserlänge: 120 cm.

Der Grundmode der Faser konnte stabil, auch bei hohen Leistungen, angeregt werden. Als Modenfelddurchmesser wurde 70  $\mu\text{m}$  bestimmt (Abb. 3).

Diese Faser zeigt eine interessante Verstärkercharakteristik, d. h. mittlere Ausgangsleistung als Funktion der Pumpleistung und der Seedleistung. Zu beobachten ist eine Sättigung der Ausgangsleistung bei geringen Seedleistungen. Dieses Verhalten ist zurückzuführen auf die Sättigung der

Pumplichtabsorption, d. h. es wird nur ein bestimmter Teil der in der Faser gespeicherten Energie extrahiert, die Inversion erreicht ihr Maximum und eine weitere Erhöhung der Pumpleistung führt zu keiner Steigerung der Ausgangsleistung, da das Material vollständig gebleicht ist (Abb. 4).

In Verbindung mit der kurzen Absorptionslänge bietet diese Faser eine extrem geringe Nichtlinearität und eignet sich somit zur Erzeugung von Femtosekunden-Pulsen mit mehr als 1 mJ Pulsenergie (Abb. 5).

Durch das oben beschriebene Phänomen der Pumplichtsättigung wurde ein Kompromiss zwischen maximal erreichbarer Verstärkung durch hohe Seedleistung und verbesserter Pulsqualität durch geringere Nichtlinearität nötig. Bei einer Puls-wiederholrate von 200 kHz und 0,5 W Seedleistung ergab eine Pumpleistung von 230 W eine mittlere Ausgangsleistung des Hauptverstärkers von 145 W. Diese Pulse konnten mit einer Effizienz von 70 % auf eine Pulsdauer von 780 fs komprimiert werden. Nach der Kompression betrug die Pulsenergie

500  $\mu\text{J}$  (100 W mittlere Leistung). Bei 50 kHz und 70 mW Seedleistung waren 180 W Pumpleistung für 71 W Ausgangsleistung nötig, was einer Pulsenergie von 1,45 mJ entspricht. Nach der Kompression ergab das eine Pulsenergie von 1 mJ bei 50 W mittlerer Leistung. Die Pulsdauer entsprach 800 fs, eine leichte Verschlechterung der Pulsqualität mit steigender Energie ist zu beobachten. Die entsprechende Pulsspitzenleistung betrug 1 GW, ein Wert der sonst mit keinem anderen Faserlasersystem erreicht werden konnte.

Literatur:

- /1/ Limpert, J.; Röser, F.; Schreiber, T.; Tünnermann, A.: High-power ultra-fast fiber laser systems, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 12, 233–244 (2006).
- /2/ Röser, F.; Schimpf, D.; Schmidt, O.; Ortaç, B.; Rademaker, K.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: 90 W average power 100  $\mu\text{J}$  energy femtosecond fiber chirped-pulse amplification system, Opt. Lett. 32, 2230–2232 (2007).
- /3/ Röser, F.; Eidam, T.; Rothhardt, J.; Schmidt, O.; Schimpf, D. N.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: Millijoule Pulse Energy High Repetition Rate Femtosecond Fiber CPA System, Opt. Lett. 32, 3495–3497 (2007).
- /4/ Limpert, J.; Schmidt, O.; Rothhardt, J.; Röser, F.; Schreiber, T.; Tünnermann, A.; Ermeneux, S.; Yvernault, P.; Salin, F.: Extended single-mode photonic crystal fiber lasers, Optics Express 14, 2715–2720 (2006).

Abb. 3: Nahfeld-Intensitätsprofil der rod-type Faser.

Fig. 3: Nearfield-Intensity profile of the rod-type fiber.

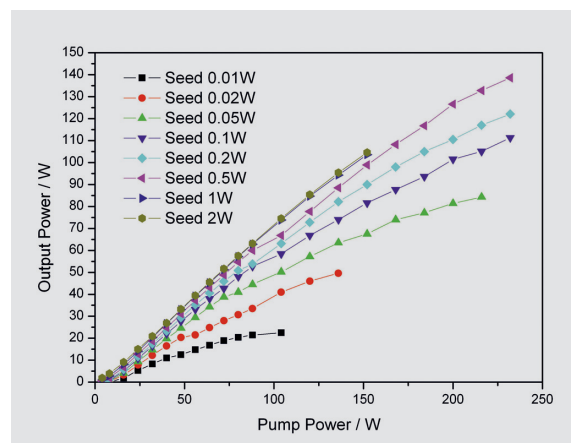
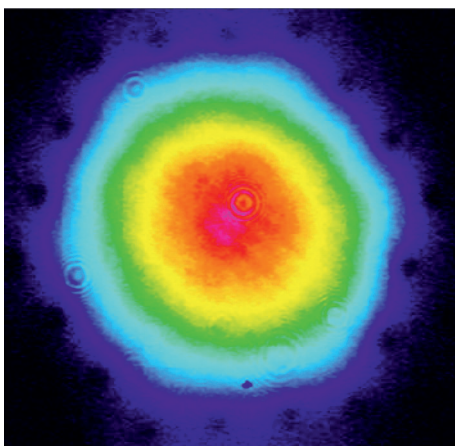
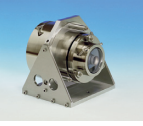


Abb. 4: Verstärkungscharakteristik der rod-type Faser als Hauptverstärker im Faser-CPA-System.

Fig. 4: Gain characteristics of the rod-type fiber as main amplifier in the fiber CPA system.



Firstly, this leads to a higher mechanical stability, as a protective polymer coating is no longer needed, which has thermal advantages in the high-performance operation. Secondly, the increased stiffness prevents bending and the propagation losses for the weakly guided laser mode are minimized.

The fiber is characterized by the following parameters:

- core diameter: 80  $\mu\text{m}$ ,
- pump core diameter: 200  $\mu\text{m}$ ,
- outer diameter: 1.5 mm,
- pumping light absorption @ 976 nm:  $\sim 30$  dB/m,
- used fiber length: 120 cm.

The fundamental mode of the fiber could be excited steadily, even at high powers. The mode field diameter was measured to be 70  $\mu\text{m}$ .

This fiber amplifier shows an interesting gain characteristic, i.e. average output power as a function of pump and seed power. Observable is a saturation of output power at low seed powers. This behaviour is due to the saturation of the pump light absorption, i.e. only a

certain part of the energy stored in the fiber is extracted, the inversion reaches its maximum and a further increase in pump power leads to no increase in power output because the material is completely bleached.

In connection with the short absorption length, this fiber has an extremely low non-linearity, and thus is suitable for the generation of femtosecond pulses with more than 1 mJ pulse energy.

Due to the above-described phenomenon of pump light saturation a compromise between maximum achievable amplification through high seed power and improved pulse quality through lower non-linearity was necessary. At a pulse repetition rate of 200 kHz and 0.5 W seed power a pump power of 230 W resulted in an average power output of the main amplifier of 145 W. These pulses could be compressed down to a pulse duration of 780 fs with an efficiency of 70 %. After compression, the pulse energy measured 500  $\mu\text{J}$  (100 W average power). At 50 kHz and 70 mW seed power 180 W of pump power were needed for 71 W output

power, corresponding to a pulse energy of 1.45 mJ. After compression this meant pulse energy of 1 mJ at 50 W average power. The pulse duration was 800 fs, a slight deterioration in pulse quality with increasing energy is observed. The corresponding pulse peak power was 1 GW, a value not reached by any other fiber laser system.

References:

- /1/ Limpert, J.; Röser, F.; Schreiber, T.; Tünnermann, A.: High-power ultra-fast fiber laser systems, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 12, 233–244 (2006).
- /2/ Röser, F.; Schimpf, D.; Schmidt, O.; Ortaç, B.; Rademaker, K.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: 90 W average power 100  $\mu\text{J}$  energy femtosecond fiber chirped-pulse amplification system, Opt. Lett. 32, 2230–2232 (2007).
- /3/ Röser, F.; Eidam, T.; Rothhardt, J.; Schmidt, O.; Schimpf, D. N.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: Millijoule Pulse Energy High Repetition Rate Femtosecond Fiber CPA System, Opt. Lett. 32, 3495–3497 (2007).
- /4/ Limpert, J.; Schmidt, O.; Rothhardt, J.; Röser, F.; Schreiber, T.; Tünnermann, A.; Ermeneux, S.; Yvernault, P.; Salin, F.: Extended single-mode photonic crystal fiber lasers, Optics Express 14, 2715–2720 (2006).

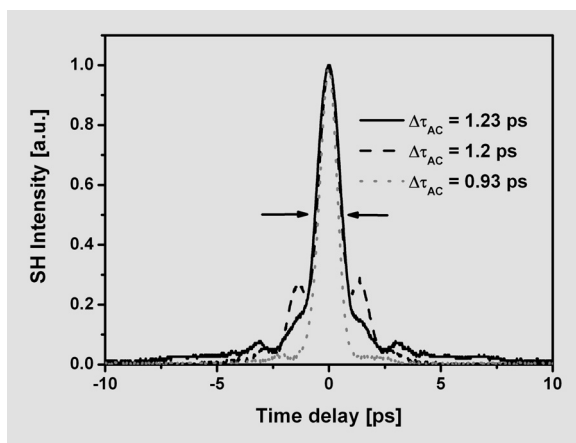


Abb.5: Autokorrelation der komprimierten Pulse bei verschiedenen Pulsenergien; gepunktet: bei kleinen Pulsenergien, gestrichelt: 200 kHz und 500  $\mu\text{J}$ , durchgezogen: 50 kHz und 1 mJ.

Fig. 5: Autocorrelation trace of the compressed pulses at different pulse energies; dotted: at small pulse energies, dashed: 200 kHz and 500  $\mu\text{J}$ , solid: 50 kHz and 1 mJ.