

## ULTRAKURZPULS-LASER MIT 830 W DURCHSCHNITTSLEISTUNG

## ULTRA-SHORT PULSE LASER WITH 830 W AVERAGE POWER

Faserlaser und -verstärker können heute hocheffizient Laserstrahlung im nahen Infrarot erzeugen, deren Durchschnittsleistung im Multi-Kilowatt-Bereich liegt. Da hierbei das Licht in einer Wellenleiterstruktur propagiert, wird im Gegensatz zu den meisten anderen Laserarchitekturen, selbst bei diesen extremen Leistungen, eine exzellente Strahlqualität beibehalten. Im kontinuierlichen Betrieb existieren bereits interessante Quellen, welche für die energieeffiziente Produktion eingesetzt werden. Mit der Übertragung dieses Konzepts auf gepulste Systeme, die neben der Durchschnittsleistung eine hohe Puls-spitzenleistung erzeugen, stehen nun erstmals effiziente Laser für die Mikromaterialbearbeitung zur Verfügung. Auch ist die Anwendung dieser Systeme in der Grundlagenforschung sehr interessant. Derzeit prominentestes Beispiel ist die Erzeugung hoher Harmonischer, d. h. eine Frequenzvervielfachung durch Wechselwirkung von Laserpulsen extremer Feldstärken mit Materie, und deren Anwendung in Spektroskopie, linsenlosen Abbildungsverfahren oder Attosekunden-Physik /1,2/. Trotz ihrer einzigartigen Eigenschaften ist die Erzeugung dieser hohen Harmonischen extrem ineffizient. Demzufolge kann durch jedes zusätzlich vorhandene Photon des verwendeten Ultrakurzpuls-Lasers der Nutzen erheblich erhöht werden.

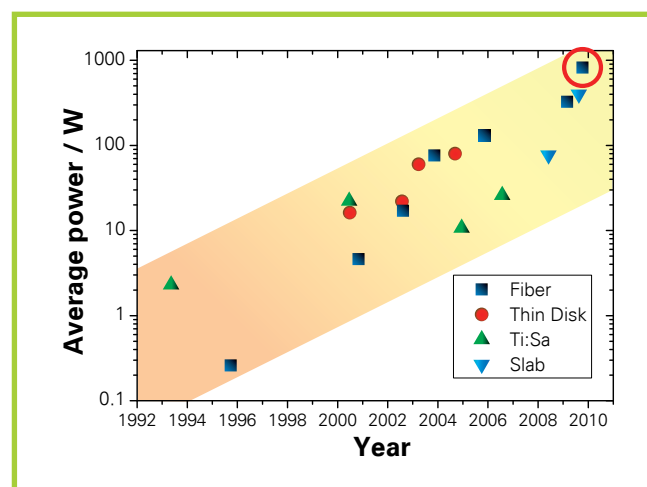
Today, fiber based lasers and amplifiers are capable of efficiently producing radiation with multi-kilowatt average power. Since light is propagating inside a waveguide structure, and in contrast to most of the other laser architectures, the excellent beam quality remains unaffected even at these power levels. In continuous wave operation sources that are interesting for energy efficient production already exist. By adapting this concept to pulsed systems, producing high average powers and high peak powers, for the first time efficient laser systems become available for micro machining. Additionally, application of these lasers in fundamental science can be very interesting. One prominent example is the generation of high harmonics, i.e. frequency up-conversion by interaction between high power laser pulses and matter, and the subsequent application of this short wavelength radiation in spectroscopy, lensless imaging and attosecond science /1,2/. Despite the unique properties, high harmonic generation suffers from poor efficiencies and its usability is increased with every additional photon from the driving ultra-short pulse laser.

2 Strahlprofil einer Großkernfaser.

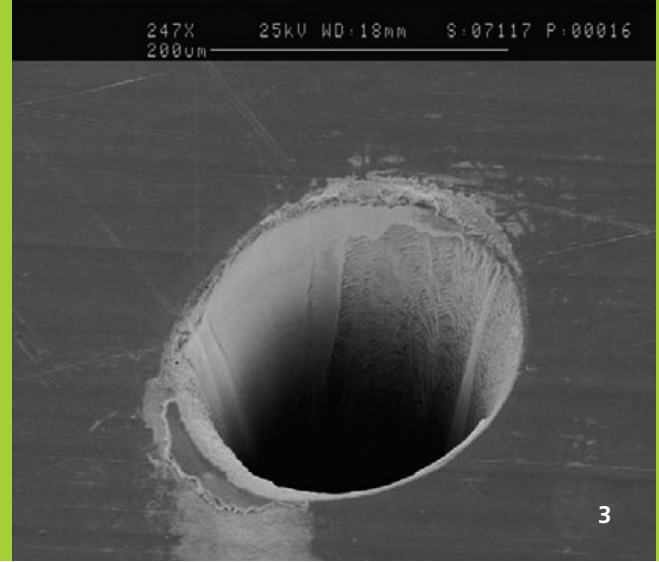
2 Beam profile of a large mode area fiber.

2009 wurde nun ein Meilenstein der Laserentwicklung durch die Demonstration eines faserbasierten »chirped pulse amplification« Systems mit 830 W Durchschnittsleistung erreicht /3/, ein Rekord auf dem Gebiet der Festkörperlaser (Abb. 1). Startpunkt des Systems ist ein modengekoppelter Femtosekunden-Oszillator, der 200 fs Pulse bei einer Zentralwellenlänge von 1042 nm und eine Pulsfolgefrequenz von 78 MHz emittiert. Um die Intensität in den Verstärkern zu reduzieren und somit störende nichtlineare Effekte zu vermeiden, werden die Pulse anschließend mit Hilfe eines Gitterstreckers auf 800 ps gestreckt. Nun wird das Signal effizient mit Hilfe von drei Faserverstärkern von wenigen Milliwatt auf 950 W verstärkt. Die entsprechende Pulsenergie beträgt 12,2  $\mu$ J. Schließlich werden die Pulse auf 640 fs Pulsdauer und 830 W Durchschnittsleistung durch einen auf hocheffizienten, dielektrischen Gittern basierten Kompressor komprimiert /4/. Die gemessene Strahlqualität beträgt bei diesem Leistungslevel  $M^2 < 1,3$ .

In 2009 a milestone in laser development was achieved by demonstrating a fiber chirped pulse amplification system with 830 W of average power /3/, a record value for ultra-short pulse solid-state lasers (Fig 1). Frontend of the system is a passively mode-locked femtosecond oscillator producing 200 fs pulses at a central wavelength of 1042 nm and 78 MHz pulse repetition frequency. In order to reduce the intensity and to avoid detrimental nonlinear effects inside the amplifier fibers these pulses are stretched in time to about 800 ps using a dielectric grating stretcher. Now, three single-pass fiber amplifier stages efficiently increase the signal power from the milliwatt-level to 950 W signal average power. The corresponding pulse energy is 12.2  $\mu$ J. Finally, these pulses are compressed down to 640 fs duration at 830 W average power with a grating compressor based on high-efficiency dielectric reflection gratings /4/. The beam quality of the main amplifier was measured to be  $M^2 < 1.3$  at this power level.



1 Entwicklung der Durchschnittsleistung von Ultrakurzpuls-Systemen. / Development of the average output power from ultra-short pulse laser systems.



Diese Parameter sind ein wichtiger Schritt in Richtung eines Ultrakurzpuls-Lasers mit 1 kW Durchschnittsleistung und 1 mJ Pulsenergie. Sie zeigen nicht nur die herausragende Leistungsfähigkeit von faserbasierten Ultrakurzpuls-Systemen, sie ermöglichen weiterhin Verbesserungen in vielen bereits etablierten Produktionsprozessen als auch komplett neue Ultrakurzpuls-Anwendungen.

Um die Überlegenheit dieser faserbasierten Ultrakurzpuls-Systeme in der Mikromaterialbearbeitung zu demonstrieren, wurden Bohrversuche in verschiedenen Metallen durchgeführt /5/. Üblicherweise ist die Qualität der Bearbeitungsergebnisse beim Einsatz herkömmlicher Laser durch thermisch oder mechanisch induzierte Schäden (Aufschmelzen, Grat- und Rissbildung, Veränderungen der Oberflächenbeschaffenheit etc.) limitiert.

Die Verwendung ultrakurzer Pulse hingegen bewirkt eine Verbesserung der Bearbeitungsergebnisse aufgrund der fundamental unterschiedlichen Wechselwirkung zwischen Licht und Materie. So wird die Laserenergie sehr schnell von den Elektronen aufgenommen, während das Ionengitter »kalt« bleibt. Nach dem Puls wird diese Energie an das Gitter abgegeben, was zu einer Vaporisierung führt. Durch Hitze entstehende, negative Auswirkungen werden weitestgehend minimiert. Abbildung 3 zeigt die Mikroskopaufnahme eines Bohrlochs, welches durch Trepanieren in 0,5 mm dickem Kupfer bei 800 fs Pulsdauer, 1 MHz Pulswiederholrate und 50  $\mu$ J Pulsenergie erzeugt wurde. Die Durchbruchzeit betrug hierbei nur 75 ms.

These parameters are an important step towards the goal of a 1 kW average power and 1 mJ pulse energy system.

They do not only demonstrate the outstanding performance of ultra-short pulse fiber systems, they also allow for improvements in many existing applications and will enable completely new ultra-short pulse laser applications.

In order to demonstrate the applicability of these high repetition rate systems for micromachining, drilling experiments with different metals were done /5/. Here, the processing with conventional laser sources is typically limited by thermal or mechanical damage (melting, formation of burr and cracks, changes in the morphology etc.). Applying ultra-short pulses results in an improved hole quality due to the fundamentally different interaction mechanism between laser radiation and matter. Here the laser energy is deposited very fast in the electronic subsystem, while the ionic lattice remains practically cold. Mainly after the laser pulse, a fast energy transfer to the lattice is taking place resulting in vaporization. Hence, the generation of molten material and heat affected zones is minimized. Figure 3 shows a scanning electron microscope image of a hole drilled in 0.5 mm thick copper using the trepanning technique and 800 fs pulses at a repetition rate of about 1 MHz and 50  $\mu$ J pulse energy. The breakthrough time was only 75 ms.

**3** Bohrloch in 0,5 mm dickem Kupfer. Die Bearbeitungszeit betrug 75 ms.

**3** Drilled hole in 0.5 mm thick copper with 75 ms breakthrough time.

## Literatur/References

/1/ Goulielmakis, E.; Yakovlev, V. S.; Cavalieri, A. L.; Uiberacker, M.; Pervak, V.; Apolonski, A.; Kienberger, R.; Kleineberg, U.; Krausz, F.: Attosecond Control and Measurement, Lightwave Electronics, Science 317 (2007).

/2/ Krausz, F.; Ivanov, M.: Attosecond physics, Rev. Mod. Phys. 81 (2009).

/3/ Eidam, T.; Hanf, S.; Seise, E.; Andersen, T.; Gabler, T.; Wirth, C.; Schreiber, T.; Limpert, J.; Tünnermann, A.: Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power, Opt. Lett. 35, 94-96 (2010).

/4/ Bunkowski, A.; Burmeister, O.; Clausnitzer, T.; Kley, E.-B.; Tünnermann, A.; Danzmann, K.; Schnabel, R.: Optical characterization of ultrahigh diffraction efficiency gratings, Appl. Opt. 45, 5795-5799 (2006).

/5/ Ancona, A.; Röser, F.; Rademaker, K.; Limpert, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: High speed laser drilling of metals using a high repetition rate, high average power ultra fast fiber CPA system, Opt. Express 16, 8958-8968 (2008).

## AUTHORS

*Tino Eidam*<sup>1</sup>

*Stefan Hanf*<sup>1</sup>

*Enrico Seise*<sup>1</sup>

*Christian Wirth*<sup>2</sup>

*Thomas Schreiber*<sup>2</sup>

*Jens Limpert*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Angewandte Physik,  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

<sup>2</sup> Fraunhofer IOF

## CONTACT

*Dr. Jens Limpert*

*Phone: +49 3641 947 811*

*jens.limpert@iof.fraunhofer.de*