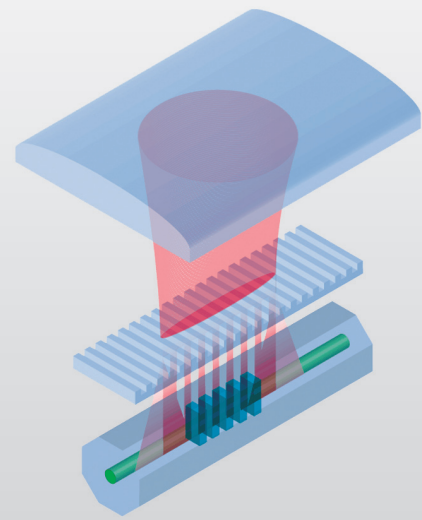


1



2

INTEGRIERTE BRAGG-REFLEKTOREN FÜR HOCHLEISTUNGS-FASERLASER

INTEGRATED BRAGG REFLECTORS FOR HIGH-POWER FIBER LASERS

Die Anforderungen an optische Komponenten für industrielle Faserlaser im Kilowatt-Bereich sind enorm: Sie müssen einer hohen Temperatur und Photonendichte standhalten und sollen außerdem verlustarm und unempfindlich gegenüber Erschütterungen und anderen Umwelteinflüssen sein. Daher gewinnen immer mehr monolithische Faserlaserkonzepte an Bedeutung. Faser-Bragg-Gitter (FBG) bieten eine Möglichkeit, schmalbandige Reflektoren direkt in der Faser zu realisieren. Sie bestehen aus tausenden streifenförmigen Brechzahländerungen im Kern der Faser, senkrecht zu deren Achse. Typischerweise sind diese Streifen weniger als ein Mikrometer dick. FBG für den Telekommunikationsbereich werden konventionell in photosensitivem Material mittels UV-Laserbelichtung hergestellt. Diese Techniken erreichen jedoch ihre Grenzen bei aktiven Großkernfasern, die in immer mehr Hochleistungslasern verbaut werden. Zum einen erfordert es viele aufwendige Prozessschritte, FBG direkt in selten-erd-dotieren Fasern zu belichten. Zum anderen ist es schwierig, auf konventionelle Weise großflächige, homogene Brechzahländerungen zu erreichen. Hinzu kommt, dass konventionelle FBG ausbleichen können, sowohl bei hohen Photonendichten als auch bei Temperaturen über 200 °C.

Requirements for optical components used in industrial fiber lasers in the kilowatt range are enormous: they have to withstand high temperatures and photon intensities and should yield low loss as well as being insensitive to vibrations and other environmental impacts. Therefore, monolithic fiber laser concepts are gaining in importance. Fiber Bragg gratings (FBG) are an option for the realization of narrow band reflectors directly within the fiber. They consist of thousands of lamellar refractive index changes within the fiber core, perpendicular to the fiber axis. Typically, these slats are less than one micron thick. FBGs for the telecommunication sector are conventionally realized in photosensitive fibers by UV-laser exposure. However, these techniques reach their limits in active large mode area (LMA) fibers, which are used in more and more high power lasers. Many cumbersome process steps are necessary in order to inscribe FBGs directly into rare earth doped fibers using the conventional approach. In addition, it is very demanding to obtain homogeneous refractive index changes. Moreover, conventional FBGs can bleach when subjected to high photon intensities as well as temperatures above 200 °C.

1 *FBG-Einschreibung mit Hilfe einer Phasenmaske.*

2 *Schematischer Aufbau und Prozedur zum Einschreiben der FBGs.*

1 *FBG inscription using a phase mask.*

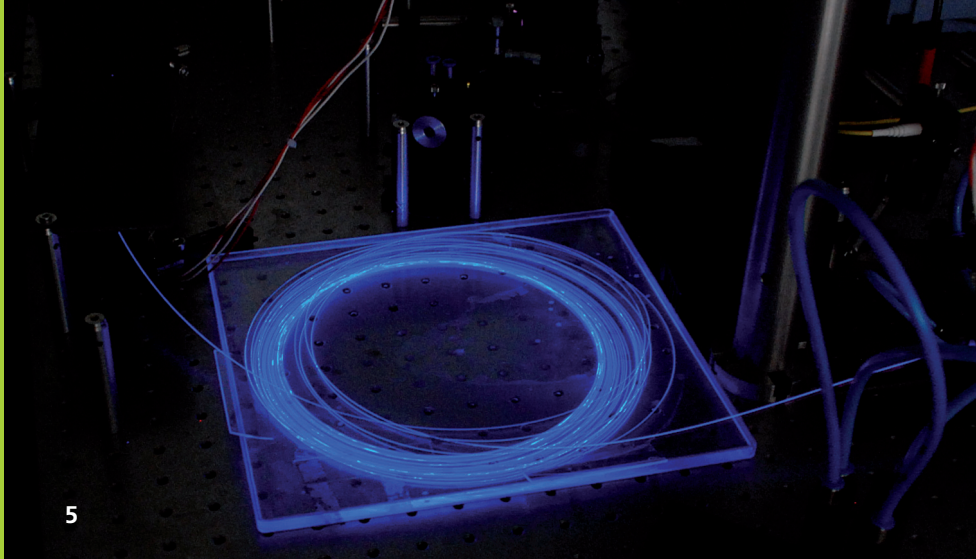
2 *Schematic of setup and procedure to inscribe the FBGs.*

Die obengenannten Limitierungen können überwunden werden, wenn zur Einschreibung der FBG ein Ultrakurz-puls-laser verwendet wird. Hier wird die Brechzahländerung nicht durch photosensitives Material gesteuert, sondern das Glas punktuell aufgeschmolzen. Dies ist durch nichtlineare Absorption aufgrund der hohen Lichtintensitäten im Fokus des Ultrakurzpuls-lasers möglich. Die Pulsdauer muss dafür allerdings im Femtosekundenbereich liegen. Femtosekunden-puls-geschriebene FBG zeichnen sich durch hervorragende Eigenschaften aus: Sie können direkt ohne Vorbehandlung der Faser in selten-erd-dotierten Fasern eingeschrieben werden /1/ und sie sind unempfindlich gegenüber Temperaturen bis zu 1000 °C.

Mittels der Technik des Phasenmasken-Scanning /2/ ist es möglich, großflächige FBG in Large Mode Area (LMA) Fasern einzuschreiben. Hierzu wird der Laserstrahl eines nachverstärkten Ultrakurzpuls-Lasersystems durch eine Zylinderoptik auf den Faserkern fokussiert. Die streifenförmige Änderung der Brechzahl wird durch ein Transmissionsgitter aus geätztem Quarzglas – der Phasenmaske – zwischen Faser und Optik erreicht (Abb. 1). Faser und Phasenmaske werden starr zueinander fixiert und unter dem Laserstrahl bewegt, um großflächige Strukturen einzuschreiben (Abb. 2). Auf diese Weise konnten Gitter mit Reflektivitäten von über 95 % bei einer Wellenlänge von 1075 nm direkt in selten-erd-dotierten LMA-Fasern realisiert werden (Abb. 3). Die FBG wurden anschließend in einem Faser-Laser-Aufbau charakterisiert (Abb. 4). Die Kavität bestand dabei aus dem FBG an einem Ende und der Fresnelreflexion (ca. 4 %) am anderen Ende. Die verwendete Ytterbium-dotierte Faser (Nufern 20/400) ist bei 1075 nm leicht multimodig. Durch ein spezielles Design des FBG konnte jedoch ein stabiler Faserlaserbetrieb erreicht werden. Auf diese Weise konnten im kontinuierlichen Betrieb 230 W erreicht werden (Abb. 5), wobei die Maximalleistung durch die verwendete Pumpdiode begrenzt war /3/.

These limitations can be overcome if an ultra-short pulse laser is used for inscription. Here, the refractive index change is not limited by photo sensitive materials. Instead, the glass is only locally melted in the focal volume because of nonlinear absorption due to the high light intensities. However, this requires pulse durations within the femtosecond range. Femtosecond-written FBGs are characterized by some outstanding characteristics: they can be inscribed directly in rare-earth doped fibers without the need for pre-processing /1/ and they resist temperatures up to 1000 °C.

Using the so-called phase mask scanning technique /2/, it is possible to inscribe enlarged FBGs even into LMA fibers. Therefore, the laser beam of an amplified ultra-short pulse laser system is focussed into the fiber core with a cylindrical lens. In order to obtain a lamellar refractive index change, a transmission grating (etched fused silica) – the phase mask – is mounted in between fiber and optics (Fig. 1). Fiber and phase mask are locked into position to each other and moved under the laser beam in order to structure larger areas (Fig. 2). In this manner, FBGs with reflectivities above 95 % at a wavelength of 1075 nm could be obtained directly in rare earth doped LMA-fiber (Fig.3). The FBGs were characterized in a fiber laser setup (Fig. 4), where the cavity consists of the FBG on one end and the Fresnel reflection (ca. 4 %) on the other end. Although the Ytterbium fiber (Nufern 20/400) used supports few modes at 1075 nm, stable laser operation could be achieved using a specially designed FBG. This way, a continuous wave output of 230 W could be obtained (Fig. 5), where the maximum power was limited only by the pump diode /3/.



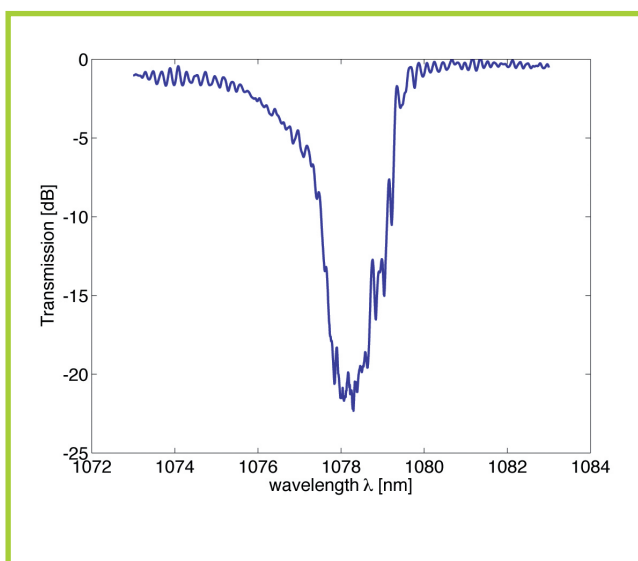
5

Ein weiteres Ziel unserer Forschungen ist es, diesen hohen Grad an Integration der optischen Komponenten auch bei gepulsten Faserlasern zu erreichen. Bei solchen Faserlasern sind gechirpte FBG nötig, um die Pulse zeitlich zu strecken und zu komprimieren und die Dispersion auszugleichen. Unsere Gruppe gehört zu den ersten weltweit, die solche FBG mit ultrakurzen Pulsen demonstrieren konnte /4,5/.

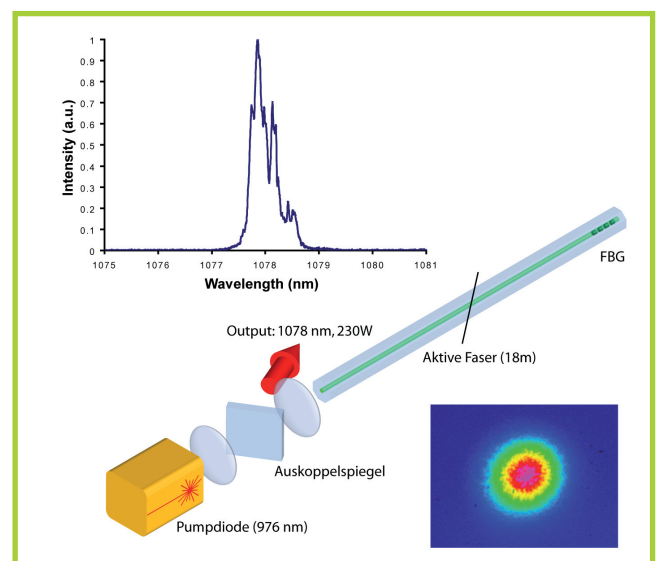
Die vorgestellten Arbeiten werden durch das BMBF im Rahmen der Projekte FABRI (FKZ: 13N9099) und One2FEL (FKZ: 13N9687) gefördert.

A further aim of our research is to achieve a high degree of integration for ultra-short pulsed fiber lasers, too. In those lasers, chirped FBG are needed to stretch and compress pulses as well as for dispersion compensation. Our group is the first worldwide to demonstrate the realization of such FBGs with ultra-short pulses /4,5/.

The present work was funded by the BMBF within the projects FABRI (FKZ: 13N9099) and One2FEL (FKZ: 13N9687).



3 Transmissionsspektrum eines FBG in einer Ytterbium-dotierten LMA-Faser. / Transmission spectrum of a FBG in an Ytterbium doped LMA fiber.



4 Aufbau und Spektrum des monolithischen 230 W Faserlasers. / Setup and spectrum of the monolithic 230 W fiber laser.

Literatur/References

/1/ Wikszak, E.; Thomas, J.; Burghoff, J.; Ortac, B.; Limpert, J.; Nolte, S.; Fuchs, U.; Tünnermann, A.: Erbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg grating. *Optics Letters*. Vol. 31. Issue 16. pp. 2390-2392. (2006).

/2/ Thomas, J.; Wikszak, E.; Clausnitzer, T.; Fuchs, U.; Zeitner, U. D.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Inscription of fiber Bragg gratings with femtosecond pulses using a phase mask scanning technique. *Applied Physics A*. Vol. 86. Issue 2. pp. 153-157 (2007).

/3/ Stutzki, F.; Jauregui, C.; Voigtländer, C.; Thomas, J.; Limpert, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Passively stabilized 215-W monolithic CW LMA-fiber laser with innovative transversal mode filter. *Photonics West/LASE 2010*. San Francisco. USA. Paper 7580-55.

/4/ Thomas, J.; Voigtländer, C.; Schimpf, D.; Stutzki, F.; Wikszak, E.; Limpert, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Continuously chirped fiber Bragg gratings by femtosecond laser structuring. *Optics Lett.* Vol. 33. Issue 14. pp.1560-1562 (2008).

/5/ Voigtländer, C.; Thomas, J.; Wikszak, E.; Dannberg, P.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Chirped fiber Bragg gratings written with ultra-short pulses and a tunable phase mask. *Opt. Lett.* Vol. 34. (2009).

AUTHORS

*Jens Thomas*¹

*Christian Voigtländer*¹

*Ria Becker*¹

*Fabian Stutzki*¹

*Cesar Jauregui-Misas*¹

Jens Limpert^{1,2}

Stefan Nolte^{1,2}

Andreas Tünnermann^{1,2}

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

²*Fraunhofer IOF*

CONTACT

Prof. Dr. Stefan Nolte

Phone: +49 3641 947 820

stefan.nolte@uni-jena.de