

# fs-Laser geschriebene Faser-Bragg-Gitter für integrierte Faserlaser



Jens Thomas<sup>1</sup>



Elodie Wikszak<sup>1</sup>



Christian Voigtländer<sup>1</sup>



Stefan Nolte<sup>1</sup>



Andreas Tünnermann<sup>1,2</sup>

Faser-Bragg-Gitter (FBG) sind periodische Brechzahlmodifikationen des Faserkerns, die Licht einer bestimmten Wellenlänge reflektieren (Abb. 1). Analog zum dielektrischen Spiegel ist die Zentralwellenlänge der schmalbandigen Reflexion durch die Periode des FBG festgelegt. FBG für Anwendungen in der Telekommunikation werden herkömmlicherweise per Excimer- oder frequenzverdoppeltem Argon-Ionen-Laser in photosensitive Faserkerne belichtet. Dazu ist eine zeitaufwendige chemische Vorbehandlung des Faserkerns nötig, wie zum Beispiel die Anreicherung mit Wasserstoff. Bei aktiv dotierten Fasern, wie sie für Faserlaser eingesetzt werden, geraten diese Verfahren jedoch an ihre Grenzen, einerseits durch größere Kerndurchmesser, andererseits durch die bereits hohe Dotierung des Fasermaterials mit Seltenerdionen. Deshalb werden bisher für Faserlaser die FBG in eine passive Faser belichtet, die anschließend mit der aktiven Faser verbunden wird. Dieser Ansatz hat zwei Nachteile, zum einen die auftretenden Verluste bei der Verbindung von aktiver und passiver Faser, zum anderen Leistungsbegrenzungen durch die photoempfindliche Faser.

Diese Schwierigkeiten können mit Hilfe ultrakurzer Laserpulse überwunden werden. Fokussiert man ultrakurze Laserpulse in transparentes Material, kann man lokal im Fokus die optischen Eigenschaften wie zum Beispiel den Brechungsindex permanent ändern. Weil die Brechungsindexmodifikation auf nichtlinearer Absorption beruht, spielt die Photoempfindlichkeit nur eine untergeordnete Rolle. Auf diese Weise lassen sich flexibel vergrabene Wellenleiter im Innern verschiedenster Gläser und Kristalle realisieren.

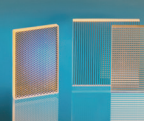
Die Anwendung reicht von frequenzverdoppelnden Wellenleitern /1/ bis hin zu komplexen dreidimensionalen Wellenleiterarrays /2/.

Mittels ultrakurzer Pulse können FBG nun auch in hochdotierte Fasern eingeschrieben werden. Allerdings muss der Laserfokus, im Gegensatz zu herkömmlichen Techniken, präzise auf den Faserkern ausgerichtet werden. Nur im Fokus ist die Leistungsdichte hoch genug, um den Brechungsindex durch nichtlineare Absorption permanent zu ändern. Für die periodische Modulierung der Brechzahl entlang der Faser wird vor der Faser ein Phasengitter angebracht. Das Phasengitter wurde zuvor mittels Elektronenstrahlolithographie in einem Quarzglassubstrat hergestellt. Beim Einschreiben des FBG wird der Laserstrahl nur in eine Richtung mit einer Zylinderlinse fokussiert, und zwar senkrecht zur Faser und parallel zum Phasengitter. Um dennoch die hohen Leistungsdichten im Bereich von  $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> im Fokus zu erreichen, benötigt man z. B. 50 fs kurze Pulse mit mehr als 200  $\mu$ J Pulsenergie. Dies kann mit einem modernen »Chirped Pulse Amplification« (CPA)-System erreicht werden.

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

<sup>2</sup> Fraunhofer IOF

# fs-laser written fiber Bragg gratings for integrated fiber lasers



Fiber Bragg gratings (FBG) are periodical modifications of the fiber core and reflect light at a specific wavelength (Fig. 1). The central wavelength of the narrowband reflection can be precisely tuned with the period of the FBG analog to dielectric mirrors. The usual technique to fabricate FBG for telecommunication applications is to expose a photosensitive fiber core to the interference pattern of an excimer or a frequency doubled Argon-Ion-laser. In order to have a photosensitive fiber core, it is necessary to prepare it chemically using a time-consuming process e.g. hydrogen loading. This technique comes to its limit with actively doped fibers, which are used for fiber lasers, due to bigger core diameters and the high doping concentration of rare earth ions. The common solution for fiber lasers is to fabricate the FBG in a passive fiber and to splice this to the active fiber afterwards. This exhibits two drawbacks, the additional losses due to the joint between active and passive fiber and the power limitations of the photosensitive fiber material.

These difficulties can be overcome by using ultra short laser pulses. If such intense pulses are focused inside a transparent material, it is possible to permanently alter the optical properties such as the refractive index locally within the focal volume. Because the induced modification is based on nonlinear absorption a photosensitivity of the material is not required.

Using this approach buried waveguides in various glasses and crystals have been realized. Applications range from frequency doubling in waveguides /1/ to complex three-dimensional waveguide arrays /2/.

With ultra short pulses, FBG can also be directly inscribed in highly doped fibers. In contrast to conventional techniques, the laser focus has to be aligned precisely to the fiber core. Only within the focus the intensity is high enough to induce nonlinear absorption for a permanent change of the refractive index. To get a periodical modulation of the refractive index along the fiber, a phase grating is placed before the fiber. This phase grating has been fabricated beforehand using electron lithography and ion beam etching. For the inscription of the FBG the laser beam is only focused perpendicular to the fiber and parallel to the phase mask. In order to obtain the high intensity of  $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> necessary for nonlinear modifications one needs e.g. 50 fs short pulses with more than 200 μJ pulse energy – easily obtainable with a modern Chirped Pulse Amplification (CPA) System.

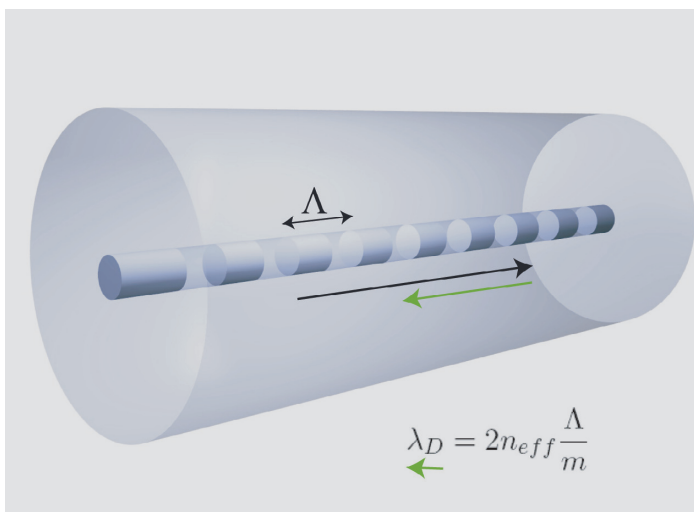


Abb. 1:  
Schema eines Faser-Bragg-Gitters.

Fig. 1:  
Schematic of a fiber Bragg grating.

Zum Einschreiben des FBG wird die Faser mit dem Phasengitter mit einer Geschwindigkeit von 4 mm/min unter dem Laserstrahl bewegt (Abb. 2). Auf diese Weise kann man FBG beliebiger Länge herstellen /3/. Dabei spielt die chemische Zusammensetzung der Faser keine Rolle. Die Einschreibung von FBG direkt in aktive seltenerd-dotierte Fasern wird dadurch ermöglicht /4/.

Für die Anwendung in einem Faserlaser (Abb. 3) wurde zum Beispiel ein FBG mit einer Periode von  $0,717 \mu\text{m}$  in eine polarisationserhaltende mit Ytterbium dotierte Faser eingeschrieben. Je nachdem, welche Polarisationsrichtung das Licht besitzt, wird es entweder bei  $1043,26 \text{ nm}$  oder  $1043,5 \text{ nm}$  schmalbandig ( $\text{FWHM} < 0,05 \text{ nm}$ ) reflektiert. Die Spektren zeigt Abb. 4. Die Faser wurde dann in einem integrierten Faserlaser getestet, der mit einer Halbleiterdiode bei  $978 \text{ nm}$  gepumpt wurde. Als Resonatorspiegel dienten an einem Faserende das hochreflektive FBG und die breitbandige Fresnelreflexion am anderen Ende /5/.

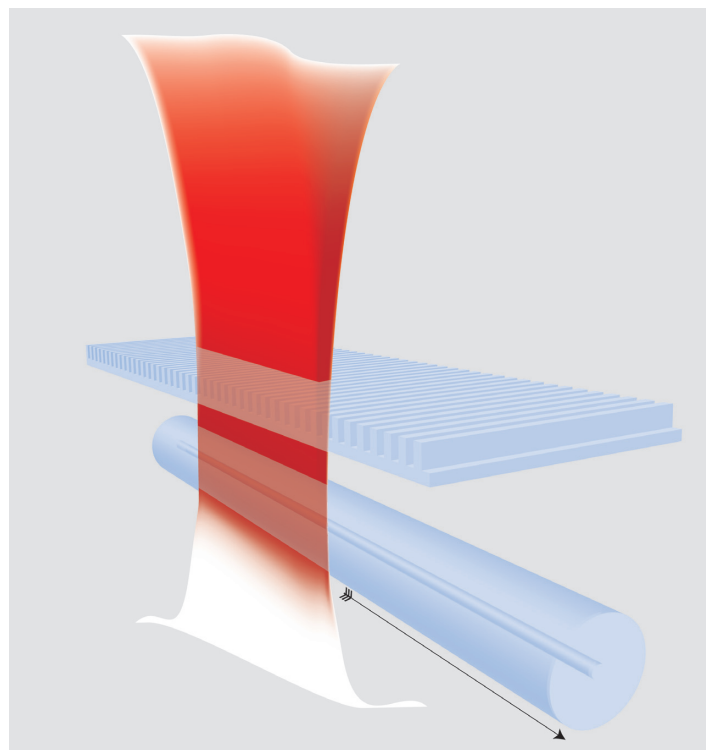
Da die FBG direkt in die Faser integriert sind, stellen sie essentielle Komponenten für die nächste Generation kompakter und hochstabiler Faserlaser dar. Der größte Vorteil des Einschreibens mit ultrakurzen Pulsen liegt darin, dass verschiedenste Fasern, inklusive aktiv dotierte Fasern, mit großem Kernquerschnitt erschlossen werden können. Solche Fasern sind insbesondere als Komponenten für industrielle Hochleistungsfaserlaser wichtig.

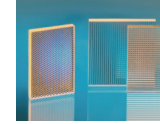
#### Literatur:

- /1/ Thomas, J.; Heinrich, M.; Burghoff, J.; Ancona, A.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Femtosecond laser-written quasi-phase-matched waveguides in lithium niobate, *Appl. Phys. Lett.* 91, 151108 (2007).
- /2/ Szameit, A.; Kartashov, Y. V.; Dreisow, F.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Torner, L.: Observation of Two-Dimensional Surface Solitons in Asymmetric Waveguide Arrays, *PRL* 98, 173903 (2007).
- /3/ Thomas, J.; Wikszak, E.; Clausnitzer, T.; Fuchs, U.; Zeitner, U.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Inscription of fiber Bragg gratings with femtosecond pulses using a phase mask scanning technique, *Appl. Phys. B* 86, 153–157 (2007).
- /4/ Wikszak, E.; Thomas, J.; Burghoff, J.; Ortaç, B.; Limpert, J.; Nolte, S.; Fuchs, U.; Tünnermann, A.: Erbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg grating, *Optics Letters* 31, 2390–2392 (2006).
- /5/ Wikszak, E.; Thomas, J.; Klingebiel, S.; Ortaç, B.; Limpert, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Linearly polarized ytterbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg gratings, *Optics Letters* 32, 2756–2758 (2007).

Abb. 2:  
Prinzip des Einschreibens der FBG  
mit ultrakurzen Pulsen.

Fig. 2:  
Principle of the inscription of FBGs  
with ultra short pulses.





For the inscription of the FBG, fiber and phase grating are synchronously moved with a velocity of 4 mm/min with respect to the laser beam (Fig. 2). This way, FBGs of arbitrary length can be written /3/. As the fiber material plays only a minor role the inscription of FBGs into rare earth doped fibers is possible /4/.

For use in a fiber laser setup (Fig. 3), a FBG with a period of 0.717  $\mu\text{m}$  has been inscribed into a polarization maintaining Ytterbium doped fiber. Depending on the polarization, light is reflected with a very narrow bandwidth (FWHM < 0.05 nm) at 1043.26 nm or 1043.5 nm respectively (Fig. 4). The fiber has been tested in an integrated fiber laser which has been pumped with a laser diode at wavelength of 978 nm. We used the highly reflective FBG at one end of the fiber and the broadband fresnel reflection at the other end of the fiber as cavity mirrors /5/.

Because the FBGs can now be written into active fibers, they represent essential components for the next generation of compact and stable fiber lasers. The advantage of ultra short pulses is that FBGs can be inscribed directly into various highly doped fibers with large core diameters. Such fibers are currently used in industrial high power fiber lasers.

#### References:

- /1/ Thomas, J.; Heinrich, M.; Burghoff, J.; Ancona, A.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Femtosecond laser-written quasi-phase-matched waveguides in lithium niobate, *Appl. Phys. Lett.* 91, 151108 (2007).
- /2/ Szameit, A.; Kartashov, Y. V.; Dreisow, F.; Pertsch, T.; Nolte, S.; Tünnermann, A.; Torner, L.: Observation of Two-Dimensional Surface Solitons in Asymmetric Waveguide Arrays, *PRL* 98, 173903 (2007).
- /3/ Thomas, J.; Wikszak, E.; Clausnitzer, T.; Fuchs, U.; Zeitner, U.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Inscription of fiber Bragg gratings with femtosecond pulses using a phase mask scanning technique, *Appl. Phys. B* 86, 153–157 (2007).
- /4/ Wikszak, E.; Thomas, J.; Burghoff, J.; Ortaç, B.; Limpert, J.; Nolte, S.; Fuchs, U.; Tünnermann, A.: Erbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg grating, *Optics Letters* 31, 2390–2392 (2006).
- /5/ Wikszak, E.; Thomas, J.; Klingebiel, S.; Ortaç, B.; Limpert, J.; Nolte, S.; Tünnermann, A.: Linearly polarized ytterbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg gratings, *Optics Letters* 32, 2756–2758 (2007).

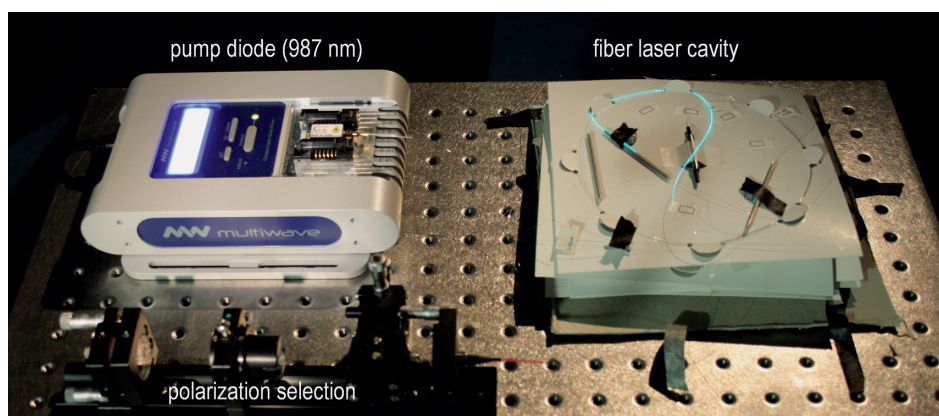


Abb. 3: Aufbau des linear polarisierten Faserlasers.

Fig. 3: Setup of the linearly polarized fiber laser.

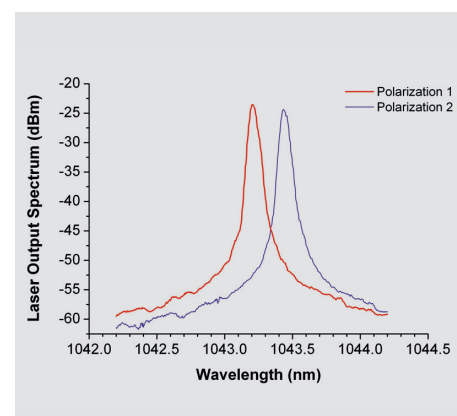


Abb. 4: Ausgangsspektrum des Ytterbium dotierten Faserlasers.

Fig. 4: Output spectrum of the Ytterbium doped fiber laser.