

Von der strukturierten Faser zum Faserlaser

Herstellung and Anwendung neuartiger Faserlaser

● Faserlaser sind kompakt, langlebig und haben eine ausgezeichnete Strahlqualität. Deshalb finden Faserlaser verschiedenster Ausgangsleistungen zunehmendes Interesse in der Mikrobeschriftung, Mikromaterialbearbeitung und in der Automobilindustrie. In diesem Artikel sollen neben den Anwendungsmöglichkeiten dieser neuartigen Lichtquellen vor allem auch die erforderlichen Technologien zur Herstellung von strukturierten und laseraktiven Fasern vorgestellt werden.

Die Anwendung von optischen Fasern für die passive und dämpfungsarme Übertragung von Nachrichtensignalen mit extremen Bandbreiten und über große Entfernungen hat heute weite Verbreitung gefunden. Darüber hinaus etablieren sich optische Fasern inzwischen aber auch zunehmend als aktive und stabile Faserlaser-Lichtquellen mit bester Strahlqualität und gleichzeitig hoher Ausgangsleistung. Für die Optimierung der Faserlasereigenschaften bieten neue Möglichkeiten zur Strukturierung des Kern- und Mantelbereichs der Faser vielfältige Optionen.

Für die Realisierung eines Faserlasers sind drei Grundfunktionen erforderlich:

- Dotierter, aktiver und leistungsbeständiger Laserkern
- Pumpkern zur effizienten Einkopplung des Anregungslichts
- Resonator zur Strahlungsrückkopplung im Laser

Die Strukturierung innerhalb einer Faser kann dabei in unterschiedlicher Weise vorteilhaft genutzt werden. Sie kann sich auf die Form der Kernstrukturen, auf die Einbringung von Kapillar-Hohlräumen oder auch auf lokale Strukturen wie Faser-Bragg-Gitter beziehen. Speziell kann so etwa die Modenfeldgröße (und damit die Leistungsdichte im Laserkern), die numerische Apertur des Pumpkerns oder die Geometrie des Pumpkerns gezielt gesteuert werden. Weiterhin kann z. B. mit Faser-Bragg-Gittern die Resonatorspiegel-Funktion in die Faser direkt in-

DIE AUTOREN

VOLKER REICHEL

Volker Reichel wurde am 5. Februar 1965 in Jena geboren. 1989 schloss er sein Physikstudium an der Friedrich-Schiller-Universität in Jena ab. Seitdem arbeitet er am IPHT an der Entwicklung von Charakterisierungsmethoden für optische Fasern mit speziellen Eigenschaften und dem Aufbau und der Untersuchung von Faserlasern.

Seit Mitte 2006 leitet er im Bereich „Optische Fasern und Faseranwendungen“ die Abteilung „Faseroptische Module“ und ist insbesondere für die aktiven Fasermodule verantwortlich.



KAY SCHUSTER

Kay Schuster wurde am 28. Juni 1965 in Beetzendorf geboren. Er studierte Chemie an der Martin-Luther-Universität Halle/Saale und promovierte 1995 an der Technischen Universität Karlsruhe. Seit 1996 ist er am IPHT Jena tätig und beschäftigt sich derzeit mit der Herstellung von Spezialfasern für passive, aktive und sensorische Anwendungen.



JENS KOBELKE

Jens Kobelke wurde am 2. Februar 1959 in Merseburg geboren. Er studierte Chemie und promovierte 1986 an der Technischen Hochschule „Carl Schorlemmer“ Merseburg. Seitdem ist er auf dem Gebiet der Entwicklung und Herstellung optischer Spezialfasern auf Basis unterschiedlicher Glasmaterialien am IPHT tätig.



JOHANNES KIRCHHOF

Johannes Kirchhof wurde am 11. Februar 1947 in Sangerhausen geboren. Er studierte Chemie und promovierte 1973 an der Friedrich-Schiller-Universität in Jena. 1980 begann er seine Arbeiten zur Forschung und Entwicklung von Lichtleitfasern, seit 1990 als Leiter der jetzigen Abteilung „Optische Fasertechnologien“ im IPHT.



HARTMUT BARTELT

Hartmut Bartelt (Jahrgang 1951) studierte Physik an den Universitäten Karlsruhe und Erlangen-Nürnberg. Nach Promotion (1980) und Habilitation (1985) war er am Forschungszentrum der Siemens AG in Erlangen tätig. Seit 1994 ist er Professor an der Universität Jena und Forschungsbereichsleiter „Optische Fasern und Faseranwendungen“ im Institut für Photonische Technologien.



Volker Reichel
Dr. Kay Schuster
Dr. Jens Kobelke
Dr. Johannes Kirchhof
Prof. Dr. Hartmut Bartelt
Institut für Photonische Technologien
Albert-Einstein-Straße 9
07745 Jena
Tel.: +49 (0) 3641/206275
Fax: +49 (0) 3641/206298
E-Mail: volker.reichel@ipht-jena.de
E-Mail: kay.schuster@ipht-jena.de
E-Mail: jens.kobelke@ipht-jena.de
E-Mail: johannes.kirchhof@ipht-jena.de
E-Mail: hartmut.bartelt@ipht-jena.de

tegiert werden. Unter Nutzung dieser vielfältigen Möglichkeiten sind heute Faserlaser möglich, die gute Effizienz mit höchsten Ausgangsleistungen, extremer Strahlqualität und Fokussierbarkeit bei gleichzeitig guter thermischer Stabilität kombinieren [1].

In den folgenden Abschnitten werden diese Möglichkeiten mit verschiedenen experimentellen Ergebnissen näher erläutert.

Herstellungstechnologien für strukturierte Fasern mit laseraktivem Kern

Die Anwendung von Mikrostrukturierungstechnologien in Faserlasern eröffnet ein weites Feld zur Beeinflussung des Lichtpropagationsverhaltens. So lassen sich aufgrund der großen Brechzahldifferenz zwischen Quarzglas und Luft beispielsweise numerische Aperturen von 0,5 und mehr realisieren. Dies ist mit herkömmlichen Mitteln wie Kodotierung oder Ummantelung mit niedrigbrechenden Polymeren nahezu unmöglich. Auch für die präzise Einstellung von sehr geringen Brechzahldifferenzen, definierten Dispersions- und Polarisations-eigenschaften sowie für die Leistungsbeständigkeit von „Large-Mode-Area“-Fasern und die Unterdrückung unerwünschter nichtlinearer Effekte ist eine geeignete Mikrostrukturierung gegenüber kompakten Strukturen deutlich im Vorteil.

Bei der Herstellung mikrostrukturierter Fasern unterscheidet man zwei prinzipielle Möglichkeiten [2].

Die erste Faservariante besteht aus einem einzelnen Laserkern sowie aus einem mikrostrukturierten Claddingbereich, der durch eine definierte Lochanordnung charakterisiert ist („Photonische Kristallfaser“; [3] bis [5], Abb. 1a und 1b).

Bei der zweiten Variante handelt es sich um eine „all-solid“ Faserlösung, bei der nur der Laserkern aus mikrostrukturierten Elementen besteht (Abb. 1c). Ziel hierbei ist ein geringer Brechzahlkontrast zwischen Laser- und Pumpkern bei gleichzeitig hohem Dotierungsniveau. Die Seltenerd-Dotierung erfordert in der Regel eine Codotierung mit z. B. Aluminium zur Löslichkeitsverbesserung der Seltenerdionen im Quarzglas. Die Codotierung wiederum ist mit einem erheblichen Anstieg der Brechzahl verbunden. Zur Absenkung der mittleren Brechzahl werden die Einzelelemente des mikrostrukturierten Kerns vorab mit fluordotiertem brechzahl-abgesenktem Quarzglas ummantelt.

Zur Herstellung aktiv dotierter Lasermaterialien wird zunächst eine poröse SiO₂-Schicht an der Innenseite eines hochreinen Quarzglasrohres mittels Modifizierter Chemischer Dampfabscheidung (Modified

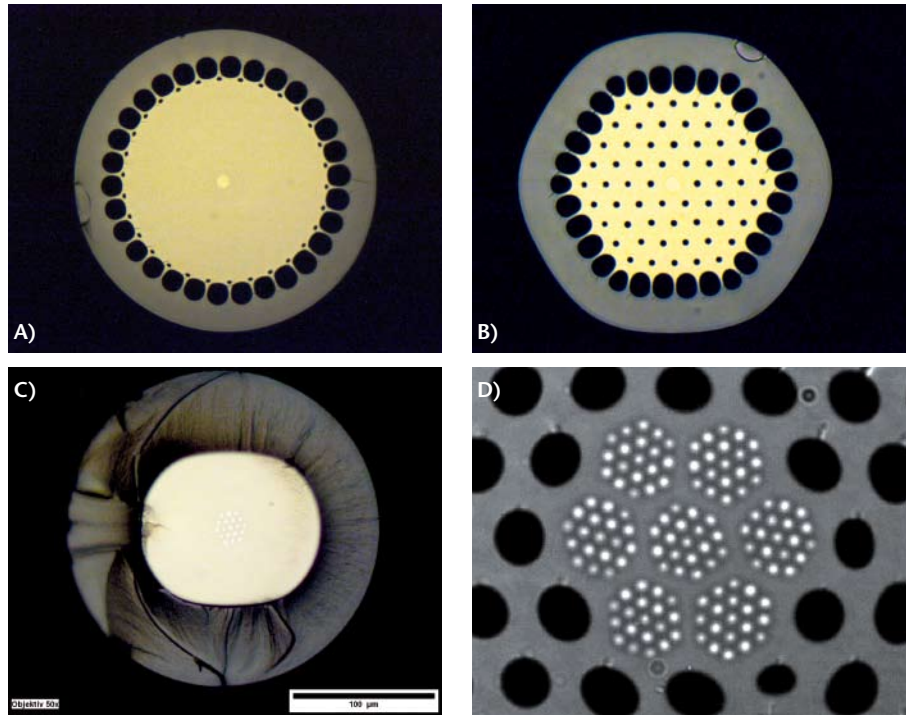


ABB. 1: Beispiele verschiedener mikrostrukturierter optischer Fasern mit Seltenerd-dotierung für Faserlaser A) kompakter Laserkern – kompakter Pumpkern / „Air-Clad“; B) kompakter Laserkern – mikrostrukturierter Pumpkern / „Air-Clad“; C) filamentierter Laserkern – kompakter Pumpkern; D) filamentierter Laserkern – mikrostrukturierter Pumpkern).

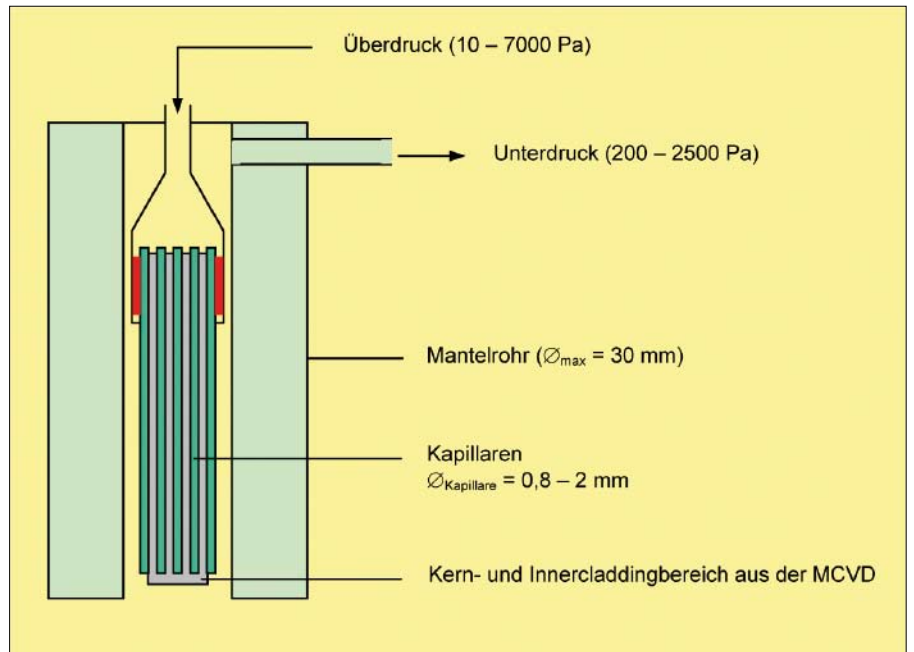


ABB. 2: Schematische Darstellung der mikrostrukturierten Preform sowie der Druckführung im Kapillarbereich. Der Unterdruck im Außenmantelbereich dient der besseren Fixierung der Struktur.

Chemical Vapor Deposition, MCVD) abgetrennt. Dabei werden die gasförmigen Ausgangskomponenten (hier: SiCl₄ und O₂) bei einer Temperatur von ca. 1500°C zur Reaktion gebracht. Das Quarzglasrohr wird anschließend mit einer wässrig-alkoholischen Lösung von bspw. YbCl₃ und AlCl₃ befüllt. Über die Porosität der abgeschie-

denen Schicht und die Yb- bzw. Al-Konzentration der Lösung kann der Seltenerdgehalt in der späteren Preform eingestellt werden. Nach Entfernung des Lösungsmittels wird die getränkte, poröse Schicht weiteren Sinterungs- und Verglasungsschritten bei Temperaturen bis zu 1900°C unterzogen. Der letzte Schritt zur Herstellung einer Sel-

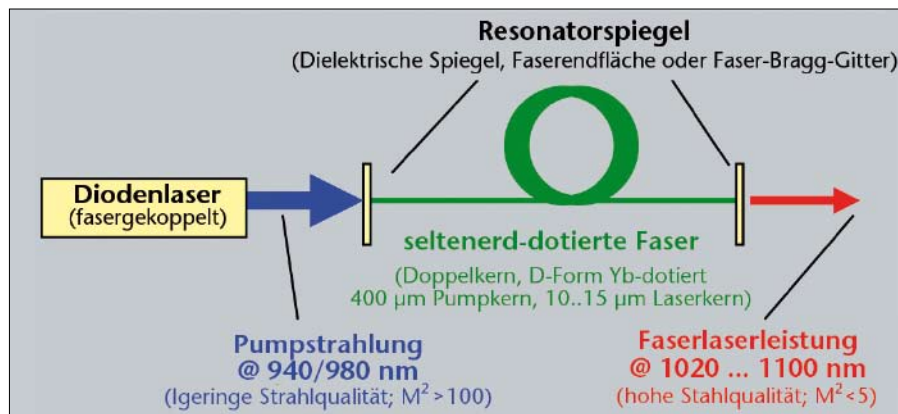


ABB. 3: Schema eines endgepumpten Faserlasers.

tenerd-dotierten Preform besteht im Kollabieren des beschichteten Rohres bei etwa 2300 °C.

Für die in Abb. 1a gezeigte Variante einer Laserfaser kann die beschriebene Vorform direkt zur Weiterverarbeitung nach dem sogenannten Stack-and-Draw-Verfahren eingesetzt werden. Dazu wird die Vorform mit einem Ring aus Kapillaren und einem äußeren Rohr ummantelt (Stack). Die Kapillaren müssen nun mit einer Druckzuführung verbunden werden (Abb. 2), um ein Kollabieren während des Faserziehens zu verhindern. Die Herstellung der Faser erfolgt dann in einem Schritt.

Die in Abb. 1c aufgeführte Faser-Variante [6] erfordert mehrere Zwischenschritte. Zusätzlich erfolgt die Abscheidung in einem Fluor-dotierten Quarzglasrohr, welches im Vergleich zu undotiertem Glas eine erniedrigte Brechzahl aufweist. Nach Abscheidung, Lösungsdotierung, Sinterung, Verglasung und Kollabierung wird die Preform einem Nassätzschritt unterworfen, um einen Teil des Mantelmaterials zu entfernen. So können die erforderlichen geometrischen Parameter genau eingestellt werden. Danach wird die Preform an der Faserziehanlage zu

Stäben von ca. 1 mm elongiert. Die Stäbe werden dann hexagonal gepackt, an der MCVD-Apparatur gereinigt (im Chlorgasstrom) und mit einem Quarzglasrohr ummantelt. Die finale Geometrie (Doppel-D-Struktur) erhält die Preform dann durch einen weiteren Ummantelungsschritt sowie durch planares Abschleifen und Polieren.

Die hier beschriebenen Technologie-schritte können vielseitig abgewandelt und auch zur Herstellung wesentlich komplexerer Faserstrukturen eingesetzt werden, ein Beispiel dafür ist in Abb. 1d gezeigt.

Aufbau Faserlaser-System

Für Hochleistungs-Faserlaser hat sich die sogenannte Doppelkern-Faser durchgesetzt, bei der ein zentraler, laseraktiver Kern (typischer Durchmesser 10 ... 50 µm) von einem größeren Pumpkern (typischer Durchmesser 400 ... 1.000 µm) umgeben ist, in den über verschiedene Koppeltechniken das Pumplicht von meist fasergekoppelten Diodenlasern eingebracht wird. Über die Faserlänge wechselwirkt dieses Pumplicht mit dem laseraktiven Kernbereich und es entsteht zunächst spontane,

später stimulierte Verstärkung bzw. die gewünschte Laserstrahlung.

Das Grundprinzip eines endgepumpten Faserlasers ist in Abb. 3 schematisch dargestellt. Die seltenerd-dotierte Lichtleitfaser dient dabei als laseraktives Medium. Der Resonator wird aus der Faser selbst und den beiden Spiegeln an den Faserenden gebildet. Als Spiegel werden dielektrische, bulkoptische Spiegel, Faser-Bragg-Gitter und / oder die Faserendfläche selbst genutzt. Typischerweise wird ein hochreflektiver (nahe 100%) und ein teilreflektiver Spiegel (<10%) genutzt. Das Pumplicht wird durch den für die Laserwellenlänge hochreflektiven Spiegel in den größeren äußeren Pumpkern eingekoppelt. Die Laserstrahlung entsteht im inneren Laserkern und wird am Ende durch den teilreflektiven Spiegel ausgekoppelt.

Im Dauerstrich (cw)-Betrieb konnten mit am IPHT entwickelten Doppelkernfasern im Labor Ausgangsleistungen von mehr als 1 kW erreicht werden ([7], Abb. 4a). Die prinzipielle Möglichkeit von Spitzenwerten von mehreren kW Ausgangsleistungen mit nahezu monomodigem Profil konnte experimentell nachgewiesen werden [1]. Mikrostrukturierte aktive Fasern sind zwar noch im Entwicklungsstadium, jedoch konnten auch hier bereits Ausgangsleistungen von über 100 W erreicht werden [8]. Bemerkenswert bei diesen Experimenten ist die relativ geringe Länge der laseraktiven Faser von nur etwa 3 m.

Anwendungen

Neben vielen möglichen Anwendungen in der Materialbearbeitung (Abstandsschweißen, Schneiden, Bohren) eignen sich Faserlaser aufgrund ihrer hervorragenden Strahlqualität für die Mikromarkierung bzw. -beschriftung. Am IPHT wurde ein Demonstratorsystem zur Erzeugung kleinster

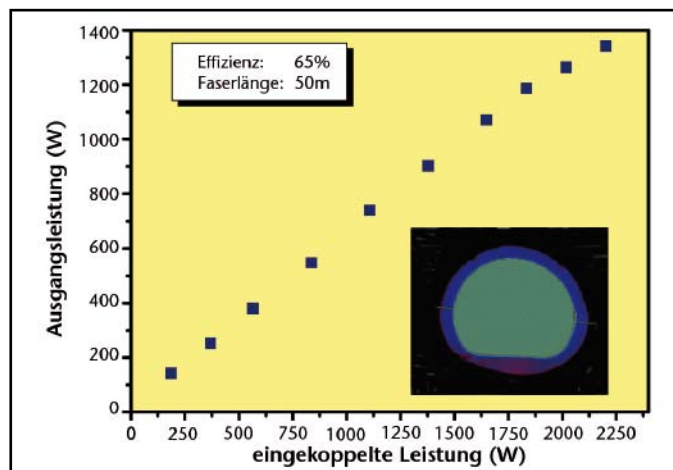


ABB. 4 A: Kennlinie eines cw-Faserlasers mit kompakter Doppelkernfaser.

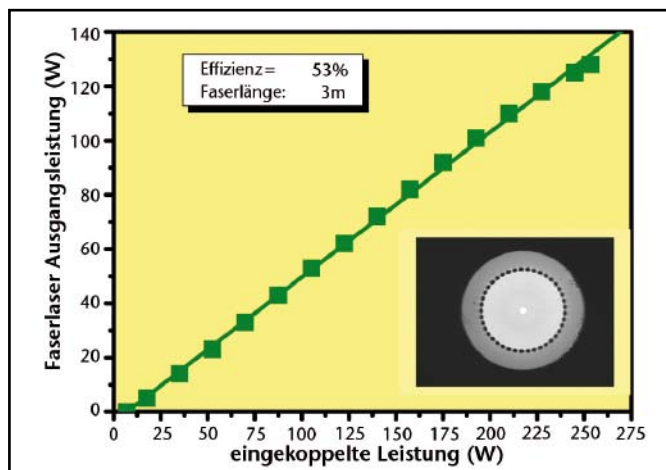


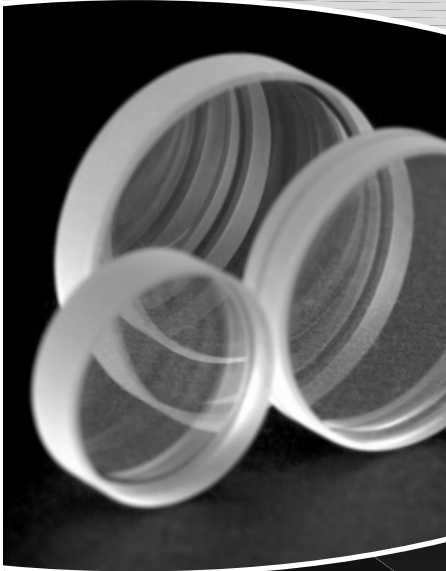
ABB. 4 B: Kennlinie eines cw-Faserlasers mit mikrostrukturierter Faser.

Fluorescence Filters

EDGE FILTERS

BANDPASS FILTERS

DICHROIC BEAM SPLITTERS



- ◆ Customized high-performance spectral characteristics
- ◆ Highly-resistant all-dielectric multilayer coatings
- ◆ User-defined filter size in single-substrate assembly



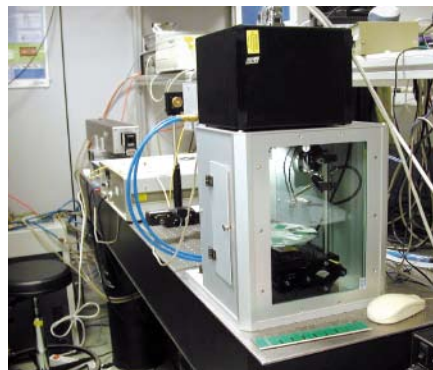
mso jena

Phone: +49(0) 36 41/35 29 30
E-mail: info@mso-jena.de

www.mso-jena.de



ABB. 5: Laboraufbau für Beschriftungssystem mit Faserlaser (links) Mikrobeschriftung von Federstahl (rechts).



Strukturen auf verschiedenen Materialien aufgebaut. Kernstück dieses Systems sind ein cw-singlemode Faserlaser mit einer Ausgangsleistung von ca. 3,5 Watt und ein 2D Scannersystem. Abb. 5 zeigt den Laboraufbau der Beschriftungseinheit. In Abb. 6 sind die Beschriftungsergebnisse auf verschiedenen Materialien zu sehen. Die dabei erzielten Spotgrößen lagen bei weniger als 20 µm.

DAS INSITUT

IPHT

Das Institut für Photonische Technologien (IPHT; bis Februar 2007: Institut für Physikalische Hochtechnologie) ist ein gemeinnütziges, außeruniversitäres Forschungsinstitut des Freistaates Thüringen.

Seine Mitarbeiter erforschen und entwickeln in den Forschungsbereichen Photonische Instrumentierung und Optische Fasern & Faseranwendungen innovative Lösungen für die Praxis.

Unter Nutzung moderner Mikro- und Nanostrukturtechnologien werden Ergebnisse der grundlagen- und anwendungsorientierten Forschung in neue Produktanwendungen umgesetzt.

Zusammenfassung und Ausblick

Die komplexen Technologien zur Herstellung mikrostrukturierter, laseraktiver Fasern wurden vorgestellt. Während Faserlaser mit mittleren Ausgangsleistungen bereits ihre Tauglichkeit in kommerziellen Systemen nachgewiesen haben, ist die aktuelle Entwicklung von Laserfasern vor allem auf höchste Leistungen in Laser- und Verstärkeranordnungen ausgerichtet. Die Möglichkeiten zur Nutzung von strukturierten Faserkernen eröffnen dabei ein erweitertes Entwicklungspotential zur Realisierung besonders effizienter und stabiler Systeme.

Literatur

- [1] T. Schreiber et al.: Paper 6453–41, Photonics West 2007, San Jose (USA)
- [2] J. Kirchhof et al.: Proc. SPIE 5951 (2005)
- [3] N. A. Issa: Applied Optics 43 (33), pp. 6191–6197, (2004)
- [4] St. J. Russel: Science, 299, pp. 358–362 (2003)
- [5] J. C. Knight, nature, 424, pp. 847–851 (2003)
- [6] J. Kobelke et al.: Paper 6453–67 Photonics West 2007, San Jose (USA)
- [7] A. Liem et al.: Postdeadline-Paper CPDD-2, CLEO 2004, San Francisco(USA)
- [8] J. Limpert et al.: Opt. Express 14, 2715–2720 (2006)