

Dotierte Photonische Kristallfasern - erweiterte Möglichkeiten zur Modifizierung der Propagationseigenschaften und zur Verbesserung der Anwendungsmöglichkeiten mikrostrukturierter Fasern

Jens Kobelke*, Hartmut Bartelt*, Johannes Kirchhof*, Sonja Unger*, Kay Schuster*, Klaus Mörl*,
Claudia Aichele*, Kyunghwan Oh**

*Institut für Physikalische Hochtechnologie e.V., Albert-Einstein-Strasse 9, 07745 Jena, Germany

**Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju, 506-712 South Korea

<mailto:jens.kobelke@ipht-jena.de>

Durch GeO_2 , P_2O_5 , SiF_4 kann die effektive Brechzahlstruktur photonischer Kristallfasern zusätzlich zu Lochpackungseinflüssen modifiziert werden. Der Einsatz GeO_2 - SiO_2 -innenbeschichteter Kapillaren als Faserkern-komponenten erlaubt auch bei hohem Luftanteil im indexführenden Kern photonischer Kristallfasern eine gute Transmission und spezifische Modenfeldverteilungen zu erzielen.

1 Einführung

Photonische Kristallfasern (PCF) werden üblicherweise aus undotiertem Quarzglas hergestellt [1]. Eine Ausnahme sind bislang seltenerd-dotierte Laserfasern mit mikrostrukturiertem Faserquerschnitt [2]. Ihr Hauptanwendungsfeld sind Leistungslaser bis in den kW-Bereich. Passive photonische Kristallfasern bestehen jedoch zumeist nur aus einem homogenen Material (z.B. Glas oder Polymer). Eine Kombination von Mikrostrukturierung und Modifizierung der Propagationseigenschaften mittels brechzahlverändernder Dotanden beschränkte sich bislang zumeist auf sogenannte „Hole assisted PCFs“ [3]. Dies sind Fasern mit typischen Querschnittsprofilen (ähnlich Standard-Telekom-fasern), jedoch mehreren Löchern im Claddingbereich. Typischerweise besitzen sie eine einmodige NIR-Transmissionscharakteristik. Der Einsatz materialstrukturierter Preformkomponenten, wie schichtstrukturierter dotierter Kapillaren bzw. Kernstäbe mit radialem Brechzahlprofil eröffnet jedoch weit mehr Möglichkeiten, optische Eigenschaften photonischer Kristallfasern zu modifizieren.

2 Herstellung der dotierten PCFs

Mittels MCVD-Verfahren wurden in einem Quarzglasrohr germanium-phosphor-dotierte Schichten abgeschieden. Diese bilden die Kernkomponenten der späteren PCF. Die Brechzahldifferenz der Schichten zum Substratrohr betrug $\Delta n_{\text{Dot}} = 0,015$. Die Gesamtschichtdicke war ca. $360 \mu\text{m}$. Als Cladding-Ausgangskomponente diente ein gleichdimensioniertes Quarzglasrohr. Hier wurden phosphor-fluor-dotierte SiO_2 -Schichten von einer Gesamtstärke von ca. $340 \mu\text{m}$ abgeschieden. Das Phosphor-Fluor-Verhältnis wurde so eingestellt, dass ein Matched-Index-Profil zum Substratrohr

erreicht wurde. Beide beschichtete Rohre wurden zu Kapillaren mit 1 mm Außendurchmesser elongiert und nach dem Stack-and-Draw-Verfahren zu mikrostrukturierten Fasern mit $125 \mu\text{m}$ bzw. $200 \mu\text{m}$ Durchmesser verzogen. Sieben GeO_2 -dotierte Kapillaren wurden in hexagonaler Geometrie als Kern angeordnet, umgeben von einer 3-Ring-Packung Claddingkapillaren (Abb.1 bzw. Tab.1).



Abb. 1 Mikroskopaufnahmen germaniumdotierter Fasern; links: voll kollabierte Referenzfaser (Tab.1: Faser K); Mitte und rechts: PCF mit hohlstrukturiertem Kern und Mantel und unterschiedlichen d/Λ (Tab.1: Faser A bzw. B;)

Alle Fasern wurden mit UV-aushärtbarem Acrylat beschichtet (Schichtdicke: ca. $50 \mu\text{m}$).

3 Charakterisierung

Das spektrale Transmissionsverhalten der Faser wurde mittels Cut-back-Methode bestimmt. Die Ein- und Auskopplung erfolgte mit speziellen Koppfasern, die in Kerndurchmesser und numerischer Apertur den PCFs angepaßt waren. Modenstruktur und Modenfelddurchmesser wurden mit einer NIR-Mikroskopkamera bestimmt.

4 Ergebnisse und Diskussion

Mit dem Übergang von der kompakten Faserstruktur (Faser K) zur mikrostrukturierten Faser B ändert sich das spektrale Propagationsverhalten

entscheidend. In der Kompaktfaser operieren die sieben germaniumdotierten Einzelsegmente mit einem Durchmesser von ca. $2,6 \mu\text{m}$ und einem Pitch von etwa $6 \mu\text{m}$ vorzugsweise als separate

Nr.	Kern				Cladding	
	\varnothing	d	d/ Λ	s	\varnothing	d/ Λ
K	$15 \mu\text{m}$	0	0	$2,6 \mu\text{m}$	$50 \mu\text{m}$	0
A	$18 \mu\text{m}$	$2 \mu\text{m}$	0,33	$0,2 \mu\text{m}$	$55 \mu\text{m}$	0,64
B	$22 \mu\text{m}$	$4 \mu\text{m}$	0,67	$0,1 \mu\text{m}$	$58 \mu\text{m}$	0,80
C	$33 \mu\text{m}$	$6 \mu\text{m}$	0,46	$0,5 \mu\text{m}$	$90 \mu\text{m}$	0,61

Tab. 1 Geometrische Parameter der germaniumdotierten PCFs (d : Lochdurchmesser, d/Λ : Loch-Pitch-Verhältnis, s : Ge-dotierte Schichtdicke)

Wellenleiter (Abb.3). Die niedrige numerischen Apertur ($NA = 0,038$) führt oberhalb 700 nm verstärkt zu kümmungsbedingte Verlusten. Die spektral aufgespalteten Verlustmaxima ($700 \text{ nm} - 1000 \text{ nm}$) weisen offensichtlich auf cut-off-bedingte Verluste hin, hervorgerufen durch geringe Unterschiede im Effektivquerschnitt der einzelnen Wellenleiter.

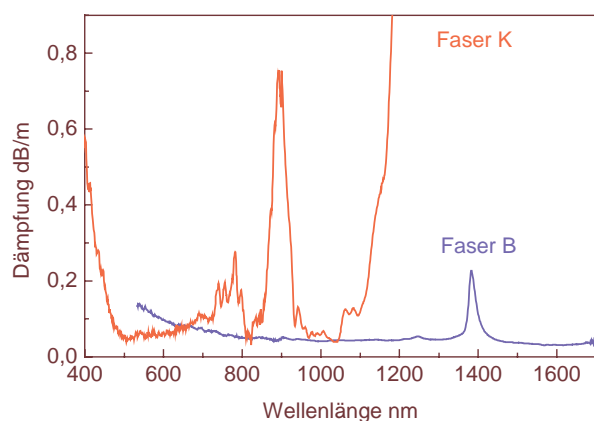


Abb. 2 Dämpfungsspektren der Kompaktfaser A im Vergleich zur mikrostrukturierten Faser B

Im Unterschied dazu ist für die Faser B ein stark gekoppeltes Propagationsverhalten aller germaniumdotierten Kernsegmente ($\varnothing \approx 22 \mu\text{m}$) kennzeichnend. Die IR-Dämpfungskante ist gegenüber der Kompaktfaser deutlich rotverschoben. Sie liegt oberhalb des untersuchten Spektralbereichs bis $1,7 \mu\text{m}$. Als Hauptursache ist eine deutlich veränderte Modenstruktur im Vergleich zur Kompaktfaser anzusehen. Diesen Trend bestätigen auch Simulationen des Profils der Fundamentalmode in Abhängigkeit von der Dotierungsschichtdicke (Abb. 4). Desweiteren treten im Cladding dotierungsbedingt höhere Luftfüllgrade als im Kern auf. Diese wirken sich ihrerseits erhöhend auf die effektive Brechzahl des Kernbereichs aus. Der um ca. 0,13 höhere d/Λ -Wert im Cladding läßt einen NA-

Zuwachs von ca. 0,02 gegenüber dem (rein) dotierungsbedingten Brechzahlprofil erwarten.

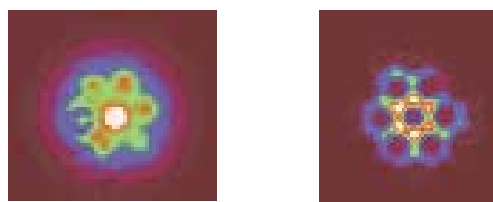


Abb. 3 Modenpattern der Kompaktfaser K ($NA = 0,038$) und der PCF B ($NA = 0,068$) bei 1060 nm

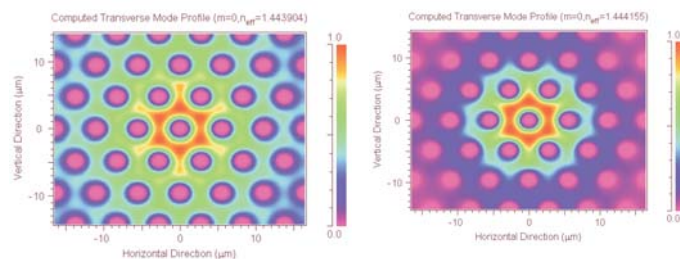


Abb. 4 Berechnetes Profil der Fundamentalmoden für mikrostrukturierte Fasern mit unterschiedlicher Schichtdicke s der Germaniumdotierung (links: $s = 0,23 \mu\text{m}$, rechts: $s = 0,4 \mu\text{m}$; $d/\Lambda = 0,45$; $\Delta n_{\text{Dot}} = 0,015$)

5 Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Unterstützung im Rahmen des Schwerpunktprogramms "Photonische Kristalle".

6 Literatur

- [1] J. Kirchhof, J. Kobelke, K. Schuster, H. Bartelt, R. Iliev, C. Etrich, F. Lederer, "Photonic Crystal Fibres", Photonic crystals: Advances in design, fabrication, and characterization", Ed. K. Busch, St. Lölkes, R. B. Wehrspohn, H. Föll, pp. 266-288, Wiley-VCH (2004)
- [2] J. Limpert, N. Deguil-Robin, I. Manek-Hönninger, F. Salin, F. Röser, A. Liem, T. Schreiber, S. Nolte, H. Zellmer, A. Tünnermann, J. Broeng, A. Petersson, and C. Jakobsen, "High-power rod-type photonic crystal fiber laser," Opt. Express **13**, 1055-1058 (2005)
- [3] N. Guan, K. Izoe, K. Takenaga, R. Suzuki, K. Himeno, "Hole-Assisted Single-Mode Fibers for Low Bending Loss" ECOC 2004, September 5-9, 2004, Stockholm, paper 3.3.5