

Photonische Kristallfasern (PCF) zur optischen Leistungsübertragung

Jens Kobelke, Kay Schuster, Volker Reichel, Hartmut Bartelt, Johannes Kirchhof, Anka Schwuchow, Hans-Joachim Pißler, Klaus Mörl, 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>

Es werden Photonische Kristallfasern (PCF) mit Air-Clad-Strukturen bezüglich ihrer numerischen Apertur, spektralen Transmissionsverhaltens und optischen Leistungsbeständigkeit untersucht und in ihren Parametern mit konventionellen polymerbeschichteten Transmissionsfasern verglichen. Auf Basis der Air-Clad-PCFs wurden durch Fused-Tapering-Verfahren 2x2 und 4x4 Faserkoppler hergestellt und charakterisiert.

1 Einführung

Photonische Kristallfasern (PCF) werden zumeist aus Quarzglas hergestellt [1]. Ein speziell interessanter Typ sind Air-Clad-Fasern, d.h. mikrostrukturierte Fasern mit einem massiven Quarzglaskern, eingebettet in eine oder mehrere Lochreihen. Damit stehen zahlreiche Möglichkeiten zur Herstellung verbesserter Transmissionsmedien und optischer Funktionsbauelemente für hohe Leistungsdichten zur Verfügung. Das Design der Luftringstruktur beeinflusst sowohl die numerische Apertur [2] als auch das thermische Leistungsdissipationsverhalten zwischen dem optisch wirksamen Kern und der polymerbeschichteten äußeren Faseroberfläche [3].

2 Herstellung der PCFs

Die Herstellung der PCFs erfolgte nach dem Stack-and-Draw-Verfahren auf Basis von Quarzglasrohren und -stäben aus Heraeus Suprasil F300. Die Preformen wurden zu Fasern mit Außendurchmessern von 125 μm und 200 μm verzogen. Durch Variation der Druckbedingungen an der PC-Preform konnte der Hohlraumanteil der mikrostrukturierten Fasern in weiten Bereichen verändert werden.

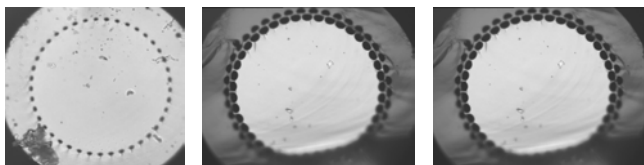


Abb. 1 Mikroskopaufnahmen von Air-Clad-PC Fasern, Außendurchmesser jeweils 200 μm , $d/\Lambda = 0,36$; 0,66 ; 0,78 (d : Lochdurchmesser, Λ : Lochmittenabstand)

Die Fasern wurden mit UV-aushärtbarem Acrylat bzw. thermisch aushärtendem Silikon-Elastomer beschichtet (Schichtdicke: ca. 50 μm).

3 Charakterisierung

Die Charakterisierung der PCFs erfolgte hinsichtlich folgender Eigenschaften: spektrale Dämpfung, Nahfeldverteilung, optisches Leistungseinkoppelverhalten. Das spektrale Transmissionsverhalten der Fasern wurde mittels Rückschneidemethode bestimmt. Die Ein- und Auskopplung erfolgte mit speziellen Koppelfasern, die in Kerndurchmesser und numerischer Apertur den PCFs angepaßt waren. Die Leistungsbeständigkeit wurde mit einem cw-Laser bei 940 nm und 980 nm untersucht. Die eingekoppelte Leistung wurde bis maximal 400 W variiert. Typischerweise wird die Leistungsbelastbarkeit der Fasern durch thermochemisch bedingte Degradationsprozesse des Polymercoatings limitiert. Um diese bewerten zu können, wurden Thermogravimetrie-Untersuchungen (TG) mit den ausgehärteten Coating-Polymeren bei einer Heizrate von 10 K/min in Luftatmosphäre durchgeführt.

4 Ergebnisse und Diskussion

Mit abnehmender Breite und steigender Länge der Verbindungsstege des Air Clads erhöht sich die numerische Apertur (NA) der PCF. Durch Vergrößerung des Luftanteils, insbesondere Verkleinerung der Stegbreite (Abb.1) steigt die numerische Apertur von 0,12 auf 0,60 (Abb. 2). Diese beeinflusst das optische Transmissionsverhalten der Faser maßgeblich, jedoch auch deren Energiedissipationsverhalten. Optische Verlustmechanismen am Kern (vzw. Absorption, Streuung) führen zur partiellen Umwandlung eingekoppelter Leistung in thermische Energie. Aus den TG-Untersuchungen der Coatings kann abgeschätzt werden, daß die thermische Belastungsgrenzen für das eingesetzte UV-Acrylat ca. 120°C, für Silikon-Elastomer ca. 250°C betragen. Diese Temperaturkennwerte entsprechen einem relativen Masseverlust von ca. 0,5 Ma.-%. Modellbetrachtungen zur thermischen Belastbarkeitsverhalten von Air-Clad-Fasern zeigen, daß die Ausbildung des radialen Faser-

daß die Ausbildung des radialen Faser-Temperaturprofils maßgeblich durch die Coatingeigenschaften beeinflusst wird (Abb.3).

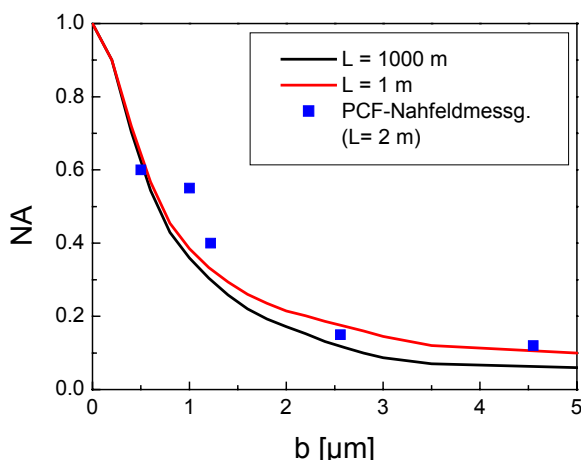


Abb. 2 Abhängigkeit der numerische Apertur der hergestellten Air-Clad-PCFs von der mittleren Stegbreite b ($\lambda = 1 \mu\text{m}$)

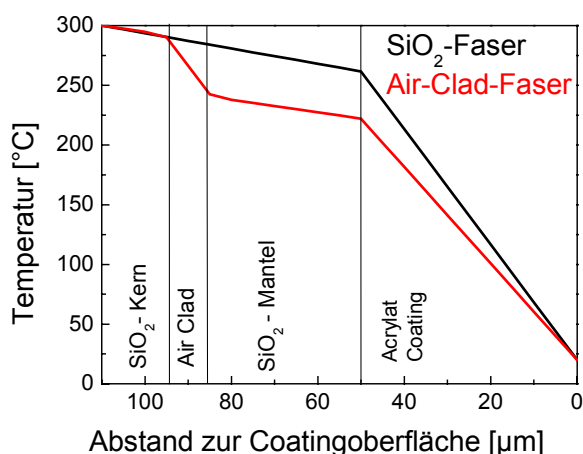


Abb. 3 Simuliertes radiales Temperaturprofil einer massiven SiO₂-Faser im Vergleich zu einer Air-Clad-PCF (Stegweite: 1 µm, Steglänge: 10 µm; Randbedingungen: Kerntemperatur durch Leistungsbelastung: 300°C, Coating-Außenoberfläche: 20°C, idealer konvektiver Wärmeübergang)

Untersuchungen zur Leistungsstabilität polymerbeschichteter Air-Clad-Fasern zeigen, dass bei moderaten Steglängen und Stegbreiten des Air-Clads die Degradationsschwelle maßgeblich durch die Thermostabilität des Coatings bestimmt wird. So zeigte eine silikonbeschichtete Air-Clad-Faser mit Quarzkerndurchmesser von 400 µm, Stegbreite $b = 5 \mu\text{m}$, Steglänge $w = 35 \mu\text{m}$ und $\text{NA} = 0,14$ bei einer Pumpleistung von ca. 160 W und Kurzzeitbelastung (1 min) keine Schädigungserscheinungen. Bei weiterer Leistungssteigerung setzte die Degradation an der Grenzfläche Quarzglas-Coating ein. Im Langzeittest lag die Belastungsgrenze um ca. 50 W. Die hohe Absorbanz des Coatings bei

940 nm bzw. 980 nm bedingt erhebliche thermische Belastungen an der Grenzfläche Quarzglas-Coatingpolymer. Darüber hinaus kommt der Coatingqualität (Materialhomogenität, gleichmäßige Aushärtung) und einer ausreichenden Schichtdicke eine erhebliche Bedeutung für die Leistungsstabilität der Faser zu.

Bei geringer numerischer Apertur des Air Clads besteht praktisch kein Leistungsstabilitätsvorteil gegenüber konventionellen Fasern mit gleichem Coatingmaterial.

Als Beispiel zur Anwendung von Air-Clad-Fasern in optischen Funktionselementen wurden 2x2 und 4x4 Air-Clad-Multimode-Faserkoppler mit einem Fused-Tapering-Verfahren hergestellt [4]. Die Ausgangskanäle der 2x2- und 4x4-Koppler zeigen eine gute Uniformität der Leistungsverteilung über einen weiten Wellenlängenbereich (800 nm – 1650 nm). Der maximalen Leistungsunterschied zwischen den Ausgangskanälen liegt beim 2x2 Koppler um 0,5 dB.

Die hergestellten Air-Clad-Faserkoppler weisen im Vergleich zu konventionellen Multimoden-Faserkopplern höhere Einfügeverluste auf. Verursacht werden diese durch den drastischen Querschnittsstrukturwechsel im Taperbereich der Koppler infolge vollständigen Kollabierens des Air-Clads.

5 Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Unterstützung im Rahmen des Schwerpunktprogramms "Photonische Kristalle" (SPP 1113).

6 Literatur

- [1] J. Kirchhof, J. Kobelke, K. Schuster, H. Bartelt, R. Iliew, 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] N. A. Issa " High numerical aperture in multimode microstructured optical fibers" Appl. Opt. **43**, 6191-6197 (2004)
- [3] J. Limpert, T. Schreiber, A. Liem, S. Nolte, H. Zellmer, T. Peschel, V. Guyenot, and A. Tünnermann, "Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation," Opt. Express **11**, 2982-2990 (2003)
- [4] Y. Kim, Y. Jeong, K. Oh, J. Kobelke, K. Schuster, J. Kirchhof "Multi-port NxN Multimode Air-Clad Holey Fiber coupler for High Power Combiner and Splitter" Opt. Lett. **30**, 2697-2699 (2005)