

SPEZIALFASERN erweitern Einsatzbereich von Faserlasern

Glasfasern mit rechteckiger anstatt runder Kerngeometrie erhöhen bei Singlemode- und Multimode-Faserlasern die nichtlinearen Schwellen und damit die in der Faser transportierbare Leistung.

#Faserlaser
#Rechteckgeometrie
#Schwellleistung
#Leistungssteigerung

AUTOR Holger Bäuerle | Vice Managing Director, Ceramoptec und Patrick Baer,
Gruppenleitung Faserlaser, Fraunhofer Institut für Lasertechnik

Optran-NCC-Glasfaser: Rohling
mit rechteckiger Kerngeometrie

Singlemode-Faserlaser verbinden Strahlqualität und Effizienz mit Nutzerfreundlichkeit – und sind daher sehr beliebt bei industriellen Anwendern. Typische Einsatzfelder sind Punkt- und Nahtschweißen, Be- und Entschichten, Fein- und Feinstschneiden sowie Wobbling und Markieren. Mittels aktiver Dotierung, üblicherweise mit seltenen Erden wie Ytterbium oder Thulium, lässt sich in Faserlasern Strahlung verschiedener Wellenlängen für unterschiedliche Applikationsszenarien erzeugen beziehungsweise verstärken.

Leistungseinschränkungen aufgrund nichtlinearer Effekte

Herkömmlichen Singlemode-Faserlasern sind allerdings Leistungsgrenzen gesetzt. Kommen als Singlemode-Lichtwellenleiter klassische Stufenindex-Quarzglasfasern mit runder Kerengeometrie zum Einsatz, so treten mit zunehmender Ausgangsleistung häufiger nichtlineare Effekte wie Brillouin- oder Raman-Streuung auf.

Bei marktüblichen Singlemode-Fasern (normierte Frequenz $V < 2,405$) lassen sich die Schwellwerte für den Eintritt dieser Effekte durch einen größeren Kernbereich anheben, wobei die Singlemodebedingung mit einer niedrigeren numerischen Apertur realisiert wird. Eine verringerte numerische Apertur erhöht allerdings die Anfälligkeit für Biegeverluste.

Um dies zu vermeiden, werden teilweise LMA-Fasern (Large Mode Area, $V > 2,405$) mit größerer resultierender Modenfläche verwendet. Diese sind jedoch im Grunde genommen keine echten Singlemode-Fasern, wodurch es sowohl bei der Verstärkung in aktiv dotierten Fasern als auch beim Leistungstransport in passiven Fasern zu transversalen Modeninstabilitäten kommen kann. Zudem sind bei LMA-Fasern die Schwellleistungen nichtlinearer Effekte zwar erhöht, grundlegend unterbunden werden diese Effekte aber nicht.

Untersuchung neuer Kerngeometrien

Im Rahmen eines Projekts (siehe Infokasten) wurden deshalb neue Kerngeometrien untersucht. Das Fraunhofer ILT führte zunächst Simulationen von Fasern mit rechteckiger Kerngeometrie durch. Es wurde von der Annahme ausgegangen, dass die Grenze zwischen Singlemode- und Multimodebereich dort verläuft, wo der effektive Brechungs-

index der Moden höherer Ordnung exakt dem Brechungsindex des Fasermantels entspricht. Bei konstanter numerischer Apertur von 0,06, einem Manteldurchmesser von 100 μm und einer Lichtwellenlänge von 1064 nm wurden verschiedene Kernseitenverhältnisse und Kernflächengrößen untersucht und dabei jeweils die effektiven Brechungsindizes der ersten Mode höherer Ordnung ermittelt. Lag die Brechzahl unterhalb der des Fasermantels, wurde ein Singlemode-Faserprofil angenommen; lag sie darüber, wurde die Faser als Multimode-Faser eingestuft. Dadurch ließ sich ermitteln, bei welchen Kernflächen- und Seitenverhältnisparametern von einem Singlemode-Profil der Faser auszugehen war. Es zeigte sich, dass bei hohen Seitenverhältnissen von langer zu kurzer Achse die Kernflächen reduziert werden müssen, wenn ein Singlemode-Betrieb möglich sein soll.

Zudem wurden die modalen Eigenschaften der rechteckigen Singlemode-Faserkerne untersucht. Hinsichtlich leistungsbeschränkender nichtlinearer Effekte ist hier insbesondere das transversale Profil der Lasermode interessant, da die Schwellleistung vieler nichtlinearer Effekte direkt mit der jeweiligen Intensitätsverteilung zusammenhängt. Eine Lasermode mit niedriger Spitzenintensität ermöglicht eine höhere Schwellleistung. Die Simulationen machten deutlich, dass bezüglich nichtlinearer Schwellleistungen Seitenverhältnisse von 1:4 vorteilhaft sind, speziell im Vergleich zu einer herkömmlichen zylindersymmetrischen Singlemode-Faser mit derselben numerischen Apertur.

Insgesamt demonstrieren die Simulationen für Fasern mit rechteckiger Kerngeometrie, dass sich bei größeren Aspektverhältnissen und gleicher Spitzenintensität eine höhere Leistung führen lässt. Zugleich zeigen die Ergebnisse, dass bei höheren Seitenverhältnissen reduzierte Kernflächen erforderlich sind, um die Singlemode-Bedingung zu erfüllen. Dies ist auch bei der nichtlinearen Schwellleistung von aktiv dotierten Fasern zu erkennen: Während sich für eine passive Faser eine Erhöhung der nichtlinearen Schwellleistung um etwa den Faktor 2 ergibt, beträgt sie für eine aktiv dotierte Faser mit einem Aspektverhältnis von 1:10 etwa 17 %.

Ein limitierender Faktor für den Einsatz von Singlemode-Fasern mit rechteckiger Kerngeometrie scheint allerdings ihre Biegeempfindlichkeit zu sein, die bei höheren Seitenverhältnissen – und

Glasfaser-Rohlinge mit rechteckiger und runder Kerngeometrie im Vergleich



Bild: Ceramoptec

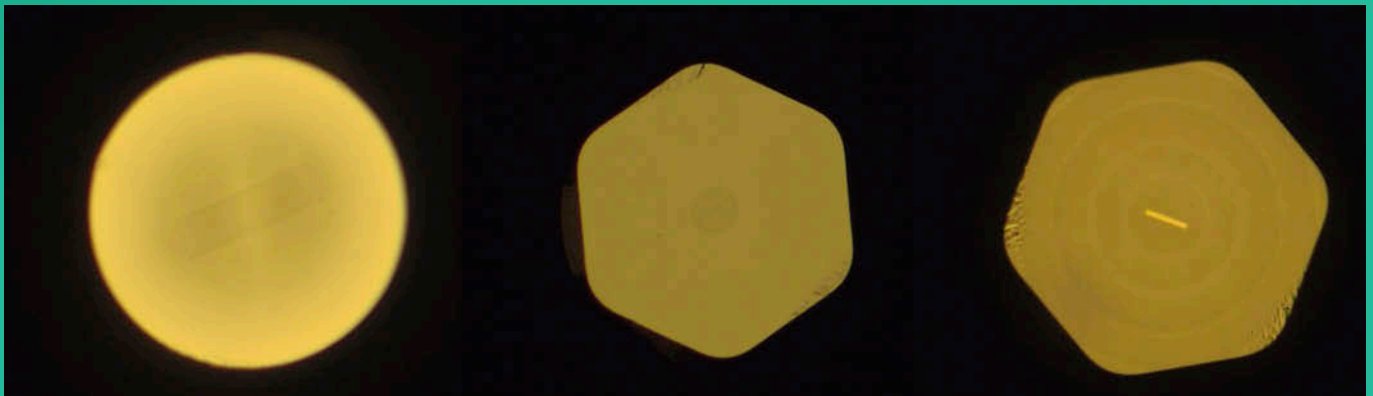


Bild: Fraunhofer ILT

Mikroskopieaufnahme der Facette einer rechteckigen Multimode-Faser mit circa $20\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$ Seitenlänge (links), einer rechteckigen Singlemode-Faser mit einem Podest und einem Aspektverhältnis von 3 : 1 (Mitte) sowie einer rechteckigen Singlemode-Faser mit einem Aspektverhältnis von 9:1 (rechts)

damit einer größeren Modenfeldfläche – zunimmt. Experimente zeigten jedoch, dass sich dieses Problem mittels zusätzlicher Strukturen in der Faser beheben lässt, beispielsweise durch ein Podest im Fasermantel.

Experimentell überprüft

Um die Simulationsergebnisse zu überprüfen, hat Ceramoptec einen ersten Prototyp einer Rechteckkernfaser hergestellt. Das Unternehmen mit Produktionsstandort in Livani/Lettland ist auf die Entwicklung und Fertigung kundenindividueller Faseroptiken spezialisiert und hat mit den Optran-NCC-Fasern (Non-Circular Core) einen Fasertypus mit orthogonaler, wahlweise auch hexa- oder oktogonaler Kerngeometrie entwickelt, der bisher hauptsächlich zur Homogenisierung klassischer Gaußstrahlen eingesetzt wurde.

Um die Simulationsergebnisse zu prüfen, wurden mehrere ytterbiumdotierte Rechteckkernfasern mit unterschiedlichen Sei-

tenverhältnissen sowie numerischen Aperturen produziert, zum Beispiel mit einem Seitenverhältnis von circa 1:2,75 ($4\ \mu\text{m} \times 11\ \mu\text{m}$) und einer numerischen Apertur von 0,1.

Am Fraunhofer ILT wurden die modalen Eigenschaften dieser Faser überprüft. Sie erwies sich, wie in der Simulation berechnet, als echte Singlemode-Faser und führte folglich nur die berechnete Grundmode. Auch bei der Messung der Biegeverluste zeigte sich eine hohe Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment. Die Ergebnisse der Simulation wurden somit nachdrücklich validiert.

Multimode-Fasern mit Rechteckkern

Neben den Singlemode-Fasern mit rechteckigem Kern wurden im Rahmen des ZIM-Projekts Multimode-Fasern mit rechteckiger Kerngeometrie



Querschnitt einer Optran-NCC-Faser mit rechteckiger Kerngeometrie

Bild: Ceramoptec

untersucht. Dieser Fasertyp war für die Spezialisten aus zwei Gründen interessant: Zum einen setzten sie darauf, mittels Parallelführung mehrerer Moden das Auftreten nichtlinearer Effekte zu unterdrücken. Zum anderen sollte die rechteckige Kerngeometrie, wie schon in anderen Fällen, die Intensitätsverteilung homogenisieren. Die Kombination dieser Effekte soll Strahlprofile erzeugen, die sich insbesondere für energieintensive Anwendungen mit hohen Anforderungen an einen gleichmäßigen Energieeintrag in der Fläche eignen.

Experimente bestätigten sowohl homogene Strahlprofile als auch – aufgrund der höheren Modenfeldflächen – deutliche Steigerungen der nichtlinearen Schwellleistungen unter Verwendung einer Faser mit bis zu 60 fuhrbaren Moden. Vorgenommen wurden diese Tests mit ytterbiumdotierten Multimode-NCC-Fasern von Ceramoptec, deren rechteckige Kerne Seitenverhältnisse von 1:3 (20 µm x 60 µm) aufwiesen. Basierend auf Multimode-Faser-Bragg-Gittern, die direkt in den aktiv dotierten Kern dieser Spezialfaser geschrieben worden waren, wurde am Fraunhofer ILT zudem auch ein Prototyp eines monolithischen Multimode-Faserresonators entwickelt.

Fazit: Rechteckgeometrie im Vorteil

Das ZIM-Projekt gestaltete sich somit in zweifacher Hinsicht erfolgreich. Zum einen demonstrierten Simulationen und Feldtests, dass sich passive Singlemode-Fasern mit rechteckiger Kerngeometrie vor allem bei großen Seitenverhältnissen des Faserkerns vorteilhaft sind. Im Vergleich zu zylindersymmetrischen Singlemod-Fasern mit identischer numerischer

Apertur lässt sich die Schwellleistung nichtlinearer Effekte etwa verdoppeln. Die höhere Biegeempfindlichkeit von Rechteckkernfasern kann durch das experimentell validierte Konzept eines kernumgebenden Podests kompensiert werden. Interessant ist der Einsatz solcher Singlemode-Rechteckfasern unter anderem dort, wo transversale Modeninstabilitäten unter allen Umständen zu vermeiden sind und LMA-Fasern deshalb keine Option darstellen.

Zum anderen wurden auch aktiv dotierte Multimode-Fasern zur Führung von mehr als 60 Moden hergestellt und charakterisiert. Dank der großen Zahl von Moden werden nichtlineare Effekte unterdrückt, was höhere Leistungen ermöglicht. Überdies ergeben sich homogene Strahlprofile, mit deren Hilfe sich die Effizienz verschiedener Flächenanwendungen verbessern lässt. Der neue Fasertyp unterstützt insbesondere die Entwicklung von Multimode-Faserresonatoren.

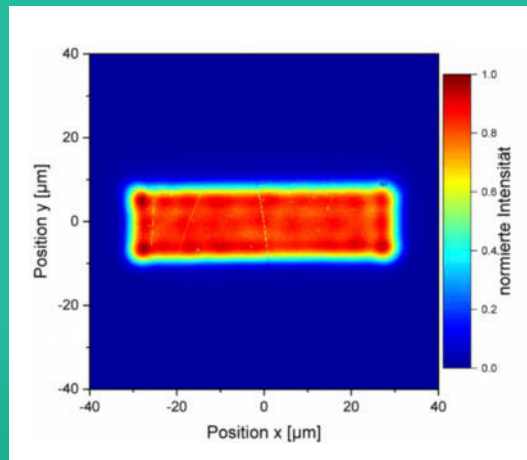


Bild: Fraunhofer/ILT

Gemessene Nahfeldcharakteristik einer rechteckigen Multimode-Faser bei einer Wellenlänge von circa 1064 nm mit 20 µm x 60 µm Seitenlängen

Für Faserlaser ergeben sich letztlich interessante industrielle Einsatzmöglichkeiten – im Hinblick sowohl auf punktuell oder linear konzentrierte als auch auf flächenorientierte Anwendungen. ■

 www.ceramoptec.com

ZIM-PROJEKT

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz finanzierten ZIM-Projekts (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand, Projekt ZF4328102AB6) hat Ceramoptec zusammen mit dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT) neue Fasergeometrien untersucht, die sowohl als klassische Transportfaser als auch zur Erzeugung von Laserstrahlung genutzt werden können. Erprobt wurden Fasern mit rechteckigem Kern anstelle standardisierter Stufenindex-Singlemode-Fasern mit rundem Kern. Fasern mit dieser Kerngeometrie dienten in der Vergangenheit allerdings vor allem zur Homogenisierung des Strahlprofils durch Anregung aller optischen Moden (Mode Scrambling) – ein faktisch entgegengesetztes Anwendungsszenario. Vor diesem Hintergrund stellte sich die Frage, ob – und wenn ja, inwieweit – Fasern mit rechteckiger Kerngeometrie überhaupt als echte Singlemodefasern fungieren und gleichzeitig die Schwellleistung für nichtlineare Effekte erhöhen sowie transversale Modeninstabilitäten unterdrücken können.