

Faserlaser

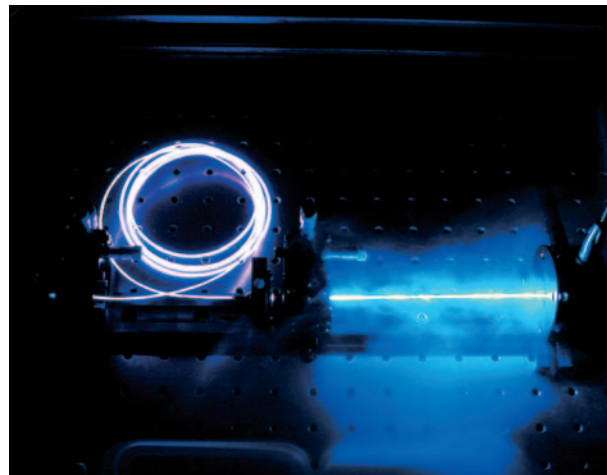
Kompakte Kurzpulsquellen mit hoher Pulsenergie und mittlerer Leistung eignen sich für die Materialbearbeitung und eröffnen völlig neue Anwendungen.

Holger Zellmer, Stefan Nolte und Andreas Tünnermann

Vielfältige Anwendungen von der Grundlagenforschung bis zur Materialbearbeitung erfordern heutzutage Laserkonzepte mit den unterschiedlichsten Strahlparametern. Hier bieten Faserlaser, genauer gesagt Faserverstärkersysteme, eine interessante Alternative, die zur Vereinfachung der Lasersysteme beiträgt. Anstatt für jeden Parameterbereich ein eigenes komplexes Hochleistungssystem zu entwickeln, erlauben es diese Systeme, die gewünschten zeitlichen und spektralen Eigenschaften der Laserstrahlung bei kleinen Leistungen zu erzeugen und dann auf die gewünschte Leistung bzw. Pulsenergie zu verstärken. Gleichzeitig lassen sich intrinsische, lineare und nichtlineare Eigenschaften der Fasern zur spektralen und zeitlichen Pulsformung einsetzen. Hierdurch ermöglicht der Faserlaser kompakte anwendungstaugliche Kurzpulsquellen mit hoher Pulsenergie und mittlerer Leistung.

In der heutigen Zeit gewinnt die Mikromaterialbearbeitung mit der zunehmenden Miniaturisierung von Komponenten und Baugruppen immer mehr an Bedeutung. Die Fertigungstechnik setzt der Herstellung kleiner Strukturen mit Mikrometer- oder sogar Nanometergenauigkeit jedoch enge Grenzen. Insbesondere die hochflexible Strukturierung mithilfe von Laserstrahlung scheidet im Allgemeinen an einem hohen Wärmeinput in das Werkstück, der eine mikrometeregenaue Bearbeitung durch Aufschmelzen des Materials und Ablagerungen an der Oberfläche verhindert. Erst der Einsatz ultrakurzer Laserpulse mit Pulsdauern unterhalb weniger Pikosekunden oder sogar im Femtosekundenbereich erlaubt – bei geeigneter Wahl der Bearbeitungsparameter – eine praktisch schmelzfreie Bearbeitung aller Werkstoffe ohne thermische oder mechanische Schäden.

Während bei der Bearbeitung mit langen Pulsen die lineare Absorption der Pulse und Wärmeleitungsprozesse im Vordergrund stehen, koppeln kurze Pulse direkt an die freien Elektronen im Werkstück oder an die durch Mehrphotonenabsorption entstandenen freien Ladungsträger.



Das zentrale Element eines Faserlasers ist eine Glasfaser, deren Kern dotiert ist. Zur Anregung des Laserprozesses wird die Faser mit einem Diodenlaser gepumpt.

Diese Prozesse, die typischerweise zu einer Sublimation oder Plasmabildung des bearbeiteten Materials führen, verlaufen schneller als die Wärmeleitung. Mit kurzen Pulsen lassen sich somit sehr feine Strukturen in metallischen und dielektrischen Werkstoffen erzeugen, ohne einen thermischen Einfluss auf das Werkstück, d. h. ohne Schmelzränder und umgeschmolzene Bereiche.

Diese und andere Anwendungen in Metrologie, Life-Science und Produktion erfordern kompakte und stabile KurzpulsLasersysteme hoher Leistung mit beugungsbegrenzter Strahlqualität und hoher Effizienz. Während heutige kommerziell erhältliche Ultrakurzpuls-Lasersysteme jedoch auf wenige Watt mittlere Leistung beschränkt sind, werden für einen industriellen Einsatz wesentlich größere mittlere Leistungen benötigt. Diese lassen sich auf heutiger Sicht nur mithilfe von diodengepumpten Festkörperlasern erreichen. Allerdings verhindern thermo-optische Effekte im laseraktiven Material, die durch den Anregungsprozess hervorgerufen werden, die direkte Skalierbarkeit der Ausgangsleistung konventioneller, diodengepumpter Festkörperlaser.

KOMPAKT

- ▶ Die Erwärmung des laseraktiven Materials und damit verbundene optische Effekte verhindern die Skalierbarkeit von gewöhnlichen diodengepumpten Festkörperlasern zu großen Ausgangsleistungen.
- ▶ Diodengepumpte Faserlaser ermöglichen hingegen Leistungen im kW-Bereich.
- ▶ Dabei gibt ein Masteroszillator die zeitlichen und spektralen Eigenschaften der Laserpulse vor, die in speziellen Glasfasern verstärkt werden.
- ▶ Die Eigenschaften dieser Fasern aus aktivem Kern und mikrostrukturiertem Mantel lassen sich in weiten Bereichen variieren und somit an die Anforderungen anpassen.

Prof. Dr. Holger Zellmer, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (FH), Fachbereich Polygrafische Technik, Gutenbergplatz 2–4, 04103 Leipzig; Dr. Stefan Nolte, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Angewandte Physik, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena; Prof. Dr. Andreas Tünnermann, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Albert-Einstein-Str. 7, 07745 Jena und Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Angewandte Physik

Diodengepumpte Festkörperlaser

Die häufigsten aktiven Materialien für diodengepumpte Festkörperlaser sind Neodym- bzw. Ytterbium-dotierte Granate, wie Nd:YAG und Yb:YAG mit einer Emissionswellenlänge von 1064 nm bzw. ca. 1030 nm. Daneben wurden zahlreiche andere seltenerd-dotierte Lasermaterialien für den Laserbetrieb im nahen und mittleren Infrarot entwickelt.

Als aktives Material werden typischerweise Laserstäbe verwendet. Diese Geometrie lässt sich am einfachsten fertigen und liefert ein rundes Strahlprofil, wie es für die meisten Anwendungen bevorzugt wird. Andere Geometrien, wie zum Beispiel „Slabs“ mit rechteckigem Querschnitt, sind ebenfalls gebräuchlich.

Bei konventionellen Festkörperlasern regen Blitz- bzw. Bogenlampen den Laserprozess an. Dabei führt jedoch der geringe Überlapp des breiten Emissionsspektrums der Lampen mit den schmalen Absorptionslinien des aktiven Materials zu einem geringen Wirkungsgrad: Typischerweise werden weniger als 3 % der elektrischen Anschlussleistung eines lampengepumpten Festkörperlasers in Laserstrahlung umgewandelt.

Ferner wird durch die Stokes-Verschiebung, die Energiedifferenz zwischen Anregungs- und Emissionswellenlänge, Wärme im aktiven Material deponiert, was die maximal erzielbare Ausgangsleistung und Strahlqualität eines Lasers beeinträchtigt. Da die Wärme im gesamten Volumen des Laserkristalls entsteht, sie aber nur über die Mantelflächen abgeleitet werden kann, entsteht innerhalb des Kristalls ein Temperaturgradient von innen nach außen, welcher

aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex zu einem Brechzahlgradienten und somit zu einer „thermischen Linse“ führt. Weiterhin verursacht der Temperaturgradient mechanische Spannungen, die zum einen über den photoelastischen Effekt zum Brechzahlgradienten beitragen und zum anderen Spannungsdoppelbrechung hervorrufen. Die thermische Linse und die Spannungsdoppelbrechung verschlechtern die Strahlqualität bzw. depolarisieren die erzeugte Laserstrahlung. Beim Design moderner Festkörperlaser ist es daher sehr wichtig, thermische Effekte zu reduzieren bzw. zu kontrollieren.

Verwendet man Diodenlaser statt Lampen zur Anregung (s. Infokasten „Transversale und longitudinale Anregung“), so wird nur etwa ein Viertel der Wärme ins aktive Material eingebracht, da sich das Emissionsspektrum der Diodenlaser perfekt auf das Anregungsspektrum des aktiven Ions anpassen lässt; entsprechend wirken sich die thermo-optischen Effekte deutlich geringer aus. Die hocheffiziente Umwandlung von elektrischer zu optischer Leistung von bis zu 50 %, eine Lebensdauer von mehr als 10 000 Stunden sowie ihre gute Verfügbarkeit sind weitere Vorteile von Diodenlasern als Pumpquelle für Festkörperlaser.

Allerdings lassen sich diese Systeme aufgrund thermischer Effekte noch nicht bis in den benötigten 100-Watt-Bereich bei beugungsbegrenzter Strahlqualität skalieren. Dies ist erst durch die jüngste Entwicklung zukunftsweisender neuartiger Lasergeometrien, wie Scheiben- und Faserlaser [1], gelungen.

Transversale und longitudinale Anregung

Beim Aufbau von diodengepumpten Festkörperlasern lassen sich zwei Konzepte unterscheiden: transversal und longitudinal angeregte Systeme.

Bei *longitudinal* bzw. *endgepumpten* Lasern wird die Strahlung der Laserdioden in einen kleinen Spot durch

resonators stabiler und effizienter transversaler Grundmodebetrieb erreichen.

Als Nachteil dieses Konzepts erweist sich jedoch, dass durch die Endfläche nur eine begrenzte Leistung eingekoppelt werden kann. Aufgrund thermischer Spannungen an den End-

flächen innerhalb gewisser Grenzen lässt sich dadurch die Ausgangsleistung des *transversal gepumpten* Lasers erhöhen, indem der Laserkristall verlängert und somit die Fläche zur Einkopplung der Pumpleistung vergrößert wird.

Dennoch bleibt das Problem bestehen, dass durch

aktiven Material deponiert wird. Auch wenn die ins aktive Material eingebrachte Wärmemenge bis zu viermal kleiner ist als bei lampengepumpten Lasern gleicher Leistung, so begrenzt sie letztendlich doch die erzielbare Ausgangsleistung. Nd:YAG-Stäbe beispiels-

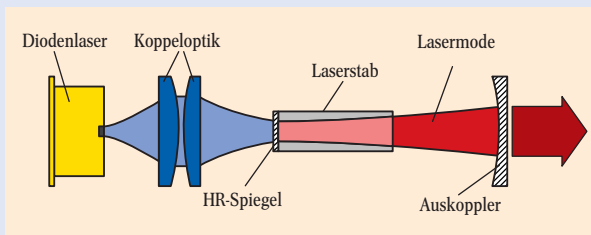


Abb. a: Beim endgepumpten Laser wird das Pumplicht durch einen der Resonatorspiegel in das aktive Medium eingekoppelt. Durch Anpassen des angeregten Volu-

mens an das Modenvolumen der Fundamentalmode lässt sich eine hervorragende Strahlqualität erreichen. einen der Resonatorspiegel auf die Endfläche des aktiven Materials fokussiert (Abb. a). Auf die Weise ist es auch möglich, das Volumen des optisch angeregten Materials an das Modenvolumen des Lasers anzupassen, um einen hohen optischen Wirkungsgrad zu erreichen. Ferner lässt sich durch sorgfältiges Design des Laser-

resonators stabiler und effizienter transversaler Grundmodebetrieb erreichen. Flächen von longitudinal gepumpten Festkörperlasern ist beispielsweise mit einem endgepumpten Nd:YAG-Laser nur eine maximale Ausgangsleistung von 60 W möglich.

Daher wird für höhere Ausgangsleistungen das Pumplicht durch die Mantelflächen des Laserstabs eingekoppelt (Abb. b). In-

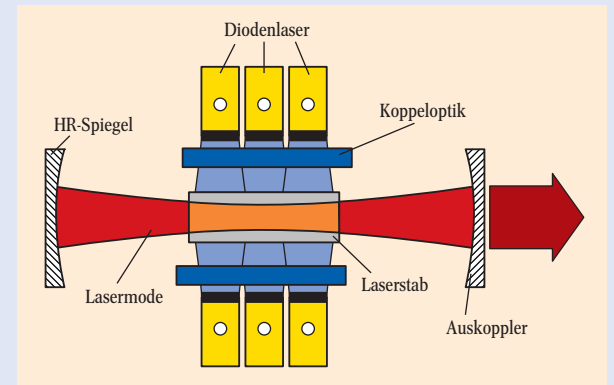


Abb. b: Beim seitengepumpten Laser sind die Pumpdioden, gewöhnlich Barren oder Stacks, neben dem aktiven Material angeord-

net, und ihre Strahlung wird durch die Mantelflächen des Laserstabs oder Slabs eingekoppelt. die optische Anregung des Laserprozesses zum einen aufgrund der Energiedifferenz zwischen Pump- und Laserphoton und zum anderen aufgrund nichtstrahlender Übergänge Wärme im

weise lassen sich nur bis zu einer Pumpleistung von 300 W pro cm Stablänge sicher betreiben. Bei höherer Pumpleistung zerstören thermische Spannungen den Kristall.

Der Scheibenlaser

Das aktive Material eines Scheibenlasers besteht aus einer dünnen Scheibe eines gängigen Lasermaterials wie Yb:YAG, deren Dicke in der Größenordnung von $200\ \mu\text{m}$ liegt, wogegen der Durchmesser $10\ \text{mm}$ überschreiten kann. Eine Seite der Scheibe ist mit einem hochreflektierenden Spiegel versehen und auf einer Wärmesenke montiert (Abb. 1). Das Pumplicht wird auf

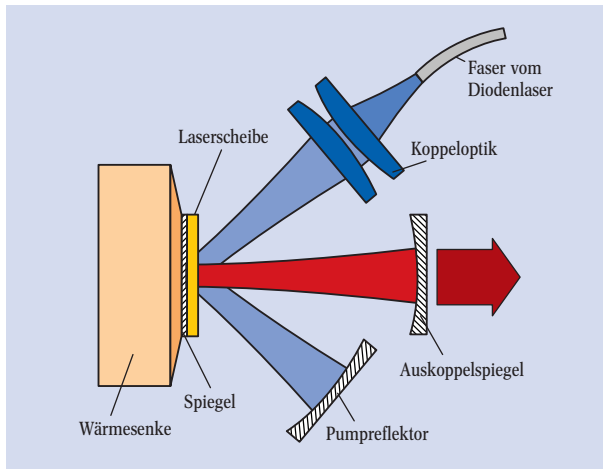


Abb. 1: Beim Scheibenlaser ist der mit dem hochreflektierenden Spiegel versehene Laserkristall auf einer Wärmesenke montiert und wird von der gegenüberliegenden Seite gepumpt.

der gegenüberliegenden Seite eingekoppelt, auf der sich auch der Auskoppelspiegel befindet. Diese Anordnung führt zu einem homogenen, eindimensionalen Temperaturgradienten entlang der Kristallachse und damit parallel zur Lasermode. Das minimiert die thermisch bedingten Einflüsse auf den Laserbetrieb und macht eine hervorragende Strahlqualität möglich.

Beim Scheibenlaser sind jedoch aufgrund des dünnen, scheibenförmigen aktiven Mediums die Durchgangsverstärkung mit wenigen Prozent pro doppeltem Durchgang und die Pumplichtabsorption relativ gering. Eine hohe Dotierungskonzentration und Mehrfachdurchgänge des Pumplichts lösen zwar das Problem der Pumplichtabsorption und erlauben effizienten Laserbetrieb, zur Erzeugung kurzer Pulse mit hohen Pulsenergien sind allerdings viele Durchgänge eines Pulses durch das aktive Medium erforderlich. Das wird in der Regel durch regenerative Verstärkung realisiert, indem der Laserpuls mithilfe eines schnellen optischen Schalters, z. B. einer Pockels-Zelle, in einen Resonator mit dem aktiven Medium eingekoppelt wird. Nach einigen zehn Umläufen hat der Puls genügend Energie, wird durch die Pockels-Zelle wieder ausgekoppelt und gelangt zur Endanwendung. Die Repetitionsrate, die sich mit solchen regenerativen Verstärkern erzielen lässt, ist durch die Pockels-Zellen begrenzt und liegt typischerweise bei einigen Kilohertz. In der Kurzpuls-Materialbearbeitung sind jedoch hohe Repetitionsraten für eine schnelle Bearbeitung vorteilhaft, weil die Prozessgeschwindigkeit linear mit der Pulsfrequenz zusammenhängt. Eine noch höhere Pulsenergie hat nur einen geringen Effekt, da oberhalb der für einen Abtrag zu überwindenden Energieschwelle die Abtragsrate und somit die Bearbeitungsgeschwindigkeit nur logarithmisch von der Pulsenergie abhängt.

Faserverstärker

Für die Erzeugung von kurzen Pulsen mit hoher Repetitionsrate und hoher Pulsenergie bieten auf Fasern basierende Systeme, genauer gesagt Master Oscillator Fiber Power Amplifier (MOFPA), entscheidende Vorteile. Dabei bestimmt ein Kurzpulsoszillator, in der Regel ist das ein modengekoppelter, diodengepumpter Festkörperlaser, die zeitlichen und spektralen Eigenschaften der Laserpulse. Diese Pulse werden anschließend unter Beibehaltung ihrer Eigenschaften in einem ein- oder mehrstufigen Faserverstärker in nur einem einzigen Durchgang verstärkt. Die beugungsunabhängige Führung von sowohl Pump- als auch Laserstrahlung in der Wellenleiterstruktur der Faser erlaubt extrem große Produkte von Wechselwirkungslänge und Intensität, woraus im Vergleich zu konventionellen Lasersystemen eine sehr hohe optische Durchgangsverstärkung resultiert, die in der Größenordnung von $10^3 - 10^4$ liegen kann. Diese hohe Verstärkung erlaubt den Aufbau eines linearen KurzpulsLasers mit hoher Pulsenergie und gleichzeitig hoher Repetitionsrate. Die sonst üblichen optischen Schalter, die gewöhnlich die Wiederholrate begrenzen, können entfallen.

Faserlaser bzw. Faserverstärker bestehen, genau wie die aus der Telekommunikation bekannten Glasfasern, aus hochreinem Quarzglas, in dem durch Dotieren mit Germanium, Aluminium und Phosphor ein Kernbereich mit erhöhter Brechzahl erzeugt wird (Stufenindexfaser). Einmal in diesen Bereich eingekoppeltes Licht wird über den Mechanismus der Totalreflexion im Kern der Faser geführt. Damit die Faser laseraktiv ist, dotiert man ihren Kern zusätzlich mit Seltenerdionen, beispielsweise Nd^{3+} , Er^{3+} oder Yb^{3+} . Zur Anregung des Laserprozesses wird nun Pumplicht in den Faserkern eingekoppelt. Um bestmögliche Strahlqualität zu erreichen, sind Durchmesser und Brechzahl des Faserkerns so gewählt, dass die Faser nur die transversale Grundmode führen kann; man spricht von einer Single-

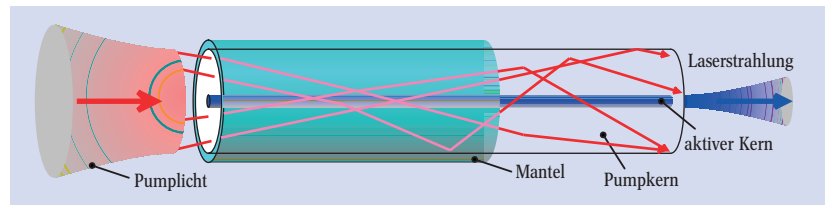


Abb. 2: Beim Doppelkern-Faserverstärker ist der aktive Singlemode-Kern der Faser von einem Multimode-Kern für das Pumplicht umgeben. Das Pumplicht koppelt über die gesamte Faserlänge vom Pumpkern in den Laserkern über und regt dort den Laserprozess an. Zur besseren Einkopplung kann die Zylindersymmetrie des Pumpkerns durch einen D-förmigen oder achteckigen Querschnitt gebrochen werden.

modefaser. Da das Pumplicht ebenfalls in den Singlemodekern der Faser eingekoppelt werden muss, ist man auf Singlemode-Dioden als Pumpquelle und damit auf Leistungen unter $1\ \text{W}$ beschränkt.

Um hohe Leistungen aus Faserlasern bzw. Faserverstärkern zu erreichen, wird das seit 1988 bekannte und seitdem konsequent weiterentwickelte Doppelkernkonzept angewendet [2] (Abb. 2): Der aktive Kern der Faser, der die Strahlqualität des Faserlasers bzw. -verstärkers durch seine Wellenleiterstruktur bestimmt, ist umgeben von einem zweiten Kern, dem sog. Pumpkern, dessen geometrische und optische Eigenschaften an die als Pumpquellen benutzten Hochleistungs-Diodenlaser angepasst sind. Damit gelang zwar eine Skalierung von kontinuierlich emittierenden Faserlasern mit beugungs-

begrenzter Strahlqualität bis über 100 W, nichtlineare Effekte verhinderten jedoch zunächst eine weitere Leistungssteigerung im aktiven Kern. Insbesondere führte bei cw-Lasern die stimulierte Raman-Streuung aufgrund der hohen Leistungsdichten im Kernbereich der Faser zur Frequenzkonversion des Lasersignals weiter in den infraroten Spektralbereich.

Erst ein neuartiges Faserdesign mit vergrößertem Modenfelddurchmesser, sog. LMA-Fasern (Large Mode Area), erlaubte es bei gleicher Ausgangsleistung, die Leistungsdichte im Faserkern deutlich zu verringern. LMA-Fasern, die bei beugungsbegrenzter Strahlqualität hohe Schwellenwerte für nichtlineare Effekte zeigen und zudem die Unabhängigkeit gegenüber thermo-optischen Effekten beibehalten, gestatten es, die Ausgangsleistung im kontinuierlichen Betrieb weiter zu steigern und im Impulsbetrieb Pulsenergien bis in den Millijoulebereich zu erzielen [3, 4]. Mit derartigen Fasern gelang es unlängst, nahezu beugungsbegrenzte Dauer-

den. Das führt zu untragbar hohen Biegeverlusten, die Wellenleitung in der LMA-Faser geht schließlich ganz verloren. Zur weiteren Skalierung der Pulsenergie muss daher die Querschnittsfläche des aktiven Kerns weiter vergrößert werden, ohne dass dabei höhere Transversalmoden in der Faser anschwingen und die Dämpfung zunimmt. Dazu bieten sich die im Folgenden näher beschriebenen photonischen Kristallfasern an.

Photonische Kristallfasern

Photonische Kristallfasern, auch Holey Fibers oder mikrostrukturierte Fasern genannt, bestehen aus einem reinen Quarzglasern, der von einem regelmäßigen Gitter von Luftlöchern umgeben ist (Abb. 3) [7]. Hergestellt werden die Fasern, indem Kapillaren und Stäbe aus Quarzglas zum Rohling (Preform) der Faser gebündelt und anschließend bei hohen Temperaturen zur Faser gezogen werden. Druckluft, die während des Ziehens in die Kapillaren gedrückt wird, verhindert

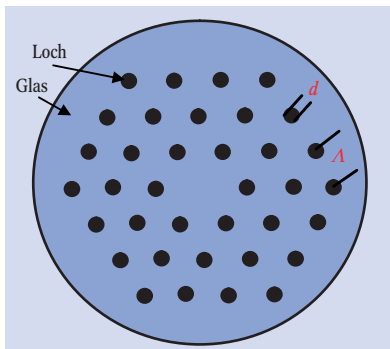


Abb. 3: Der Mantel (Cladding) einer photonischen Kristallfaser besteht aus Quarzglas mit einem Gitter von Löchern mit dem Durchmesser d und dem Abstand Λ . Der Kern der Faser besteht aus reinem Quarzglas ohne Löcher.

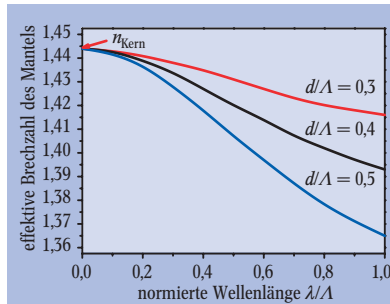


Abb. 4: Verlauf der effektiven Brechzahl im Mantel einer photonischen Kristallfaser. Die Dispersion hängt stark vom Verhältnis Lochgröße zu Lochabstand d/Λ ab und lässt sich dadurch bei der Faserherstellung in weiten Bereichen einstellen.

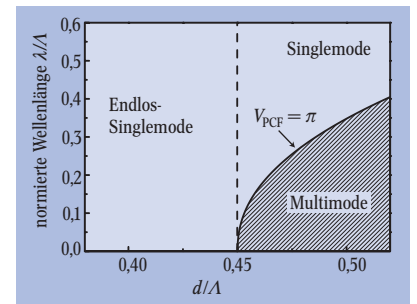


Abb. 5: Wird das Verhältnis von Lochdurchmesser zu Lochabstand d/Λ im Mantel einer photonischen Kristallfaser hinreichend klein, kann sich unabhängig von der Wellenlänge nur noch die transversale Grundmode ausbreiten. Insbesondere lassen sich so durch große Lochabstände Λ große Modenfelddurchmesser erzielen.

strichlaser mit Ausgangsleistungen im Kilowattbereich zu realisieren – eine erheblich höhere Grundmodeleistung als mit jedem anderen Festkörperlasersystem [5]. Die optischen Konversionseffizienzen liegen dabei typischerweise über 70 %.

Die Beherrschung der nichtlinearen Effekte in der Faser ermöglichte nicht nur hohe kontinuierliche Ausgangsleistungen bei exzellenter Strahlqualität, sondern auch Laserpulse hoher Energie bei mittleren Leistungen um 100 W. So gelang es in Jena unlängst, Faserverstärkersysteme mit Pulsenergien über 4 mJ bei Pulsdauern um 50 ns zu realisieren, mit beugungsbegrenzter Strahlqualität und hoher mittlerer Leistung [6]. Da diese Pulsenergien oberhalb der Zerstörschwelle der Faserendflächen liegen, wurde ein spezielles Verfahren zur Endflächenkonfektionierung entwickelt. Durch einen verlustarmen Spleiß wird dabei ein undotierter Quarzzyylinder mit dem Ende der Laserfaser verbunden. Damit verringert sich die Belastung der Endfläche, sodass sich nun auch aus Ytterbium-dotierten Fasern gesättigte Laserpulse extrahieren lassen.

Allerdings stößt man auch bei LMA-Fasern bezüglich des maximalen Modenfelddurchmessers und somit der extrahierbaren Pulsenergie an Grenzen. Um die Ausbreitung höherer Transversalmoden im Faserkern zu vermeiden, muss bei größerem Kerndurchmesser und damit Modenfelddurchmesser der Brechzahlssprung zwischen Kern und Mantel der Faser verkleinert wer-

ein Kollabieren durch die Oberflächenspannung und erlaubt es, das Verhältnis von Wandstärke und Lochdurchmesser einzustellen; Strukturen mit sehr dünnen Wänden sind möglich. Aus dieser Struktur ergeben sich eine Vielzahl von Freiheitsgraden im Design der Fasern. Insbesondere lässt sich die Wellenleiter- und Materialdispersion der Glas-Luft-Struktur so einstellen, dass nur die transversale Grundmode geführt wird, um bestmögliche Strahlqualität zu bekommen und gleichzeitig Modendispersion zu vermeiden. So genannte Endlos-Singlemodefasern sind über den gesamten Transmissionsbereich von Quarzglas singlemodig und ermöglichen etwa doppelt so große Modenfelddurchmesser wie konventionelle LMA-Fasern.

Um eine Aussage zu den in einer photonischen Kristallfaser ausbreitungsfähigen Moden zu erhalten, wird analog zu gewöhnlichen Stufenindexfasern der dimensionslose Faserparameter V_{PCF} definiert:

$$V_{PCF} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Lambda \cdot \sqrt{n_{\text{Kern}}^2(\lambda) - n_{\text{Mantel}}^2(\lambda)}$$

Für $V_{PCF} < \pi$ ist nur die transversale Grundmode ausbreitungsfähig. Hier lässt sich ausnutzen, dass im Gegensatz zu einer Stufenindexfaser die effektive Brechzahl des Mantels (Cladding) stark von der Wellenlänge abhängt (Abb. 4). Bei genügend schnellem Abfall der Brechzahl mit steigender Wellenlänge lassen sich Fasern realisieren, die über weite Wellenlängenbereiche

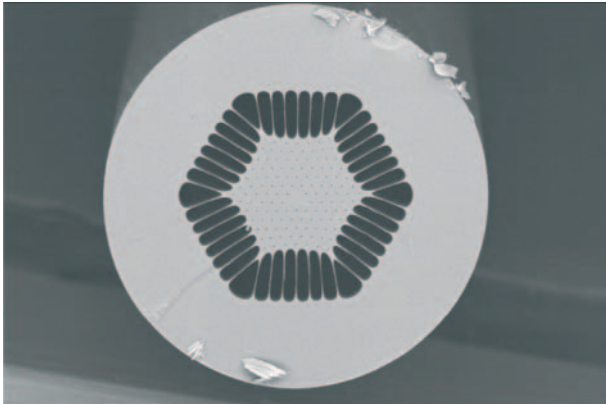


Abb. 6: Querschnitt einer photonischen Kristallfaser mit Doppelkernstruktur, bei der der Pumpkern an dünnen Quarzglasbrücken aufgehängt ist (Airclad-Faser).

singlemodig sind. Für das Verhältnis $d/\lambda < 0,45$ wird die Faser sogar im gesamten transmittierten Spektralbereich singlemodig (Abb. 5).

Analog zu konventionellen Fasern lässt sich der Kern einer photonischen Kristallfaser mit seltenen Erden, z. B. Ytterbium, dotieren, um die Fasern als optische Verstärker verwenden zu können [8]. Sogar das Doppelkernkonzept kann auf die Fasern übertragen werden (Abb. 6). Dazu wird der Pumpkern der Faser an dünnen Quarzglasbrücken aufgehängt, man erhält eine sog. Airclad-Faser. Die Brücken haben eine Dicke von nur wenigen hundert Nanometern, sodass im Pumpkern geführtes Licht nicht entweichen kann. Auf diese Weise lässt sich eine numerische Apertur NA von bis zu 0,8 im Pumpkern erreichen. Dieser im Vergleich zu konventionellen Fasern hohe Wert erlaubt es für eine gegebene Pumpquelle, den Durchmesser des Pumpkerns zu verkleinern. Durch das vergrößerte Verhältnis von Kernfläche zu Pumpkernfläche ergibt sich eine

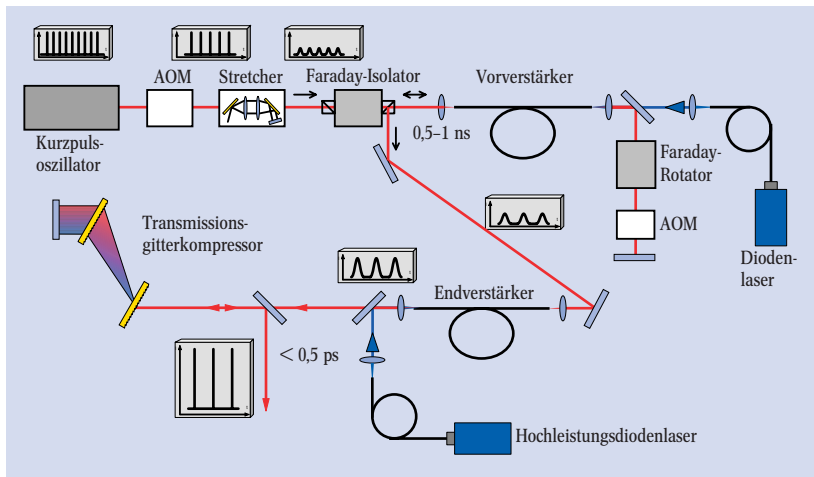


Abb. 7: Am Anfang des Kurzpuls-Faser-Systems stehen Femtosekunden-Laserpulse hoher Folgefrequenz, aber geringer Leistung eines konventionellen Oszillators. Diese werden mithilfe eines schnellen akustisch-optischen Modulators (AOM) auf eine Wiederholrate von 1 MHz gebracht und anschließend in einem dispersiven Faser- oder Gitterstretcher auf eine Dauer von 0,5–1 ns gestreckt. Dadurch verringert sich die Spitzenintensität der Pulse und sie können in einem zweistufigen Faserverstärker die gewünschte Pulsener-

gie erlangen. Die Vorverstärkerstufe wird zum Erreichen einer höheren Verstärkung doppelt durchlaufen, wobei das hin- und rücklaufende Signal durch einen Faraday-Rotator und einen Polarisator getrennt werden. Ein weiterer AOM erlaubt es, die Wiederholrate von 1 MHz bis in den 10-kHz-Bereich beliebig herabzusetzen. In einem Gitterkompressor, der eine zum Stretcher komplementäre Dispersion hat, werden die Pulse wieder in den Femtosekundenbereich komprimiert und gelangen dann zur Anwendung.

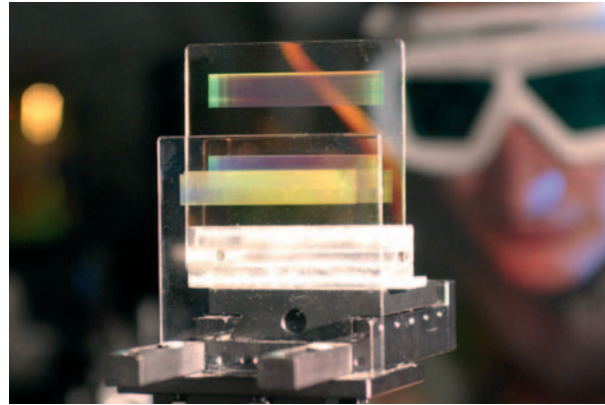


Abb. 8: Transmissionsgitterpaar zur Pulscompression. Die Gitter bestehen aus Quarzglas, in das die Gitterstruktur mit einer Periode von 1750 Linien/mm hineingätzt wird.

bessere Pumplichtabsorption, sodass kürzere Fasern ausreichen.

Ein weiterer Vorteil der Airclad-Struktur besteht darin, dass das äußere Kunststoffcoating der Faser keine optische Funktion erfüllen muss, da es mit keinerlei Strahlung in Berührung kommt. Das macht diese Art von Faser besonders für den Hochleistungslaserbetrieb interessant. Unlängst wurde eine cw-Ausgangsleistung von 1,5 kW mit nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität aus einer photonischen Kristallfaser mit Airclad demonstriert.

Kurzpuls-Faserverstärkersysteme

Kurze Airclad-Fasern mit großem Modenfelddurchmesser haben die Grundlagen für eine völlig neue Klasse von Ultrakurzpuls-Lasersystemen auf der Basis von Faserverstärkern geschaffen. Mithilfe der Technik der sog. Chirped-Pulse-Amplification (CPA) gelang es, faserbasierte Femtosekunden-Lasersysteme zu realisieren (Abb. 7), die mittlere Leistungen bis in den Bereich größer 100 W vor der Kompression aufweisen – die höchsten mittleren Leistungen, die jemals mit einem Ultrakurzpuls-Lasersystem erzeugt wurden [9].

Um die Pulse bei den erzielten hohen mittleren Leistungen komprimieren zu können, wurden spezielle dielektrische Kompressionsgitter [10] entwickelt (Abb. 8). Diese Gitter haben eine hundertfach höhere Zerstörschwelle und eine größere Beugungseffizienz als die üblichen in Gitterkompressoren verwendeten Goldgitter. So gelang es, nach der Kompression eine mittlere Leistung von 76 W bei einer Pulsdauer von 400 fs zu erzielen. Die Pulsenergie betrug 1 μ J. Bei einer geringen Repetitionsrate im 100-kHz-Bereich wurden Pulsenergien von über 100 μ J erreicht.

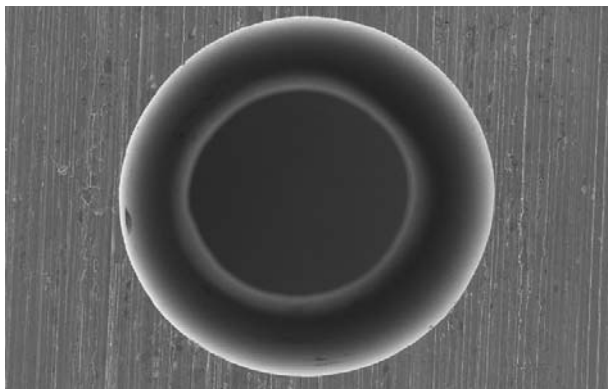
Anwendungen

Faserbasierte Kurzpuls-Lasersysteme eröffnen mit ihrem intrinsisch einfachen Aufbau einer linearen Verstärkerkette erstmals

neue Anwendungsfelder außerhalb der Grundlagenforschung. Dazu gehört als prominentes potenzielles Anwendungsgebiet die präzise Bearbeitung von Metallen und dielektrischen Werkstoffen.

Auf diesem Feld wurden seit Mitte der neunziger Jahre grundlegende Untersuchungen durchgeführt [11, 12]. Mittlerweile lassen sich fertigungsrelevante Bauteile mit hoher Präzision strukturieren (Abb. 9) [13]. Ein wirtschaftlicher Industrie-Einsatz ist im Allgemeinen jedoch aufgrund der relativ geringen Leistungen kommerzieller Ultrakurzpulslaser bisher nicht möglich. Ultrakurzpuls-Faserlaser rücken den industriellen Einsatz dieser Technologie in der Mikromaterialbearbeitung allerdings in greifbare Nähe.

Abb. 9: Bohrung in Chrom-Nickel-Stahl mit ultrakurzen Laserpulsen, Durchmesser 300 μm , Tiefe 1 mm [12]. Durch die Kürze der Pulse werden thermische Effekte (Aufschmelzen und Gefügeveränderungen) an den Rändern und an der Wandfläche der Bohrung vermieden.



Neben der klassischen Lasermaterialbearbeitung erlauben Ultrakurzpuls-Lasersysteme auch völlig neue Anwendungen, z. B. die Modifizierung optischer Eigenschaften im Volumen dielektrischer Materialien. Durch die hohen Spitzenintensitäten im Fokus eines Ultrakurzpulslasers kommt es zur Mehrphotonenabsorption in Materialien, die normalerweise bei der Laserwellenlänge transparent sind. Die in das Material eingebrachte Energie verändert Bindungen und erzeugt Spannungen, die zu einer lokalen Veränderung des Brechungsindex führen. Aufgrund der kurzen Pulsdauer und des kleinen Fokaldurchmessers kühlt das Material sehr schnell ab, wodurch die Änderungen permanent eingefroren bleiben. Durch Aneinandersetzen der Foki lassen sich Punkt für Punkt Wellenleiter im Inneren verschiedenster transparenter Festkörper schreiben: Gläser, Kristalle, Kunststoffe [14]. Im Gegensatz zu herkömmlichen, planaren Wellenleitern lassen sich die Wellenleiter dreidimensional anordnen, wodurch sich neben einer hohen Packungsdichte optischer Funktionen auch völlig neuartige integrierte optische Bauelemente verwirklichen lassen [15].

Um bei diesem Verfahren eine hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit von einigen Metern pro Minute zu erreichen, benötigt man Kurzpulslaser mit hoher Repetitionsrate im Bereich einiger Megahertz. Auch hier sind Faser-CPA-Systeme anderen Lasersystemen weit überlegen.

Ausblick

Die jüngsten Untersuchungen zu Faserlasern und -verstärkern belegen, dass diese Systeme ein hohes Potenzial aufweisen, die Betriebsparameter von bestehenden Lasersystemen zu erweitern und damit grundsätzlich neue Anwendungsfelder für die Lasertechnik zu eröffnen. Zukünftige Entwicklungen werden über photonische Nanostrukturen eine bessere Kontrolle der Dispersions- und Polarisations-eigenschaften und eine weitere Leistungssteigerung ermöglichen. Gerade auf

diesem Gebiet wurde in den letzten Monaten wichtige Pionierarbeit geleistet, die es erlaubt, Licht in allen seinen Eigenschaften immer besser zu beherrschen.

Danksagung

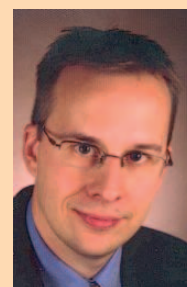
Teile der hier vorgestellten Arbeiten wurden gefördert vom BMBF und TMWFK.

Literatur

- [1] A. Tünnermann et al., New Concepts for Diode Pumped Solid State Lasers, in: R. Diehl (Hrsg.), High-Power Diode Lasers, Topics in Applied Physics 78, 369, Springer Verlag, Heidelberg (2000)
- [2] E. Snitzer et al., Optical Fiber Sensors, New Orleans, January 27-29, 1988, Postdeadline Paper PD5 (1988)
- [3] J. Limpert et al., Trends in Optics and Photonics, Series TOPs 68, 112 (2002)
- [4] J. A. Alvarez-Chavez et al., Opt. Lett. 25, 37 (2000)
- [5] A. Liem et al., CLEO 2004, San Francisco, May 16-21, 2004, Postdeadline paper CPDD2
- [6] J. Limpert et al., Appl. Phys. B 75, 477 (2002)
- [7] P. Russel, Science 299, 358 (2003)
- [8] J. Limpert et al., Optics Express 12, 1313 (2004)
- [9] J. Limpert et al., Trends in Optics and Photonics Series TOPs 83, 414 (2003)
- [10] T. Clausnitzer et al., Appl. Opt. 42, 6934 (2003)
- [11] S. Nolte et al., J. Opt. Soc. Am. B 14, 2716 (1997)
- [12] M. D. Perry et al., J. Appl. Phys. 85, 6803 (1999)
- [13] M. Willert, Strukturierung von metallischen Werkstoffen mit Laserstrahlung unter Vermeidung von Gefügeveränderungen, Dissertation Friedrich-Schiller-Universität Jena (2003), Bosch-Schriftenreihe
- [14] K. M. Davies et al., Opt. Lett. 21, 1729 (1996)
- [15] S. Nolte et al., Appl. Phys. A 77, 109 (2003)

Die Autoren

Holger Zellmer hat in Hannover Physik studiert und am dortigen Laserzentrum 1996 über Faserlaser promoviert. Von 1998 bis Anfang 2005 leitete er die Gruppe Faser- und Wellenleiterlaser am Institut für Angewandte Physik (IAP) der Universität Jena, wo er sich 2003 auch habilitierte. Seit März 2005 ist er Professor für Systemtechnik der Mediovorstufe an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig. Zellmer hat die Guided Color Technologies GmbH mitgegründet und engagiert sich privat für den Erhalt alter Kirchenorgeln in seiner Wahlheimat Thüringen.



Stefan Nolte hat ebenfalls in Hannover Physik studiert und 1999 am Laserzentrum Hannover promoviert. Seit März 2000 ist er am IAP für den Bereich „Ultraschnelle Optik“ verantwortlich, in dem er Pionierarbeit leistete. Gemeinsam mit Zellmer und Tünnermann hat er u. a. den Bertold-Leibinger-Innovationspreis erhalten. **Andreas Tünnermann** wechselte nach seiner Promotion 1992 in Hannover als Leiter

der Entwicklung an das Laserzentrum. Im Alter von nur 34 Jahren erhielt er 1997 einen Ruf auf eine C4-Professur nach Jena, wo er seit 2002 auch Direktor des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik ist. Für seine wegweisenden Arbeiten zu all-solid-state-Lasern wurde er mehrfach ausgezeichnet, darunter mit einem Leibniz-Preis.

