

GEORG-SIMON-OHM-PREIS

Doppelt gekoppelt

Eine neue passiv modengekoppelte Laserquelle ermöglicht zahlreiche Anwendungen.

Christoph Gerhard, Patrick Georges, Frédéric Druon, Vincent Couderc und Wolfgang Viöl

Diodengepumpte Festkörperlaser zählen zu den klassischen Laserquellen für die Materialbearbeitung. Besonders Kurzpuls-Laser eignen sich dazu, temperaturempfindliche Materialien zu behandeln. Um kurze Pulse zu erzeugen, bedienen sich Physiker der aktiven oder passiven Modenkopplung. Letztere erlaubt es, extrem kurze Pulse ohne zusätzliche elektronische Bauteile zu realisieren.

Neben der Materialbearbeitung finden Kurzpuls-Laser zahlreiche Anwendungen in der Chirurgie und medizinischen Forschung. Um kurze Laserpulse herzustellen, ist es erforderlich, die im Laserresonator schwingenden Eigenzustände (Moden) zu synchronisieren, also ihre Phase zu koppeln. Dafür kommen verschiedene Techniken infrage, die sich in die aktive bzw. passive Modenkopplung unterteilen. Die aktive Modenkopplung ist auf optische Schalter (z. B. Pockels-Zellen) angewiesen, die zusätzliche Energiequellen und Treiber erfordern. Zudem lassen sich mit ihr nur Pulse im Bereich einiger Nanosekunden erreichen. Eine passive Modenkopplung erlaubt es hingegen, noch kürzere Pulse zu generieren. Dabei kommen sättigbare Absorber, z. B. aus Halbleitern, als passive optische Schaltelemente zum Einsatz [1]. Sättigbare Absorberspiegel (Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM) dienen z. B. als Endspiegel in Laserresonatoren. Erreicht die Leistung eines intrakavitären Pulses einen bestimmten Schwellenwert, sinkt das Absorptionsvermögen des SESAM, der den Puls nun reflektiert. Aufgrund der schnellen Abklingzeit sättigbarer Absorber werden nachfolgende Pulse geringerer Leistung absorbiert, der zuvor reflektierte und im Resonator oszillierende Puls aber weiterhin verstärkt.

Besonders im industriellen Einsatz sind robuste, wartungsarme Laser mit hohen Leistungen bzw. Pulsenergien gefragt. Vor diesem Hintergrund wurde am Laboratoire Charles Fabry des Institut d'Optique in Orsay 2006 eine neuartige diodengepumpte Kurzpuls-Laserquelle entwickelt. Ein Teilziel bestand darin, eine langzeitstabile und selbststartende passiv modengekoppelte Laserquelle mit geringer Wiederholrate zu realisieren. Ein Resonator mit einstellbarer Länge bildet die Grundlage dieser Laserquelle [2]. Bei einer Resonatorlänge L von 38 Metern resultiert gemäß $f = c/2L$ eine Wiederholrate f von 3,95 MHz. Als laseraktive Medien dienen zwei verschiedene Neodym-dotierte Kristalle



Die neue Laserquelle (hier ein Teil des optischen Aufbaus) kombiniert erstmals zwei Methoden zur passiven Modenkopplung.

(Nd:GdVO₄ und Nd:YVO₄), als Resonatorendspiegel ein SESAM. Um einen langzeitstabilen passiv modengekoppelten Betrieb zu erreichen, ist dieser Aufbau erstmals mit einer weiteren Methode zur intensitätsabhängigen Modenkopplung kombiniert – dem sog. Quadratic Polarization Switching (QPS) [3]. Diese Technik beruht auf der intensitätsabhängigen Polarisationsdrehung in nichtlinearen Kristallen und lässt sich wie ein sättigbarer Absorber beschreiben. Diese Dual-Modenkopplungstechnik, die sättigbare Absorber und QPS kombiniert, weist eine Vielzahl an Vorteilen auf: Sie erweitert den Bereich des passiv modengekoppelten Betriebs deutlich, verbessert die Ausfallsicherheit und Langzeitstabilität und verringert zudem die Empfind-

KOMPAKT

- Bei der neuen Kurzpuls-Laserquelle sind zwei Methoden der Modenkopplung kombiniert: sättigbare Absorberspiegel und das Quadratic Polarization Switching.
- Dank dieser Dual-Modenkopplungstechnik erzeugt der Laser Pikosekundenpulse im langzeitstabilen Betrieb.
- Ein akustooptischer Modulator erlaubt es, die Wiederholrate und damit die Pulsenergie gezielt einzustellen.
- Die Laserquelle eignet sich für den Einsatz in zahlreichen Gebieten, z. B. in der Mikromaterialbearbeitung, in den Materialwissenschaften oder der Biologie.

Dipl.-Ing. (FH) Christoph Gerhard, HAWK, Von-Ossietzky-Str. 99, 37085 Göttingen, Dr. Patrick Georges, Dr. Frédéric Druon, Dr. Vincent Couderc und Prof. Dr. Wolfgang Viöl – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Georg-Simon-Ohm-Preises 2009 auf der 73. Jahrestagung der DPG in Hamburg an C. Gerhard.

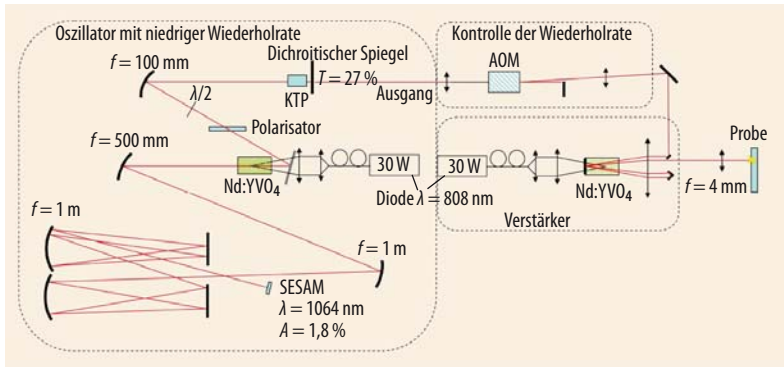


Abb. 1 Die Pikosekundenlaserquelle enthält neben dem Resonator (linker Teil) einen akustooptischen Modulator (AOM) und einen Verstärker, mit denen sich die Wiederholrate und Nachverstärkung des Laserpulses steuern lassen.

lichkeit des Resonators sowie die Zerstörgefahr des SESAMs. Dank des robusten Aufbaus ist es über mehrere Wochen nicht erforderlich, die Laserquelle nachzuzustieren. Insbesondere ermöglicht die Dual-Modenkopplungstechnik erstmals den passiv modengekoppelten Betrieb eines Nd:GdVO₄-Pikosekundenlasers bei geringer Wiederholrate [4]. Da im Vergleich der beiden laseraktiven Medien in dieser Resonatoranordnung Nd:YVO₄ eine höhere mittlere Ausgangsleistung $P = 2,5 \text{ W}$ und eine geringere Pulsdauer $t = 14,8 \text{ ps}$ erzeugt als Nd:GdVO₄ ($P = 1,4 \text{ W}$; $t = 16,4 \text{ ps}$), wurde Nd:YVO₄ als Verstärkermedium gewählt.

Um die Pulsenergie der Laserquelle nachzuverstärken, ist es erforderlich, den Versuchsaufbau um zwei Elemente zu erweitern (Abb. 1). Ein akustooptischer Modulator (AOM) fungiert dabei als Bragg-Zelle und koppelt einen Teil der Laserstrahlung aus. Die Wiederholrate dieses Anteils lässt sich durch Synchronisation und Triggern des Lasersignals, eines Pulsgenerators und des akustooptischen Modulators einstellen. Gemäß $E = P/f$ ist es mit dieser Konfiguration somit möglich, durch eine veränderte Laserwiederholrate f die Pulsenergie E zu variieren. So resultiert aus der Verringerung der Wiederholrate von 3,95 MHz auf 73,3 kHz eine zehnfach höhere Pulsenergie von 10,37 μJ . Ein optischer Verstärker, der aus einem weiteren diodengepumpten Nd:YVO₄-Kristall besteht, verstärkt den Laserstrahl anschließend nach, indem dieser viermal durch das Verstärkermedium läuft. Die mittlere Leistung erhöht sich dadurch um den Faktor 30. Die Kombination dieser beiden extrakavitären

Elemente führt somit zu einer signifikant höheren Pulsenergie.

Eines der wichtigsten Charakteristika eines Lasers ist die Strahlqualitätskennzahl M^2 , der M^2 -Faktor. Dieser Wert ist ein Maß dafür, wie gut sich ein Laserstrahl fokussieren lässt und kann minimal 1 betragen. Die vorgestellte Laserquelle besitzt einen M^2 -Faktor von 1,27. Das Strahlprofil zeigt eine gaußförmige Verteilung, den TEM₀₀-Mode. Bei der Fokussierung durch ein Laserobjektiv (Brennweite $f = 8 \text{ mm}$) kommt es aufgrund der hohen Leistungsdichte von 10^{14} W/cm^2 im Fokus zum Plasmadurchbruch in Luft (Abb. 2).

Schneidversuche an Aluminium, Kupfer, Glas und Papier bestätigen die gute Fokussierbarkeit des Laserstrahls und verdeutlichen den Einfluss der Pulsenergie (bzw. Wiederholrate und Vorschubgeschwindigkeit) (Abb. 3) [5]. In Standardpapier verursacht der Laser eine Schnittbreite von $19 \pm 2 \mu\text{m}$.

Koppelt man den Laserstrahl in verschiedene hoch doppelbrechende photonische Kristallfasern ein, lassen sich Superkontinua, also „weißes Laserlicht“, erzeugen. Auf diese Weise entsteht ein polarisiertes sichtbares Superkontinuum im Pikosekundenbereich mit geringer Wiederholrate (Abb. 4) [6]. Polarisationsgesteuerte Superkontinua im sichtbaren Bereich zu erzeugen, ist in der biologischen Forschung ausgesprochen wichtig. So stellt z. B. die Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy zahlreiche Anforderungen an die ideale Lichtquelle: Erstens muss die Wiederholrate gering genug sein, um den Fluoreszenzverfall typischer Fluorophore im Bereich einiger MHz beobachten zu können. Zweitens sollte die Pulsdauer im Bereich einiger Pikosekunden liegen, um die Fluoreszenzdauer präzise zu messen. Drittens sollte die Lichtquelle einen möglichst großen Bereich des sichtbaren Spektrums abdecken, um verschiedenste Fluorophore verwenden zu können.

Zurzeit dient die Laserquelle dazu, die Lumineszenz von Diamant-Nanopartikeln zu untersuchen. Zudem würde es die kurze Pulsdauer ermöglichen, die Fluoreszenz kurzlebiger Farbstoffe zu messen oder sehr schnelle chemische Reaktionen zu analysieren. In der Herstellung von Solarzellen könnte der Laser dazu beitragen, photovoltaische Elemente zu verbessern, da sich mit den kurzen Pulsen empfindliche Schichtsysteme strukturieren lassen.

*

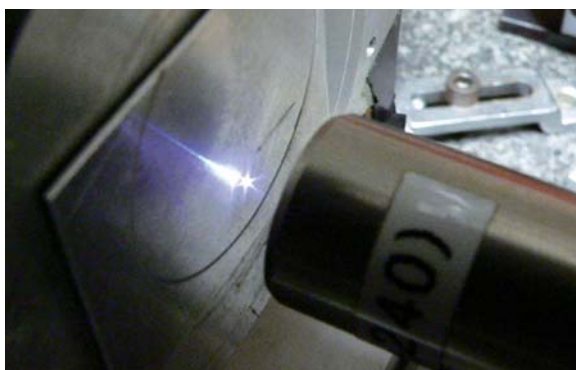


Abb. 2 Die hohe Leistungsdichte führt zum Plasmadurchbruch des fokussierten Laserstrahls.

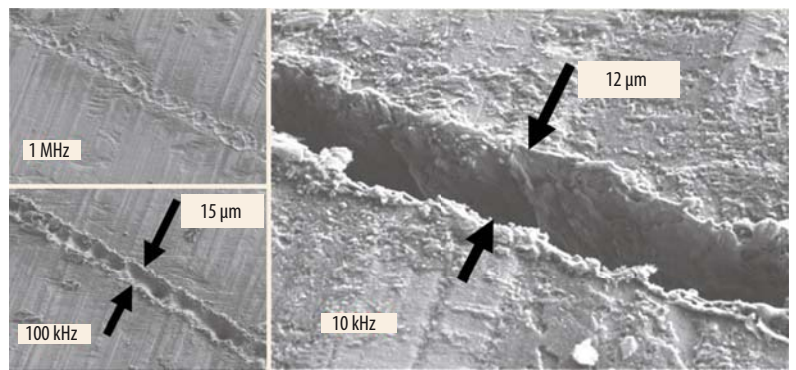


Abb. 3 Abhängig von der Wiederholrate bzw. Pulsenergie des Lasers schneidet er nur einen kleinen „Kratzer“ ins Aluminium (links oben) oder einen tiefen Schnitt.

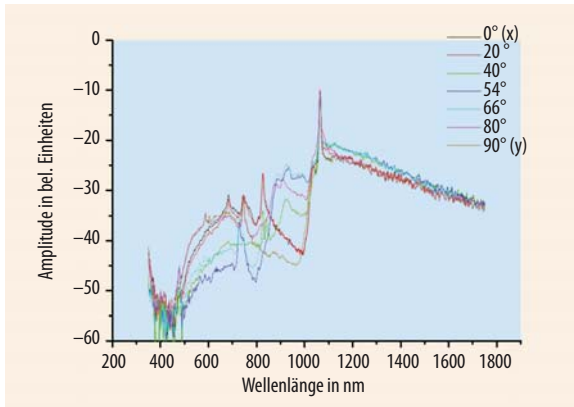


Abb. 4 Das Superkontinuum in einer 1,4 m langen photo-nischen Kristallfaser hängt von der Polarisation des eingekoppelten Lasers ab. Bei 0° ist das Laserlicht in x -Richtung polarisiert, bei 90° in y -Richtung.

Wir danken den Mitgliedern der Equipe Lasers Solides et Applications des Institut d'Optique Graduate School, vor allem P. Blandin, E. Hérault, J. Didierjean und B. Cocquelin für die Hilfe beim Bau des Lasers; Ch. Lesvigne und Ph. Leproux von der Université de Limoges und S. Lévêque-Fort vom Laboratoire de Photophysique Moléculaire (Orsay) für die Hilfe bei der Erzeugung von Superkontinua und F. Falcoz von Thales Laser (Orsay) für die Unterstützung bei den Versuchen zur Materialbearbeitung. Die Arbeit wurde unterstützt vom Conseil Général de l'Essonne und vom Pôle Laser des Contrat Plan Etat Région.

Literatur

- [1] U. Keller et al., IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics **2**, 435 (1996)
- [2] D. N. Papadopoulos et al., Optics Letters **28**, 19 (2003)
- [3] V. Couderc et al., Opt. Commun. Vol. **166**, 103 (1999)
- [4] Ch. Gerhard et al., Optics Express **14**, 7093 (2006)
- [5] Ch. Gerhard et al., Applied Optics **47**, 967 (2008)
- [6] P. Blandin et al., Proc. of SPIE Vol. 6588, 658808 (2007)

DIE AUTOREN

Christoph Gerhard studierte an der HAWK Göttingen und fertigte seine Diplomarbeit in Orsay an. Zurzeit arbeitet er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am BIAS in Bremen. 2006 gründete er das Austauschprogramm PESGIN für Studierende der Optischen Technologien in der Île-de-France und Niedersachsen.

Patrick Georges ist Senior Scientist des CNRS und leitet die Arbeitsgruppe „Lasers and Biophotonic“ am Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique.

Frédéric Druon ist leitendes Mitglied der Arbeitsgruppe ELSA am Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique.

Vincent Couderc vom Labor XLIM der Université de Limoges befasst sich vor allem mit Spatial Solitons Propagation und diodengepumpten Festkörperlasern.

Wolfgang Viöl leitet das Laser-Laboratorium Göttingen e.V. und lehrt als Professor an der HAWK in Göttingen sowie als Privatdozent an der TU Clausthal.

