

## Q 18: Laserentwicklung: Festkörperlaser

Time: Monday 16:30–19:00

Location: V38.01

Q 18.1 Mon 16:30 V38.01

**Power scaling of an all-solid-state laser source for trapping lithium** — ●ANDREA BERGSCHNEIDER, ULRICH EISMANN, FRÉDÉRIC CHEVY, and CHRISTOPHE SALOMON — Laboratoire Kastler Brossel, CNRS UMR 8552, UPMC, Ecole Normale Supérieure, 24 rue Lhomond, 75231 Paris, France

We recently presented an all-solid-state laser source emitting 670 mW of narrowband 671-nm light, frequency-locked to the lithium D-line transitions for laser cooling applications [1]. It consists of a solid-state Nd:YVO<sub>4</sub> ring laser emitting light of 1342 nm wavelength, which is subsequently frequency-doubled in an enhancement cavity using periodically-polarized potassium titanyl phosphate (ppKTP).

Here, we focus on the challenge of increasing the output power into the multi-Watt range. The key issue is the minimization of unavoidable detrimental thermal effects in the Nd:YVO<sub>4</sub> and the nonlinear crystal. We discuss in detail the theoretical optimization of the spatial overlap between pump beam and cavity mode [2] with respect to the pump beam wavelength and size as well as the crystal doping and length, and compare to our experimental results. We also investigate intra-cavity second harmonic generation.

[1] U. Eismann et al., arXiv:1103.5841 (2011)

[2] Y. F. Chen et al., IEEE J. Quantum Electron. **33**, 1424 (1997)

Q 18.2 Mon 16:45 V38.01

**Einfrequenzbetrieb eines Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Scheibenlasers bei 1015 nm** — ●MATTHIAS SÄTTLER<sup>1,2</sup>, THOMAS DIEHL<sup>1,2</sup>, ANDREAS KOGLBAUER<sup>1,2</sup>, DANIEL KOLBE<sup>1,2</sup>, MATTHIAS STAPPEL<sup>1,2</sup>, RUTH STEINBORN<sup>1,2</sup> und JOCHEN WALZ<sup>1,2</sup> — <sup>1</sup>Johannes Gutenberg-Universität, D-55099 Mainz — <sup>2</sup>Helmholtz-Institut Mainz, Johannes Gutenberg-Universität, D-55099 Mainz

In Scheibenlasern ist eine effektive Kühlung des aktiven Mediums aufgrund seiner geringen Dicke möglich. Dadurch lässt sich die Ausbildung von thermischen Linsen reduzieren, womit eine sehr gute Strahlqualität bei hohen Ausgangsleistungen erreicht werden kann.

Für einen Scheibenlaser bei einer Wellenlänge von 1015 nm ist Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Lutetiumoxid) ein vielversprechendes, alternatives Scheibenmaterial zu dem etablierten Material Yb:YAG. Mit einem höheren Emissionsquerschnitt bei 1015 nm und einer besseren thermischen Leitfähigkeit ist eine Steigerung der erreichbaren Ausgangsleistung zu erwarten.

Für eine anschließende, zweifache Frequenzverdopplung in externen Überhöhungsresonatoren ist ein longitudinaler Einmodenbetrieb des Lasers erforderlich. Dieser wird im vorgestellten Lasersystem durch einen doppelbrechenden Filter, sowie ein Etalon im Laserresonator realisiert. Um den transversalen Einmodenbetrieb zu gewährleisten, ist der Resonator des Scheibenlasers dynamisch stabil ausgelegt.

Die mit dem Lasersystem erzielten Ergebnisse werden präsentiert und es wird ein Ausblick auf eine leistungsstarke kontinuierliche UV-Laserquelle gegeben.

Q 18.3 Mon 17:00 V38.01

**Stable MHz-Repetition-Rate Passively Q-Switched Microchip Laser Frequency Doubled by MgO:PPLN** — ●EVA MEHNER<sup>1,2</sup>, ANDY STEINMANN<sup>2</sup>, ROBIN HEGENBARTH<sup>2</sup>, HARALD GIESSEN<sup>2</sup>, and BERND BRAUN<sup>1</sup> — <sup>1</sup>Georg-Simon-Ohm Hochschule Nürnberg — <sup>2</sup>Physikalisches Institut, Universität Stuttgart

We present a Nd<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub> microchip laser passively Q-switched by a semiconductor saturable absorber mirror. At a wavelength of 1064 nm, the system generates 460 ps pulses with an average output power of 210 mW. The repetition rate was measured to be up to 1.1 MHz with the timing jitter remaining at less than 1%. We discuss the influence of different setup parameters by using numerical simulations of the coupled rate equations and FEM-simulations of the heat distribution within the crystal. We show that single longitudinal and transversal mode operation is the key factor to achieve high pulse-to-pulse stability. Furthermore the IR-light was frequency doubled in a MgO:PPLN crystal with up to 75% conversion efficiency. To our knowledge, this is the highest conversion efficiency ever achieved with a microchip laser.

Q 18.4 Mon 17:15 V38.01

**Optimierung eines orangefarben emittierenden Praseodym Lasers anhand eines einfachen analytischen Modells** — ●PHILIP

METZ, TEOMAN GÜN, NILS-OWE HANSEN, SEBASTIAN MÜLLER und GÜNTER HUBER — Institut für Laser-Physik, Universität Hamburg, Hamburg, Deutschland

Praseodym-basierte Festkörperlaser haben sich in den letzten Jahren zu einem der effizientesten Systeme für die Erzeugung kohärenter Strahlung im sichtbaren Spektralbereich entwickelt. Hierzu tragen insbesondere die hohen Wirkungsquerschnitte sowie die Entwicklung leistungsstärkerer Diodenlaser mit Emissionswellenlängen um 440 nm als Anregungsquellen bei. Durch die Entwicklung verschiedener Wirtsmaterialien, insbesondere aus der Gruppe der Fluoride, ist es mittlerweile möglich, schmalbandige Laseremission bei einer Vielzahl von Wellenlängen im sichtbaren Spektralbereich zu realisieren. Obwohl auf den prominentesten Übergängen <sup>3</sup>P<sub>1</sub>→<sup>3</sup>H<sub>5</sub> und <sup>3</sup>P<sub>0</sub>→<sup>3</sup>F<sub>2</sub> Dauerstrich-Lasertätigkeit mit differentiellen Wirkungsgraden von bis zu 64 % realisiert werden konnte, bleibt der entsprechende Wert für den Übergang <sup>3</sup>P<sub>0</sub>→<sup>3</sup>H<sub>6</sub> in bisherigen Veröffentlichungen auf etwa 30 % beschränkt. Dieses Phänomen wird mit einem Absorptionsprozess für die Laserphotonen in das langlebige, ansonsten nicht am Laserbetrieb beteiligte Multiplett <sup>1</sup>D<sub>2</sub> erklärt. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse einer einfachen analytischen Beschreibung eines solchen Lasersystems mit Experimenten an einem Praseodym-dotierten LiYF<sub>4</sub>-Kristall verglichen und so die Skalierbarkeit der Effizienz absorptionsbelasteter Lasersysteme in Hinblick auf das Resonatordesign überprüft.

Q 18.5 Mon 17:30 V38.01

**Femtosecond Written Waveguides in Pr<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub>** — ●SEBASTIAN MÜLLER, THOMAS CALMANO, PHILIP METZ, NILS-OWE HANSEN, CHRISTIAN KRÄNKEL, and GÜNTER HUBER — Institute of Laser-Physics, Hamburg, Germany

For applications in the field of integrated optics, communication and display technique, passive and active crystalline waveguides are very suitable due to their optical properties. Waveguiding in or between fs-written tracks has been successfully demonstrated in a large number of dielectric materials like crystals and glasses. Nonlinear absorption processes induced by high intensity femtosecond laser pulses lead to a distortion of a small area inside the bulk material. This distortion can result in a refractive index change and waveguiding in and around the tracks is possible. The waveguiding losses and the guided mode profile strongly depend on the writing parameters during the fabrication process. The laser material Pr<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub> with its high absorption and emission cross sections is a well-known active medium for efficient, low threshold bulk lasers for the visible spectral region. In this work, the characteristics of Pr<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub> waveguides with respect to the writing parameters as well as different waveguide geometries were investigated. Waveguiding inside the tracks and the unmodified regions surrounded by written claddings was successfully achieved. A characterization of the guiding losses and the guided mode profiles will be presented.

Q 18.6 Mon 17:45 V38.01

**Herstellung von Kanalwellenleitern in Nd:Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>-Schichten mittels fs-Laserstrukturierung** — ●SEBASTIAN HEINRICH, SVEN H. WÄESELMANN, THOMAS CALMANO und GÜNTER HUBER — Institut für Laser-Physik, Universität Hamburg

Die Kanalwellenleiter-Geometrie ist vielversprechend im Hinblick auf die Entwicklung kompakter Lasersysteme mit hoher Frequenzstabilität. Infolge der hervorragenden thermomechanischen und optischen Eigenschaften stellen Seltenerd-dotierte Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>-Wellenleiter schmale Emissionslinien und eine hohe optische Verstärkung in Aussicht. Eine Strukturierung von Wellenleiterschichten mittels ultrakurzer Laser Pulse ermöglicht, im Vergleich zu Strukturierungsmethoden wie dem reaktiven Ionenätzen, eine räumlich stark lokalisierte Materialmodifikation in einem Arbeitsschritt.

Mit dem Pulsed Laser Deposition-Verfahren wurden 2 μm dicke Nd(0,5 at.%):Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> Schichten auf Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>-Substraten gewachsen. Spektroskopische Untersuchungen haben gezeigt, dass die hergestellten Schichten ein Emissionsmaximum bei einer Wellenlänge von 1061 nm aufweisen.

Die auf Ablation basierende laterale Strukturierung erfolgte durch die Fokussierung eines fs-Lasers mit einer asphärischen Linse ( $f = 3,1$  mm;  $NA=0,68$ ) auf die Oberfläche der Schichten. Mit Pulsenergien von 600 nJ und Pulsdauern von ca. 150 fs wurden so Strukturen mit einer Breite von ca. 2 μm und einer Tiefe von ca. 0,5 μm geschrieben.

Homogener Materialabtrag konnte bei Pulswiederholraten von 1 kHz und Verfahrgeschwindigkeiten von bis zu 400  $\mu\text{m/s}$  erzielt werden.

Q 18.7 Mon 18:00 V38.01

**Yb:CaGdAlO<sub>4</sub> und Yb:SrAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub> als breitbandig emittierende Lasermaterialien** — ●BASTIAN DEPPE, KOLJA BEIL, CHRISTIAN KRÄNKEL, KLAUS PETERMANN und GÜNTHER HUBER — Institut für Laser-Physik, Universität Hamburg, Luruper Chaussee 149, D-22761 Hamburg

Yb<sup>3+</sup>-dotierte Lasermaterialien eignen sich aufgrund ihrer breiten Emissionsbanden im Bereich um 1  $\mu\text{m}$  bestens für die Erzeugung ultrakurzer Pulse im modengekoppelten Laserbetrieb. Dabei weisen viele besonders breitbandig emittierende Materialien aufgrund einer ungeordneten Gitterstruktur eine geringe Wärmeleitfähigkeit auf, was diese Materialien für hohe Ausgangsleistungen ungeeignet macht. Ziel dieser Arbeit ist daher die Herstellung und Charakterisierung neuartiger Yb-dotierter Lasermaterialien mit breiten Emissionsbanden bei gleichzeitig guten thermischen Eigenschaften. Zu diesem Zwecke wurde die Herstellung von Yb<sup>3+</sup>:CaGdAlO<sub>4</sub> und Yb<sup>3+</sup>:SrAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub> nach dem Czochralski-Verfahren optimiert und klare Kristalle mit mehr als 25 cm<sup>3</sup> Volumen hergestellt. Spektroskopische Untersuchungen ergaben unter anderem Emissionsbandbreiten von mehr als 35 nm in beiden Kristallsystemen. Erste Laserexperimente unter Ti:Saphir-Pumpen wurden ebenfalls durchgeführt.

Q 18.8 Mon 18:15 V38.01

**Polarisationsgekoppeltes InGaN-Diodenpumpen von Pr,Mg:SrAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub>** — ●DANIEL-TIMO MARZAHN, FABIAN REICHERT, MATTHIAS FECHNER, NILS-OWE HANSEN und GÜNTHER HUBER — Institut für Laser-Physik, Universität Hamburg, Luruper Chaussee 149, 22761 Hamburg, Germany

Das Pr<sup>3+</sup>-Ion besitzt mehrere strahlende Übergänge vom blauen bis in den tiefroten Spektralbereich. Mit InGaN-Laserdioden (LD) im blauen Spektralbereich als Pumpquellen lassen sich kompakte Festkörperlasersysteme realisieren. Mögliche Anwendungsbereiche für Laser im sichtbaren Spektralbereich sind z.B. in der Medizin, Biophotonik und Displaytechnik zu finden. Ein auf Grund seiner thermomechanischen Eigenschaften geeignetes Wirtsmaterial ist SrAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub>. Der für InGaN LD geeignete Absorptionspeak von Pr<sup>3+</sup> in diesem Oxid bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 444,5 \text{ nm}$  hat einen Absorptionswirkungsquerschnitt von etwa  $10^{-20} \text{ cm}^2$ . Die höchsten Emissionswirkungsquerschnitte bei  $\lambda = 724,4 \text{ nm}$  und  $\lambda = 643,5 \text{ nm}$  betragen etwa  $10^{-19} \text{ cm}^2$ . Die Wirkungsquerschnitte sind maximal für  $\sigma$ -Polarisation. Um eine optimale Absorption der Pumpstrahlung zu erreichen, wurde eine mit dem Czochralski-Verfahren hergestellte Probe Pr<sub>2</sub>Mg(2,7%<sub>at</sub>):SrAl<sub>12</sub>O<sub>19</sub> im c-cut präpariert. Die Emission von zwei InGaN LD wurde an einem polarisationsabhängigen Strahlteilerwürfel kombiniert. Der resultierende Pumpstrahl hatte eine Gesamtleistung von ca. 2 W bei  $\lambda = 444 \text{ nm}$ . Mit einem hemisphärischen Resonator von ca. 5 cm Länge konnten so Ausgangsleistungen von 277 mW bei

$\lambda = 643,5 \text{ nm}$  und 228 mW bei  $\lambda = 724,4 \text{ nm}$  erreicht werden.

Q 18.9 Mon 18:30 V38.01

**Epitaktisches Wachstum von Nd:In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schichten auf Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Substraten** — ●SVEN H. WAESELMANN, SEBASTIAN HEINRICH und GÜNTHER HUBER — Institut für Laser-Physik, Universität Hamburg

Das Pulsed Laser Deposition-Verfahren (PLD) eignet sich zur Herstellung von dünnen, dielektrischen Schichten. Die hohen Teilchenenergien ermöglichen hierbei epitaktisches Layer-by-Layer Wachstum.

Mit dem PLD-Verfahren wurden sowohl Nd(0,5 at.%):In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> als auch gitterangepasste Nd(0,5 at.%):InYO<sub>3</sub>-Schichten mit einer Dicke von ca. 2  $\mu\text{m}$  auf Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Substraten gewachsen. In-Situ wurde mit Beugung von hochenergetischen Elektronen an der Schichtoberfläche (RHEED) epitaktisches Wachstum der gewachsenen Schichten gezeigt. Dies wurde Ex-Situ mit Röntgenbeugung und Rasterkraftmikroskopie bestätigt. Spektroskopische Untersuchungen haben gezeigt, dass die Positionen der Emissionsmaxima dieser Schichten gut mit denen von Nd:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Einkristallen übereinstimmen. Die Spektren von Nd:InYO<sub>3</sub> zeigen dabei eine geringe spektrale Verbreiterung.

Die Brechungsindizes wurde bei einer Wellenlänge von 413,5 nm zu 3,2 für Nd(0,5 at.%):In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bzw. zu 2,2 für Nd(0,5 at.%):InYO<sub>3</sub> bestimmt. Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hat bei 413,5 nm einen Brechungsindex von 1,97. Durch die hohe Brechungsindexdifferenz sind beide Systeme vielversprechend für Wellenleiteranwendungen.

Q 18.10 Mon 18:45 V38.01

**Kompakter Dauerstrichlaser im fern-ultravioletten Spektralbereich bei 273 nm** — ●JANNIS LEHMANN, PHILIP METZ, TEOMAN GÜN und GÜNTHER HUBER — Universität Hamburg, Institut für Laser-Physik

Im Rahmen dieses Beitrages wird die Erzeugung kohärenter fern-ultravioletter (FUV) Dauerstrich-Strahlung durch resonatorinterne Frequenzverdopplung eines im grünen Spektralbereich bei 546 nm emittierenden Praseodym-Lasers demonstriert. Hierfür wird ein 2,9 mm langer Pr<sup>3+</sup>-dotierter LiYF<sub>4</sub>-Kristall über zwei InGaN-Laserdioden mit jeweils etwa 1 W Ausgangsleistung bei einer Wellenlänge von 444 nm gepumpt. In einem der beiden Fokusse des zweifach gefalteten Resonators befindet sich zur Frequenzkonversion unter Ausnutzung kritischer Phasen Anpassung vom Typ I ein 6 mm langer  $\beta$ -Bariumborat-Kristall.

Der vorgestellte Laser liefert kohärente Dauerstrich-Strahlung bei 273 nm mit einer maximalen Ausgangsleistung von etwa 35 mW. Die geringe optisch-optische Effizienz von etwa 2 % beruht auf der vergleichsweise hohen Laserschwelle aufgrund des geringen Emissionswirkungsquerschnittes von  $8,4 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^2$  des Übergangs  $^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{H}_5$  bei 546 nm sowie aufgrund relativ hoher linearer Resonatorverluste. Durch die Verwendung einer Anregungsquelle höherer Leistung sowie verlustarmer optischer Komponenten sollte eine effiziente FUV-Strahlungsquelle realisierbar sein.