

## Q 9: Laserentwicklung (Halbleiterlaser)

Zeit: Montag 16:30–19:00

Raum: 3H

## Q 9.1 Mo 16:30 3H

**Spektral breitbandige Diodenlaser zur Erzeugung energiereicher, ultrakurzer Pulse** — •THORSTEN ULM, FLORIAN HARTH, JOHANNES L'HUILLIER und RICHARD WALLENSTEIN — Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Physik, Erwin-Schrödinger-Straße 46, 67663 Kaiserslautern

Die Entwicklung neuartiger Hochleistungsverstärker mit über 1 W Ausgangsleistung im Pulsbetrieb und guter räumlicher Strahlqualität macht modengekoppelte Diodenlaser heute zu einer interessanten Alternative zu Festkörper-Strahlquellen wie z.B. Titan-Saphir-Lasern. Elektrisch gepumpte Diodenlaser eignen sich außerdem zum Aufbau miniaturisierter Strahlquellen.

Das von uns realisierte passiv modengekoppelte Diodenlaser-MOPA-System erzeugt Pulse mit mehr als 4 nm spektraler Breite. Allein durch Kompensation des linearen Chirps können so 480 fs kurze Pulse erzeugt werden. Dabei wurden mittlere Leistungen von 740 mW und Pulsspitzenleistungen von 340 W erreicht. Zur Modenkopplung wurde ein in den Wellenleiter integrierter sättigbarer Absorber verwendet. Die sättigbaren Verluste lassen sich durch Anlegen einer DC-Gegenspannung einstellen und wurden im Hinblick auf die anschließende Verstärkung und Pulskompression optimiert. Die verwendeten Halbleiter-Bauelemente werden hinsichtlich ihrer Bandbreite, Ausgangsleistung, der zeitlichen und spektralen Pulsform sowie ihres Sättigungsverhaltens charakterisiert. Durch Modellierung der Gewinnsättigung im Wellenleiter konnte gezeigt werden, dass im Oszillator bereits bei einer geringen Rückkopplung von 20% Gewinnsättigung auftritt.

## Q 9.2 Mo 16:45 3H

**Kompaktes Diodenlasersystem mit variabler Repetitionsrate im MHz-Bereich** — •FLORIAN HARTH, THORSTEN ULM, JOHANNES L'HUILLIER und RICHARD WALLENSTEIN — Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Physik, Erwin-Schrödinger-Straße 46, 67663 Kaiserslautern

Kompakte, effiziente Strahlquellen auf Diodenlaserbasis mit einstellbarer Repetitionsrate und Pulsenergie sind für eine Vielzahl von Anwendungen wie z.B. der Mikromaterialbearbeitung von Interesse.

Es wird ein System vorgestellt, das aus einem modengekoppelten Diodenlaser mit externem Resonator, einem nachgeschaltetem LiNbO<sub>3</sub>-Mach-Zehnder-Modulator und einem Yb-Faserverstärker besteht. Der Oszillator emittiert Impulse mit einer Impulslänge von 6 ps und einer Repetitionsrate von 500 MHz bei einer Wellenlänge von 1066 nm. Mit Hilfe des Modulators können einzelne Impulse oder auch Impulsbursts aus dem Pulszug des Oszillators ausgeschnitten werden. Die Impulsenergien der verstärkten Impulse betragen 380 pJ, bei nur geringen Änderungen in der zeitlichen und spektralen Impulsform. Diese Impulsenergie ist ausreichend für die Verstärkung in nachfolgenden Hochleistungsverstärkern.

Bei der gewählten Impulswiederholrate von 10 MHz bildete sich im Yb-Faserverstärker verstärkte Spontanemission (ASE) aus. Es werden Konzepte zur Unterdrückung der ASE vorgestellt.

## Q 9.3 Mo 17:00 3H

**Optimierung und Automatisierung eines ECDLs basierend auf einem Modell zur Modensprungdynamik** — •THORSTEN FÜHRER und THOMAS WALTHER — TU Darmstadt, Institut für Angewandte Physik, AG Laser und Quantenoptik, Schlossgartenstr. 7, D-64289 Darmstadt

ECDLs finden in vielen Bereichen Anwendung, beispielsweise für Sensor-Applikationen oder in der Präzisionsspektroskopie. Dabei ist ein großer modensprungfreier Durchstimmbereich von Vorteil. Um diesen zu erreichen werden bei einem ECDL in Littrow-Konfiguration typischerweise sowohl die Position und der Winkel des Reflexionsgitters als auch der Strom durch die Laserdiode aufeinander abgestimmt variiert. Die manuelle Justage aller Parameter ist zeitaufwändig und schwierig. Darüberhinaus müssen diese Parameter aufgrund äußerer Störungen oft angepasst werden, um den modensprungfreien Betrieb aufrecht zu erhalten.

Es wird ein Modell präsentiert, mit dem sich die Dynamik der Modensprünge als Funktion der freien Parameter beschreiben lässt. Basierend auf diesem Modell und der Detektion der Modensprünge während des Durchstimmens des ECDLs wird ein Fehlersignal erzeugt und damit eine Regelung implementiert. Zusätzlich werden etwaige Nichtli-

nearitäten beispielsweise der Piezoaktoren durch eine selbstoptimierende nichtlineare Nachführung des Laserdiodenstroms ausgeglichen. Mit der Automatisierung wird der modensprungfreie Betrieb eines ECDLs schnell erreicht und aufrechterhalten.

## Q 9.4 Mo 17:15 3H

**Erzeugung von sub-300-fs-Pulsen mit einem Halbleiterscheibenlaser** — •PETER KLOPP<sup>1</sup>, FLORIAN SAAS<sup>1</sup>, UWE GRIEBNER<sup>1</sup>, MARTIN ZORN<sup>2</sup> und MARKUS WEYERS<sup>2</sup> — <sup>1</sup>Max-Born-Institut, Max-Born-Straße 2a, D-12489 Berlin — <sup>2</sup>Ferdinand-Braun-Institut, Gustav-Kirchhoff-Straße 4, D-12489 Berlin

Die Erzeugung von ultrakurzen Pulsen mit einem optisch gepumpten, oberflächenemittierenden Halbleiterlaser wird vorgestellt. Die Verstärkungsstruktur besteht aus mehreren Quantentrögen (QWs) in spezieller, unregelmäßiger Anordnung. Die Absorption der 840 nm-Diodenlaser-Pumpstrahlung erfolgt in gradierten Barrieren zwischen den QWs [1]. Ein sättigbarer single-QW-Halbleiter-Absorberspiegel mit Relaxationszeiten < 5 ps dient zur passiven Modenkopplung des Lasers. Mit diesem rein halbleiterbasierten Laser konnten optische Pulse mit einer Dauer von 290 fs erzeugt werden. Bei einer Pulsfolgefrequenz von 3 GHz wird eine mittlere Leistung von 10 mW im Wellenlängenbereich um 1030 nm erzielt. Unter Ausnutzung des AC-Stark-Effekts und ohne weitere Elemente zur Dispersionskontrolle im Resonator gelang die Erzeugung nahezu Fourier-limitierter, soliton-artiger Pulse.

[1] F. Saas et al., Appl. Phys. Lett. **89**, 151120 (2006).

## Q 9.5 Mo 17:30 3H

**Active frequency stabilization of an infrared diode laser at 1115 nm for the generation of UV light** — •STEFFEN OPPEL<sup>1</sup>, GÜNTER GUTHÖHRLEIN<sup>2</sup>, WILHELM KAENDERS<sup>3</sup>, and JOACHIM VON ZANTHIER<sup>1</sup> — <sup>1</sup>Institut für Optik, Information und Photonik, Max-Planck-Forschungsgruppe, Universität Erlangen-Nürnberg, Germany — <sup>2</sup>Fachbereich Elektrotechnik, Lasertechnik und Werkstofftechnik, Helmut Schmidt Universität der Bundeswehr Hamburg, Germany — <sup>3</sup>Toptica Photonics AG, Gräfelfing (München), Germany

We present a novel method of active frequency stabilization of a commercial high power external-cavity diode laser near 1115 nm to atomic transitions in praseodymium (Pr I). The spectrum of neutral Pr is recorded in a hollow cathode lamp via laser-induced fluorescence (LIF). Laser irradiation between 1105 and 1123 nm leads to a wide variety of excitation lines with Doppler linewidths of typically 500 MHz, identified via fluorescence light in the visible. The excitation signals are strong enough to enable the lock of the laser onto most of the lines of the spectrum by means of a lock-in detection technique. In this way the frequency drifts of the unlocked laser (of more than 30 MHz/h) can be reduced to below 2 MHz/h. Frequency quadrupling of the referenced infrared diode laser can produce in the future frequency-stable UV-light in the range 276 - 281 nm. In particular, using a strong hyperfine component of the excitation line  $E = 16502,616_{J=7/2} \text{ cm}^{-1} \rightarrow E' = 25442,742_{J=9/2}^2 \text{ cm}^{-1}$  of Pr at 1118,54 nm allows - after frequency quadruplication - to excite the D<sub>2</sub>-transition of trapped Mg<sup>+</sup> ions at 279,64 nm.

## Q 9.6 Mo 17:45 3H

**Kohärente Addition von zwei TA verstärkten Laserstrahlen für eine kontinuierliche Hochleistungslaserquelle** — •DANIEL KOLBE, MARTIN SCHEID, FRANK MARKERT und JOCHEN WALZ — Johannes Gutenberg Universität Mainz, Institut für Physik

Kohärente kontinuierliche Strahlung bei 121,56 nm, dem 1S - 2P Übergang in Anti-Wasserstoff, kann durch Vierwellenmischen in Quecksilber erzeugt werden. Zur effizienten Produktion werden drei Laser mit Wellenlängen in der Nähe von atomaren Resonanzen im Quecksilber benötigt. Eine dieser Resonanzen, die 6<sup>3</sup>P - 7<sup>1</sup>S Resonanz, liegt bei einer Wellenlänge von 407,9 nm und kann durch einen frequenzverdoppelten Titan:Saphir-Laser erzeugt werden.

Alternativ können auch gitterstabilisierte Laserdioden bei 815,8 nm frequenzverdoppelt werden. Jedoch ist deren Fundamentalleistung auf wenige 100 mW beschränkt. Durch die Weiterentwicklung von Halbleiterverstärkerchips (*tapered amplifier*; kurz: TA) lassen sich Laserdioden im nahinfraroten Spektrum auf Leistungen bis zu 1 Watt

verstärken. Um eine weitere Leistungssteigerung zu ermöglichen, wird ein System vorgestellt, das zwei durch TAs verstärkte Laserstrahlen kohärent addiert und damit Ausgangsleistungen von bis zu 1,6 Watt ermöglicht. Die Effizienz dieser Überlagerung ist dabei hauptsächlich durch die Strahlprofile der beiden TA-Strahlen begrenzt.

Q 9.7 Mo 18:00 3H

**Entwicklung eines Diodenlasersystems mit Frequenzverdopplung zur zweistufigen Anregung von Cäsium-Atomen in Rydbergzustände** — •ANDREAS MÜLLERS, FRANK MARKERT, DANIEL KOLBE, MARTIN SCHEID und JOCHEN WALZ — Johannes Gutenberg Universität Mainz, Institut für Physik

Für die Anregung von Cäsium-Atomen in Rydbergzustände wird ein zweistufiges Diodenlasersystem entwickelt. Der erste Übergang des Anregungsschemas von  $6S_{1/2}$  nach  $6P_{3/2}$  benötigt Laserlicht einer Wellenlänge von 852 nm. Hierfür verwenden wir eine gitterstabilisierte Laserdiode. Die zweite Anregungsstufe von  $6P_{3/2} \rightarrow 38D_{5/2}$  ist bei 511 nm Wellenlänge. Für diesen Schritt wird eine antireflexbeschichtete Laserdiode ebenfalls per Gitterstabilisierung auf 1022 nm abgestimmt, mit einem *Tapered Amplifier (TA)* verstärkt und anschließend in einem externen Resonator frequenzverdoppelt. Gewöhnlich verwendet man für die Verdopplung einen Aufbau bestehend aus Ein- und Auskoppelspiegel sowie zwei Umlenkspiegeln (*Doppel-Z-Aufbau*). Wir ersetzen die beiden Umlenkspiegel durch ein Prisma und erhalten so einen dreieckigen Resonator. Die Strahllänge reduziert sich für diese Geometrie von ca. 80 cm auf 15 cm.

Anwendung findet das System bei der Erzeugung von kaltem Antiwasserstoff über einen zweifachen Ladungstransfer: Positronen bilden mit den Rydberg-Elektronen der Cäsium-Atome Positronium ( $Cs^* + e^+ \rightarrow Ps^* + Cs^+$ ), welches wiederum mit Anti-Protonen zu Anti-Wasserstoff reagiert ( $Ps^* + \bar{p} \rightarrow \bar{H}^* + e^-$ ).

Der Stand des Systems wird vorgestellt und diskutiert.

Q 9.8 Mo 18:15 3H

**Hocheffiziente Frequenzverdopplung von Diodenlasern mit periodisch gepolten Wellenleiterkristallen bei 488 nm** — •ANDREAS JECHOW und RALF MENZEL — Universität Potsdam, Institut für Physik, Photonik, Am Neuen Palais 10, 14469 Potsdam

Die Entwicklung von periodisch gepolten Wellenleiterkristallen auf der Basis von Lithiumniobat (PPLN) ermöglicht hocheffiziente Frequenzverdopplung (SHG) im Einfachdurchgang für Pumplaser mit moderaten cw-Ausgangsleistungen [1].

Sowohl DFB-Diodenlaser als auch Breitstreifenlaserdioden im externen Resonator [2] liefern Ausgangsleistungen von mehreren Hundert Milliwatt bei sehr guter Strahlqualität und schmalbandiger spektraler Emission. Aufgrund der sehr guten Strahleigenschaften war es möglich mehr als 60% des infraroten Lichtes in einen Wellenleiter mit einer Apertur von  $3,5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$  und 10 mm Länge einzukoppeln.

Bei einer Zentralwellenlänge von 488 nm konnten Leistungen von mehr als 150 mW und Konversionseffizienzen von über 50% realisiert werden. Die Gesamteffizienz (wall-plug efficiency) konnte dabei auf Werte von über 5% gesteigert werden.

[1] A. Jechow, D. Skoczowsky, and R. Menzel, *Opt. Express* **15**, 6976–6981 (2007)

[2] A. Jechow, V. Raab, and R. Menzel, M. Cenkier, S. Stry, and J. Sacher, *Opt. Commun.* **277**, 161–165 (2007)

Q 9.9 Mo 18:30 3H

**Passive Modenkopplung eines Breitstreifen-Diodenlasers im externen Resonator mit Hilfe eines sättigbaren Absorbers** — •DANILO SKOCZOWSKY, AXEL HEUER, ANDREAS JECHOW und RALF MENZEL — Universität Potsdam, Lehrstuhl Photonik, Am Neuen Palais 10, 14469 Potsdam

Breitstreifen-Diodenlaser mit einem externem Resonator zeigen unter bestimmten Bedingungen eine Selbst-Modenkopplung und emittieren ps-Pulse mit einer Wiederholrate, die der reziproken Resonatorumlaufzeit entspricht. Bei einem streifig kontaktierten Laserchip in einem V-förmigen Resonator konnten so Pulse von 25 ps Dauer mit einer Pulsspitzenleistung von 4,7 W bei einer Repetitionsrate von 3 GHz beobachtet werden [1].

Möchte man unabhängig vom Aufbau der Diode und der Resonatorgeometrie einen ps-Laser realisieren, so bietet sich eine passive Modenkopplung mit einem sättigbaren Absorber an. Auf Basis einer Breitstreifen-Laserdiode wird ein Resonator vorgestellt, der eine Modenkopplung und damit eine gepulste Emission bei einer Emissionswellenlänge von 976 nm ermöglicht. Entsprechend der Länge des externen Resonators von 15 cm ergibt sich eine Pulsfolgefrequenz von 1 GHz. Zusätzlich kann der Laser über eine Strommodulation aktiv modengekoppelt werden.

[1] D. Skoczowsky, A. Heuer, A. Jechow and R. Menzel. *Opt. Com.* **279**, 341–345, 2007.

Q 9.10 Mo 18:45 3H

**Waveguide mode dynamics of (Al,In)GaN Laser Diode** — •ULRICH SCHWARZ and HARALD BRAUN — Institute for Experimental and Applied Physics, University of Regensburg, D-93040 Regensburg, Germany

We measure the waveguide mode dynamics of (Al,In)GaN laser diodes emitting in the near UV to blue wavelength range. The combination of a scanning near-field microscope (SNOM) with a high spectral resolution monochromator and/or temporal resolution allows collecting multi-dimensional data sets (space, time, and wavelength) of the laser diode during pulsed operation. For highest temporal resolution — to measure relaxation oscillations and delay of lasing onset — we use a streak camera in combination with the SNOM. The measurements are then compared with basic simulations within the framework of rate equations. The central question is whether the physical effects which are particular for the group III-nitrides (i.e. carrier localization caused by indium fluctuations and quantum confined Stark effect) result in a fundamentally different behavior when compared to standard laser diodes operating in the red and infrared spectral region. We demonstrate how optical gain measurements already indicate the impact of indium fluctuations on (Al,In)GaN laser diode properties.