

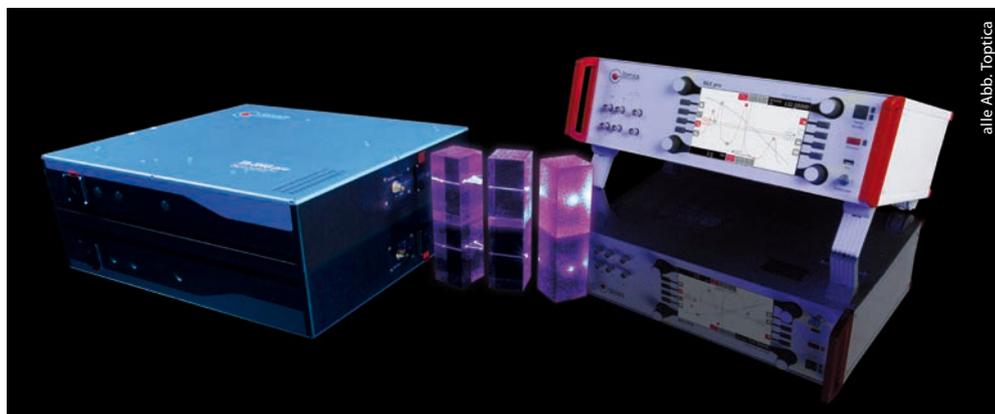
Kurz, kürzer, am kürzesten

Durchstimmbare Diodenlaser im Vakuum-Ultraviolett ermöglichen zahlreiche Anwendungen.

Ulrich Eismann, Matthias Scholz, Tim Paasch-Colberg und Jürgen Stuhler

Die Anwendungen von Laserstrahlung im tiefen Ultraviolett sind mannigfaltig, aber die Auswahl an verfügbaren Quellen und Wellenlängen ist stark eingeschränkt. Dank neuartiger Kristallmaterialien sind frequenzkonvertierte Diodenlaser im Vakuum-Ultraviolett unterhalb von 200 nm realisierbar. TOPTICA ist nun erstmals in der Lage, durchstimmbare Dauerstrich-Laser in diesem Wellenlängenbereich kommerziell anzubieten.

Vakuum-Ultraviolett (VUV) bezeichnet die Wellenlängenregion unterhalb von 200 nm. Viele industrielle und wissenschaftliche Anwendungen können von neuen Laserquellen profitieren, die in diesem Wellenlängenbereich arbeiten. Beispiele dafür sind die Halbleiterlithographie und -inspektion bei 193 nm. Mit Hilfe zahlreicher Tricks lassen sich mit dieser Wellenlänge derzeit Strukturgrößen von 14 nm im industriellen Maßstab



Die neuen digital betriebenen SHG-Lasersysteme von TOPTICA: Laserkopf mit Ausgangsstrahl (links), Lasercontroller DLC pro mit Touchscreen (rechts).

produzieren, wie man sie in der neuesten Smartphone- und Ultra-book-Chipgeneration antrifft [1]. Aktinische Inspektion der belichteten Wafer, d. h. Inspektion bei der Belichtungswellenlänge, kann von einer nichtgepulsten Lichtquelle profitieren.

Zu den wissenschaftlichen Anwendungen gehört die winkel-

aufgelöste Photoemissions-Spektroskopie (ARPES). Hierzu sind hohe Photonenenergien nötig, um große Teile der Brillouin-Zone von Festkörpern zu vermessen. Wellenlängen zwischen 170 und 205 nm und schmalbandige Laser eignen sich dabei besonders. Wellenlängen unterhalb von 200 nm sind auch für die Photolumineszenz-Untersuchung von Materialien mit hoher Bandlücke erforderlich, welche zurzeit unter anderem für UV-LEDs erforscht werden [2]. Auch in der Raman-Spektroskopie eröffnen sich durch schmalbandige VUV-Laserquellen neue Einsatzgebiete wie die Strukturuntersuchung von Proteinen [3].

Ganz allgemein lässt sich durchstimmbare Laserstrahlung im VUV auch für hochauflösende Spektroskopie oder zur Laserkühlung einsetzen. Damit ist es möglich, optische Atomuhren mit Aluminium- oder Quecksilberionen [4] zu vereinfachen oder zu verbessern sowie optische Kernuhren mit Thorium [5] erstmals zu realisieren.

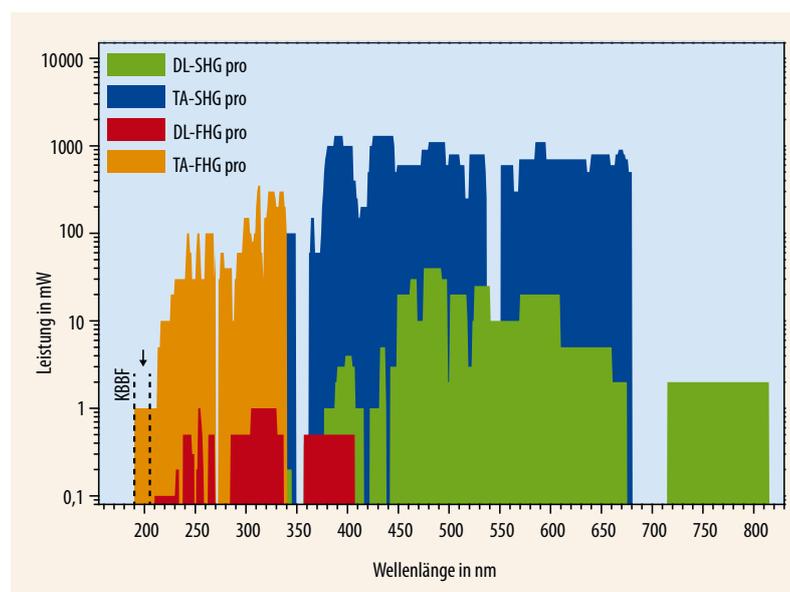


Abb. 1 Die Ausgangsleistung der aktuellen TOPTICA-NLO-Systeme als Funktion der Wellenlänge von 190 nm bis 780 nm. Die Fundamentallaser emittieren hier im

Wellenlängenbereich von 650 nm bis 1560 nm. Der nur mit KBBF zugängliche Wellenlängenbereich unterhalb von 205 nm ist hervorgehoben.

Dr. Ulrich Eismann,
Dr. Matthias Scholz,
Dr. Tim Paasch-Colberg
und Dr. Jürgen Stuhler,
Toptica Photonics AG,
Lochhammer Schlag 19,
82166 Gräfelfing

Kurze Wellenlängen aus Diodenlasern?

Diodenlaser haben in den vergangenen Jahrzehnten breiten Einzug in Alltag und Industrie gehalten. Die Anwendungen reichen vom Laserpointer über den Laserscanner an der Supermarktkasse bis zum Bearbeiten von Smartphone-Komponenten. Ihre Beliebtheit basiert auf den zahlreichen Vorteilen dieser Laserbauform wie etwa die sehr kleine Größe und das geringe Gewicht, die hervorragende Energieeffizienz, ihre Wartungsarmut und ihr relativ günstiger Preis.

Insbesondere für wissenschaftliche Anwendungen sind optimale Lasereigenschaften erforderlich, was zu einer ständigen Verbesserung der verfügbaren Systeme führt. Um etwa die spektrale Emissionsbandbreite stark einzuschränken, kann man den Diodenlaser mit einem externen Reflexionsgitter stabilisieren und erhält einen „External Cavity Diode Laser“ (ECDL). Auf diese Weise sinkt z. B. beim TOPTICA DLC DL pro Laser im Infraroten die freilaufende Linienbreite bis zum einstelligen Kilohertzbereich verglichen mit wenigen hundert Gigahertz bei Diodenlasern, bei denen es sich nicht um

ECDL handelt. Ein weiterer Vorteil der ECDL-Technologie: Die Emissionswellenlänge lässt sich kontinuierlich und ohne Modensprünge über typischerweise 30 bis 50 GHz bzw. einige bis mehrere zehn Nanometer mit Modensprüngen durchstimmen. In Sondermodellen wie dem DLC CTL sind sogar bis zu 110 nm modensprungfrei möglich.

Eine Herausforderung sind die für die Herstellung von Diodenlasern notwendigen Halbleitermaterialien und deren Emissionswellenlängen. Bisher ist nur das Infrarot quasi-kontinuierlich durch passende Materialien abgedeckt. Bis auf wenige Ausnahmen gibt es im blauen Spektralbereich und im nahen UV nur Materialien für 488 nm, 445 nm, 405 nm und 375 nm. Die kürzeste kommerziell erhältliche Wellenlänge liegt trotz Durchstimmhilfe mittels ECDL-Gitters momentan bei knapp über 370 nm. Somit ist der Zugang zum tiefen UV für die direkte Laserdioden-Technologie auf absehbare Zeit leider versperrt.

Kürzere Wellenlängen durch Frequenzverdopplung

Eine Möglichkeit, den durch Laserdioden bzw. Diodenlaser verfügbaren

Wellenlängenbereich zu erweitern, ist die nichtlineare Frequenzumwandlung. Ein Spezialfall davon ist die Frequenzverdopplung (Second Harmonic Generation, SHG). Dabei werden in einem nichtlinearen Kristall zwei Photonen einer Wellenlänge zu einem Photon bei der doppelten Frequenz, also der halben Wellenlänge, „verschmolzen“. Auf diese Weise lässt sich aus Diodenlaserlicht im nahen Infrarot über einen oder mehrere Frequenzverdopplungsschritte Laserstrahlung im gesamten sichtbaren Spektral- sowie im Ultraviolettbereich erzeugen. Da der Prozess kohärent ist, besitzt das frequenzkonvertierte Licht im Wesentlichen dieselben typischen Eigenschaften wie das Licht des Fundamentallasers.

Für eine effiziente Frequenzverdopplung sind einige technische Hürden zu überwinden. Zunächst muss neben der Energie- auch die Impulserhaltung der drei beteiligten Photonen gewährleistet sein. Sie müssen also im verwendeten nichtlinearen Kristall die gleiche Phasengeschwindigkeit und damit auch den gleichen Brechungsindex besitzen. Da dies aufgrund der allgegenwärtig vorherrschenden Dispersion normalerweise nicht erfüllt

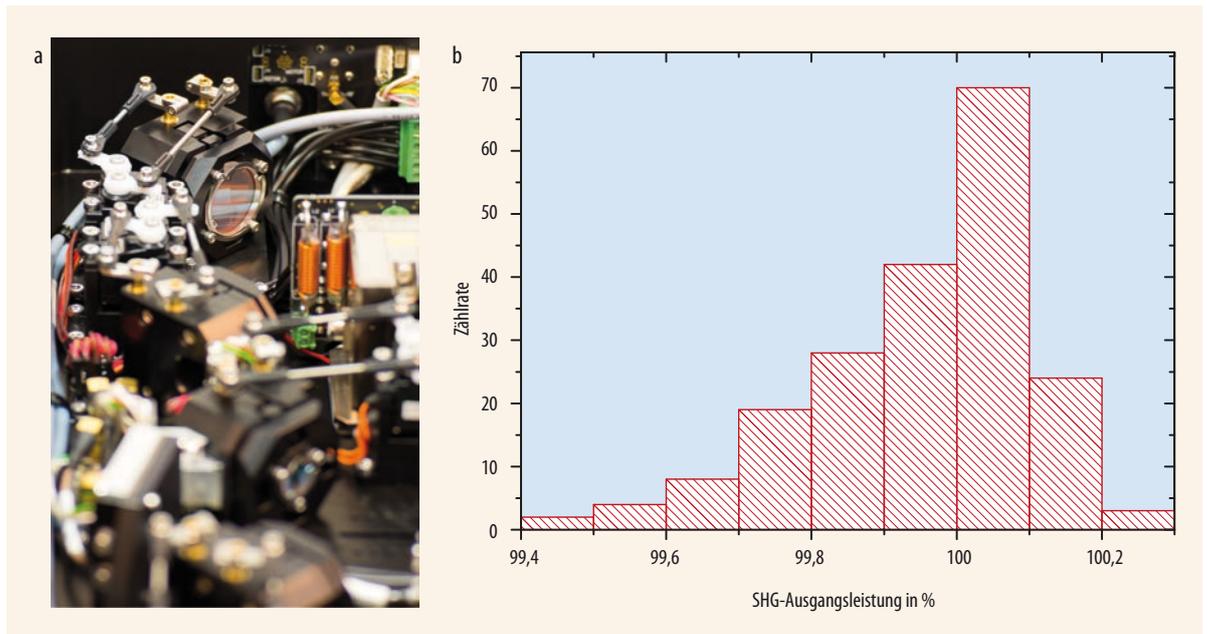


Abb. 2 Die AutoAlign-Funktion basiert auf der patentierten, ultrastabilen Optomechanik, welche mit speziellen Motoren ausgestattet wurde (a). Um die

Stabilität nicht zu beeinträchtigen, werden die Motoren nur bei Bedarf aktiviert. Statistik der Optimierungsergebnisse (b): Die residuellen Schwankungen

der optischen Ausgangsleistung liegen im Promillebereich.

ist, bedient man sich eines Tricks und optimiert die Polarisationsrichtungen der Photonen, ihre Ausbreitungsrichtungen im Kristall und die Kristalltemperatur, bis die Phasengeschwindigkeit der Photonen gleich ist. Diese Phasenanpassung erfordert unter bestimmten Winkeln geschnittene nichtlineare Kristalle, die mechanisch sehr stabil und fein einstellbar gelagert sowie temperaturstabilisiert sind.

Zudem ist die Frequenzverdopplung sehr „leistungshungrig“. Um die Effizienz des Verdopplungsprozesses von Dauerstrichlasern zu optimieren, kann man das nach dem Durchgang durch den nichtlinearen Kristall übriggebliebene Fundamentallicht „recyclen“ und wieder mit dem ursprünglichen Strahl vereinigen, sodass es erneut für die Frequenzverdopplung zur Verfügung steht. Hierfür wird ein optischer Resonator verwendet, in dem sich der nichtlineare Kristall befindet. Da die Bandbreiten der Resonanzen des Resonators typischerweise einige Megahertz betragen, wird Licht nur dann effizient überhöht, wenn es deutlich schmalbandiger ist. Moderne ECDLs erfüllen diese Bedingung und können dementsprechend sehr gut als Fundamentallaser zur Frequenzverdopplung dienen. Für einen resonanten Betrieb muss jedoch die optische Länge des Resonators ein ganzzahliges Vielfaches der Fundamentallaser-Wellenlänge betragen. Dies gewährleisten piezoelektrische Aktuatoren, welche die Resonatorlänge in einer Regelschleife nachführen. Hierbei gibt es verschiedene Verfahren, um das dafür notwendige Fehlersignal zu erzeugen. TOPTICAs SHG-Systeme verwenden das System nach Pound, Drever und Hall, da es das schnellste, stabilste und zuverlässigste Verfahren ist. Außerdem ist ein Doppelpiezo-Aktuator integriert, der einen hohen Hub für langsame Variationen oder Scans sowie eine hohe Bandbreite von etwa 30 kHz zum Ausgleich akustischer Störungen und Vibrationen ermöglicht.

Die verfügbare Ausgangsleistung frequenzverdoppelter Diodenlaser-

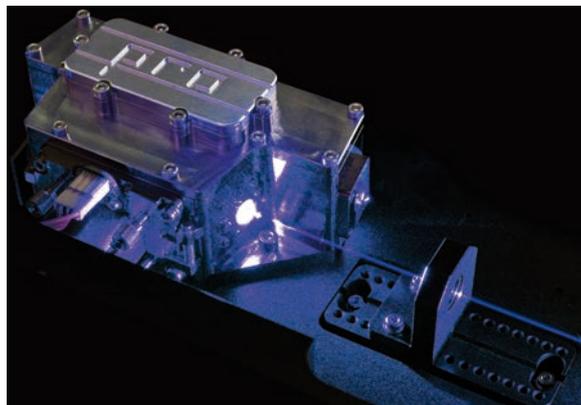


Abb. 3 Der TOPTICA pro-Resonator ist komplett gekapselt. Die serienmäßig erreichte residuelle Gasleckrate beträgt 10^{-3} bis 10^{-5} mbar l/s.

systeme beträgt mittlerweile mehr als ein Watt (Abb. 1). Dies ist den kontinuierlichen Fortschritten der zugrundeliegenden optischen Halbleitermaterialien (insbesondere neuer Trapezverstärker) sowie der Frequenzverdopplung zuzuschreiben. So ist ein Watt Ausgangsleistung heute bei sichtbaren Wellenlängen (Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau) bis ins UV erreichbar, und viele spektrale Lücken schmalbandiger Laser haben sich in den letzten Jahren geschlossen. Besonders relevant sind zum Beispiel die Wellenlängen um 400 nm (Ytterbiumionen-/Calciumionen-Laserkühlung), 461 nm (Strontium-Laserkühlung), 480 nm (Rydberg-Anregungen von Rubidium), 589 nm (Natrium-Laserkühlung) oder 671 nm (Lithium-Laserkühlung).

Eine Besonderheit der aktuellen, frequenzverdoppelten TOPTICA-Laser ist die vollständig digitale Ansteuerung der Laserköpfe. Einerseits ermöglicht dies ein konkurrenzlos geringes Rauschen der Fundamentallaser, das sich auch im frequenzverdoppelten Licht widerspiegelt. Andererseits ergeben sich dadurch neuartige Optionen, die mit herkömmlicher Analogelektronik nicht umsetzbar sind. Dazu gehören eine Touchscreen-Bedienung, die das klassische Oszilloskop und Bedienknöpfe ersetzt, die Fernsteuerung über TCP/IP oder intelligente Relock-Funktionen sowohl des Resonators als auch des Fundamentallaser-Locks auf eine externe Referenz. Die Ausgangsleistung aller Stufen (ECDL, Verstärker, SHG) wird kontinuierlich elektronisch erfasst

und die SHG-Ausgangsleistung auf Knopfdruck aktiv geregelt. Mit der FiberMon-Option ist dies sogar für Systeme mit fasergekoppeltem Ausgang möglich.

Ein weiteres Highlight von TOPTICAs digitalen Systemen ist die AutoAlign-Funktion. Obwohl die Laserköpfe der bewährten pro-Serie aufgrund ihrer Konstruktionsmerkmale (versiegelter monolithischer Resonator, ein aus dem Vollen gefrästes Gehäuse, patentierte ultrastabile Spiegelhalter mit Festkörpergelenken) von Haus aus äußerst stabil sind, kann die Ausgangsleistung durch Temperaturdrifts und residuelles mechanisches Kriechen schwanken. Um diese Drifts zu kompensieren, lässt sich die Ausrichtung der Laserstrahlen in den aufeinanderfolgenden Stufen (ECDL, Verstärker, SHG-Resonator, Faser) auf Knopfdruck automatisch optimieren. Dies ermöglichen motorisierte Spiegelhalter (Abb. 2a). Zwei Spiegel dienen dazu, die Position und den Winkel des Laserstrahls bei der Einkopplung in die jeweils nächste Stufe zu variieren. Die Optimierung erfolgt mit Hilfe eines speziellen Gradientensuchalgorithmus. Das Resultat ist eindrucksvoll (Abb. 2b): Die typischerweise erreichte Streuung der optimierten Ausgangsleistung liegt im Promillebereich – ein Wert, der die bei manueller Justage üblichen Ergebnisse bei Weitem übertrifft. Im Normalbetrieb ist das System allerdings elektrisch deaktiviert, um mögliche mechanische Vibrationen auszuschließen. Allein der Nutzer entscheidet, ob und wann die Autoalign-Funktion startet.

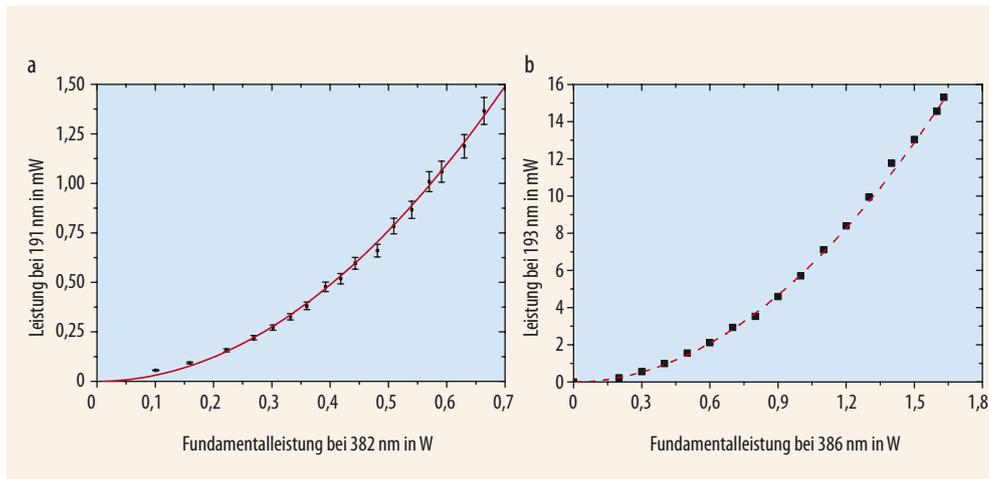


Abb. 4 VUV-Ausgangsleistung der resonanten Frequenzverdopplung in einem KBBF-Kristall bei 191 nm (a) und 193 nm (b) als Funktion der jeweiligen Fundamentalleistung.

sind mindestens 30 mW möglich. Außerdem lässt sich hier durch einfache ECDL-Frequenzverdopplung eine Ausgangsleistung von einigen Milli watt erzielen [6]. Allerdings erlauben die normal verfügbaren nichtlinearen Kristalle keine effiziente Verdopplung zu kürzeren Wellenlängen als etwa 205 nm, da die oben erwähnte Phasenanpassung nicht mehr möglich ist. Nichtsdestotrotz erreichen die Systeme von TOPTICA direkt an dieser „klassischen Barriere“ immer noch 1 mW Ausgangsleistung.

Von kurz zu ganz kurz

1) Für die SHG von 386 nm auf 193 nm beträgt der Phasenanpassungswinkel 56,5° und ist damit größer als der Winkel für interne Totalreflexion. Selbst bei tangential zur Kristallgrenzfläche auftreffendem Licht propagiert der Strahl unter für die Phasenanpassung zu kleinem Winkel zur optischen Achse des Kristalls.

Das im Sichtbaren oder nahen UV verfügbare frequenzkonvertierte Licht lässt sich in einem weiteren, analog zur oben beschriebenen SHG-Stufe aufgebauten Verdopplungsschritt ins tiefe UV konvertieren. Die entsprechenden Laser sind als FHG-Systeme (Fourth Harmonic Generation) bekannt. Allerdings treten im tieferen UV neue technische Probleme auf, wie etwa die stärkere Absorption der üblichen optischen Materialien, welche bis hin zur Degradation der Ausgangsleistung führen kann. Hier kann der TOPTICA pro-Resonator seine technischen Stärken voll ausspielen (Abb. 3). Durch vollständige Versiegelung aller im Grundkörper notwendigen Durchführungen (optisch, mechanisch, elektronisch) sank die residuelle Gasleckrate auf 10^{-3} bis 10^{-5} mbar l/s. Dank der be-

sonderen Konstruktion gelang dies ohne jegliche Einschränkungen der Bedienungsfreundlichkeit. Alle notwendigen Komponenten wie Spiegel und nichtlinearer Kristall sind bequem von außen zu erreichen und bei Bedarf im versiegelten Zustand justiert. Um die Verdopplungsstufe für einen weiteren Anwenderkreis zugänglich zu machen, ist sie sowohl ohne DL- oder TA-Fundamentallaser als auch mit Faserverstärkung des Fundamentallichts erhältlich.

Mit einer derartigen Ausstattung gerüstet, sind Ausgangsleistungen von 300 mW oberhalb von 300 nm bereits Standard. Selbst bei den beliebten Wellenlängen 243 nm und 254 nm (Wasserstoff- und Quecksilberspektroskopie) sind mittlerweile 100 mW üblich, und bei 230 nm (Indiumionen, Direktanregung von Lithium-Rydberg-Zuständen und Flusszytometrie)

Kürzeste Wellenlängen

Um noch kürzere Wellenlängen erreichen zu können, war bislang die Kristallforschung gefragt. Zum Beispiel gelingt es mittlerweile, den Kristall Kaliumfluoroberyllborat (KBBF) herzustellen [7]. Dieser zeichnet sich im Vergleich zu herkömmlichen nichtlinearen Kristallen durch bessere UV-Transparenz aus. Außerdem ermöglicht er eine Phasenanpassung für SHG-Wellenlängen unter 200 nm (Tabelle). Der KBBF-Kristall lässt sich bislang aufgrund seiner fragilen Schichtstruktur nur in einer Richtung schneiden, und es gelingt nicht ohne Weiteres, den Fundamentalstrahl von außen so einzustrahlen, dass er im Kristall unter dem Phasenanpassungswinkel propagiert.¹⁾ Um dies zu erreichen, wird der Kristall zwischen zwei optische Prismen eingespannt [8]. Gleichzeitig ermöglicht es die geschickte Wahl der Prismen, die Oberflächenreflexionen am Kristall zu verringern. Damit lässt sich der KBBF-Kristall in einem SHG-Resonator einsetzen. Im TOPTICA-System wird dafür zum Beispiel eine TA-SHG pro mit 1,6 W Ausgangsleistung bei 386 nm als Fundamentalleistung benutzt.

Abb. 4 zeigt die Ausgangsleistungen bei Wellenlängen von 191 nm [9] und 193 nm [10] als Funktion der Fundamentalleistung, die mit zwei unterschiedlichen Systemen und KBBF-Kristallen erzielt wurden. Erwähnenswert ist der VUV-Spitzenwert von 15 mW

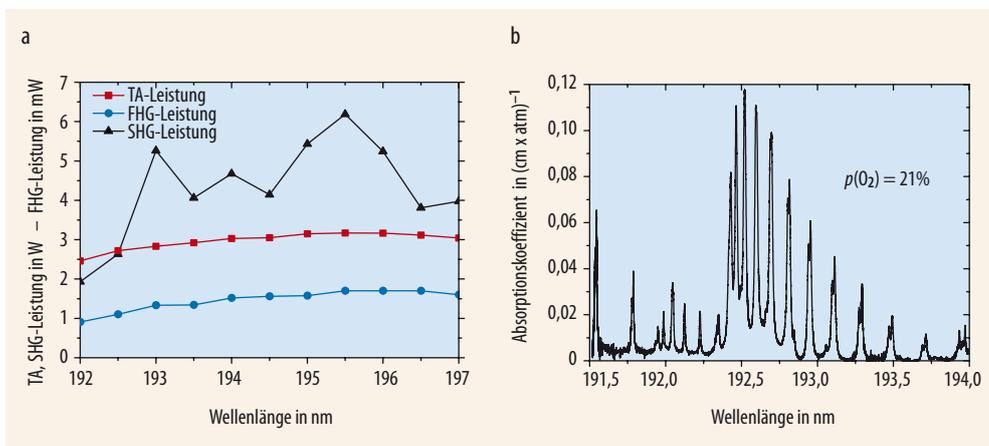


Abb. 5 Grobdurchstimmung des KBBF-Systems: Leistungen als Funktion der Wellenlänge (a) und damit realisierte Absorptionsspektroskopie an Sauerstoff in Luft (b)

Eigenschaften nichtlinearer optischer Kristalle

Material	LBO	CLBO	BBO	KBBF
UV-Transmissionskante in nm	155	180	185	147
SHG-Grenzwellenlänge in nm	277	237	205	162

Table 1 Relevante Eigenschaften diverser nichtlinear-optischer Kristalle im Vergleich

bei 193 nm im Single-Frequency-Dauerstrichbetrieb. Die resultierende VUV-Strahlung hat eine Linienbreite von unter 1 MHz und lässt sich modensprungfrei über mehr als 80 GHz abstimmen. Somit wird höchstauflösende Spektroskopie im VUV möglich. Bei allen ECDL-basierten Lasern von TOPTICA erlaubt die schnelle Frequenzregelung auf einen Hochfinesse-Resonator, die Linienbreite deutlich zu reduzieren, d. h. auch auf Werte unter 1 Hz [11, 12]. Die KBBF-Systeme besitzen ein äußerst geringes Intensitätsrauschen unter 0,3 Prozent (RIN 10 Hz – 10 MHz) und eine für wissenschaftliche Zwecke ausreichende Langzeitstabilität (typischerweise 80 Stunden ohne Justage bei 8 mW Ausgangsleistung).

Wie bei anderen TA-SHG pro- oder TA-FHG pro-Systemen von TOPTICA lässt sich die Wellenlänge über einen größeren Bereich durchstimmen (Abb. 5a). Links sind die erzielten optischen Leistungen eines KBBF-Systems über der Wellenlänge gezeigt. Während sich die TA- und SHG-Leistung bei 772 nm bzw. 386 nm durch die Abstimmung sehr homogen und nur geringfügig verändern, erkennt man größere Variationen der Ausgangsleistung der FHG-Stufe bei 193 nm. Dieses ist der Inhomogenität des KBBF-Kristalls geschuldet: Durch die Verkipfung des Kristalls im Resonator, die aufgrund der Phasen Anpassung bei der Wellenlängenänderung nötig ist, gelingt es nicht immer, einen optimalen Punkt auf dem Kristall für beste Performance zu finden. Am Beispiel der Absorptionsspektroskopie an Sauerstoff sieht man die mit diesem System ermittelten wellenlängenabhängigen Absorptionskoeffizienten von Laborluft (Abb. 5b). Die Absorption in diesem Wellenlängenbereich ist hauptsächlich durch Sauerstoff bestimmt, und

die gemessenen Werte entsprechen sehr gut den Erwartungen für einen Sauerstoffanteil von 21 Prozent.

Zusammenfassung

Alle hier erwähnten Lasersysteme sind bei TOPTICA Photonics erhältlich. Dies gilt nicht nur für durchstimmbare ECDL-Diodenlaser vom Typ DL pro oder CTL sowie frequenzverdoppelte oder frequenzvervierfachte Diodenlaser (TA-SHG pro oder TA-FHG pro), sondern auch für das frequenzvervierfachte Diodenlaser-System mit KBBF, das erstmals kommerziell durchstimmbare Dauerstrichlaserstrahlung bei Wellenlängen unterhalb von 205 nm in spektroskopischer Qualität zur Verfügung stellt.

Literatur

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/14_nanometer
- [2] *Trinkler und Berzina*, Advances in Ceramics – Characterization, Raw Materials, Processing, Properties, Degradation and Healing
- [3] *I. K. Lebedev et al.*, Anal. Bioanal. Chem **381**, 431 (2005)
- [4] *T. Rosenband et al.*, Science **28**, 1808 (2008)
- [5] www.pro-physik.de/details/news/7892161/Genauer_als_die_beste_Atomuhr.html, www.nuclock.eu
- [6] *G. Almog et al.*, Review of Scientific Instruments **86**, 033110 (2015)
- [7] *C. Chen et al.*, J. Appl. Phys. **77**, 2268 (1995)
- [8] *J. Lu et al.*, Opt. Commun. **200**, 415 (2001)
- [9] *M. Scholz et al.*, Opt. Express **20**, 18659 (2012)
- [10] *M. Scholz et al.*, Appl. Phys. Lett. **103**, 051114 (2013)
- [11] *N. Hoghooghi et al.*, ICOLS 2015 22nd International Conference on Laser Spectroscopy June 28 – July 3, Singapore **129** (2015)
- [12] *Y. N. Zhao et al.*, Optics Communications **283**, 4696 (2010)