

Zwei - Drei - Vier - UV!

Kontinuierlich abstimmbare UV-Laser auf Halbleiterbasis

Thorsten Schmitt, Anselm Deninger und Frank Lison

Dipl. Phys. Thorsten Schmitt, Dr. Anselm Deninger, Dr. Frank Lison, TOPTICA Photonics AG, Lochhamer Schlag 19, 82166 Gräfelfing

Anspruchsvolle Laseranwendungen in Spektroskopie und Messtechnik basieren häufig auf wellenlängenspezifischen optischen Übergängen. Speziell in der Prozesstechnologie zeigen viele relevante Atome (Silizium, Aluminium, Gold, ...) Resonanzübergänge im ultravioletten Spektralbereich. In der Mikroskopie erhöhen die bei kurzen Wellenlängen erzielbaren kleinsten Fokusburchmesser das Auflösungsvermögen. In vielen Fällen werden hierfür kontinuierlich betriebene UV-Laser benötigt. Die technische Umsetzung dieser Anforderungen im ultravioletten Spektralbereich ist bis heute eine Herausforderung geblieben. Moderne Konzepte auf Basis frequenzverdoppelter und -vervierelter Halbleiterlaser eröffnen eine Vielzahl neuer Möglichkeiten.

Konventionelle UV-Laser, beispielsweise Excimer- oder Gaslaser, sind wenig effizient, zeigen häufig eine schlechte Strahlqualität oder sind nicht kontinuierlich abstimmbare. Zudem stehen diese Laser nur bei einzelnen diskreten Wellenlängen zur Verfügung. Durchstimmbare Systeme, die beispielsweise auf der Kombination von Pumplaser, Farbstofflaser und nachgeschalteter Frequenzverdopplung basieren, können zwar prinzipiell beliebige UV-Wellenlängen erreichen, sind andererseits jedoch unangenehm groß und aufwändig zu justieren.

Im nahinfraroten und teilweise auch im sichtbaren Spektralbereich (violett, blau, rot) haben sich halbleiterbasierte Lasersysteme fest etabliert. Durch ein zusätzliches Beugungsgitter lässt sich das Emissionsprofil einer Laserdiode einengen und die Kohärenzlänge um mehrere Größenordnungen

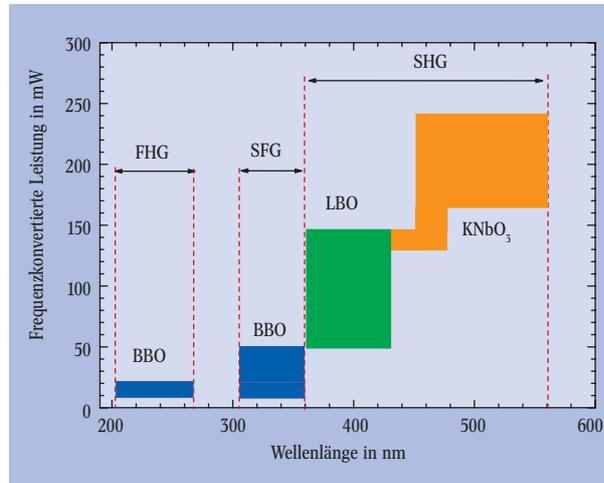


Abb. 1: Erreichbare Laserleistung frequenzkonvertierter Halbleiterlaser bei Verwendung von Kristallen aus Beta-Bariumborat (BaB_2O_4 , kurz BBO), Lithium-Triborat (LiB_3O_5 , LBO) und Kaliumniobat ($KNbO_3$) [3].

1) Genau genommen ist hier zwischen kritischer und nichtkritischer Phasenanpassung zu unterscheiden. Bei kritischer Phasenanpassung ist die senkrechte Polarisationsrichtung durch hohe Verluste unterdrückt. Bei nichtkritischer Phasenanpassung kann auch die zweite Polarisationsrichtung resonant sein, allerdings aufgrund des unterschiedlichen Brechungsindex bei einer anderen Wellenlänge. Somit sind nie beide Polarisationskomponenten gleichzeitig resonant.

erhöhen. Im Fall von Laserdioden mit sog. Distributed Feedback (DFB) und Distributed Bragg Reflector (DBR) ist die Gitterstruktur unmittelbar in den Halbleiter integriert. Sie wirkt als spektraler Bandpass, der aus dem Verstärkungsprofil des Halbleiters eine einzige longitudinale Lasermode selektiert. Der alternative Ansatz, ein Diodenlaser mit externem Resonator (*external cavity diode laser*, ECDL), kommt insbesondere bei höchsten Anforderungen hinsichtlich der Linienbreite zum Einsatz. Mittels ausgeklügelter Verfahren kann ein ECDL so präzise auf einen atomaren Resonanzübergang oder einen Resonator hoher Finesse stabilisiert werden, dass seine Linienbreite auf weniger als 1 kHz verringert wird [1]. Zudem lässt sich die Wellenlänge eines ECDLs durch mechanische Änderung

der Resonatorgeometrie über einen weiten Bereich - durchaus 20 nm und mehr - abstimmen.

Trotz all dieser Fortschritte in der Halbleitertechnologie sind zwei wichtige Spektralbereiche nach wie vor nicht direkt mit Laserdioden erreichbar: die grün/gelbe „Lücke“ im sichtbaren Bereich (470-620 nm) sowie die UV-Region unterhalb von 375 nm. Hier bietet sich jedoch die nichtlineare Frequenzkonversion leistungsstarker (nah-)infraroter Diodenlaser mit guter Strahlqualität an. Die Kombination eines Diodenlasers mit Modulen zur Frequenzverdopplung, Summenfrequenzmischung oder Frequenzvervierfachung ergibt ein kompaktes und zudem wartungsfreies Lasersystem bei vormals unzugänglichen Wellenlängen.

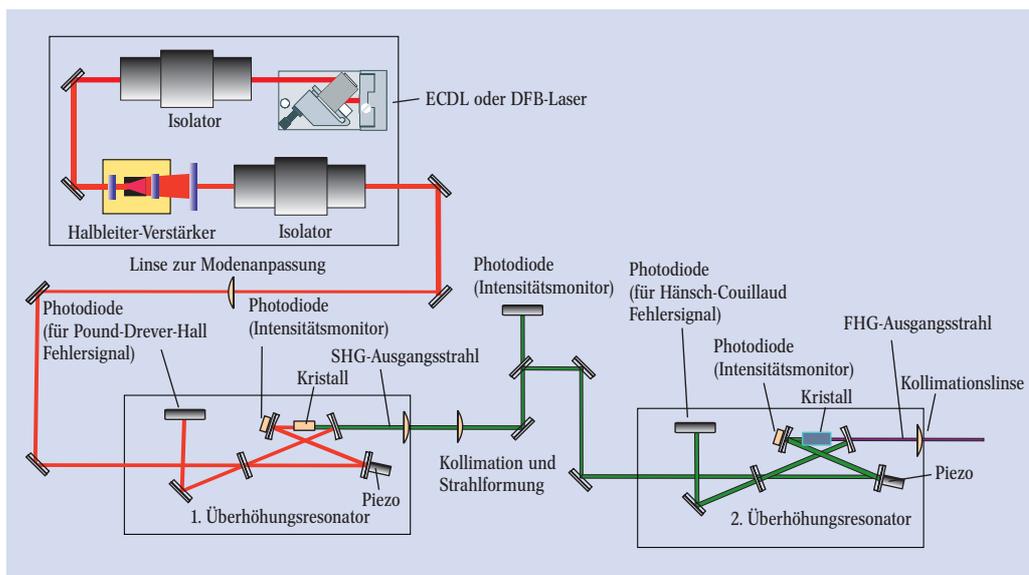


Abb. 2: Lasersystem zur Erzeugung von frequenzvervierfachtem Licht. Der Ausgangsstrahl eines nahinfraroten, abstimmbaren Diodenlasers (ECDL oder DFB-Laser) wird in einem Halb-

leiterverstärker verstärkt und in einen ersten Ringresonator eingekoppelt. Das frequenzverdoppelte Licht wird in einem weiteren Ringresonator abermals frequenzkonvertiert.

Nichtlineare Frequenzkonversion: SHG, SFG und FHG

Die gängigste Möglichkeit zur Erweiterung des Wellenlängenbereichs ist die Frequenzverdopplung (*Second Harmonic Generation*, SHG) mittels eines nichtlinearen Kristalls, der sich üblicherweise in einem Überhöhungsresonator befindet [2]. Da die Intensität des frequenzkonvertierten Lichts quadratisch von der verfügbaren Leistung der Fundamentalwellenlänge abhängt, werden hier bevorzugt zweistufige Diodenlaser aus einem „Master-Oszillator“ (mit niedriger Leistung, aber genau einstellbaren spektralen Eigenschaften) und einem nachgeschalteten Halbleiterverstärker eingesetzt. Der Ausgangsstrahl des Verstärkers (1-1,5 W) wird in einem Ringresonator auf 10-100 W überhöhrt und in ultraviolettes, blaues oder grünes Laserlicht mit bis zu 300 mW Leistung konvertiert. Abbildung 1 zeigt die Wellenlängenabdeckung der gängigsten nichtlinearen Kristalle und die hiermit erreichbaren Ausgangsleistungen.

Zur Erzeugung noch kurzwelligerer

Strahlung bietet sich der Prozess der Summenfrequenzmischung (*Sum Frequency Generation, SFG*) an. Hier werden zwei Fundamentallaser benötigt, deren Licht auf einem nichtlinearen Kristall überlagert wird. Der Kristall wandelt dann zwei Photonen der Frequenzen ω_1 und ω_2 zu einem Photon der Frequenz $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ um. In der Praxis wird oft ein leistungsschwächerer, infraroter Halbleiterlaser in einen Überhöhungsresonator eingekoppelt und mit einem stärkeren, kurzwelligeren Laser „single-pass“ gemischt. Dieser zweite Laser kann beispielsweise ein diodengepumpter Festkörperlaser bei 532 nm sein; derartige Laser sind kommerziell mit hoher Leistung und spektraler Güte erhältlich. Mit einer solchen Kombination lässt sich der spektrale Bereich von 306–356 nm relativ einfach erreichen – bei Ausgangsleistungen von bis zu 50 mW.

Die „Königsdisziplin“ der Frequenzkonversion ist schließlich die Frequenzvervierfachung (*Fourth Harmonic Generation, FHG*). Hier kaskadiert man zwei Verdopplerstufen, um Laserstrahlung im tiefen UV zu generieren. Abb. 2 zeigt einen möglichen Aufbau.

Stabilisierung des Überhöhungsresonators

Zur effizienten Frequenzkonversion ist eine genaue Kontrolle der Länge des Überhöhungsresonators erforderlich. Es gibt zwei etablierte Verfahren, um den Überhöhungsresonator auf die Laserfrequenz zu stabilisieren. Beide Verfahren gehen auf Arbeiten der 2005 ausgezeichneten Physik-Nobelpreisträger zurück: die Hänsch-Couillaud-Stabilisierung [4] auf der einen und die Pound-Drever-Hall-Methode [5] auf der anderen Seite. In beiden Fällen wird ausgenutzt, dass bei korrekter Resonatorlänge die Phase der fundamentalen Laserstrahlung vor und nach Durchlaufen des Verdopplungsringes gleich ist. Weicht die Länge des Verdopplungsringes hingegen vom idealen Fall ab, so lässt sich zwischen einem Teilstrahl vor Eintritt in den Verdopplungsring und einem Teilstrahl, der den Ring bereits ein- oder mehrfach durchlaufen hat, eine Phasendifferenz messen. Diese wird zur Erzeugung eines Fehlersignals verwendet und einem Regelkreis zugeführt, der die Länge des Überhöhungsresonators kontrolliert.

Das *Hänsch-Couillaud-Verfahren* nutzt einen polarisationsabhängigen Effekt zur Erzeugung eines dispersiven Fehlersignals aus. Der im Verdopplungsring befindliche doppelbrechende Kristall dient hierbei als polarisationssensitives Element in dem Sinne, dass nur eine Polarisationsrichtung die Resonanzbedingung erfüllen kann.¹⁾ Der „Trick“ besteht nun darin, dass die lineare Polarisierung der fundamentalen Laserstrahlung vor Eintritt in den Verdopplungsring um wenige Grad aus der korrekten Polarisationsrichtung heraus rotiert wird. Bei exakt eingestellter Resonatorlänge bleibt die resonante Polarisationskomponente mit dem nichtresonanten Polarisationsanteil in Phase und der Laserstrahl ist somit auch hinter dem Verdopplungsring linear polarisiert. Dieser Polarisationszustand wird mit dem Hänsch-Couillaud-Detektor (Abb. 3) gemessen.

Der Teststrahl durchläuft dabei eine $\lambda/4$ -Platte, die so eingestellt ist, dass im Resonanzfall die lineare Polarisierung vollständig in zirkulare umgewandelt wird. Anschließend wird der Teststrahl mit einem Polarisationsstrahlteiler auf zwei Photodioden aufgeteilt. Nach Subtraktion der Photodiodensignale ergibt sich das Fehlersignal, das genau dann Null ist, wenn der Teststrahl hinter dem Resonator seine lineare Polarisierung beibehalten hat. In allen anderen Fällen ist der Teststrahl sowohl vor als auch hinter der $\lambda/4$ -Platte elliptisch polarisiert und das Fehlersignal von Null verschieden.

Der wesentliche Vorteil des Hänsch-Couillaud-Verfahrens liegt in seinem einfachen

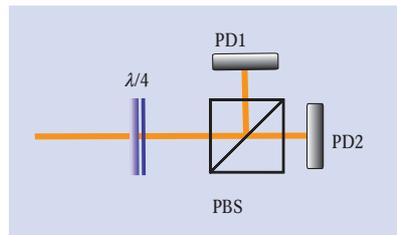


Abb. 3: Hänsch-Couillaud-Detektor zur Messung des Polarisationszustands hinter dem Verdopplungsring.

Aufbau, der keinerlei Modulationstechniken erfordert. Nachteilig ist hingegen die Änderung der Doppelbrechung im Kristall in Abhängigkeit der Temperatur. Daraus kann eine Verfälschung des Fehlersignals resultieren, die – abhängig vom verwendeten Kristall und den resonatorinternen Leistungen – im Extremfall so groß werden kann, dass keine stabile Regelung möglich ist.

Beim *Pound-Drever-Hall-Verfahren* wird die einfallende Laserstrahlung der Frequenz ν mit einer Radiofrequenz ω phasenmoduliert, sodass zwei Seitenbänder bei Frequenzen $\nu \pm \omega$ entstehen. Hierbei wird die vom Lokaloszillator erzeugte Modulationsfrequenz ω deutlich größer gewählt als die Bandbreite des Resonators, sodass im Resonanzfall die Trägerfrequenz ν in den Verdopplungsring eingekoppelt wird, die Seitenbänder jedoch vollständig am Einkoppelspiegel reflektiert werden. Das frequenzverdoppelte Licht ist somit nicht frequenzmoduliert.

Der reflektierte Teilstrahl (Frequenz $\nu \pm \omega$) wird mit der Fundamentalstrahlung überlagert, die den Verdopplungsring durchlaufen hat (Trägerfrequenz ν), und das zugehörige Schwebungssignal wird mit einer schnellen Photodiode detektiert. Die Phase des Schwebungssignals hängt nun von der Phase der aus dem Resonator ausgekoppelten Strahlung ab. In einem RF-Mischer wird die Phase des Beat-Signals mit der des Lokaloszillators verglichen und hieraus ein dispersives Fehlersignal generiert.

Das Pound-Drever-Hall-Verfahren hat den Vorteil, dass es unabhängig von der thermischen Änderung der Doppelbrechung des nichtlinearen Kristalls ist. Der Fangbereich der Regelung wird nur durch die gewählte Modulationsfrequenz limitiert, und das Fehlersignal erlaubt eine große Regelbandbreite. Ein Nachteil liegt in der Notwendigkeit, die Laserstrahlung zu modulieren. Bei einem

Diodenlaser kann dies auf einfache Weise über den Betriebsstrom erfolgen, bei einem Festkörper- oder Farbstofflaser hingegen ist ein externer (z. B. elektrooptischer) Modulator nötig.

Unabhängig von der Art der Stabilisierung lässt sich durch Frequenzvervierfachung der Wellenlängenbereich von 205–280 nm mit einer kontinuierlichen Ausgangsleistung von bis 20 mW erschließen. Derartige halbleiterbasierte UV-Laser finden in der wissenschaftlichen Forschung wie beispielsweise der hochauflösenden Spektroskopie, der Laserkühlung und der Manipulation von Atomen und Ionen ihre Anwendung. Für den industriellen Einsatz ist insbesondere die Kombination von sehr kurzer Wellenlänge und hoher Kohärenz von Vorteil. Vorwiegende Einsatzgebiete in Interferometrie und Messtechnik sind das Testen von hochqualitativen Linsen, ellipsometrische Schichtdickenmessung in der Halbleiterindustrie oder photoelektronische Spektroskopie und Mikroskopie.

Mit der Verfügbarkeit noch stärkerer Infrarot-Halbleiterlaser wird die erreichbare UV-Leistung zukünftig weiter steigen und durch den modularen Aufbau der Lasersysteme sind den Wünschen des Anwenders hinsichtlich Wellenlänge und Ausgangsleistung kaum noch Grenzen gesetzt: So wird die Verwendung eines Masterlasers mit Faserverstärker oder eines Faser-Masterlasers schon bald die letzten spektralen Lücken schließen.

- [1] A. Schoof et al., *Opt. Lett.* **26**, 1563 (2001)
- [2] Th. Schmitt, A. Deninger, F. Lison, *Physik Journal*, Juni 2004, S. 64
- [3] Diese Lasersysteme werden von TOPTICA Photonics gefertigt und unter den Produktnamen TA-SHG, TA-SFG und TA-FHG angeboten.
- [4] T. W. Hänsch, B. Couillaud, *Opt. Comm.* **137**, 295 (1997)
- [5] R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalsky et al., *Appl. Phys.* **B 31**, 97 (1983)