

# Infrarote Laserdioden machen blau

Frequenzkonversion von Halbleiterlasern erschließt den kurzwelligen Spektralbereich

Thorsten Schmitt, Anselm Deninger und Frank Lison

**L**asersysteme auf Basis blau-violetter Laserdioden haben sich in den vergangenen fünf Jahren sowohl in der wissenschaftlichen Grundlagenforschung als auch in industriellen Anwendungen durchsetzen können [1]. Derzeit verfügbare GaN-Halbleiterlaser decken allerdings nur einen Wellenlängenbereich zwischen 375 nm und 470 nm ab, und dies auch nur sehr lückenhaft: Mangelndes ökonomisches Interesse bei „exotischen“ Wellenlängen rechtfertigt die teuren Entwicklungskosten nicht, zudem sind viele interessante Wellenlängen mangels geeigneter Halbleitermaterialien derzeit überhaupt nicht zugänglich. Stehen Laserdioden geeigneter Wellenlänge zur Verfügung, so schließt wiederum die Ausgangsleistung von wenigen 10 mW viele Anwendungen aus. Abhilfe schafft hier die Frequenzkonversion von nah-infraroten (NIR) Halbleiterlasern. Durch Frequenzverdopplung wird der gesamte blau-grüne Spektralbereich zugänglich; weitere nichtlineare Methoden wie Summenfrequenzmischung oder Frequenzvervierfachung erweitern das Laserspektrum darüber hinaus bis weit ins Ultraviolett (UV).

Techniken der nichtlinearen Frequenzkonversion sind nicht neu, doch wurden sie bislang meist in Kombination mit Kristall-Lasern (Nd:YAG, Nd:YVO, Titan: Saphir) angewandt – Lasersysteme, die aufgrund ihres Preises, Energieverbrauchs und Wartungsaufwands Nachteile mit sich bringen. Diodenlasersysteme hingegen sind vergleichsweise billig, kompakt und effizient bei gleichzeitig langer Lebensdauer. Zudem lässt sich die Emissionsfrequenz von Diodenlasern auf einfache Weise variieren

(„durchstimmen“), was diese Laser vorteilhaft von anderen UV-Lasern (Stickstoff-Laser, HeCd-Laser) abhebt.

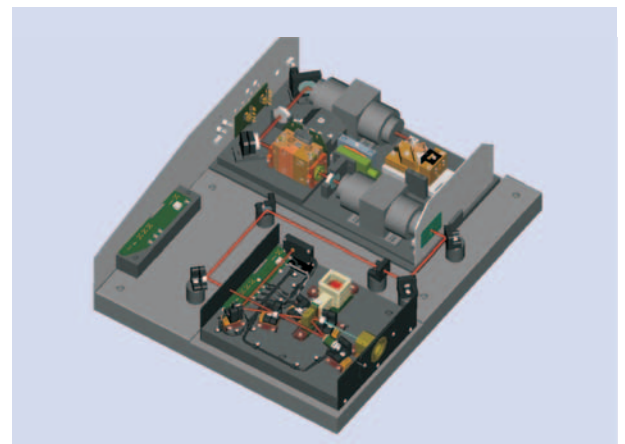
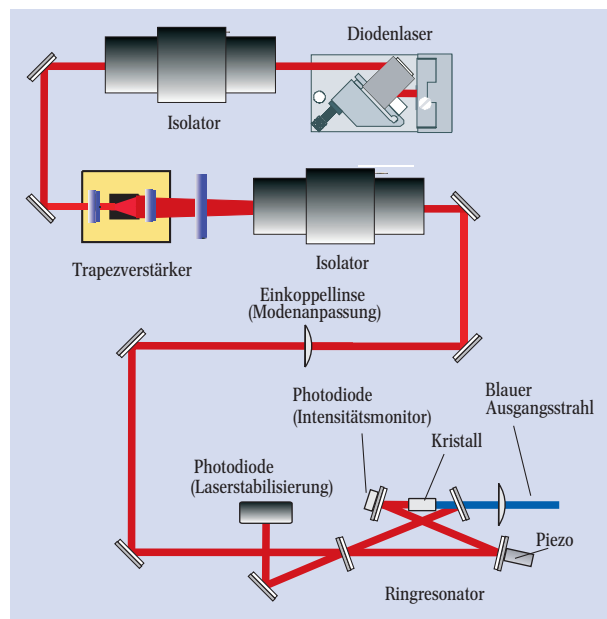
Abbildung 1 skizziert den Aufbau eines frequenzverdoppelten Diodenlasersystems. Die Frequenzkonversion erfolgt mittels eines nichtlinearen Kristalls, der üblicherweise in einen Überhöhungsresonator platziert wird. Da die erreichbare blau-grüne Lichtleistung quadratisch von der Intensität der NIR-Fundamentalwellenlänge abhängt, wird der Diodenlaser als zweistufiger Aufbau aus sog. „Master“-Laser und Verstärker realisiert („Master oscillator – Power amplifier“, MOPA-Konfiguration). Als Master-Laser dient hierbei ein gitterstabilisierter, abstimmbarer Diodenlaser [2]. Derartige Laser, seit längerem kommerziell erhältlich, haben im Wellenlängenbereich zwischen 700 und 1000 nm eine spektrale Breite von 1–2 MHz und eine Ausgangsleistung von bis zu 150 mW; die Laserfrequenz lässt sich typischerweise um 20–50 GHz modensprungfrei verstimmen. Zur Lichtverstärkung durchläuft der Laserstrahl anschließend eine Halbleiterstruktur mit trapezförmiger Geometrie der laseraktiven Zone. Ein solcher Trapezverstärker („tapered amplifier“) emittiert einen nahezu beugungsbegrenzten Strahl mit den spektralen Eigenschaften des Master-Lasers, jedoch bei einer Ausgangsleistung von 1–1,5 Watt. Diese infrarote Laserleistung wird durch Einkopplung in einen Ringresonator („Bow-tie Resonator“) auf 10–100 W überhöht. Um einen stabilen Laserbetrieb zu gewährleisten, wird die Länge des Überhöhungsresonators aktiv auf die Laserfrequenz geregelt. Zur Erhöhung der Frequenz- und Amplitudenstabilität kann der Diodenlaser zusätzlich auf

eine Referenz (z. B. einen atomaren Resonanzübergang oder eine Fabry-Perot-Kavität) stabilisiert werden.

Für eine effiziente Frequenzverdopplung muss die Dispersion zwischen Fundamentalwelle und frequenzverdoppelter Lichtwelle im nichtlinearen Kristall kompensiert werden, da die Oberwelle andernfalls wechselseitig konstruktive und destruktive Interferenz erfährt. Bei der sog. Phasenanpassung („phase matching“) gibt es verschiedene Möglichkeiten. Üblicherweise variiert man den Brechungsindex des Kristalls durch Anpassen der Temperatur. Zudem kann die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls ausgenutzt werden, um durch die Winkelausrichtung des Kristalls eine Phasenanpassung zu realisieren. Dieses Verfahren funktioniert jedoch nicht für alle Wellenlängenbereiche und Kristallmaterialien gleich gut: Im Falle „kritischer Phasenanpassung“ begrenzen unterschiedliche Ausbreitungswinkel von Fundamental- und Oberwelle (sog. „walk-off“) die Wechselwirkungslänge im Kristall und verschlechtern die Strahlqualität. Ein weiteres Verfahren („Quasi-phase-matching“) basiert auf einer periodischen Vorzeichenumkehr des Suszeptibilitätskoeffizienten in „periodisch gepolten“ Kristallen. Hierdurch werden dispersiv bedingte Phasenfehler zwischen Fundamental- und Oberwelle ausgeglichen, sodass beide Strahlen stets konstruktiv interferieren. Da sich die Strahlen in gleicher Richtung ausbreiten, wird bei dieser Methode der „walk-off“ automatisch vermieden. Durch Frequenzverdopplung derzeit verfügbarer MOPA-Systeme lässt sich der gesamte Wellenlängenbereich von 380 bis 540 nm mit

<sup>\*)</sup> Pikosekundenlasersysteme mit Pulsspitzenleistungen im Bereich von einigen zehn Watt werden gemeinsam von TOPTICA und PicoQuant unter dem Namen PicoTA angeboten.

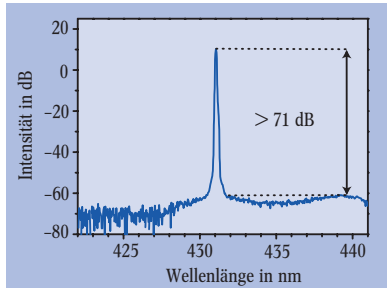
Dipl.-Phys. Thorsten Schmitt, Dr. Anselm Deninger, Dr. Frank Lison, TOPTICA Photonics AG, Fraunhoferstraße 14, 82152 Martinsried



**Abb. 1:** Licht eines abstimmbaren „Master“-Lasers wird in einem Trapezverstärker verstärkt und in einen externen Ringresonator eingekoppelt. Dort konvertiert ein nichtlinearer Kristall die Laserstrahlung in den blauen oder grünen Spektralbereich. Laser und Verdopplungskavität werden elektronisch stabilisiert. Der modulare Aufbau erlaubt den Austausch der Laserquelle oder des Verdopplungskristalls.

einer Ausgangsleistung von bis zu 300 mW abdecken (Abb. 2).

Der modulare Aufbau der Verdopplungseinheit erlaubt überdies eine Kaskadierung zweier Ringresonatoren. So gelang es beispielsweise, aus einer Fundamentalwellenlänge von 1014 nm durch sukzessive Frequenzverdopplung in KNbO<sub>3</sub> und BBO-Kristallen abstimmbares Laserlicht bei 253,5 nm zu erzeugen, wobei eine maximale Ausgangsleistung von 3 mW erreicht wurde.



**Abb. 2:** Spektrum eines frequenzverdoppelten MOPA-Systems ( $\lambda = 431$  nm), aufgenommen mit einem Gitterspektrometer mit 5 pm Auflösung. Der Untergrund durch verstärkte Spontanemission ist um mehr als 70 dB unterdrückt, was zugleich die Nachweisgrenze des verwendeten Gitterspektrometers darstellt. Der leichte Anstieg des Untergrunds bei 439 nm entspricht einer Frequenzverschiebung um 13 THz gegenüber der Laserlinie; dies deutet auf Raman-Streuung in der für die Messung verwendeten Glasfaser hin.

Eine Erweiterung des zugänglichen Wellenlängenbereichs erhält man durch nichtlineare Prozesse höherer Ordnung. Hier bietet sich insbesondere die sog. Summenfrequenzmischung an, um verbleibende Lücken im Spektralbereich zu schließen. Bei diesem Verfahren wird wie beschrieben das Licht eines nah-infraroten MOPA-Systems in einen Überhöhungsresonator eingekoppelt, im Kristall jedoch zusätzlich mit einem zweiten, kurzwelligeren Laserstrahl überlagert. Dadurch wird ein Ausgangsstrahl generiert, dessen Lichtfrequenz sich aus der Summe der Frequenzen beider Fundamentalstrahlen ergibt. Ein von TOPTICA Photonics realisiertes Lasersystem verwendet eine Kombination eines Trapezverstärkers ( $\lambda_1 = 1064$  nm,  $P_1 = 1$  W) und eines frequenzverdoppelten Nd:YAG-Lasers ( $\lambda_2 = 532$  nm,  $P_2 = 6$  W) zur Erzeugung von abstimmbarer Laserstrahlung bei 355 nm mit einer Ausgangsleistung von 40 mW. Der Strahl des Nd:YAG-Lasers wird dabei in „single-pass“-Geometrie durch einen BBO-Kristall geführt. Durch Variation der Wellenlänge des MOPA-Lasers lässt sich die resultierende UV-Strahlung spektral über einen Bereich von 1 nm abstimmen. Die spektrale Breite des UV-Lichts beträgt 6 MHz, im Wesentlichen bedingt durch die Linienbreite des YAG-Lasers von 5 MHz. Je nach Wahl der fundamentalen Laserquellen sind derzeit Wellenlängen von 260 bis 380 nm realisierbar.

Für gepulste Anwendungen mit hohen Pulsspitzenleistungen im Bereich einiger Watt kann für die Frequenzverdopplung sogar auf den Überhöhungsresonator verzichtet werden, da – speziell bei Verwendung der effizienten periodisch gepolten Kristalle – bereits beim einfachen Durchgang des Laserstrahls durch

den Kristall eine hohe Lichtintensität im blauen oder grünen Spektralbereich erzielt wird.<sup>9)</sup>

Abstimmbare Lasersysteme im ultravioletten, blauen und grünen Spektralbereich eröffnen eine Vielzahl neuer Möglichkeiten in Grundlagenforschung wie angewandter Wissenschaft. So werden bei vormals „unzugänglichen“ Wellenlängen spektroskopische Untersuchungen möglich, die sich ihrerseits z.B. zur Spurenanalyse verwenden lassen. Bei interferometrischen Messverfahren lässt sich durch Verwendung kürzerer Wellenlängen die erreichbare Auflösung steigern. Auch die zeitaufgelöste Spektroskopie profitiert von zusätzlichen Halbleiterquellen im blauen und grünen Spektralbereich, der bis dato noch nicht direkt erreicht werden konnte. Insgesamt bietet die nichtlineare Konversion der Ausgangsstrahlung von einem oder mehreren Laser heutzutage die Möglichkeit, Kurzpulslaser wie auch schmalbandige abstimmbare Laserquellen über nahezu den gesamten Spektralbereich von 190 bis 540 nm auf Halbleiterbasis zu realisieren.

**Literatur**

- [1] W. G. Kaenders, Physik Journal, Juni 2003, S. 71
- [2] L. Ricci et al., Optics Communications 117, 541 (1995)