

Zuverlässige Dauerstrichquelle für hochauflösende Laserspektroskopie im nahen Infrarot

Geeignete Pumplaser verhelfen durchstimmbaren, schmalbandigen optischen parametrischen Oszillatoren zum Durchbruch

Günter Hummelt

Bei der Laserspektroskopie werden Stoffe oder Stoffgemische mit einem Laser angeregt und die dabei entstehenden Spektren interpretiert. Der Laser als kohärente Strahlungsquelle erlaubt im Vergleich zu breitbandigen Anregungsquellen eine höhere Auflösung der Spektren und damit einen genaueren Nachweis von Atomen und Molekülen.

Die hochauflösende Laserspektroskopie setzt schmalbandige und durchstimmbare Laserquellen voraus. Je schmalbandiger die Linienbreite dieser Laser ist, desto höher ist die spektrale Auflösung. Eine hohe Ausgangsleistung dieser schmalbandigen Laser reduziert den apparativen Aufwand und hilft, die Nachweisgrenzen wesentlich zu senken.

Typische Einsatzgebiete sind der Nachweis von geringsten Anteilen von Spurengasen, die Analyse von Molekülen oder die Schadstoffüberwachung in der Atmosphäre. In der Industrie wird die Laserspektroskopie bei der Abgasanalyse zur Optimierung von Verbrennungsmotoren oder für qualitätssichernde Messeinrichtungen eingesetzt.

Für Messungen außerhalb des Labors benötigt man einen kompakten, robusten und transportablen Aufbau der Messeinrichtung und damit auch der Laserquelle. Die ideale Messeinrichtung benötigt darüber hinaus noch möglichst wenig externe Versorgung. Ein einfacher Stromanschluss sollte genügen, aufwändige Kühleinrichtungen oder Gasversorgungen sollten entfallen.

Bisher standen als kommerziell erhältliche, durchstimmbare Dauerstrichlaser im nahen Infrarot nur Halbleiterlaser (insbesondere Bleisalz-Diodenlaser) und Farbzentrenlaser zur Verfügung. Ein durchstimmbarer und schmalbandiger optischer parametrischer Oszillator (OPO) mit hoher Dauerstrichleistung bietet jedoch die idealen Voraussetzungen für diese Aufgabenstellung.

Zwar wurde der Betrieb eines OPOs bereits 1965 demonstriert, diese Technologie setzte sich jedoch nicht auf breiter Front durch. Zunächst mangelte es sowohl an den geeigneten Kristallen als auch an den geeigneten Anregungslasern mit gutem Strahlprofil. Seit einigen Jahren stehen zuverlässige und belastbare Kristalle zur Verfügung, wie beispielsweise BBO, PPLN, KTA oder KTP.

Jetzt eröffnet ein schmalbandiger, durchstimmbarer Scheibenlaser mit 50 Watt Dauerstrichleistung bei 1030 nm neue Möglichkeiten. Er dient als stabile und einfach aufgebaute Pumpquelle mit schmalbandiger Ausgangsleistung, die sich von 1000 nm bis 1060 nm durchstimmen lässt (Abb. 1).

OPOs, die schmalbandige Dauerstrichleistung abgeben, sind relativ neu. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass die Frequenzkonversion nichtlinear von der Pumpleistung abhängt und bisher durchstimmbare, leistungs-

starke Dauerstrichlaser mit guten Strahleigenschaften nicht zur Verfügung standen. Erst Laser wie VersaDisk kombinieren hohe Ausgangsleistung und geringe Linienbreite, um damit leistungsstarke OPOs aufzubauen, die den oben geschilderten Anforderungen entsprechen.



Abb. 1: Schmalbandige, durchstimmbare Scheibenlaser mit hoher Ausgangsleistung um 1 μm erlauben den Aufbau von Dauerstrich-OPOs, die als komfortable Strahlungsquelle für die hochauflösende Laserspektroskopie im nahen Infrarot dienen.

Funktionsweise eines optischen parametrischen Oszillators

Die Funktion des OPOs kann man sich so vorstellen, dass die Photonen des Pumplasers „geteilt“ werden und jeweils zwei neue Photonen mit unterschiedlicher Energie entstehen. Das neu erzeugte Photon mit der höchsten Energie bezeichnet man als Signal, das andere als Idler. Die beiden neuen Photonen können nicht jede beliebige Frequenz annehmen, es gilt der Energieerhaltungssatz: Die Energie der beiden erzeugten Photonen entspricht der Energie des ursprünglichen Photons. Zusätzlich darf keine destruktive Interferenz zwischen den beiden Photonen auftreten. Diese zweite Restriktion bezeichnet man als Phasenanpassung. Für einen doppelbrechenden, phasenangepassten OPO gilt daher:

$$\text{Energieerhaltung: } \omega_{\text{pump}} = \omega_{\text{signal}} + \omega_{\text{idler}}$$

Phasenanpassung:

$$n_{\text{pump}} \omega_{\text{pump}} = n_{\text{signal}} \omega_{\text{signal}} + n_{\text{idler}} \omega_{\text{idler}}$$

mit dem Brechungsindex n für die verschiedenen Wellenlängen. Durch Lösen des Gleichungssystems erhält man die Signal- und Idlerfrequenzen. Andere Signal- und Idlerfrequenzen lassen sich in Grenzen durch Ändern der Brechungsindizes erreichen. Hierzu kann man einen der Kristall des OPO relativ zur optischen Achse gedreht werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Temperatur zu variieren.

Bei der Quasi-Phasenanpassung verwendet man einen speziellen Kristall, der eine bestimmte Polperiode Λ in der optischen Achse aufweist. Damit ergibt sich ein zusätzlicher Term in der Phasenanpassung:

$$\text{Energieerhaltung: } \omega_{\text{pump}} = \omega_{\text{signal}} + \omega_{\text{idler}}$$

Phasenanpassung:

$$n_{\text{pump}} \omega_{\text{pump}} = n_{\text{signal}} \omega_{\text{signal}} + n_{\text{idler}} \omega_{\text{idler}} + 2\pi/\Lambda$$

Auch hier ist eine Lösung der Gleichungen für die Signal- und Idlerfrequenz möglich, die Translation des Kristalls ändert den Wert von Λ und damit die Frequenzen für Signal und Idler. Durch Polen des Kristalls mit dem passenden Wert für Λ kann die Bedingung für die Phasenanpassung für jede Kombination von Pump- und Signalphotonen erfüllt werden. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass die Durchstimmung der Frequenz über die Polperioden sehr viel einfacher ist und Kristalle mit sehr hohen nichtlinearen Koeffizienten eingesetzt werden können. Dies resultiert in einer wesentlich höheren Ausgangsleistung aus dem OPO.

Änderung der Pumpwellenlänge

Eine bisher nicht zur Verfügung stehende Möglichkeit, um die Frequenzen zu ändern, besteht darin die Energie des anregenden Photons zu variieren. Mit VersaDisk ist die Änderung der Pumpwellenlänge leicht möglich. Ein Durchstimmbereich von 60 nm und

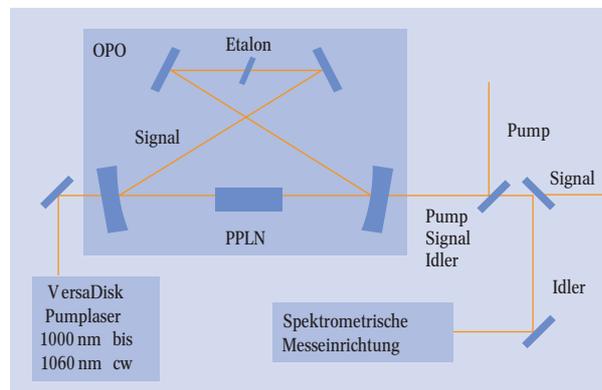


Abb. 2: Mit einem schmalbandigen Pumplaser hoher Ausgangsleistung erreichen die Forscher an der Universität Nijmegen mit ihrem optischen parametrischen Oszillator eine Idler-Leistung von mehreren Watt um 3 μm . Das Durchstimmen der Idler-Wellenlänge erfolgt über das Durchstimmen der Pumpwellenlänge.

Dipl.-Ing. Günter Hummelt, ELS Elektronik Laser System GmbH, Reinheimer Str. 11, 64846 Groß-Zimmern, www.els.de

schmalbandige Leistungen bis 50 Watt ermöglichen es, in der Praxis den OPO in den Hintergrund treten zu lassen und sich mit der eigentlichen Messung zu befassen.

Die Änderung der Pumpwellenlänge hat den Vorteil, dass damit am OPO selbst keinerlei Justage der Wellenlänge erforderlich ist. Deshalb bleibt die Lage des Ausgangsstrahles vom OPO konstant. Dies stellt eine enorme Arbeiterleichterung gegenüber den Aufbauten dar, bei denen der Kristall des OPO gedreht wird oder seine Temperatur verändert wird – hier muss der gesamte Strahlengang nachjustiert werden.

Aufbau des Pumpasers

Als Pumpaser dient ein Yb:YAG-Scheibenlaser VersaDisk, bei dem das aktive Lasermaterial aus einer Scheibe von etwa 240 μm Dicke besteht. Diese Scheibe dient gleichzeitig als Resonatorspiegel. Der Kristall wird frontseitig angeregt, als Pumpquelle dienen fasergekoppelte Diodenlaser.

Aufgrund dieser speziellen Geometrie gibt VersaDisk Dauerstrichleistungen bis 100 Watt mit perfekt gaußförmigem Intensitätsprofil ab. Die Linienbreite beträgt etwa 1 GHz. Verwendet man zusätzlich ein resonatorinternes Etalon, reduziert sich die Linienbreite auf weniger als 5 MHz bei 50 Watt Ausgangsleistung. Yb:YAG hat ein breites Emissionsspektrum, sodass die Wellenlänge von etwa 1000 nm bis 1060 nm verändert werden kann. Dies erreicht man durch die manuelle oder motorische Justage des resonatorinternen Lyotfilters und des Etalons.

Experimenteller Aufbau mit PPLN-OPO

Die Kombination von VersaDisk mit einem optischen parametrischen Oszillator auf der Basis von PPLN wird erfolgreich an der Universität Nijmegen im Fachbereich Molekular- und Laserphysik eingesetzt. In diesem Experiment dient ein durchstimmbarer Laser VersaDisk mit 20 Watt Ausgangsleistung und weniger als 5 MHz Linienbreite als Pumpquelle. Der OPO ist als Ringresonator mit einem internen Etalon aufgebaut, um schmalbandige Ausgangsleistung zu erzeugen (Abb. 2).

Die im optischen parametrischen Oszillator erzeugte Idler-Wellenlänge wird in eine photoakustische Messzelle geführt, um hochauflösende Messungen an Gasen im Infrarotbereich (um 3 μm) vorzunehmen. In dieser Konfiguration beträgt die schmalbandige Leistung des Idlers über 3 Watt. Der Durchstimmbereich des Pumpasers erlaubt einen besonders großen Arbeitsbereich innerhalb einer Periodendomäne des PPLN-Kristalls. Dies vereinfacht die Handhabung des kompletten Aufbaus wesentlich.

Exemplarisch wird das Absorptionsspektrum von Ethan mit zwei Absorptionslinien über einen Bereich von insgesamt 190 GHz gemessen (Abb. 3). Der Pumpaser wird über die sequentielle Verstellung des resonatorinternen Lyotfilters und des Etalons durchgestimmt. Das Etalon verschiebt die Laserfrequenz über etwa 25 GHz. Anschließend erfolgt die Nachjustage des Lyotfilters, die einen Modensprung von 25 GHz erzeugt, danach wird wieder mit dem Etalon die Fre-

quenz um weitere 25 GHz verschoben. Diese Prozedur wird mehrfach wiederholt, bis der Bereich von 190 GHz abgedeckt ist. Die optischen Elemente im Resonator des Pumpasers werden in diesem Aufbau ausschließlich manuell justiert. Für höheren Bedienkomfort kann die Durchstimmung von Etalon und Lyotfilter motorisch und synchronisiert durchgeführt werden.

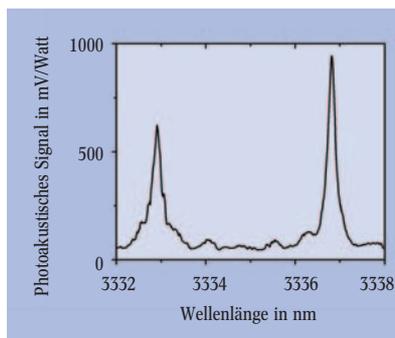


Abb. 3: Das Spektrum von Ethan mit zwei Absorptionslinien wird allein durch die manuelle Justage der optischen Elemente im Resonator des Pumpasers gemessen. Insgesamt wird ein Bereich von 190 GHz abgedeckt.

Zusammenfassung

Ein auf PPLN basierender, schmalbandiger optischer parametrischer Ringoszillator mit VersaDisk als durchstimmbarem Pumpaser bietet eine Reihe von praktischen Vorteilen. Zum einen erreicht man einen großen Durchstimmbereich der Idlerfrequenz bei hohen Ausgangsleistungen. Dies ermöglicht die komplette und rasche Abdeckung eines großen Spektralbereichs und zudem niedrige Nachweisgrenzen. Der als Ringresonator aufgebaute OPO mit internem Etalon gibt schmalbandige kohärente Strahlung ab. Damit lassen sich Spektren sehr hoch auflösen.

Der gesamte Aufbau ist kompakt und leicht transportabel. Der Aufbau des OPO als Ringresonator ist unempfindlich gegen Dejustage. Der Pumpaser benötigt kein externes Kühlwasser und hat eine geringe Leistungsaufnahme. Deshalb eignet sich diese Konfiguration auch ideal für Messungen, bei denen ein ortsunabhängiges System gefordert ist.

Literatur

- [1] W. Demtröder, *Laser Spectroscopy*, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin (2003)
- [2] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin (1999)
- [3] M. M. J. W. van Herpen, „A high power, continuous wave, continuous tunable, narrow linewidth infrared OPO beyond 4 μm “, *Post Deadline Papers Book, CLEO/QELS 2003*