



Durchstimmbarer Lückenfüller

Eine neue Lichtquelle erlaubt höchstauflösende Molekularspektroskopie im mittleren Infrarot.

Ulrich Eismann, Adam T. Heiniger, David B. Foote, Walter C. Hurlbut und Chris Haimberger

Die Spektroskopie von Molekülen kommt in den Quantentechnologien zum Einsatz und dient dazu, Spurengase zu detektieren oder Verbrennungsvorgänge zu erforschen. Optische Übergänge, die Streckschwingungen des Moleküls anregen, liegen meist zwischen 2500 und 3700 cm^{-1} bzw. $2,7$ bis $4,0\text{ }\mu\text{m}$. TOPTICA Photonics hat einen Dauerstrich-optisch-parametrischen Oszillator (TOPO) entwickelt, der diesen schwer zugänglichen Wellenlängenbereich kontinuierlich abdeckt. Er ist von $1,45$ bis $4,00\text{ }\mu\text{m}$ abstimbar und emittiert Licht mit einer schmalen Linienbreite. Damit ist höchstauflösende Spektroskopie auch mit der TOPO-Idlerwelle im mittleren Infrarot möglich.

Moleküle lassen sich anhand ihrer einzigartigen Spektren identifizieren. Dies erlaubt es beispielsweise, Treibhausgasemissionen zu detektieren, in sensiblen Bereichen wie Flughäfen Explosivstoffe optisch zu erkennen, molekulare Krankheitsindikatoren im menschlichen Atem nachzuweisen oder effizientere Kraftstoffe und Verbrennungsprozesse durch Untersuchung der zugrundeliegenden molekularen Vorgänge zu entwickeln.

Aufgrund jahrzehntelanger Forschung sind die Schwingungsübergänge vieler Moleküle bekannt, obwohl die Grundlagenforschung längst noch nicht abgeschlossen ist. Die optische Spektroskopie dieser Übergänge kann helfen, die spektralen Linienpositionen und

-formen von ultrakalten Molekülen im Vakuum zu bestimmen, was präzise Messungen grundlegender Eigenschaften des Universums ermöglicht. Techniken wie Cavity-Ringdown-Spektroskopie oder NICE-OHMS besitzen höchste Nachweisempfindlichkeiten [1]. Zudem sind molekulare Schwingungszustände und deren Manipulation vielversprechend für Anwendungen in der Quantentechnologie und machen kalte Moleküle zu einem aussichtsreichen Materialsystem für Quantensensoren und Quantencomputer.

Für die Präzisionsspektroskopie an einem Zielmolekül ist bei den interessierenden Wellenlängen eine Laserquelle nötig. Jedoch sind zwischen 2500 und 4500 cm^{-1} (bzw. $2,2$

– 4,0 μm) keine weit abstimmbaren Laserquellen mit direkter Emission verfügbar. Molekülschwingungen in diesem Bereich entsprechen einer molekularen Streckung (Tab. 1), wobei Atome innerhalb des Moleküls aufeinander zu und voneinander weg schwingen.

Umgewandelte Frequenzen

Wenn Laserquellen mit direkter Emission bei einer bestimmten Wellenlänge eine zu geringe Ausgangsleistung aufweisen, hilft häufig nichtlineare optische Frequenzumwandlung, um die entstandene Lücke zu füllen. TOPTICA verfügt über jahrzehntelange Erfahrung in der Herstellung hocheffizienter, frequenzkonvertierter Dauerstrichlasersysteme. Diese basieren auf der hohen Leistung und schmalen Linienbreite von Quellen im nahen Infrarot sowie auf Resonatorüberhöhung. Bei der Frequenzverdopplung werden zwei Photonen in ein Photon mit der doppelten Energie der ursprünglichen Photonen umgewandelt. Die entsprechenden Systeme von TOPTICA sind bekannt für ihre Stabilität, Benutzerfreundlichkeit und die komfortable digitale Bedienung.

Um Strahlung im mittleren Infrarotbereich zu erzeugen, setzt TOPTICA dieselbe Technologie in einer veränderten Konfiguration ein. Der optisch-parametrische Dauerstrichoszillator TOPO wird

mit Licht einer Wellenlänge von 1,06 μm gepumpt. Dazu kommt ein passender Diodenlaser (DFB pro von TOPTICA) zum Einsatz, dessen Ausgangsleistung mit einem Ytterbiumfaserverstärker um Größenordnungen verstärkt wird. Bei der optisch-parametrischen Erzeugung wandelt sich ein Pumpphoton in zwei Photonen niedrigerer Energie um – das Signal- und das Idlerphoton. Das Signal ist das Ausgangsphoton mit der höheren Energie, der Idler dasjenige mit niedrigerer Energie. Hochleistungs-NIR-Pumpen und Resonatoren (im Fall des TOPO in Resonanz mit dem Signal) verbessern die Umwandlungseffizienz. Über 60 Prozent der Pumpleistung werden in Signal- und Idlerleistung umgewandelt.

Der TOPO ist von 1,45 bis 2,07 μm (Signal) bzw. 2,20 bis 4,00 μm (Idler) lückenlos durchstimmbar (Abb. 1). Hierbei lässt sich die Wellenlänge über den gesamten Bereich ohne manuelle Optimierung oder gar den Austausch von Optiken einstellen. Es gibt vier Abstimmungsmechanismen, die alle mithilfe des Systemcontrollers DLC pro und der entsprechenden Software für die ferngesteuerte und automatisierte Durchstimmung benutzt werden:

- Die motorisierte Einstellung der Position des nichtlinearen Kristalls stimmt das Signal und den Idler in (linearen) Schritten von etwa 1 THz ab.

Frequenzen

Absorption in cm^{-1}	Gruppe
3700 – 2500	O-H-Streckung
3500 – 3300	N-H-Streckung
3000 – 2800	N-H-Streckung
3333 – 3267	C-H-Streckung
3100 – 2695	C-H-Streckung
2600 – 2550	S-H-Streckung

Tab. 1 Frequenzen verschiedener molekularer Streckerschwingungsübergänge

- Der Resonator enthält ein Etalon, um den Einzelfrequenzbetrieb sicherzustellen; eine motorisierte Verkippung des Etalons stimmt das Signal und den Idler in Schritten von rund 30 GHz ab.
- Ein Resonatorspiegel ist auf einem Piezoaktuator gelagert, um eine kontinuierliche Abstimmung des Signals und des Idlers über ca. 500 MHz zu erreichen.
- Der Seed-Laser ist so einstellbar, dass der Idler kontinuierlich und modensprungfrei über bis zu 300 GHz gefahren wird, bevor das Signal in eine neue Resonatormode springt.

Um eine bestimmte Wellenlänge zu erreichen, kann jedes dieser Stellglieder einzeln zum Einsatz kommen, während der Benutzer die Ausgangswellenlänge überwacht.

Für die automatisierte Durchstimmung und Aufnahme von Spektroskopiedaten hat TOPTICA eine Software entwickelt. Zuerst wird eine Zuordnungstabelle für die Grobdurchstimmung erzeugt, bevor der Benutzer die Startwellenlänge, die Stoppwellenlänge und die Schrittgröße für einen Spektroskopiescan eingeben kann. Die Software liest Daten von einem Wellenlängenmessgerät, während sie das System abstimmt und einzelne modensprungfreie Bereiche zusammenfügt, um breite, hochauflösende und kontinuierliche Scans zu erzeugen. Zur Demonstration wurde durch

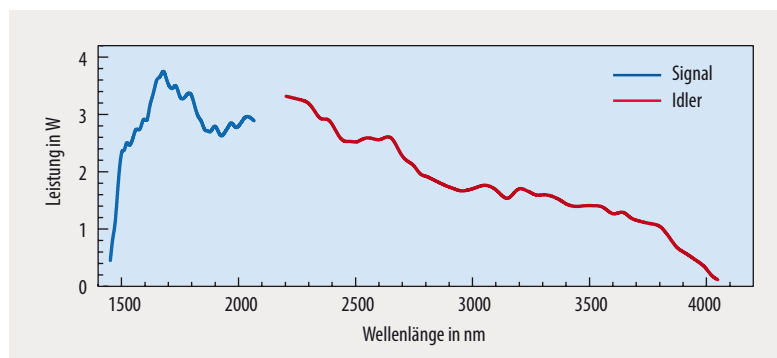


Abb. 1 Der DLC TOPO ist in einem weiten Bereich lückenlos durchstimmbar.

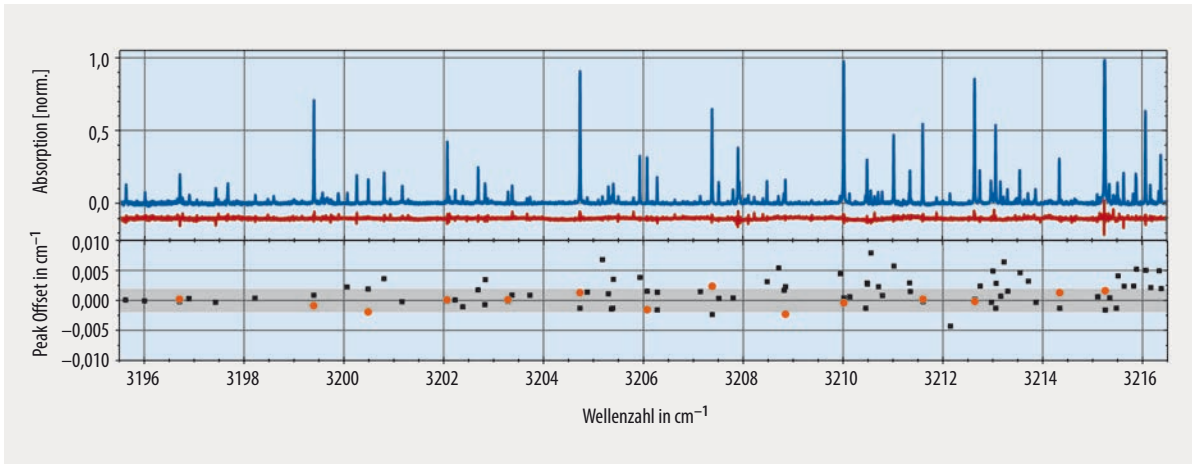


Abb. 2 Das Absorptionsspektrum der C-H-Streckschwingungsübergänge in Acetylen deckt einen weiten Frequenzbereich ab (oben). Die Abweichung der Peakpositionen relativ zu HITRAN (unten) ist gering.

automatische Abstimmung ein molekulares Spektrum generiert, das den Bereich von 3196 bis 3216 cm^{-1} kontinuierlich abdeckt (**Abb. 2**) [2].

Sensitive Spektroskopieverfahren wie die Cavity-Ringdown-Spektroskopie erfordern möglicherweise eine Quelle mit einer schmalen Linienbreite als bei TOPO standardmäßig verfügbar. Der DFB pro-Seedlaser hat eine Linien-

breite von unter 2 MHz, und die Signallinienbreite liegt in der Größenordnung von mehreren 10 kHz. Die Idlerlinienbreite ist eine Faltung dieser beiden Linienbreiten, sodass sie etwa der Seedbreite von unter 2 MHz entspricht (**Abb. 3a**).

Der Diodenlaser CTL 1050 im nahen Infrarot weist eine breite kontinuierliche Abstimmbarkeit von 1,02 μm bis 1,07 μm sowie ei-

ne Linienbreite von unter 10 kHz auf. Diese alternative Seed-Option für den TOPO führt zu einer Idlerlinienbreite von weniger als 50 kHz (**Abb. 3b**).

Für noch schmalere Linienbreiten sowie für phasenkohärentes Locken hat TOPTICA umfassende Lösungen im Angebot, etwa den FALC pro mit höchster Performance und digitalem Bedienkomfort.

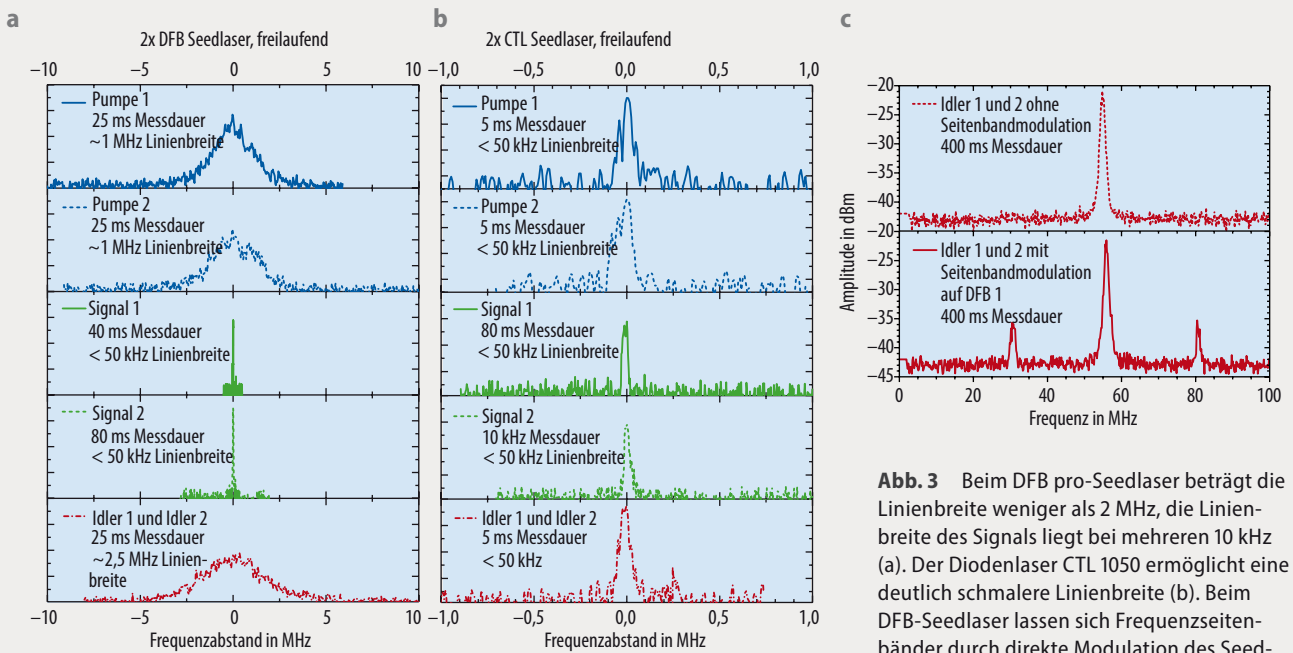


Abb. 3 Beim DFB pro-Seedlaser beträgt die Linienbreite weniger als 2 MHz, die Linienbreite des Signals liegt bei mehreren 10 kHz (a). Der Diodenlaser CTL 1050 ermöglicht eine deutlich schmalere Linienbreite (b). Beim DFB-Seedlaser lassen sich Frequenzseitenbänder durch direkte Modulation des Seed-Diodenstroms erzeugen (c).

Analog zur oben skizzierten Übertragung der spektralen Eigenschaften des Seedlasers auf den Idler erzeugt ein Seed-Laser mit aufmodulierten Frequenzseitenbändern einen Idler mit Frequenzseitenbändern im gleichen Abstand und annähernd gleicher relativer Amplitude. Idlerseitenbänder sind für verschiedene Anwendungen wie die Resonatorüberhöhung und die NICE-OHMS-Spektroskopie erforderlich. Als Demonstration dieser Modulationstechnologie wurden Seitenbänder durch direkte Modulation des Seed-Diodenstroms auf dem Seed-Laser eines der beiden TOPOs im Experiment erzeugt (Abb. 3c).

Eine TOP(0)-Laserquelle

Der DLC TOPO von TOPTICA hat die größte spektrale Abdeckung unter Dauerstrich-Laserquellen im mittleren Infrarotbereich und füllt eine Wellenlängengücke, die für die Absorptionsspektroskopie im molekularen Streckschwingungsbereich

entscheidend ist. Er verfügt über eine automatische, digital ferngesteuerte Bedienung und ist damit einfach in Experimente zu integrieren. Ein alternativer Seedlaser erlaubt es, die Linienbreite des Idlers deutlich zu reduzieren. Seitenbänder lassen sich für die Frequenzmodulationsspektroskopie und für den Frequenzlock auf Resonatoren z. B. für die Ringdown-Spektroskopie erzeugen. Kombinationen aus dem Frequenzkamm DFC CORE + und dem TOPO können die Phasenkohärenz zwischen entfernten Bereichen des elektromagnetischen Spektrums herstellen und damit neue Wege für die Präzisionsmetrologie und die Quantensensorik eröffnen [3].

- [1] J. Ye, L. S. Ma und J. L. Hall, J. Opt. Soc. Am. B **15**, 6 (1998)
- [2] D. B. Foote et al., OSA Technical Digest paper JW2C.2 (2020)
- [3] E. Kovalchuk und A. Peters, Frequency Standards and Metrology – Proceedings of the 7th Symposium (2009), S. 285

Die Autoren

Ulrich Eismann,
TOPTICA Photonics AG,
Lochhamer Schlag 19, 82166 Gräfelfing,
Tel.: +49 89 85837-0,
sales@toptica.com

**Adam T. Heiniger, David B. Foote,
Walter C. Hurlbut und
Chris Haimberger,**
TOPTICA Photonics Inc.,
Tel.: +1 585.657.6663,
sales@toptica-usa.com

Tausende Produkte auf Lager



und verfügbar mit PhotonSpeed™

- Schnelle Auswahl** – Optimierte Such- und Filterfunktionen
- Schnelle Lieferung** – Gratis Express-Lieferung für Newport Produkte*
- Schnelle Ergebnisse** – Top-Produkte und Service für Ihre Forschung

Jetzt mit Newport auf die Überholspur. An die Forschung, fertig, los!
Mehr auf www.newport.com



Weitere Informationen über MKS Newport finden Sie unter www.newport.com.

* Weitere Informationen und Bedingungen finden Sie auf www.newport.com/free2day.
Nur gültig für Bestellungen aus und innerhalb den USA und Europa.



Schnelle Auswahl. Schnelle Lieferung. Schnelle Ergebnisse.