

Photonik

LASERQUELLEN

Quantenkaskadenlaser: Technologie und Anwendungen

042 Johannes Kunsch,
Laser Components GmbH, Olching

Der Entwicklungsstand des Quantenkaskadenlasers (QCL) soll hier – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – anhand eines Konferenzberichts im Überblick wiedergegeben werden. Am 19.09.2002 referierten neun Experten aus Forschung und Industrie auf dem 3. QCL Workshop im Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM in Freiburg (**Bild 1**). Im Folgenden sind die wichtigsten Aussagen der neun Vorträge resümiert. In der Zusammenfassung des technologischen Standes versuche ich, mich vorzugsweise auf die jeweils originären Aspekte zu konzentrieren. Bei der Anwendung ist das Augenmerk auf kommerziell wichtige Aspekte gelegt worden. Hierbei ist natürlich die subjektive Brille des Autors zu berücksichtigen, so dass andere Konferenzteilnehmer, durchaus berechtigt, auch zu anderen Wichtungen gelangen können



Bild 1: Referenten und Teilnehmer des 3. QCL Workshop in Freiburg, 19.09.2002

1 Kontinuierlich emittierende abstimmbare QCL für die Spektroskopie

Referent: *Mattias Beck, Universität Neuchâtel*

Herr Beck präsentierte die neuesten Entwicklungen an der Universität Neuchâtel. In diesem Jahr (2002) hat man dort einen Quantensprung vollzogen und den kontinuierlichen (CW) Betrieb bei Raumtemperatur realisiert. Das besondere „Bonbon“ hierbei war seine Antwort auf die Rückfrage nach der Lebensdauer: Laut Herrn Beck ist dies „absolut kein Problem, der Laser hat den gesamten Nachmittag geleuchtet“. Das Hauptentwicklungsziel galt der Erhöhung der maximalen Arbeitstemperatur. Näher eingegangen wurde auf die Verbesserung der spezifischen thermischen Leitfähigkeit durch die Einführung von vergrabenen Heterostrukturen (buried heterostructures, BH-Laser) und des Energieniveaudesigns (im Vortrag wurden hierzu die Stichworte „Bound to continuum“ und „Doppelphononenresonanz“ verwendet). Hier entleert man die unteren Zustände besonders schnell und erhöht so die Besetzungsinversion unter Beibehaltung effektiver Ladungsträgerinjektion. Berichtet wurde außerdem im gleichen Referat über den Betrieb von QCL mit Emission bei 64 μm , wobei hier die MBE (Molekularstrahl-Epitaxie) vom Cavendish Laboratory in Cambridge durchgeführt wurde. Die höchste Betriebstemperatur bei diesem Laser im cw Betrieb war 44 Kelvin bei etwa 0,05 mW Leistung.

2 Gallium-Arsenid-basierte QC-DFB Laser und Mikrokavitäten (DFB: Distributed Feedback)

Referent: *Gottfried Strasser, TU Wien*

Das traditionelle Materialsystem für QCL basiert auf Indium-Phos-

phid. Prinzipiell lassen sich QCL auch auf der Basis von Gallium-Arsenid realisieren. Von den elektrooptischen Parametern her gilt InP als günstiger, Gallium-Arsenid hat jedoch den Vorteil der einfacheren Bearbeitbarkeit. Auf der Basis von Indium-Phosphid lassen sich QCL mit Emission im Bereich ab etwa 3,5 μm bis 24 μm herstellen, mittels Gallium-Arsenid mit Emission ab etwa 7,2 μm bis 23,5 μm sowie im fernen IR ab 67 μm bis 84 μm . Der Entwicklungsstand von Gallium-Arsenid-QCL liegt gegenüber Indium-Phosphid-QCL etwa 5 Jahre zurück. So wurde der erste CW-Laser bei niedrigen Temperaturen erst im Jahr 2000 realisiert, mittels des InP-Materials aber bereits im Jahr 1995. Neben den Designs als Fabry-Perot-Laser und DFB-Laser ist man an der TU Wien folgenden Weg gegangen: Um die gewachsenen Schichten schnell charakterisieren zu können, hat man sogenannte Ringkavitäten gefertigt, im Prinzip VCSEL¹-Laser. Bei 25 μm Durchmesser wurde so bei 78 Kelvin Laseraktivität ab einem Schwellstrom von nur 115 mA erreicht.

3 QCL für den mittleren Infrarot-Bereich

Referent: *Frank Fuchs, Fraunhofer IAF Freiburg*

Die Arbeiten erfolgten im Rahmen des QUANKAS-Projektes (Projektetails unter www.quantenkaskadenlaser.de). Das Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF hat relativ spät mit der QCL-Entwicklung angefangen, will aber einen originären Beitrag leisten. Im Gegensatz zu den Arbeiten aus Neuchâtel, wo man die

¹ VCSEL Vertical cavity surface emitting laser. Die Laserstruktur ist radialsymmetrisch und senkrecht zum Substrat orientiert.

2 Photonik 6/2002

Bandstruktur im Hinblick auf eine möglichst effiziente Entleerung des unteren Zustandes optimiert, konzentriert sich das IAF darauf, die Lebensdauer im angeregten Zustand durch zusätzliche Barrieren (sogenannte Mini Bands, die als eine Art Bragg-Reflektor wirken) zu erhöhen. Experimentelle Resultate über die Wirkung dieser Mini-Bands (im Vortrag auch als Blocking Barriers bezeichnet): Im Pulsbetrieb hat man unter Beibehaltung der Geometrie bei -196 °C 295 mW aus dem Laser herausgeholt (bei 3,67 A Betriebsstrom) und bei Raumtemperatur 30 mW bei 3,64 A. Mit den Blocking Barriers sind die Werte 890 mW bei -196 °C (5,5 A) und 245 mW (5,6 A) bei Raumtemperatur. Die Leistungsfähigkeit des Lasers ist begrenzt durch die Aufheizung der aktiven Region. Man hat deshalb dazu ein thermisches Modell erstellt und experimentell verifiziert, so dass als nächster Schritt eine gezielte Optimierung auf der Basis dieses Modells vorgenommen werden kann. Die Arbeiten in Freiburg laufen erst seit vergleichsweise kurzer Zeit. Nimmt man den Raumtemperaturbetrieb für Puls laser als Meilenstein, so hat man derzeit etwa 5 Jahre Rückstand. An der zügigen Aufholung dieses Rückstandes wird mit eigenen Konzepten gearbeitet.

4 Optische Übertragung mit QCL im mittleren IR durch die Atmosphäre

Referent: Rainer Martini, Stevens Institute of Technology
Die optische Übertragung durch die Atmosphäre (free space optical communication, FSOC) könnte eine Lösung darstellen, wie man Internetkommunikation schnell und preiswert auf der „letzten Meile“ an den Kunden bringt. Optische Fasern können zwar 100 Mbps übertragen, führen jedoch zu sehr hohen Anschlusskosten. Die optische Übertragung durch die Atmosphäre hat eine ihrer Bewährungsproben unmittelbar nach dem 11. September 2001 bestanden, da das World Trade Center gleichzeitig auch eine große Kommunikationszentrale war und kurzfristige Ausweichkapazitäten mittels FSOC realisiert werden mussten. Die theoretischen Grenzen für die Übertragungsgeschwindigkeit sieht man bei Fasern bei 37 Tbps, bei der FSOC hingegen bei 570 Tbps. Die schnellste bisher realisierte Variante im IR-Spektralbereich reichte bis in den GHz-Bereich hinein und war wohl hauptsächlich durch die Bandbreite des Detektors limitiert. Man hat hier in einer zweiten Runde besonders die Hochfrequenz-Eigenschaften des QCL verändert sowie sogenannte QWIP-Detektoren (Quantum Well Infrared Photodetector) mit einer theoretischen Bandbreite von 18 GHz verwendet (QWIP-Detektoren funktionieren allerdings nur flüssigstickstoff-gekühlt). Mit dem derart veränderten Aufbau wurde die HF-Grenze auf jenseits der 10 GHz angehoben. In einem nächsten Versuch wurde ein lediglich thermoelektrisch gekühlter QCL verwendet, der auch schon eine Datenübertragung mit 1 Mbps ermöglichte. Die Bitfehler rate betrug $< 10^{-12}$.

Verbesserungen verspricht man sich vom IR gegenüber dem nahen Infrarot (NIR) natürlich auch durch die erhöhte Transmission der Atmosphäre im IR insbesondere bei widrigen Wetterumständen. Laut Martini sollte die Übertragung im IR mindestens genau so gut (sehr konservativ gerechnet) funktionieren wie im NIR oder sogar bis zu 100 mal besser, wobei Unsicherheitsfaktoren die Güte der Optiken und die Güte der Detektoren darstellen. Bei den Optiken hat er 1-10 fache Verluste einkalkuliert, bei den Detektoren 100-1000 fache. Jede Verbesserung hier schlägt sich direkt als Vorteil für die FSOC nieder. Ein natürlicher Vorteil für die Übertragung im IR gegenüber dem NIR ergibt sich aus der etwa 850 mal niedrigeren Rayleigh-Streuung, der etwa 18 mal geringeren Mie-Streuung und den mindestens 7 mal geringeren Szintillationseffekten, so dass die FSOC auf Basis von QCL insbesondere bei schlechtem Wetter deutlich besser funktionieren sollte. Die Absorption hat in diesem Spektralbereich praktisch keinen Einfluss. Man hat deshalb bei Lucent versuchsweise

ein Videobild parallel bei $1,55\text{ }\mu\text{m}$ und bei $8\text{ }\mu\text{m}$ über 200 m durch den freien Raum übertragen. Der QCL-Laser ($8\text{ }\mu\text{m}$) arbeitete mit 7 mW eher an seiner unteren Leistungsgrenze. Beide Systeme zeigten eine stabile Übertragung. Unterschiede traten erst am 14.08.2001 zutage, als Nebel mit geringer Sichtweite aufzog und beide Übertragungswege unterbrochen wurden. Als sich der Nebel verflüchtigte, „erholte“ sich die QCL-Übertragung jedoch etwa um 20 Minuten schneller als die bei $1,55\text{ }\mu\text{m}$.

5 QCL in der Sub-Doppler-Spektroskopie und bei NO_x-Messung

Referent: Willes H. Weber, Forschungsabteilung Ford Motor Company
Herr Weber präsentierte eine hochpräzise Messung von Kfz-Stickoxid-Emissionen basierend auf QCL-Lasern im CW-Betrieb bei Tiefemperaturen. Erreicht wurden Auflösungen von NO_x im ppb-Bereich. Die Dopplerbreite betrug im vorgestellten Fall 130 MHz, die Laserlinienbreite 2-3 MHz. Diese hohe Messgenauigkeit ist für die Zertifizierung von zero emission Kfz erforderlich.

6 Chemische Sensoren auf Basis von QCL

Referent: Frank K. Kittel, Rice-University Houston
Herr Kittel präsentierte eine Vielzahl an Arbeiten zur Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLS [1,2]). Erwähnenswert sind neue Ansätze mit einem miniaturisierten Sensor (ca. 1" Durchmesser) auf QCL-Basis und Arbeiten zur Entwicklung von abstimmbaren QCL-basierten Lasern mittels externem Resonator.

7 In-Situ- und Fernerkundungs-Anwendungen von QCL

Referent: Mark Allen, Physical Sciences Inc., Andover, MA, USA
Mark Allen präsentierte mehrere Geräteentwicklungen im NIR basierend auf DFB-Lasern und im IR basierend auf QCL-Lasern. Interessant seine Verwendungsvorschläge für die „exotischen“ langwelligen QCL-Laser mit Emissionswellenlängen $60\text{ }\mu\text{m}$ und länger: hier kann man offensichtlich in Strukturen eindringen und Nachweise in nichtmetallischen Behältern führen. Z.B. könnte man Briefpost auf biologische Erreger untersuchen oder Sprengstoffe identifizieren. Allen beendete seinen lebhaften Vortrag mit einer Wunschliste zum idealen QCL aus Anwendersicht:

- Raumtemperatur CW
- Reduzierte Schwellströme, denn die Verlustleistungsabfuhr ist immer problematisch
- Hocheffiziente Faserkopplung
- 1 W mittlere Leistung bei Fabry-Perot-Lasern (öffnet militärische Anwendung, die einen weit größeren Markt als die industrielle Gasmessungstechnik bedeuten)
- Stabile Lieferantenbasis

8 Industrielle Anwendungen von QCL für Spurengasmessungen

Referent: Markus Nägele, ABB Switzerland
Die ABB hat sich der Aufgabe gestellt, ein QCL-System für den industriellen Einsatz zu entwickeln und dabei vor allem auch die Kosten im Auge zu behalten. Konsequenterweise nutzt man photoakustische Detektoren. Nägele schätzte am Beispiel des Ammoniaks nach erfolgter Optimierung die Nachweisgrenze mit 50 ppb (0,05 % Vollausschlag) ein. Die Genauigkeit beträgt 30 ppb, es gibt keine Nullpunktdrift und die Empfindlichkeitsdrift pro Woche beträgt etwa 0,05 %. Das Gerätekonzept hat einen gewissen Abschluss erreicht und künftige Forschungen konzentrieren sich auf das Finden geeigneter Anwendungen.

Photonik

LASERQUELLEN

9 QCL-basierte Leak-out-Spektroskopie für die Messung medizinischer Spurengase

Referent:

Heiko Ganser, Institut für Lasermedizin der Universität Düsseldorf
Herr Ganser ging auf medizinische Spurenanalyse im Atemgas mittels QCL ein. Der Nobelpreis 1998 für Medizin wurde für die Entdeckung der Rolle des Stickstoffmonoxid im Körper verliehen. NO regelt den Blutdruck, ist für Gehirn, Lunge und das Immunsystem wichtig. Das Institut für Lasermedizin hat mittels "cavity leakout" vorläufige Messungen durchgeführt und erreicht eine Empfindlichkeit von 3 ppb NO bei einer Messzeit von 10 Sekunden. Wichtig sind sicher die Forschungsergebnisse der nächsten Projektphase, d. h. Erprobung am Patienten zur Diagnostik und Einsatz in der pharmazeutischen Forschung.

Postervorträge

In der Postersession gab es drei weitere Beiträge: Die TU Darmstadt hat das Rauschen (RIN, Relative Intensity Noise) von QCL vermessen. Das Fraunhofer IPM präsentierte einen verbesserten Ammoniak-Detektor mit QCL und TE-gekühltem Detektor. Die Universität Würzburg und die Firma Nanoplus präsentierten den Entwicklungsstand ihres QCL auf GaAs-Basis.

Rahmen der Veranstaltung

Zum 3. QCL-Workshop im Fraunhofer IPM hatten sich 81 Teilnehmer angemeldet – die Vortragenden mitgerechnet. Die Teilnehmer kamen etwa zu gleichen Teilen aus der Industrie und dem Universitäts- oder Institutsbereich. Es gab eine kleine begleitende Ausstellung von fünf Firmen. Am Vorabend fand ein zwangloses Treffen der Teilnehmer statt, was ca. 15 Teilnehmer auch nutzten. Eine Integration der Vortragenden in dieses Treffen hätte sicherlich die Diskussion befruchtet.

Generelle Einschätzung

An Kompaktheit ist der Workshop nicht zu überbieten, und das ist sicher seine große Stärke. Diese Beschränkung hat aber auch Schattenseiten: Für den aufmerksamen Beobachter zeichnet sich ab, dass die QCL-Technologie nicht zum breiten industriellen Durchbruch gelangen kann, wenn nicht zunächst substantielle Fortschritte in der Detektortechnologie erreicht werden. Dies sollte stärker ins Bewusstsein der Forscher und Entwickler gelangen; Forschungsschwerpunkte müssten entsprechend angepasst werden. Ein Fort-

schritt bei den Detektoren ist leider bei weitem nicht so spektakulär wie ein Fortschritt bei den Lasern. Die Applikationsbeiträge (insbesondere in der Spektroskopie) waren von den Resultaten her teilweise nicht wirklich qualitativ neu, man hätte in ähnlicher Weise meist auch schon vor 10 Jahren mit Lasern auf IV-VI-Basis und kryogener Kühlung messen können. Der neue Aspekt ist eben die prinzipielle Möglichkeit, diese Experimente mittels Diodenlaser ohne kryogene Kühlung durchführen zu können und so einen einfacheren Weg in die industrielle Nutzung zu eröffnen. Bei Systemen basierend auf QCL im Pulsbetrieb steht man hier an der Schwelle zur industriellen Anwendungsreife. Eine einheitliche, finanziell attraktive Schlüsselanwendung des QCL, die in absehbarer Zeit zu einem breiten technologischen Durchbruch führen wird, ist derzeit noch nicht zu erkennen. Die Gemeinde der Infrarot-Nutzer braucht anscheinend noch etwas Zeit, um diesem unerwarteten wissenschaftlichen Weihnachtsgeschenk kommerzielle Lebensfähigkeit einzuhauchen. Ein einfaches Umstellen der bislang in die Industrie verkauften IR- und UV-Photometer auf diodenlaserbasierte Systeme würde (bei einer angenommenen Konversionsrate von 20 %) einen jährlichen Gesamtbedarf der analytischen Industrie von nur 4000 Diodenlasern bedeuten [3]. Weiteren möglichen Anwendungen sollte also künftig ein Forschungsschwerpunkt gewidmet werden.

Literaturhinweise:

- [1] J. Kunsch, Diodenlaser-Absorptionsspektroskopie auf dem Weg zu kommerzieller Bedeutung, Photonik 3/2002, 72–74
- [2] Anwendungen und Trends in der Optischen Analysentechnik, Tagung Frankfurt, 26. und 27. Februar 2002, VDI-Berichte; 1667
- [3] M. Zöchbauer, Tunable Diode Laser Gas Analysis: Thoughts on a possible market, 5th International Symposium on Gas Analysis by Tunable Diode Lasers, VDI Berichte; 1366, 129-134

Ansprechpartner

Johannes Kunsch
Gruppenleiter
IR-Detektoren und Diodenlaser
Laser Components GmbH
Werner-von-Siemens-Str. 15
82140 Olching
Tel. 08142/2864-28
Fax 08142/2864-11
eMail: j.kunsch@lasercomponents.com
Internet: www.lasercomponents.com

