



Doctoral Thesis

High-performance quantum cascade laser sources for spectroscopic applications

Author(s):

Wittmann, Andreas

Publication Date:

2009

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005815915> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH Nr. 18363

HIGH-PERFORMANCE QUANTUM CASCADE LASER
SOURCES FOR SPECTROSCOPIC APPLICATIONS

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

ANDREAS WITTMANN

M.Sc., Technische Universität München

born January 2nd, 1974

citizen of Zurich/ZH, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J. Faist, supervisor

Prof. Dr. M. W. Sigrist, co-examiner

Prof. Dr. J. Wagner, co-examiner

2009

Abstract

Quantum cascade (QC) lasers are semiconductor lasers based on intersubband transitions in multi quantum well heterostructures, which rely on epitaxial growth techniques. They are very versatile mid-infrared sources for the realization of ultra-sensitive and selective sensors for spectroscopic applications in the fields of environmental monitoring, industrial processes, security and military. However, for many applications, like the determination of isotopic ratios (e.g. of CO₂), a high spectral resolution (in the MHz range) is an absolute necessity, which requires the laser source to operate in continuous wave (CW) mode. Cheap measurement systems for large volume applications also benefit from CW operating lasers since they can be combined with inexpensive dc current drivers, instead of pulse shaping electronics needed for pulse operated lasers. In addition, applications like breath analysis would profit from portable, low-power consuming devices allowing the realization of hand-held, battery-operated systems. Furthermore, broadly tunable sources with narrow linewidth are desirable for the detection of multiple absorption lines or mixtures with very broad resonances, as found in clinical medicine for non-invasive detection of glucose levels. Their broad frequency coverage combined with their higher spectral resolution (compared with Fourier transform infrared spectrometers) makes them very interesting for the detection of a variety of chemicals.

In this work, low power consuming distributed feedback (DFB) based single mode QC lasers were developed, operating at $\lambda \sim 9 \mu\text{m}$ in CW up to a temperature of 150 °C, which is the highest value reported in literature. Such devices are tunable by 1.3 % of its center wavelength. Low electrical power consumption of 1.6 W and 3.8 W for an optical output power of 16 mW and 100 mW has been demonstrated.

The relatively small tuning range of a single DFB device, smaller than or equal to approximately 1 % of the wavelength, usually limits its efficiency for the detection of complex mixtures with multiple absorption lines. By using a broad-gain active region design and monolithic integration of different DFB gratings, high-performance devices

were realized with single-mode emission between 7.7 and 8.3 μm at a temperature of +30 °C. This corresponds to 8 % of the center wavelength. Some of these lasers have been selected for the NASA Mars Science Laboratory Mission to evaluate whether Mars was ever inhabitable.

The combining of two of these broad-gain active region designs in the same device resulted in heterogeneous high performance QC lasers for broad-gain applications. They were tested in an external cavity setup, with single-mode tuning of the center wavelength at room temperature of 25 % in pulsed mode and 18 % in CW operation, which is the widest reported tuning range in literature. These devices are commercially available at Daylight Solutions, Poway, CA.

Furthermore, a model to *a priori* calculate the temperature and field dependent intersubband linewidth in QC laser designs is presented; the same was experimentally verified with devices having different linewidths. This model constitutes a useful tool for the development of novel narrow gain and high wallplug efficiency active region designs or designs for broad gain applications.

Kurzfassung

Quantenkaskaden-Laser sind Halbleiterlaser, die auf Intersubband-Übergängen in Multi-Quantentopf-Schichtstrukturen basieren und mit Hilfe von epitaktischen Wachstumsverfahren hergestellt werden. Mit ihnen lassen sich sehr empfindliche und selektive Sensoren für spektroskopische Anwendungen in den Bereichen Industrie, Umwelt, Sicherheit und Militär realisieren.

In vielen Fällen, wie beispielsweise für die Bestimmung von Isotop-Verhältnissen (etwa von CO₂), ist eine hohe spektrale Auflösung (im MHz-Bereich) nötig, was Laserquellen im Dauerstrich-Betrieb erfordert. Aber auch die preiswerten Messsysteme für die Massenproduktion würden von dauerstrichbetriebenen Lasern profitieren, da diese mit Gleichstromquellen betrieben werden können, die im Vergleich zu Pulsgeneratoren relativ günstig sind. Zudem braucht es stromsparende batteriebetriebene Laserquellen, um tragbare Systeme zu realisieren, welche beispielsweise für die Atemanalyse mit portablen Geräten von Vorteil wären. Des Weiteren sind Breitband-Laserquellen mit schmaler Linienbreite sehr interessant für die Messung von Substanzen mit mehreren Absorptionslinien oder Mischungen mit breiten Absorptionsresonanzen, wie etwa zur nichtinvasiven Messung von Glukose. Der grosse Abstimmbereich zusammen mit einer, verglichen mit Fourier-Transformierten-Infrarot Spektrometern, viel höheren spektralen Auflösung macht diese Laserquellen sehr interessant für die Messung einer Vielzahl von chemischen Substanzen.

In dieser Arbeit wurden Laser mit verteilter Rückkopplung (DFB-Laser) für eine Emissionswellenlänge von 9 μm entwickelt, welche bis zu einer Temperatur von 150 °C im Dauerstrichbetrieb arbeiten, was die höchste publizierte Temperatur darstellt. Solche Laser sind um 1.3 % der Zentralwellenlänge durchstimmbare. Der elektrische Leistungsverbrauch eines solchen Lasers für optische Ausgangsleistungen von 16 mW bzw. 100 mW liegt bei 1.6 W bzw. 3.8 W.

Der relativ kleine Abstimmbereich eines einzelnen DFB-Lasers von etwa 1 % oder weniger schränkt den Anwendungsbereich für Messungen von komplexen Mischungen

mit mehreren Absorptionslinien ein. Durch den Einsatz eines Breitband-Verstärkermediums und der Integration mehrerer DFB-Gitter konnten Hochleistungslaser realisiert werden, die einen Wellenlängenbereich von 7.7 bis 8.3 μm bei einer Temperatur von 30 °C abdecken. Dies entspricht einem Durchstimmbereich von 8 % der Zentralwellenlänge. Einige von diesen Lasern wurden für die NASA Mars Science Laboratory Mission ausgewählt, deren Ziel es ist, herauszufinden, ob der Planet Mars jemals bewohnbar war.

Die Kombination zweier solcher Breitband-Verstärkermedien im selben Bauteil erlaubte die Realisierung eines heterogenen Hochleistungs-Quantenkaskaden-Lasers, welcher mit Hilfe einer externen Kavität durchgestimmt wurde. Der Abstimmbereich eines solchen Lasers über 25 % der Zentralwellenlänge im Pulsbetrieb und 18 % im Dauerstrichbetrieb stellt den höchsten publizierten Wert für Quantenkaskaden-Laser dar. Diese Laser sind kommerziell bei Daylight Solutions (Poway, Kalifornien) erhältlich.

Darüber hinaus wurde ein Modell für die Berechnung der temperatur- und feld-abhängigen Intersubband-Linienbreite in Quantenkaskaden-Lasern erstellt und experimentell mit Lasern unterschiedlicher Linienbreite verifiziert. Dieses Modell stellt ein nützliches Werkzeug für die Entwicklung neuer aktiver Zonen mit schmalen Linienbreiten und hohem Gesamtwirkungsgrad oder neuartiger Designs für Breitband-Anwendungen dar.