

Infrared Laser for High-resolution Spectroscopy and Metrology

Marcel Rattunde – marcel.rattunde@iaf.fraunhofer.de

Fraunhofer IAF has developed tunable lasers based on the semiconductor disk laser (SDL) concept for the 2 – 3 μm wavelength range and on quantum cascade lasers (QCL) covering the 4 – 11 μm range. These lasers can be precisely tuned to any specific wavelength (e. g. of a particular absorption line) and feature mode-hop-free fine tuning combined with a large coarse tuning range and a high output power of up to 500 mW. They can be tailored for precise spectroscopic measurements as well as for quantum optical experiments.

1 Precision spectroscopy as well as quantum optical experiments calls for tunable, narrow-linewidth high power lasers.

Für die Quantenoptik sowie die hochauflösende Spektroskopie werden durchstimmbare Leistungslaser mit einer schmalen Linienbreite benötigt.

Although distributed feedback (DFB) semiconductor lasers are now widely used for standard spectroscopic measurements such as absorption spectroscopy of gases, many applications demand a wider spectral tuning range (e. g. for multi-species analysis) or higher output power (e. g. for stand-off detection or quantum optics). At the same time, these laser platforms should still facilitate mode-hop-free fine tuning and exhibit a narrow emission linewidth. Due to technological achievements within the last year, Fraunhofer IAF can now offer these platforms in two relevant IR-wavelength regions, drawing on two different semiconductor-based optical gain structures.

Tunable Semiconductor Disk Laser (SDL) for the 2 – 3 μm Range

For high-power operation, a transparent intracavity heat spreader made of SiC or

diamond is currently state of the art for GaSb-based SDLs emitting in the 2 to 3 μm wavelength range. However, the severe drawback of this mounting technology is that the heat spreader also acts as an optical etalon. As a result, at a constant chip temperature, which is the preferred mode of operation for stable single-frequency emission, the heat spreader prevents a tunable setup from reaching emission wavelengths in between the different etalon modes. Omitting the heat spreader could solve this problem, but in such cases the output power is currently limited to approximately 10 mW.

Fraunhofer IAF has developed a new chip-mounting technology for these SDLs that enables high output power without the need for an intracavity heat spreader. This technology facilitates the tunable laser setup shown in Fig. 2. A birefringent filter is used



- Mode-hop-free tunable laser
- Infrared wavelength range
- Spectral tunable semiconductor laser
- Narrow spectral linewidth
- High output power

Infrarotlaser für hochauflösende Spektroskopie und Metrologie

Basierend auf zwei unterschiedlichen Halbleiter-Technologien wurden am Fraunhofer IAF durchstimmbare Laser für den 2 – 3 μm sowie für den 4 – 11 μm Spektralbereich entwickelt. Die Laser können präzise auf jede beliebige Wellenlänge, z. B. einer spezifischen Absorptionslinie, eingestellt werden und zeichnen sich durch eine hohe Ausgangsleistung von bis zu 500 mW sowie eine schmalen Linienbreite aus. Die Laser finden Anwendung in der hochauflösenden Spektroskopie sowie der Quantenoptik.

< 0.0001
 cm^{-1}

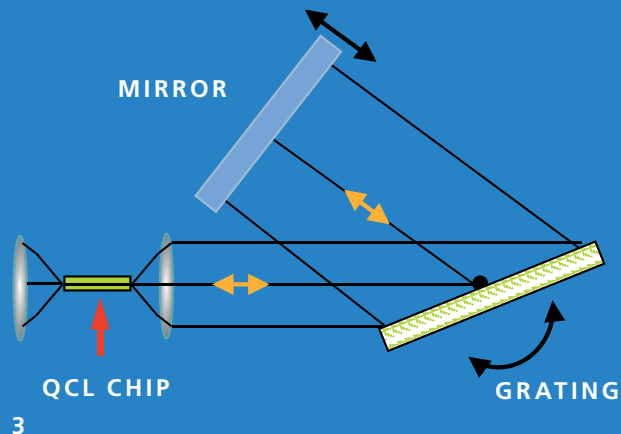
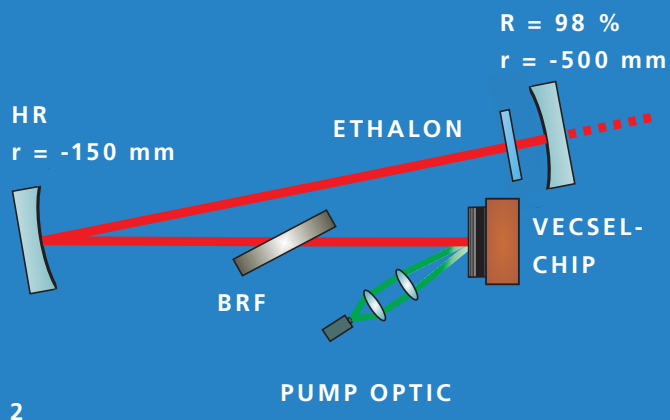
*Spectral linewidth of a tunable 2 μm SDL.
Spektrale Linienbreite eines 2 μm Halbleiterscheibenlasers.*

Für einfache spektroskopische Messungen, wie der Absorptionsspektroskopie einzelner Gaslinien, haben sich mittlerweile »distributed feedback« (DFB)-Halbleiterlaser etabliert, die jedoch in ihrer Emissionswellenlänge auf einen sehr kleinen Spektralbereich begrenzt sind. Viele Anwendungen benötigen hingegen einen größeren spektralen Durchstimmbereich, z. B. bei der Multikomponenten-Analyse. Oder sie benötigen höhere Ausgangsleistungen, z. B. in quantenoptischen Experimenten. Gleichzeitig sollen die vom DFB-Laser bekannten Eigenschaften, schmale Linienbreite sowie modensprungfreies Durchstimmen in einem begrenzten Wellenlängenbereich, beibehalten werden. Durch technologische Fortschritte im Bereich der Halbleiter-Scheibenlaser (semiconductor disk laser, SDL) für den 2 – 3 μm , sowie des Quantenkaskadenlaser (QCL) für den 4 – 11 μm Wellenlängenbereich kann das

Fraunhofer IAF nun Laser-Plattformen in zwei relevanten Wellenlängenbereichen anbieten, die die obigen Vorgaben erfüllen.

Durchstimmbare Halbleiter-Scheibenlaser (SDL) für den 2 – 3 μm Bereich

Um eine hohe Ausgangsleistung der GaSb-basierten SDLs sicherzustellen, werden nach bisherigem Stand der Technik resonatorinterne Wärmespreizer aus SiC- oder Diamant verwendet. Der Nachteil dieser Technologie ist, dass die Wärmespreizer gleichzeitig als Etalon wirken. Ein durchstimmbarer, schmalbandiger SDL, dessen Chip-Temperatur aus Stabilitätsgründen konstant gehalten werden muss, kann damit keine Emissionswellenlängen zwischen den einzelnen Etalon-Moden erreichen. Betreibt man die SDL ohne Wärmespreizer, so war die Ausgangsleistung bisher auf 10 mW begrenzt.



2 Schematic diagram of the tunable SDL resonator.

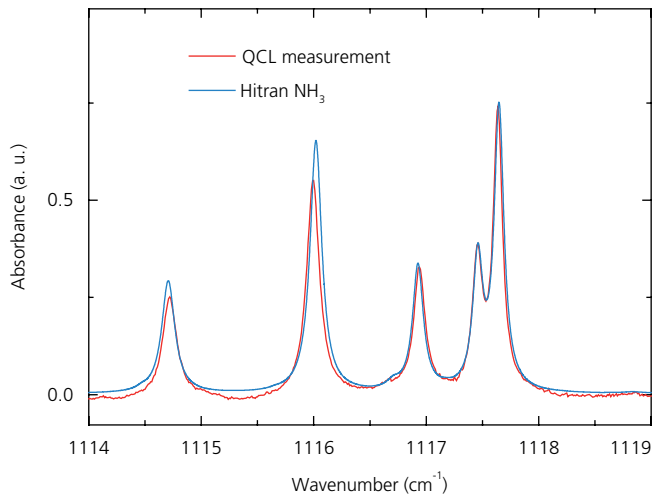
Aufbau des durchstimmbaren Halbleiter-Scheibenlasers (SDL).

3 Schematic diagram of a mode-hop-free tunable EC-QCL setup.

Schematischer Aufbau des QCL-Resonators, mit dem ein modensprungfrei-durchstimmbarer Betrieb erreicht wurde.

for coarse tuning of the emission wavelength at around 150 cm^{-1} . Single-frequency emission is ensured by a tiltable etalon inside the laser cavity. Mode-hop-free fine tuning can be achieved by changing the cavity length with a piezo-mounted end mirror, resulting in a mode-hop-free tuning range on the order of 1 GHz (or 0.03 cm^{-1}). With this setup, any arbitrary wavelength within the tuning range of the gain chip is accessible at a constant chip temperature. At the same time, this

resonator reaches a high output power of 500 mW (at the central emission wavelength) in single-frequency operation with an emission linewidth below 3 MHz (or 0.0001 cm^{-1}). These combined features make the SDL setup a unique laser system for cw-LIDAR side facets acting as plan-parallel mirrors. With a typical chip length of 2 mm , this results in mode spacing and consequential mode hops, of around 0.75 cm^{-1} when tuning the laser. To improve on this, a Littman-Metcalf-type external resonator was designed (shown schematically in Fig. 3) that exhibits a higher spectral resolution compared with the standard Littrow configuration. Moreover, the anti-reflection coating on the intracavity out-coupling facet of the QCL chip was improved and the QCL was operated in continuous-wave (cw) mode. For a large mode-hop-free tuning range, the rotation of the mirror was synchronized with the change in the cavity length.



The ability for mode-hop-free tuning of this improved QCL setup was demonstrated by measuring absorption peaks of ammonia (NH_3) as shown in Fig. 4. This absorbance trace (red line) shows excellent agreement with the reference spectra from the HITRAN database (blue line) and no mode hops within this 150 GHz (5 cm^{-1}) wavelength scan. The output power of this EC-QCL reaches 100 mW (at the central emission wavelength) in single-frequency operation with a linewidth below 60 MHz (or 0.002 cm^{-1}). The coarse tuning range is around 100 cm^{-1} .

4 Absorbance measurement of NH_3 with an EC-QCL setup (red line). All features of the different absorption lines are well resolved, and are in excellent agreement with the HITRAN reference spectrum (blue line).

Vergleich der mit dem EC-QCL gemessenen NH_3 -Absorptionslinien (rot) mit dem aus der HITRAN-Datenbank bestimmten Spektrum (blau).

measurements, selective optical pumping of atoms and molecules, and quantum optical experiments.

Mode-hop-free EC-QCL for the 4 – 11 μm Wavelength Range

For longer emission wavelengths well above $3.5 \mu\text{m}$, quantum cascade lasers (QCL) constitute the most effective semiconductor structure for optical gain. An external grating can be used for wavelength tuning. However, as above, for continuous and smooth tuning, there is an unwanted »etalon« inside this resonator – the QCL chip itself with the

Just like a DFB laser, this QCL setup can resolve spectrally narrow absorption features. However, it exhibits a much larger total tuning range, enabling multi-species analysis with a single laser source. Furthermore, this wider spectral coverage greatly improves the subsequent chemometric analysis, reducing the risk of false correlations.

< 0.002
cm⁻¹

*Spectral linewidth
of a cw EC-QCL.
Spektrale Linienbreite
eines cw-EC-QCL.*

5 *Mounted QCL chip with
integrated micro lenses.
Mounted QCL-Chip mit
integrierten Mikro-Linsen.*

Am Fraunhofer IAF konnte eine neue Aufbautechnik für die SDL-Chips entwickelt werden, die zum ersten Mal hohe Ausgangsleistungen ohne die Verwendung eines resonatorinternen Wärmespreizers erlaubt. Durch diese Aufbautechnik konnte der in Abb. 2 gezeigte durchstimmbarer SDL realisiert werden. Durch die Kombination aus Lyot-Filter und kippbarem Etalon kann bei konstanter Chip-Temperatur jede beliebige Emissionswellenlänge innerhalb des 150 cm⁻¹ Durchstimmbereiches eingestellt werden. Modensprungfreies Abstimmen im Bereich von 3 GHz (0,03 cm⁻¹) ist durch Veränderung der Resonatorlänge mit Hilfe eines Piezos möglich. Dieser SDL-Resonator erreicht eine hohe Ausgangsleistung von 500 mW (bei der Zentralwellenlänge) im spektral-einmodigen Betrieb mit einer Linienbreite unterhalb von 3 MHz (0,0001 cm⁻¹). Diese Eigenschaften ermöglichen den Einsatz dieses SDLs in cw-LIDAR-Messungen, der präzisen Vermessung von Atom- und Molekülspektren sowie quantenoptischen Experimenten.

**Modensprungfreie EC-QCL für den
4 – 11 µm Wellenlängenbereich**

Für Emissionswellenlängen oberhalb von 3,5 µm bietet der Quantenkaskadenlaser (QCL) ein effizientes Halbleitermedium für optischen Gewinn. Für die wellenlängenselektive Rückkopplung wird ein optisches Gitter in den QCL-Resonator integriert. Wie im obigen Fall gibt es aber auch in diesem Resonator einen unerwünschten Etalonneffekt, der durch den QCL-Chip selber verursacht wird. Bei einer typischen Chip-Länge von 2 mm ergeben sich so Modensprünge im Abstand von 0,75 cm⁻¹. Um diese Einschränkung

aufzuheben, wurde der QCL-Resonator an mehreren Stellen optimiert: So wurde ein Littman-Metcalf-Design verwendet, das gegenüber dem Littrow-Design eine deutlich höhere spektrale Auflösung besitzt. Ferner wurde die AR-Beschichtung der Chipfacette optimiert und der QCL wurde im Dauerstrich (cw)-Modus betrieben. Durch Anpassung der Resonatorlänge synchron zur Drehung des Gitters, konnte der kontinuierliche Durchstimmbereich maximiert werden. In Abb. 4 sind mehrere NH₃-Absorptionslinien gezeigt (rote Linie), die mit Hilfe des neuen EC-QCL gemessen wurden. Der Vergleich mit den Daten aus der HITRAN-Datenbank (blaue Linie) zeigt eine hervorragende Übereinstimmung und damit auch, dass der Laser über diese 150 GHz (5 cm⁻¹) modensprungfrei abgestimmt werden kann. Die Ausgangsleistung beträgt 100 mW (bei der Zentralwellenlänge) im spektral-einmodigen Betrieb mit einer Linienbreite unterhalb von 60 MHz (0,002 cm⁻¹). Der gesamte Durchstimmbereich des EC-QCLs liegt bei 100 cm⁻¹.

Im Vergleich zu einem DFB-QCL bietet der hier vorgestellte EC-QCL ebenfalls die Möglichkeit, spektral schmale Absorptionslinien genau aufzulösen, allerdings mit dem Vorteil eines viel größeren maximalen Durchstimmbereichs. Dadurch kann mit nur einer Laserquelle ein Gemisch aus verschiedenen Substanzen analysiert werden (Multikomponenten-Analyse). Weiterhin wird durch die Erfassung eines breiten Spektralbereichs die nachfolgende chemometrische Auswertung deutlich einfacher und robuster und reduziert so die Gefahr von Falschalarmen deutlich.