

Diss. ETH No. 18732

Gain and waveguide engineering in mid-infrared quantum cascade lasers

A dissertation submitted to
ETH ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
TOBIAS GRESCH

Dipl. Phys.-El., University of Neuchâtel
born on November 3, 1977
citizen of Freienbach, SZ – Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Jérôme Faist, examiner
Prof. Dr. Carlo Sirtori, co-examiner

2009

Abstract

Quantum cascade lasers are unipolar semiconductor lasers that, due to the generality of the principles they are based on and the flexibility of the underlying technology, allow to fabricate sources of coherent light from the mid-infrared down to the frequencies of the terahertz. In this work we present different approaches in the domains of active region and waveguide engineering of mid-infrared quantum cascade lasers.

The quantum cascade lasers with large optical cavities presented in this work allow to obtain an optical mode with a quasi-rectangular intensity profile. We show that devices based this principle reduce the effects of vertical spatial hole burning in the waveguide core and thus achieve an optimal slope efficiency. We also show that the introduction of passive layers in the waveguide core stabilizes the electric field in the latter and enhances its thermal conductivity. Moreover, due to the large spatial extension of the optical mode, the devices exhibit a much narrower farfield than devices with standard waveguides. Despite limitations encountered due to the use of non-optimized active regions and old-school device processing we could demonstrate devices that exhibit more than 14 W of peak power and 34 % slope efficiency at $\lambda \approx 5 \mu\text{m}$ in pulsed operation (1 % duty-cycle) at cryogenic temperatures. Devices emitting at $\lambda \approx 10.5 \mu\text{m}$ and fabricated with more advanced techniques attained a peak power of 4.7 W and slope efficiencies up to 1.6 W/A in pulsed operation (1 % duty-cycle) at room temperature.

Strain-compensated active regions developed more than 10 years ago and based on the GaInAs and AlInAs materials and grown on InP substrates have shown to be the best way to obtain high power quantum cascade lasers emitting in the first mid-infrared atmospheric window (3.5-5.0 μm). After introducing the framework (including surface segregation) that allows us to quantitatively simulate the performances of our devices and to correctly predict their emission wavelength at different temperatures we present a “spiked” active region design. With this design structures are grown with a small amount of strain ($\pm 0.5\%$) and AlAs and InAs spikes with sub-monolayer thicknesses are added in the barriers and wells, respectively, that are situ-

ated around the wells hosting the lasing transition. Devices based on this design and emitting at $\lambda \approx 4.5 \mu\text{m}$ and $\lambda \approx 4.8 \mu\text{m}$ worked in continuous-wave operation up to room temperature and a maximal average power of 200 mW was observed at 303 K.

Furthermore we present a multi-section cavity gain measurement technique that allows to measure the gain of a quantum cascade laser structure in waveguide configuration. The self-aligned technique yields a direct and quantitative measurement of the gain and the waveguide losses and, due to its pulsed operation, can be performed at high temperatures and for high current densities. Using this technique we measured the gain of devices based on a single-quantum-well active region and that operate in a regime of very low to vanishing population inversion. The measured gain shows a dispersive lineshape for low population inversion between the upper and lower subband of the lasing transition and recovers a more Lorentzian-shaped gain for increasing population of the upper subband. This evolution of the gain shape is predicted by a model that includes scattering-assisted transitions between the two subbands.

Resumé

Des lasers à cascade quantique sont des lasers unipolaires qui, grâce à la flexibilité des principes et de la technologie sur lesquels ils sont basés, permettent de réaliser des sources de lumière cohérente qui émettent des longueurs d'ondes dans l'infrarouge moyen jusqu'aux fréquences therahertz. Dans ce travail, nous allons présenter des approches différentes dans le domaine de l'ingénierie des régions actives d'une part et des guides d'onde d'autre part pour des lasers à cascade quantique qui émettent dans l'infrarouge moyen.

Les lasers à cascade quantique avec des cavités optiques que nous présentons dans ce travail permettent de réaliser des modes optiques avec un profil d'intensité quasi rectiligne. Nous montrons que des lasers basés sur ce principe réduisent les effets du hole-burning spatial dans la direction de croissance et permettent d'obtenir une pente différentielle optimale. Nous montrons aussi que l'incorporation de couches passives dans le coeur du guide d'onde stabilise le champ électrique et améliore la conduction thermique du dispositif. De plus, l'extension spatiale large du mode optique dans le guide résulte dans un champ lointain étroit ce qui facilite la collection de la lumière avec des dispositifs optiques. Malgré les limitations que nous avons rencontrés dû à l'emploi de régions actives non-optimisées montrant des courants de seuil importants d'une part et une fabrication simpliste des échantillons d'autre part, nous avons pu démontrer des dispositifs qui émettent plus de 14 W de puissance de crête et une efficacité de 34 % à une longueur d'onde de $\lambda \approx 5 \mu\text{m}$ à température cryogénique. Un échantillon émettant à $\lambda \approx 10.5 \mu\text{m}$ et fabriqué avec une technologie plus avancée a atteint une puissance de crête de 4.7 W et une pente différentielle jusqu'à 1.6 W/A à température ambiante en mode pulsé.

Des régions actives avec contrainte compensée ont été développées il y a dix ans. Les lasers basés sur les matériaux GaInAs et AlInAs et crûs sur un substrat de InP ont montré que ceci est la meilleure méthode pour fabriquer des lasers à cascade quantique qui émettent dans la première fenêtre transparente de l'infrarouge moyen qui se trouve entre 3.5 et 5.0 μm . Après la présentation des bases (en incluant la ségrégation à la surface des matériaux volatiles)

qui nous permet de faire une simulation quantitative des performances des échantillons et de prédire correctement leur longueur d'onde d'émission en fonction de la température, nous présentons une région active qui contient des pics. Cette région active a été crû avec relativement peu de contrainte ($\pm 0.5\%$), mais des couches fines de InAs et de AlAs avec une épaisseur plus fine qu'une couche atomique ont été introduites dans les puits et barrières proches de la transition optique. Des échantillons basés sur ce principe et qui émettent à $\lambda \approx 4.5 \mu\text{m}$ et $\lambda \approx 4.8 \mu\text{m}$ ont fonctionné jusqu'à température ambiante en mode continu et ont atteint une puissance maximale de 200 mW à la même température.

De plus, nous présentons une technique basée sur un guide d'onde divisé en plusieurs sections qui permet de mesurer le gain d'une structure à cascade quantique. Ceci est une technique auto-alignée qui permet de faire une mesure directe et quantitative du gain et des pertes de guide et qui, grâce au mode d'opération pulsé, permet aussi de faire les mesures à haute température et avec des densités de courant importantes. En utilisant cette technique, nous avons mesuré le gain d'échantillons basés sur une région active contenant un simple puits quantique. Ces échantillons travaillent dans un régime d'inversion de population faible. Le gain mesuré montre une forme dispersive quand l'inversion de population est très faible et devient de plus en plus symétrique lorsqu'on augmente le courant et donc l'inversion de population. Cette évolution de la forme de gain est prévue par un modèle qui tient compte de transitions du deuxième ordre entre des sous-bandes.