

MODELOCKING OF SEMICONDUCTOR VERTICAL  
EMITTERS: FROM VECSEL TO MIXSEL

A dissertation submitted to

E T H Z U R I C H

for the degree of

D O C T O R O F S C I E N C E S

presented by

A U D E - R E I N E B E L L A N C O U R T

Physicist Engineer from Institut d'Optique Graduate School (Orsay, France)

born on February 22, 1982

citizen of France

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. U. Keller, Supervisor

Prof. Dr. P. Georges, Co-Examiner

Dr. T. Südmeyer, Co-Examiner

January 2009

# *Abstract*

Thanks to their vertical emission and external cavity, optically pumped vertical external cavity surface-emitting lasers (VECSELs) offer excellent single transverse mode beam quality at higher powers than any other semiconductor lasers. The output power can be simply scaled up by increasing the pump spot diameter, enabling output powers as high as 20 W so far, in fundamental transverse mode ( $M^2 < 1.1$ ). Furthermore, contrary to other solid-state lasers, the gain of the semiconductor is not defined by specific excitation level but can be continuously tuned by the gain material composition. This offers a great flexibility in design and makes it possible to address a large wavelength range from visible to infrared.

The low gain saturation of VECSELs is moreover favorable for passive modelocking with semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) and reduces Q-switching instability issues. SESAM-VECSELs modelocking have been demonstrated with high power up to 2.08 W at 4 GHz, as well as high repetition rate up to 50 GHz.

In this thesis, we present a detailed study on modelocked VECSELs, which resulted in a new type integrated modelocked VECSEL: the MIXSEL (modelocked integrated external-cavity surface emitting laser). We describe first how the development of quantum dot based SESAMs (QD-SESAMs) has enabled the realization of very short cavities for repetition rate in the multi-10 GHz regime. With the initially used quantum well (QW) SESAMs, modelocking required focusing the laser beam on the absorber. However, for cavities in the range of a few millimeters, focusing has become a constraint, limiting the highest achievable repetition rates. Reducing the saturation fluence of the absorber is necessary for high repetition rates, as it allows modelocking with similar spot sizes on the gain and absorber (1:1 modelocking).

QD-SESAMs exhibit a larger design freedom than QW-SESAMs. The additional parameter of the dot density allows decoupling the saturation fluence and modulation depth. QD-SESAMs permit to reduce the saturation fluence with a resonant field enhancement, while keeping the right amount of modulation depth. The low saturation fluence QD-SESAMs also enabled the demonstration of a novel type of ultrafast semiconductor laser, which integrates a saturable absorber directly into the VECSEL gain structure, the MIXSEL. With the MIXSEL, modelocking can be achieved from a simple straight cavity. For the first demonstration, 40 mW were obtained at 2.8 GHz and 34.6 ps pulses. We discuss the saturable absorber requirements and challenges for integration in the MIXSEL. We also show improvement of the average output power to 185 mW by better cooling and discuss the challenges for further power scaling and pulse shortening. The MIXSEL concept appears suitable for cost-efficient wafer-scale mass-production and the potential for electrically pumped MIXSELS will make this laser technology even more attractive.

The first MIXSEL design used a resonant field enhancement in the absorber, which however makes the MIXSEL more sensitive to growth errors. We investigated the QD growth parameters to understand how the growth conditions have an influence on the SESAM properties like modulation depth and saturation fluence. We studied a set of antiresonant single-layers QD-SESAMs with varying dot density and growth temperature. We confirmed that the modulation depth can be controlled by the dot density while the saturation fluence stays constant and we showed that one can reduce the saturation fluence of the absorber with post-growth annealing. We experimentally verified the design guidelines of this study for multiple dot layers, which enabled to obtain the appropriate modulation depth and to demonstrate 1:1 modelocking for the first time with an antiresonant SESAM. These low saturation fluence QDs are perfectly adapted for MIXSEL integration. Antiresonant designs will increase the growth tolerance and lower MIXSEL dispersion, which is especially important for short pulse generation and high repetition rates.

## Résumé

Grâce à leur émission verticale et leur cavité externe, les VECSELS (lasers semiconducteurs à émission perpendiculaire aux couches epitaxiales), pompés optiquement, offrent une qualité de faisceau excellente avec les puissances les plus élevées émises par des lasers semiconducteurs. La puissance de sortie peut être augmentée en agrandissant simplement le diamètre du faisceau de pompe, ce qui a permis d'atteindre jusqu'à 20 watts avec un faisceau monomode transverse fondamental ( $M^2 < 1.1$ ). De plus, contrairement aux autres lasers solides, le gain des semiconducteurs n'est pas défini par des niveaux d'excitation spécifiques, mais peut être ajusté continuellement avec la composition des matériaux.

La faible saturation du gain des VECSELS est, de plus, favorable pour le blocage de modes avec un SESAM (miroir semiconducteur à absorption saturable) et réduit la tendance au Q-switching. Le blocage de modes de VECSELS avec SESAMs a été démontré avec des puissances allant jusqu'à 2.08 watts à 4 GHz, ainsi que des taux de répétition allant jusqu'à 50 GHz.

Dans cette thèse, nous présentons une étude détaillée sur les VECSELS à blocage de modes, qui a abouti sur la réalisation d'un nouveau type de VECSEL bloqué en modes avec absorbant saturable intégré : le MIXSEL. Nous décrivons tout d'abord comment le développement d'absorbants saturables à base d'îlots quantiques (QD-SESAMs) a permis la réalisation de très petites cavités pour des fréquences dans le régime multi-gigahertz. Avec les absorbants saturables à puits quantiques (QW-SESAMs) utilisés initialement, le blocage de modes nécessitait de focaliser le faisceau laser sur l'absorbant. Cependant, pour des cavités de quelques millimètres, la focalisation est devenue une contrainte, limitant les plus hautes fréquences accessibles.

La réduction de la fluence de saturation du SESAM, qui autorise le blocage de modes avec des surfaces similaires sur le gain et l'absorbant, est nécessaire pour les très hautes fréquences.

Les QD-SESAMs offrent une plus grande liberté dans le design que les QW-SESAMs. Le paramètre que constitue la densité d'îlots permet de découpler la fluence de saturation et l'amplitude de modulation. Les QD-SESAMs permettent de réduire la fluence de saturation en utilisant un champ électrique résonant, tout en conservant une amplitude de modulation adéquate. La faible fluence de saturation des QD-SESAMs a aussi rendu possible la démonstration d'un nouveau type de laser à impulsions brèves, qui intègre un absorbant saturable dans la structure épitaxiale d'un VECSEL : le MIXSEL. Avec le MIXSEL, il est devenu possible d'obtenir le blocage de modes avec une simple cavité droite. Pour la première démonstration, 40 mW ont été obtenus à un taux de répétition de 2.8 GHz avec des impulsions de 34.6 ps. Nous présentons les exigences de l'intégration de l'absorbant saturable dans le MIXSEL. Nous montrons également une augmentation de la puissance moyenne à 185 mW obtenue grâce à un refroidissement plus efficace. Puis nous discutons comment augmenter encore plus la puissance et réduire la durée des impulsions. Le concept du MIXSEL entièrement réalisé en semiconducteur est adapté à la production en masse. La possibilité de remplacer le pompage optique par un pompage électrique rend cette technologie encore plus séduisante.

Le design d'origine du MIXSEL comprend un champ électrique résonant au niveau de l'absorbant, ce qui a l'inconvénient de le rendre aussi plus sensible aux imprécisions liées à l'épitaxie de fines couches. Nous avons analysé les conditions de croissance des îlots quantiques afin de comprendre leurs influences sur les propriétés macroscopiques du SESAM comme l'amplitude de modulation et la fluence de saturation. En étudiant une série de QD-SESAMs antirésonants contenant une couche unique d'îlots quantiques pour différentes densités et températures de croissance, nous avons confirmé que l'amplitude de modulation pouvait être

contrôlée par la densité d'îlots tandis que la fluence de saturation reste constante. Nous avons par ailleurs montré qu'il était possible de réduire la fluence de saturation grâce à un recuit (annealing).

Nous avons vérifié que les propriétés des SESAMs comportant plusieurs couches d'îlots quantiques peuvent être modifiées de manière similaire, ce qui a permis de démontrer pour la première fois le blocage de modes sans focaliser le faisceau sur l'absorbant avec un SESAM antirésonant. Ces îlots quantiques à faible fluence de saturation sont parfaitement adaptés à l'intégration dans le MIXSEL. Les designs antirésonants vont améliorer la tolérance face aux imprécisions de croissance et diminuer la dispersion, ce qui est crucial pour la génération d'impulsions brèves et les très hautes fréquences.