



Doctoral Thesis

Long wavelength VCSELs with MOVPE grown AlGaAsSb/InP bragg reflectors

Author(s):

Ostinelli, Olivier

Publication Date:

2006

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005195295> →

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](#).

Doctoral Thesis ETH no. 16503

Long Wavelength VCSELs with MOVPE Grown AlGaAsSb/InP Bragg Reflectors

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

For the degree of
Doctor of Natural Sciences

Presented by

Olivier Ostinelli

Dipl. Phys. ETH (Swiss Federal Institute of Technology, Zurich)

Born on February 27, 1975

Citizen of Rancate (TI), Switzerland

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. W. Bächtold, supervisor

Prof. Dr. H. Jäckel, co-examiner

Dr. G. Almuneau, co-examiner

2006

Abstract

In the last decades a large fraction of copper cables for data communication have been replaced by optical glass fibers. The optical links offer a larger bandwidth capacity, a reduced weight and absence of electromagnetic interferences. Whereas today expensive edge-emitting DFB lasers are used, suitable optical sources for long distance data transmission would be long wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers (LW-VCSELs) with emission wavelengths where the silica-based fibers show a minimum of dispersion and absorption, i.e. at 1.31 μm and 1.55 μm , respectively. These devices are characterized by a circular shaped beam with high light coupling efficiencies in optical fibers, a large modulation bandwidth of up to 20 GHz, a low drive current and can be integrated as two-dimensional VCSEL arrays. The realization of high performance devices is still limited by technological and material-related issues. In the last decades, several research groups reported on a variety of designs, materials and fabrication techniques for LW-VCSELs. Most VCSELs have not reached the performances as required for optical data communication. Furthermore, the fabrication flow does not allow realizing low costs and high volume production in industry.

This thesis focuses on the development of InP based LW-VCSELs with AlGaAsSb/InP DBRs. The proposed fabrication flow and device properties might be attractive for the industry. Metal-organic vapor-phase epitaxy (MOVPE) has been chosen as growth technique. The low costs of this technology meet one of the requirements enabling high volume production. Since so far an MOVPE growth process was not available for antimonide DBRs, the corresponding growth has been developed. AlGaAsSb has been grown with a low defect density ($<1\text{-}2\text{ cm}^{-2}$), a good reproducibility, no phase separation, no atomic ordering, an uniform composition on 2 in. wafers and with abrupt interfaces.

The optical properties of InP/AlGaAsSb heterostructures have been investigated by photoluminescence at 15 K. The band alignment between InP and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}$ as well as the material band gaps have been derived for Al contents of up to $x=0.168$.

With the developed antimonide epitaxy, highly reflective AlGaAsSb/InP DBRs have been grown. The silicon/tellurium n-doped DBR composed of 24 Bragg periods shows a reflectivity of 99.6%, negligible free carrier absorption and a voltage drop per Bragg period of 50 mV at a current density of 1 kA/cm^2 . This DBR achieves all requirements needed for the application in LW-VCSELs. The remaining structure of the LW-VCSEL has been grown on the n-doped AlGaAsSb/InP DBR.

An active region composed of three InP/InGaAs multiple quantum wells emitting at the wavelength 1.52-1.54 μm has been embedded in a 0.98 μm thick InP cavity. InP has a good thermal conductivity, which improves the MQWs and thus the VCSEL efficiency at high drive currents. The oxidation of an AlAsSb layer has been demonstrated. However, the

oxidation process must further be optimized to provide an efficient carrier confinement layer in the VCSEL.

The top VCSEL DBR with a reflectivity of 99.1% has been achieved with a p-doped 6.5-period InGaAsP/InP DBR for the hole conduction and a 3.5-period SiO₂/SiO_x DBR. With the dielectric DBR high reflectivities can be achieved with less Bragg periods otherwise needed with InGaAsP/InP. This design reduces the voltage drop across the semiconductor layers of the device.

The VCSEL fabrication process has been performed with standard photolithographic techniques used in the III-V semiconductor technology. VCSELs with a cavity diameter varying between 10 μm and 30 μm have been fabricated.

The devices with a cavity diameter of 30 μm have been characterized. The current-voltage characteristic shows a voltage drop across the mesa-etched VCSEL of 2.5 V at a current density of 1 kA/cm². The emission spectrum shows a peak centered at the wavelength 1.56 μm, with a full width at half maximum of 3 nm. The current-power characteristic is like that of a LED and shows a roll-over current density of 1.6 kA/cm². Because of the insufficient carrier confinement in the active region, the laser threshold could not be achieved. The estimated active region temperature is 95°C at a current density of 2.8 kA/cm². The near field of the VCSEL imaged on an InGaAs CCD camera shows the presence of lateral guided modes in the VCSEL cavity.

Beside the growth and processing of LW-VCSELs, antimonide semiconductor saturable absorber mirrors (SESAMs) for ultra-short pulse lasers have been developed. The carrier decay time of AlGaAsSb saturable absorbers have been reduced from several hundred of picoseconds to 20 ps. The SESAMs allowed achieving pulse repetition rates of up to 10 GHz in an Er:Yb:glass laser at the wavelength 1.5 μm.

Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten wurde ein grosser Teil der Kupferleitungen für die Datenübertragung durch optische Glasfasern ersetzt. Optische Glasfasern bieten eine höhere Übertragungskapazität, haben ein geringeres Gewicht und schliessen elektromagnetische Interferenzen aus. Während heute überwiegend relativ teure kantenemittierende Lasers in der faseroptischen Technologie eingesetzt sind, wären die geeignete Lichtquellen "Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers" (VCSELs) mit Emissionwellenlängen bei 1.31 μm oder 1.55 μm , also dem Dispersions- oder Absorptionsminimum der Glasfaser. Diese optische Bauelemente haben einen kreisförmigen Strahlquerschnitt mit hoher Einkopplungseffizienz in optischen Fasern, eine sehr hohe Modulationsbandbreite von bis zu 20 GHz, einen geringen Betriebsstrom und können als integrierte zwei-dimensionale VCSEL Arrays eingesetzt werden. Die Herstellung dieser VCSELs mit hoher Leistung ist zurzeit noch eingeschränkt durch technologische Probleme wie auch durch Materialeigenschaften. In den letzten Jahren wurden eine Reihe von Entwürfen, Materialien und Herstellungsprozesse für langwellige VCSELs veröffentlicht. Die Resultate zeigen, dass sich in den meisten Fällen diese VCSELs nicht für die faseroptischen Technologie eignen, und dass eine billige industrielle Herstellung kaum möglich ist.

Diese Arbeit beschreibt die Herstellung von InP-basierten langwelligen VCSELs mit AlGaAsSb/InP Bragg Spiegeln. Das Herstellungsverfahren und die VCSEL Eigenschaften sollten auch eine attraktive Lösung für die Industrie darstellen. Metallorganische Gasphasenepitaxie wurde für das Wachstum der III-V Halbleiter gewählt. Die niedrigen Kosten dieser Technologie wären für eine industrielle Produktion vorteilhaft. Da bisher noch kein Wachstumsprozess für antimonhaltige Spiegel beschrieben wurde, wurde in dieser Arbeit der entsprechende Prozess entwickelt. Für AlGaAsSb/InP wurden Schichtstrukturen mit einer geringen Dichte von Oberflächendefekten ($<1-2 \text{ cm}^{-2}$), mit guter Reproduzierbarkeit, ohne Phasenseparation oder Ordnungseffekte, mit einer uniforme Schichtzusammensetzung auf 2-Zoll Substraten und abrupten Grenzflächen zwischen AlGaAsSb und InP erzielt.

Die optischen Eigenschaften von InP/AlGaAsSb Heterostrukturen wurden mit Photolumineszenz bei 15 K untersucht. Die relative Position der Bänder an der Grenzfläche zwischen InP und $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsSb}$, sowie die Bandlücken konnten für eine Al Konzentration von bis zu $x=0.168$ ermittelt werden.

Die entwickelte Antimonidepitaxie ermöglichte die Herstellung von AlGaAsSb/InP Bragg Spiegeln mit Reflektivitäten von bis zu 99.6%. Der mit Silizium/Tellur dotierte Spiegel erreichte einen Spannungsabfall pro Spiegelpaar von 50 mV bei einer Stromdichte von 1 kA/cm^2 , und hatte eine vernachlässigbare freie Ladungsträgerabsorption. Dieser Spiegel erfüllt alle Anforderungen für die Anwendung im VCSEL.

Die aktive Zone, bestehend aus drei InP/InGaAs Potentialtöpfen und mit Emissionswellenlänge bei 1.52-1.54 μm wurde in eine 0.98 μm dicke InP Kavität eingebaut. Mit der guten Wärmeleitfähigkeit von InP kann der VCSEL mit hoher Stromdichte betrieben werden.

Zur Herstellung einer Oxidapertur wurde AlAsSb oxidiert. Allerdings sind weitere Verbesserungen des Oxidationsprozesses für die Verwendung von AlAsSb als Isolationsschicht mit Apertur im VCSEL erforderlich.

Der obere VCSEL Spiegel mit 99.1% Reflektivität wurde mit zwei Bragg Spiegeln bestehend aus 6.5 InGaAsP/InP Perioden und 3.5 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_x$ Perioden hergestellt. Der p-dotierte Halbleiterspiegel ermöglicht die Löcherleitung und die geringe Anzahl Spiegelpaare führt zu einem geringeren Spannungsabfall. Mit dem dielektrischen Spiegel konnte die gewünschte Reflektivität mit weniger Spiegelpaaren erreicht werden.

Das Prozessieren der VCSEL Strukturen erfolgte mit gewöhnlicher, in der III-V Halbleiter Industrie verwendeter photolithographischer Technologie. Es wurden VCSELs mit Kavitätsw Durchmesser von 10 μm bis 30 μm hergestellt.

Die Struktur mit einem Kavitätsw Durchmesser von 30 μm wurde elektrisch und optisch charakterisiert. Die Strom-Spannungs Messung zeigte einen Spannungsabfall über dem gesamten VCSEL von 2.5 V bei einer Stromdichte von 1 kA/cm^2 . Das Emissionsspektrum zeigte einen Intensitätshöchstwert bei der Wellenlänge 1.56 μm mit einer Halbwertsbreite von 3 nm. Die Strom-Leistung Kurve ist ähnlich wie die einer LED, und zeigt einen "roll-over" bei der Stromdichte 1.6 kA/cm^2 . Wegen den noch ungenügenden Strom confinement konnte die Laserfunktion noch nicht nachgewiesen werden. Die ermittelte Temperatur bei einer Stromdichte von 2.8 kA/cm^2 beträgt 95°C in der Kavität. Das Nahfeld vom VCSEL wurde in einer InGaAs CCD Kamera abgebildet, und zeigte lokale Intensitätshöchstwerte, was die Anwesenheit lateraler Moden in der Kavität nachweist.

Neben der Herstellung von langwelligen VCSEL Strukturen, wurden Antimon „Semiconductor Saturable Absorber Mirrors“ (SESAMs) für die Erzeugung von ultra-kurze Laserpulsen entwickelt. Schnelle SESAMs bestehend aus AlGaAsSb Schichten mit sättigbarer Absorption und mit Ladungsträgerzerfallszeiten von 20 ps wurden gewachsen. Pulswiederholungsraten von bis zu 10 GHz wurden bei 1.5 μm Wellenlänge mit einem Er:Yb:Glas Laser erreicht.