



## Doctoral Thesis

# **Modeling, growth and characterization of InGaAs/AlAsSb quantum well structures for all-optical switching based on intersubband transitions**

**Author(s):**

Fedoryshyn, Yuriy

**Publication Date:**

2012

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007146701> →

**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 No. 20223

**Modeling, growth and characterization  
of InGaAs/AlAsSb quantum well structures  
for all-optical switching  
based on intersubband transitions**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

YURIY FEDORYSHYN

Master's Diploma, Lviv Polytechnic National University, Ukraine

born on May 6, 1980

Nationality: Ukrainian

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Heinz Jäckel, examiner  
Prof. Dr. Jérôme Faist, co-examiner

2012

# Abstract

A continuously increasing demand of bandwidth in communication and signal processing systems challenges electronic and optoelectronic devices with speed limits of  $\sim 100$  Gbit/s restricted by properties of existing materials and device principles. However all-optical devices utilizing nonlinear properties of relatively new materials have an exceptional potential to operate at bit rates of several Tbit/s. Intersubband transitions (ISBTs) in quantum wells (QW) make it possible to achieve ultra-fast optical nonlinearities for all-optical switching with acceptable control energies of  $< 1$  pJ. The substantial conduction band offset of  $\sim 1.6$  eV in InGaAs/AlAsSb QWs ensures the compatibility of ISBTs with the telecommunication wavelength around  $\lambda = 1550$  nm.

This work is focused on the investigation and development of ultra-thin InGaAs/AlAsSb QW structures for Tbit/s all-optical switching in the telecommunication wavelength range around  $\lambda = 1550$  nm employing exclusively ISBTs. With the systematic studies based on experiments using polarization-resolved spectroscopy and modeling with a self-consistent Schrödinger-Poisson solver, material band parameters, such as band-offsets, effective masses and non-parabolicity coefficients were determined for the best fit of the experimental data to the theoretical results. This allowed us to design and accurately predict the linear and non-linear characteristics of ISBTs in the studied structures.

The successful accomplishment of the experimental results is tightly coupled to the epitaxy and fabrication technology. In the scope of this thesis, the MBE-growth was developed for the relatively new Sb-based material system of InGaAs/AlAsSb QWs. Multi-layer heterostructures composed of binary (InP, AlAs), ternary (InGaAs, AlAsSb) and quaternary (InGaAsP) alloys with the state-of-the-art crystalline quality were achieved through optimisations of the growth parameters. Investigations of interfaces between InGaAs and AlAsSb layers in the QW structures revealed intermixing of Sb and In atoms due to their strong interdiffusion properties. These intermixing effects result in a deviation of the QW potential from an ideal square-like shape and they generate roughness at the heterointerfaces. As a consequence, an undesired shift of the ISBTs to lower energies occurs and a strong broadening of the intersubband absorption (ISBA) peaks due to the interface roughness leads

to high operation powers of the devices. The interdiffusion length was successfully reduced from  $>2\text{nm}$  to  $<0.5\text{nm}$  by inserting AlAs spacer layers and by applying growth interruptions at the interfaces, which allowed us to tune the ISBTs towards the telecommunication wavelength range and to reduce the broadening of the ISBA peaks.

Deeply-etched ridge waveguides designed and fabricated in the course of this work enabled the realization of inline devices for all-optical switching incorporating the studied InGaAs/AlAsSb QWs. Coupling of two QWs with a thin barrier makes it possible to produce a four-level system in the conduction band of the wells. Such a system can exhibit two ISBA peaks corresponding to the  $E_1 - E_4$  and  $E_2 - E_3$  ISBTs. With our pump-probe experiments, we demonstrated the capability of the studied CDQW structures to perform ultra-fast inline all-optical switching in the telecommunication wavelength range. These structures can be operated as single-wavelength switches at either  $\lambda = 1430\text{nm}$  or  $\lambda = 1730\text{nm}$ , employing the  $E_1 - E_4$  or  $E_2 - E_3$  ISBTs, with the ISBA recovery times of 400fs and 2ps, respectively. They can also be operated in a dual-wavelength mode which allows a straightforward separation of signal pulses at  $\lambda = 1730\text{nm}$  from control pulses at  $\lambda = 1430\text{nm}$  by relaxed spectral filtering at the output of the device.

In the last chapter of this thesis, perspectives on ultra-fast low-energy inline all-optical switching based on ISBTs in InGaAs/AlAsSb QWs for practical applications are discussed with respect to our experimental and modeling results.

# Zusammenfassung

Durch die stetig steigenden Kapazitätsanforderungen in der Signalverarbeitung und Telekommunikation stösst die Entwicklung von elektronischen und optoelektronischen Komponenten auf grosse Herausforderungen. Bei Übertragungsraten von  $\sim 100$  Gbit/s kommen die herkömmlichen Materialien und Funktionsprinzipien an ihre Grenzen. Geht man aber über zu optisch-optischer Schaltung von Signalen, welche sich nichtlineare Eigenschaften von relativ neuen Materialien zunutze macht, dann kann man aus dem vollen Potential der optischen Signalbandbreiten von Glasfasern schöpfen, die im Bereich von mehreren Terahertz liegen. Ultraschnelle optische Nichtlinearitäten, welche auf Intersubband (ISB)-Übergängen in Quantentöpfen beruhen, ermöglichen optisch-optische Schaltung mit erträglichen Schaltenergien von  $< 1$  pJ. Der beträchtliche Leitungsbandabstand von  $\sim 1.6$  eV in InGaAs/AlAsSb Quantentöpfen macht es möglich, ISB-Übergänge im Wellenlängenbereich um  $\lambda = 1550$  nm (typisch für Telekommunikation) zu nutzen.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Untersuchung und Entwicklung von ultradünnen InGaAs/AlAsSb Quantentopf-Strukturen für Tbit/s optisch-optische Schaltungen im Wellenlängenbereich um  $\lambda = 1550$  nm, die ausschliesslich auf ISB-Übergängen beruhen. Materialparameter wie Bänderabstände, effektive Massen und Nichtparabolizitätskoeffizienten wurden ermittelt indem experimentelle Daten systematisch mit theoretischen Modellen abgeglichen wurden. Für die Experimente wurde polarisationsaufgelöste Spektroskopie verwendet und für die Modellierung ein selbstkonsistenter Schrödinger-Poisson Solver. Die genaue Kenntnis aller Parameter erlaubte es uns die linearen und nichtlinearen Eigenschaften der ISB-Übergänge in den studierten Strukturen vorherzusagen und zu entwerfen.

Die erfolgreiche Gewinnung von experimentellen Resultaten hängt entscheidend von der Epitaxie und Fabrikationstechnologie ab. Im Rahmen dieser Dissertation wurde das MBE-Wachstum des relativ neuen Sb-basierten Materialsystems von InGaAs/AlAsSb Quantentöpfen entwickelt. Durch Optimierung der Wachstumsparameter wurden mehrlagige Heterostrukturen aus binären (InP, AlAs), ternären (InGaAs, AlAsSb) und quaternären (InGaAsP) Verbindungen von höchster Qualität erzielt. Die Untersuchung von Übergängen

zwischen InGaAs- und AlAsSb-Schichten zeigte eine Durchmischung von Sb- und In-Atomen aufgrund deren starker Interdiffusionseigenschaften. Diese Durchmischungseffekte führen zu einer Abweichung des Quantentopfpotentials von der idealen Rechtecksform, und sie bewirken Rauigkeiten an den Hetero-Übergängen. Als Folge davon treten unerwünschte Verschiebungen der ISB-Übergänge zu tieferen Energien auf. Zudem werden durch eine starke Verbreiterung der Intersubband-Absorption (ISBA), welche auf die Grenzflächenrauigkeiten zurückzuführen ist, hohe Betriebsleistungen der Schaltelemente nötig. Die Interdiffusionslänge wurde erfolgreich von  $>2\text{nm}$  auf  $<0.5\text{nm}$  reduziert, indem AlAs Trennschichten eingefügt wurden und mittels Wachstumsunterbrüchen an den Schichtübergängen. Dies erlaubte es uns die ISB-Übergänge in den Telekommunikations-Wellenlängenbereich zu verschieben und die Verbreiterung der ISB-Übergänge zu minimieren.

Tiefgeätzte Streifenwellenleiter, welche im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und fabriziert wurden, dienten der Realisierung von optisch coaxialen Bauelementen für optisch-optische Schaltung mittels der hier untersuchten InGaAs/AlAsSb Quantentöpfen. Durch die Kopplung von zwei Quantentöpfen über eine dünne Barriere kann ein Vier-Niveau-System im Leitungsband erreicht werden. Ein solches System kann zwei ISBA-Spitzen aufweisen, entsprechend den  $E_1$ - $E_4$  und  $E_2$ - $E_3$  ISB-Übergängen. Mittels Pump-Probe-Experimenten konnten wir zeigen, dass unsere gekoppelten Quantentopf-Strukturen ultraschnelle optisch coaxiale Schaltung im Telekommunikations-Wellenlängenbereich ermöglichen. Die Strukturen können als Einzel-Wellenlängen-Schalter bei  $\lambda = 1430\text{ nm}$  oder bei  $\lambda = 1730\text{ nm}$  betrieben werden, durch Verwendung des  $E_1$ - $E_4$  bzw. des  $E_2$ - $E_3$  ISB-Übergangs. Die entsprechenden ISBA Erholungszeiten sind  $400\text{fs}$  und  $2\text{ps}$ . Es kann aber auch ein Zwei-Wellenlängen-Betrieb gewählt werden, welcher am Ausgang des Elements eine einfache Trennung der Signal-Pulse von den Kontroll-Pulsen durch spektrales Filtern erlaubt.

Im abschliessenden Kapitel dieser Dissertation interpretieren wir unsere experimentellen und theoretischen Resultate hinsichtlich praktischer Anwendung von ISB-Übergängen in InGaAs/AlAsSb Quantentöpfen für zukünftige ultraschnelle coaxiale optisch-optische Schalter mit tiefen Schaltenergien.