



Doctoral Thesis

Integrated ultrafast all-optical switches relying on intersubband transitions in InP-based photonic bandgap structures

Author(s):

Ma, Ping

Publication Date:

2011

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007321423> →

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. 20178

Integrated Ultrafast All-optical Switches
Relying on Intersubband Transitions
in InP-based Photonic Bandgap Structures

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

PING MA

Master of Science, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden

born on January 11th,1981

citizen of P. R. China

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Heinz Jäckel, examiner

Prof. Dr. Gian-Luca Bona, co-examiner

2011

Abstract

Next generation all-optical communication networks, which are able to support the rapid growth of Internet traffic, require an ultra-high transmission bit rate of multi-hundred $Gbit/s$ to several $Tbit/s$. Such networks can be based on mixed systems of optical time division multiplexing (OTDM) and wavelength-division multiplexing (WDM). For the high-speed OTDM system, ultrafast all-optical switches are one of the crucial components. This thesis presents a series of exploratory studies on integrated ultrafast all-optical switches relying on intersubband transitions (ISBT) in InP-based photonic bandgap structures. The advanced optical designs are used to enhance the performance of the all-optical switches with respect to the device size and energy consumption. The work shown in the thesis covers the entire process to develop the passive devices and all-optical switches, including both material and device development.

InGaAs/AlAs/AlAsSb coupled double quantum well (CDQW) materials exhibiting ISBTs are promising for ultrafast all-optical switching applications. Because theoretical modeling and simulations play an important role in investigating the physics of CDQW materials, after a general introduction of all-optical switching, the thesis presents the computational studies of the time evolution of optical nonlinearities and absorption saturation characteristics. The QW model developed in the study is based on the density matrix theory and modified optical Bloch equations with the relaxation-time approximation. The theoretical estimates achieved from the model well interpret the corresponding experimental results. In addition, the thesis also discusses the ultimate switch performance. As a whole, our theoretical studies provide useful insights to optimize the QW material and device design.

Over the past two decades, photonic crystal (PhC)-based integrated optical devices have been proposed and extensively investigated. PhC devices offer unique spatial, spectral and temporal control over the photons on a wavelength scale. Dense optical integration and enhanced light-matter interaction can be obtained due to the special attributes of PhCs, for example, the strong local mode confinement or slow light propagation effect. This thesis work has explored and demonstrated novel passive PhC devices for transverse magnetic (TM)-polarized light. The proposed optical devices include bulk PhC structures, line-defect waveguides, waveguide polarizers, waveguide tapers, in-line direct-coupled waveguide-cavities and waveguide intersection. All of these designs are theoretically investigated and modeled with numerical simulations. Furthermore, the majority of the designs has been verified experimentally. The investigated structures are of relevance and

interest not only for compact ISBT-based all-optical switches but also for optical devices operating with TM-polarized light in general.

The optical cavity is able to confine light within an ultra-small mode volume. A strong light intensity within the cavity greatly enhances the light-matter interaction and material nonlinearity, thereby reducing the energy consumption and size of the device. In this thesis, an ultrafast, compact and energy efficient all-optical switch design based on a saturable absorbing cavity is theoretically demonstrated. Furthermore, high-speed optical time-division demultiplexing operations with the proposed ultrafast all-optical switch are also studied by numerical simulations. The switch performance is very attractive with respect to the device size, speed, energy consumption and insertion loss.

In an InGaAs/AlAs/AlAsSb CDQW material system, a strong intersubband absorption of the TM-polarized control light can initiate an ultrafast cross phase modulation to the co-propagating transverse electrical (TE)-polarized signal light. This thesis work demonstrates a monolithically integrated all-optical switch based on distributed feedback Bragg (DFB) waveguides utilizing cross phase modulation effects in InGaAs/AlAs/AlAsSb CDQWs for the first time. Driven by the pumping-induced refractive index change of the material, the Bragg wavelength of the DFB grating waveguide is shifted for the succeeding signal light. With the help of the transmittance contrast between the passband and stopband, the control pulse modulates the signal light transmission, thereby realizing the all-optical switching operation. The switching device has been designed, fabricated and characterized. Our analysis shows that the device performance agrees reasonably well with the theory and simulation studies.

Zusammenfassung

Die nächste Generation volloptischer Kommunikationsnetzwerke, welche die Anforderungen in Bezug auf ein rasantes Wachstum des Internet-Verkehr erfüllen können, erfordern eine ultrahohe Datenübertragungsrate von mehreren hundert *Gbit/s* bis zu mehreren *Tbit/s*. Solche Netzwerke können auf gemischten Systemen von Zeitmultiplex (Optical Time Division Multiplexing, OTDM) und Wellenlängenmultiplex (Wavelength Division Multiplexing, WDM) subsystemen basieren. Für Hochgeschwindigkeits-OTDM-Systeme sind ultraschnelle volloptische Schalter entscheidende Komponenten. Diese Arbeit präsentiert eine Reihe von explorativen Studien zu integrierten ultraschnellen volloptischen Schaltern, beruhend auf Inter-subbandübergängen (ISBT-Prozessen) in InP-basierten photonischen Bandlücke-Strukturen. Die verbesserten optischen Designs werden verwendet, um die Eigenschaften der volloptischen Schalter bezüglich Grösse und Energieverbrauch zu verbessern. Die Arbeit umfasst den gesamten Entwicklungsprozess der passiven Bauteile und der volloptischen Schalter.

Materialstrukturen aus InGaAs/AlAs/AlAsSb mit zwei gekoppelten Quantentöpfen (Coupled Double Quantum Well, CDQW) sind aufgrund von ISBT-Prozessen vielversprechend für ultraschnelle volloptische Schalteranwendungen. Theoretische Modellierung und Simulationen spielen eine wichtige Rolle bei der Untersuchung der Physik von CDQW Materialien. Nach einer allgemeinen Einführung in die volloptischen Schalter werden rechnergestützte Studien zur zeitlichen Entwicklung von optischen Nichtlinearitäten sowie Absorptionssättigung vorgestellt. Das QW-Modell basiert auf der Dichtematrix-Theorie und modifizierten optischen Bloch-Gleichungen mit der Relaxationszeit-Approximation. Die aus dem Modell abgeleiteten theoretischen Abschätzungen erlauben eine gute Interpretation der entsprechenden experimentellen Ergebnisse. Darüber hinaus wird das Leistungsvermögen der Schaltung diskutiert. Insgesamt bieten die theoretischen Studien nützliche Einblicke in die Optimierung von QW-Material und Bauteil-Design.

In den letzten zwei Jahrzehnten wurden auf photonischen Kristallen (photonic crystal, PhC) basierende, integrierte optische Bauteile vorgeschlagen und umfangreich untersucht. PhC-Elemente bieten eine einzigartige räumliche, spektrale und zeitliche Kontrolle über die Photonen auf einer Grössenskala der optischen Wellenlänge. Aufgrund der spezifischen Eigenschaften der PhC werden dichte optische Integration und verbesserte Licht-Materie-Wechselwirkung ermöglicht. Diese Arbeit untersucht und zeigt neue passive PhC-Bauteile für TM (transverse magnetic)-polarisiertes Licht. Die vorgeschlagenen optischen Elemente beinhalten die PhC-Strukturen, Liniendefekt-Wellenleiter, Wellenleiter-Übergänge, Wellenleiter-Kavitäten

und Wellenleiter-Kreuzungen. Alle Designs wurden theoretisch untersucht und mit numerischen Simulationen modelliert. Darüber hinaus wurden die meisten Designs auch experimentell verifiziert. Die PhC Designs sind nicht nur für kompakte ISBT-basierte volloptische Schalter von Relevanz und Interesse, sondern ganz allgemein für mit TM-polarisiertem Licht operierende optische Bauteile.

Optische Resonatoren können Licht auf ein sehr kleines Modenvolumen beschränken. Eine starke Lichtintensität innerhalb des Resonators verbessert die Licht-Materie-Wechselwirkung und Material-Nichtlinearitäten. Dadurch erlaubt es eine Reduktion des Energieverbrauchs und der Bauteilgröße. In dieser Arbeit wird ein ultraschnelles, kompaktes und energieeffizientes Design eines volloptischen Schalters, das auf einem sättigbar absorbierenden Resonator basiert, theoretisch ausgearbeitet. Darüber hinaus werden Hochgeschwindigkeits-Demultiplexer-Operationen mit den vorgeschlagenen ultraschnellen volloptischen Schaltern durch numerische Simulationen untersucht. Der resultierende Schalter ist sehr attraktiv in Bezug auf Bauteilgröße, Geschwindigkeit, Energieverbrauch und Einfügungsverlust.

In InGaAs/AlAs/AlAsSb CDQW Systemen kann starke Interband-Absorption des TM-polarisierten Kontrollpulses eine ultraschnelle Kreuzphasenmodulation des co-propagierenden TE (transverse electrical)-polarisierten Signalpulses initiieren. Diese Arbeit zeigt zum ersten Mal einen monolithisch integrierten volloptischen Schalter, der auf Distributed-Feedback-Bragg (DFB) Wellenleiter basiert und die Kreuzphasenmodulation-Effekte in InGaAs/AlAs/AlAsSb CDQWs benutzt. Durch die während des Pumpens induzierten Brechungsindex-Änderung der Materialien wird die Bragg-Wellenlänge des DFB Wellenleiters für das nachfolgende Signallicht verschoben. Mit Hilfe des Transmissions-Kontrasts zwischen den Durchlass- und Sperrbereichen modulieren die Kontrollpulse dann die Durchlässigkeit des Signallichts. Dadurch wird der volloptische Schaltungsvorgang realisiert. Das Schalterelement wurde entwickelt, hergestellt und charakterisiert. Die Analyse zeigt, dass die Funktion des Bauteils mit Theorie und Simulationsstudien gut übereinstimmt.