

Zusammenfassung

Die schnell fortschreitende Entwicklung im Bereich der optischen Datenübertragung und die exponentielle Steigerung der zu übertragenden Datenmengen erfordern immer neue Bauelemente und Modulationskonzepte. Im Rahmen dieser Doktorarbeit werden drei verschiedene (InGa)As-Quantenpunkt(QP)-basierte photonische Bauelemente für den 1.31 μm Wellenlängenbereich für Übertragungstrecken bis 100 km entwickelt und deren Eignung für verschiedene Modulationsformate untersucht: QP Laser mit verteilter Rückkopplung (DFB), QP Elektroabsorptionsmodulatoren (EAM) und deren monolithische Integration in QP elektroabsorptionsmodulierte Laser (EML).

Diese profitieren von Quantenpunkten als Gewinnmaterial, deren Vorteile innerhalb der letzten zwei Jahrzehnte in diversen Laserstrukturen demonstriert wurden. Auf der Grundlage verschiedener Simulationen statischer und dynamischer Bauelementeigenschaften werden die epitaktischen und horizontalen Chipdesignparameter festgelegt. Für die QP DFB Laser führen statische Wellenleiter- und DFB Gittersimulationen, sowie epitaktische Randbedingungen, zur Einführung von InGaP als oberes Mantelschichtmaterial und als Barriere zwischen Gitter und Wellenleiter. Die Eignung von QPs in EAMs kann mithilfe von Simulationen von QP Energiezuständen in einem variablen externen elektrischen Feld und der daraus resultierenden Rotverschiebung von bis zu 15 nm, gezeigt werden.

Die grundlegende Neuentwicklung solcher EAM und DFB Bauelemente erfordert umfangreiche Optimierungs- und Entwicklungsprozesse im epitaktischen Design, der Waferprozessierung und der Chipfabrikation. Insbesondere die Herstellung und das darauffolgende epitaktische Überwachsen des DFB Gitters oberhalb von QP Strukturen stellen eine Herausforderung dar. Für die vollständige Charakterisierung der verschiedenen Bauelemente wird ein Messaufbau realisiert, welcher die hohen Anforderungen an die Messstabilität berücksichtigt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird einer der ersten rein index-gekoppelten QP Laser mit vergrabenen DFB Gitter realisiert. Mit einer optischen Leistung von bis zu 35 mW, 27 % differentieller Quanteneffizienz und bis zu 60 dB Seitenmodenunterdrückung bei Wellenlängen um die 1.31 μm erfüllen die Laser die statischen Anforderungen aktueller und zukünftiger optischer Netzwerke. Aufgrund des QP-typischen breiten Gewinnspektrums kann mit dem identischen Gewinnmaterial ein 60 nm breiter Wellenlängenbereich, d.h. annähernd das gesamte O-Band, abgedeckt werden.

Verschiedene Groß-Signal-Übertragungsexperimente, unter Anwendung verschiedener einfacher und höherer Modulationsformate, werden erstmalig an den entwickelten QP Bauelementtypen durchgeführt. Unter einfacher OOK Modulation wird die bislang höchste fehlerfreie Datenübertragungsrate von 15 Gb/s mit QP DFB Lasern erreicht. Erstmals wird eine Datenübertragung mittels direkter 4-Level-Amplitudenmodulation (PAM-4) mit einer Datenrate von 16 Gb/s demonstriert. Der Betrieb im Bereich der Gewinnsättigung führt zum ersten QP Laser unter differentieller Phasenmodulation (DPSK). Eine fehlerfreie Übertragungsrate von 10 Gb/s wird erreicht. Zum ersten Mal wird ein QP DFB Lasersignal extern differentiell quaternär phasenmoduliert (DQPSK), wobei eine fehlerfreie Übertragung von 80 Gb/s erreicht wird.

Zusammen mit den Wellenleitersimulationen für die QP DFB Laser wird ein neues Konzept zur THz-Signal-Erzeugung vorgestellt, wobei ein stabiler Zweimodenbetrieb mit einem Modenabstand von 0.33 THz in einem einzelnen DFB Laser präsentiert wird.

Der hier vorgestellte QP EAM erreicht ein Extinktionsverhältnis von über 17 dB. Zum ersten Mal werden an einem solchen Bauelement dynamische Untersuchungen durchgeführt, wobei eine Groß-Signal-Eignung von 12.5 Gb/s demonstriert wird. Die monolithische Integration beider Bauelemente, QP DFB und EAM, führen zum ersten QP EML. Während die Datenübertragungsrate mit 6 Gb/s im Elektromodulationsbetrieb aufgrund von optischen Rückkopplungseffekten noch relativ gering ist, können im Betrieb als passiver Rückkopplungslaser (PFL) Datenraten von bis zu 20 Gb/s erreicht werden.

Neben der Verwendung als Transmitter, wird die Eignung der QP DFB Laser für die optische Signalprozessierung untersucht. In Experimenten zur Vierwellenmischung (FWM) unter optischer Injektion werden Wellenlängenkonversionen über 6 nm mit einer Effizienz von -30 dB demonstriert. Während die Groß-Signal-Konversion in QP Lasern mit Hilfe von FWM nicht möglich ist, kann über Kreuzgewinnmodulation (XGM) eine Konversion über 1.6 nm bei einer Datenrate von 10 Gb/s erstmalig gezeigt werden.

Abstract

The fast development in the field of optical data communication and the exponential growth of transmitted data require continuously new devices and modulation concepts. In the framework of this thesis, three different In(Ga)As quantum dot (QD) based photonic devices, all operating in the 1.31 μm wavelength range for transmission distances up to 100 km, and their suitability for several modulation formats are investigated: QD distributed-feedback (DFB) lasers, QD electro-absorption modulators (EAMs), and their monolithic integration into an electro-absorption modulated laser (EML).

These devices benefit from the advantages of QDs as gain medium that have been demonstrated within the last two decades in different laser structures. The epitaxial and horizontal chip parameters are designed based on several simulations of static and dynamic device properties. Accordingly, the wafers are grown and processed. For the DFB lasers, static waveguide and DFB grating simulations as well as epitaxial growth conditions lead to the introduction of InGaP as upper cladding material and as barrier between waveguide and grating. The laser dynamics are simulated by means of a semi-microscopic rate equation model for prediction of the large-signal behavior under on-off-keying (OOK) and four level amplitude modulation (PAM-4). Their suitability for applications beyond 10 Gb/s is shown. Based on QD energy state simulations under an applied external electrical field and the subsequent red shift of up to 15 nm, the suitability of QDs in EAMs is predicted.

The fundamental development of such EAM and DFB devices requires extensive optimization and developments processes in epitaxial design, wafer processing, and chip fabrication and are described in this work. Especially, the grating fabrication and the subsequent epitaxial overgrowth are challenging. A measurement setup for complete device characterization is realized and ensures a high measurement stability.

In the framework of this thesis, one of the first purely index-coupled QD lasers with buried DFB grating is fabricated. The 27% differential quantum efficiency, the 60 dB side-mode suppression ratio at wavelengths around 1.31 μm , and line widths of 5 MHz completely fulfill all static requirements of optical networks. Due to the typical broadened gain spectrum of QDs, a 60 nm wavelengths range, almost the whole O-Band, is covered by identical gain material.

Extensive large-signal experiments under application of simple and higher order modulation formats lead to several record results for QD DFB lasers. The so far highest transmission data rate of 15 Gb/s under OOK modulation is presented. For the first time PAM-4 signal transmission by a QD DFB laser is demonstrated, achieving a data rate of 16 Gb/s. Operating the QD DFB laser in gain saturation regime, a 10 Gb/s pure differential phase shift keying (DPSK) signal is generated and transmitted without errors also for the first time. Furthermore, the QD DFB laser emission will be modulated in a differential quadrature PSK (DQPSK) format. Error-free data transmission rates up to 80 Gb/s are demonstrated.

The waveguide simulations for the QD DFB laser allow to present a novel concept for THz-signal generation. Stable dual-mode operation with a mode distance of 0.33 THz of a single DFB laser is shown.

The QD EAM, developed in this work, achieves an extinction ratio of 17 dB. For the first time dynamic investigations are performed on such a device, resulting in a large-signal transmission at 12.5 Gb/s. The monolithic integration of both devices, QD DFB and EAM, results in the first QD EML. Whereas the achieved data rate of 6 Gb/s under electro-absorption modulation is relative low due to optical feedback effects, the operation as passive feedback laser (PFL) leads to data rates up to 20 Gb/s.

The suitability of QD DFB lasers for optical signal processing is investigated. In four-wave mixing (FWM) experiments under optical injection, wavelength conversion across 6 nm with an efficiency of -30 dB is demonstrated. Whereas large-signal conversion in such QD lasers by means of FWM is not possible, signal conversion at 10 Gb/s across 1.6 nm using cross gain modulation (XGM) is presented for the first time.