

## Summary

The thesis investigates the suitability of GaAs based quantum-dot (QD) semiconductor optical amplifiers (SOAs) for applications in future all-optical communication networks featuring transmission in multi-wavelength channel configuration with symbol rates larger than 40 GBd, particularly using advanced modulation formats. These networks require optical amplifiers to compensate losses caused e. g. by the extended reach and larger splitting ratios. In addition, signal processing is of great interest to enable applications like all-optical wavelength conversion (AOWC). SOA are key components for these applications as they offer a small footprint, low-cost mass production and low power consumption. In comparison to conventional SOAs, QD based SOAs exhibit unique properties. The separation of the energy states into gain providing QD states, i.e. ground state (GS) and excited state (ES), and carrier reservoir providing higher energy states results, in case of a highly populated reservoir, in a decoupling of gain and phase dynamics, a presumably low  $\alpha$ -factor, and a very fast gain recovery. Furthermore, the inhomogeneously broadened QD ensemble enables a broad gain bandwidth of both, GS and ES. Hence, QD SOAs are promising candidates for both requested network applications and, furthermore, allow new application concepts.

The first part of the thesis is assigned to the basics and advantages, the fabrication and presentation of the used QD SOAs. The main focus is on the optimization of the gain and the investigation of the gain dynamics. Single-section QD SOAs exhibit a fiber-to-fiber gain of up to 26 dB and lately developed multi-section SOAs up to 31 dB. The complete GS gain recovery is found to be faster than 10 ps. In addition, a strong carrier depletion on the ES shows no influence on the GS gain recovery. Furthermore, measurements and simulations lead to an expectable fast gain recovery of both QD states, if both states are saturated and the carrier reservoir is highly populated.

Further parts of the thesis address the above mentioned applications and present new concepts, using system experiments among others. This thesis is focused on intensity- (on-off keying, OOK) and phase-coded (differential (quadrature) phase-shift keying, D(Q)PSK) signals.

The second part presents a novel concept for direct modulated DPSK signal generation by exploiting the unique decoupling of gain and phase dynamics of QDs. The proof of concept is given by an error-free 25 GBd DPSK signal generation using a direct modulated QD SOA, which exhibits a gain of 8 dB.

The third part of this thesis is focused on the suitability of QD SOAs for single- and multi-channel amplification of OOK and D(Q)PSK signal with symbol rates of up to 80 GBd. A second novel concept exploits the QD GS and ES to amplify signals in dual-band configuration, i.e. with a large spectral separation. The proof of concept is demonstrated by an error- and distortion-free amplification of bidirectional 40 GBd OOK signals, exhibiting a spectral separation of more than 91 nm. Both signals experience a gain of 10 dB or more. Furthermore, QD SOAs enable a pattern-effect free amplification of an 80 GBd OOK signal (GS wavelength) with a gain of up to 16 dB within an input power dynamic range (IPDR) larger than 18 dB. In the presence of three interfering 40 GBd NRZ OOK channels (5 nm grid), an error-free performance is still achieved. Using a QD SOA, the error-free amplification of a 40 GBd D(Q)PSK signal is achieved for the first time with a gain of 24 dB in an IPDR larger than 37 dB (30 dB). Even in the presence of a 40 GBd OOK signal (5 nm grid) an error-free performance is achieved, as long as the OOK power level is below the DQPSK input power level.

The final part of the thesis investigates AOWC of phase-coded signals using four-wave mixing. First, the advantages of QD SOAs are addressed and a guideline for the optimization of the conversion efficiency and signal-to-noise ratio of two concepts is given. Finally, the error-free 40 GBd D(Q)PSK wavelength conversion is demonstrated within a range of 45 nm (16 nm), limited by the measurement system.

In conclusion, QD SOAs show very promising results and offer new concepts for applications in future all-optical communication networks. The current generation of QD SOAs require some well-known technological improvements for developing their full potential. These will improve the achievements and additionally allow further new concepts.

## Zusammenfassung

Die eingereichte Arbeit untersucht die Eignung von auf GaAs basierenden optischen Quantenpunkt- (quantum dot, QD) Halbleiterverstärkern (semiconductor optical amplifier, SOA) für die Anwendung in zukünftigen rein-optischen Kommunikationsnetzwerken. Hintergrund und Motivation sind dabei der stetig wachsende Internetdatenverkehr und Vernetzungsgrad sowie der damit nötige Ausbau der Netzwerke. SOAs können u. a. aufgrund ihrer billigen Massenproduktion, geringen Größe und Energieeffizienz eine tragende Rolle spielen. Mögliche Anwendungsgebiete sind die gleichzeitige Verstärkung mehrerer Wellenlängenkanäle mit Kanalsymbolraten jenseits von 40 GBd und die optische Signalverarbeitung, im Speziellen die Wellenlängenkonversion.

QD-basierte SOAs bieten die Separation in optisch verstärkende QD Zustände, i. e. Grundzustand (ground state, GS) und angeregte Zustände (excited states, ES), und Ladungsträgerreservoir bildende höherenergetischen Zuständen. Dadurch ermöglichen selbstorganisierte QD-SOAs ein breites Gewinnpektrum, eine sehr schnelle Gewinndynamik, einen vermutlich geringen  $\alpha$ -Faktor und sehr schnelle nichtlineare Effekte, solange das Reservoir stark besetzt ist. Damit eignen Sie sich besonders für die beiden oben genannten Anwendungsfelder und ermöglichen darüber hinaus neue Anwendungskonzepte.

Der erste Teil der Arbeit widmet sich den Grundlagen und Vorteilen, der Herstellung und der Vorstellung der realisierten QD-SOAs. Dabei wird insbesondere auf die Optimierung des Gewinns sowie der Untersuchung der Gewinndynamik eingegangen. Einsektions-SOAs bieten einen Faser-zu-Faser-Gewinn von bis zu 26 dB und neuere Mehrsektions-SOAs bis zu 31 dB. Eine komplette GS-Gewinnerholung von unter 10 ps wird gezeigt. Darüber hinaus zeigt sich die GS-Gewinndynamik unbeeinflusst von der ES-Gewinndynamik und eine Unabhängigkeit der ES-Gewinndynamik von der GS-Gewinndynamik in QD SOAs kann erwartet werden, wenn das Reservoir stark besetzt ist.

Weitere Teile der Arbeit gehen u. a. mit Systemexperimenten auf die verschiedenen o. g. Anwendungen, aber auch auf neue Konzepte ein. Dabei liegt der Schwerpunkt auf intensitäts- (on-off keying, OOK) und phasenmodulierten (differential (quadrature) phase-shift keying, D(Q)PSK) Signalen.

Im zweiten Teil der Arbeit wird ein neues Konzept zur Erzeugung von phasenkodierten Signalen durch direkte Modulation des QD-SOAs vorgestellt, welches auf der Entkopplung von Gewinn- und Phasendynamik basiert. Der konzeptionelle Nachweis wird durch die fehlerfreie Erzeugung und Detektion von DPSK-Signalen mit einer Symbolrate bis zu 25 GBd und einem Gewinn von 8 dB erbracht.

Im dritten Teil wird die Eignung von QD-SOAs für die ein- und mehrkanalige Verstärkung von OOK und D(Q)PSK Signalen mit Symbolraten von bis zu 80 GBd untersucht. Ein weiteres neues Konzept basiert auf der Nutzung von QD-GS und ES zur gleichzeitigen Verstärkung von Wellenlängenkanälen aus unterschiedlichen Kommunikationsbändern. Der konzeptionelle Nachweis wird durch die fehlerfreie bidirektionale Verstärkung von zwei 40 GBd OOK-Signalen mit einem spektralen Abstand von 91 nm und einem Gewinn von bis zu 10 dB und mehr erbracht. Darüber hinaus wird die fehlerfreie Verstärkung eines 80 GBd OOK-Signals auf dem QD-GS um bis zu 16 dB in einem Eingangleistungsdynamikbereich (input power dynamic range, IPDR) von mehr als 18 dB demonstriert. Die fehlerfreie Verstärkung auch in Anwesenheit von drei weiteren 40 GBd OOK-Signalen (5-nm-Raster) erzielt. Die fehlerfreie Verstärkung von einem 40 GBd D(Q)PSK-Signal mittels QD-SOAs wird erstmalig in einem IPDR von mehr als 37 dB (30 dB) mit einem Gewinn von mehr als 24 dB demonstriert. Die gleichzeitige Verstärkung eines 40 GBd OOK-Signals (5-nm-Raster) zeigt nur geringen Einfluss, solange die Eingangleistung kleiner als die des DQPSK-Signals ist.

Der vierte Teil widmet sich der Wellenlängenkonversion von phasencodierten Signalen mittels Vierwellenmischung. Dabei wird zunächst auf die Vorteile von QD-SOAs eingegangen und ein Leitfaden zur Optimierung der Konversionseffizienz und des optischen Signal-zu-Rausch-Verhältnisses unter Verwendung von zwei Konzepten erstellt. Anschließend wird die fehlerfreie 40 GBd D(Q)PSK-Signal Konversion innerhalb eines durch das Messsystem beschränkten Bereichs von 45 nm (16 nm) demonstriert.

Zusammengefasst zeigen die QD-SOAs vielversprechende Ergebnisse für den Einsatz in zukünftigen, rein-optischen Netzwerken und ermöglichen darüber hinaus neue Konzepte für diese. Die gegenwärtig realisierten Bauelemente bedürfen einer technologischen Weiterentwicklung um ihr volles Potenzial zu entwickeln. Damit werden die Ergebnisse noch einmal verbessert. Darüber hinaus sind weitere neue Konzepte vorstellbar.