

## Abstract

As the telecommunication industry experiences a continuous growth in data traffic, there is an increasing demand for available bandwidth. To meet this requirement, complex transmitter architectures and coherent reception techniques have been developed. Towards the need for realizing compact, integrated, cost-efficient, electro-optical systems, silicon photonics has drawn significant attention. This is because low-loss waveguides, high-speed modulators and photodetectors can be integrated with electronic components on the same wafer, thus resulting in highly-optimized architectures of electro-optical devices at a low cost.

As far as the transmitter concerns, the Mach-Zehnder modulator (MZM) is considered as a promising candidate for being used in high-speed, coherent optical systems. Its major advantage is the large optical bandwidth and the insensitivity to wavelength or temperature drifts. From the different modulation effects met in silicon, the plasma dispersion effect is the most prominent because of the high speed that can be achieved when utilizing carrier depletion or accumulation. The focus of the current thesis is mainly on depletion-type phase shifters that typically consist of a p-n junction inside a silicon waveguide. When applying a reverse bias voltage to the junction, the depletion of the free carriers takes place which results in a refractive index change of the optical mode. The depletion-type phase shifters are chosen to be studied in the current thesis because they are considered to have the potentials of meeting the speed, loss and power requirements of commercial data-center and long-haul applications. Furthermore, their simplicity in fabrication and parameter tolerances make them ideal candidates for integrated transmitter architectures consisting of both the modulator and the driver.

In order to exploit the intrinsic performance limits of depletion-type phase shifters, three different p-n junction geometries are introduced and compared. The phase shifters are inserted into the MZM mathematical model to predict its optical output. For comparing the electrical performance of the MZMs, the traveling-wave approach is taken into account. In this approach the electrical signal on a transmission line co-propagates with the optical signal to assure high-speed operation. The comparison of the phase shifters is performed on the basis of a low driving voltage (2 V) for compatibility with the low-power driver electronics. Under this assumption, the suitability of silicon modulators for demonstrating advanced modulation formats, which is a prerequisite for meeting the increasing bandwidth demands, is explored. It is shown that although the optical performance of silicon MZMs is comparable to the technologies of lithium niobate and indium phosphide, their electro-optical performance is inferior, predominantly due to bandwidth-loss trade-offs. This brings up the need for electronic-photonics integration where a different from the traveling-wave approach, such as the segmented driver, is implemented.

Two monolithically integrated silicon depletion-type MZMs with segmented drivers are demonstrated, the linear and the one featuring an on-chip integrated digital-analog converter (DAC). The first topology outperforms in terms of extinction ratio (approximately 13.0 dB) and speed (28 and 32 Gb/s) compared to other monolithically integrated silicon OOK transmitters but at the expense of an increased power consumption (1.8 W). From the second power-efficient approach, PAM-4 at 40 Gb/s is demonstrated. The experimental results of the integrated transmitters presented here, are based on non-optimized parameters. Consequently, the modulator performance is still far from the theoretically expected. The aim of this work is, however, to demonstrate the great potentials offered by the monolithic integration technology where the design of the modulator and the driver can be optimized simultaneously. It is expected that by using the segmented driver topology, the drawbacks of the limited extinction ratio and speed that stem from the traveling-wave approach, can be overcome. This will enable the demonstration of advanced modulation formats by using any of the two driver architectures reported here depending on the system requirements. In this way, silicon modulators could withstand the bandwidth and cost demands and become part of future coherent optical networks.

## Zusammenfassung

Während der Telekommunikationsmarkt ein stetig wachsendes Datenaufkommen bewältigen muss, steigt die Nachfrage nach verfügbarer Bandbreite. Um diese Erwartung zu erfüllen, wurden aufwändige Senderarchitekturen, sowie kohärente Empfangstechniken entwickelt. Mit dem Bedarf an wirtschaftlicher Herstellung von kleinen, integrierten, elektro-optischen Schaltungen hat die Siliziumphotonik an Bedeutung gewonnen. Durch die Integration von verlustarmen Wellenleitern, sowie schnellen Modulatoren und Empfängern, die gleichzeitig mit elektronischen Komponenten auf demselben Wafer hergestellt werden, wurde es möglich, hoch optimierte elektro-optische Schaltungen zu entwerfen und herzustellen.

Hinsichtlich der Sender, ist der Mach-Zehnder Modulator (MZM) ein vielversprechender Kandidat für die Verwendung in kohärenten optischen Hochgeschwindigkeitssystemen. Sein Hauptvorteil liegt in der großen optischen Bandbreite und der Unempfindlichkeit gegenüber Wellenlängen- und Temperaturschwankungen. Von den verfügbaren Modulationsmechanismen ist der Effekt der Plasmodispersion der bedeutendste in Silizium und ermöglicht sehr schnelle Modulation durch Ladungsträgerverarmung oder -anreicherung. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt hauptsächlich in Phasenschiebern des Verarmungstyps, die typischerweise aus einem pn-Übergang innerhalb eines Siliziumwellenleiters bestehen. Legt man eine Sperrspannung an den Übergang an, werden die freien Ladungsträger ausgeräumt und eine Änderung des Brechungsindex für die optische Mode findet statt. Die Phasenschieber des Verarmungstyps wurden zum Betrachtungsobjekt dieser Arbeit ausgewählt, da angenommen wurde, die Erwartungen von kommerziellen Anwendungen, wie zum Beispiel in Rechenzentren und Weitverkehrsübertragungssystemen bezüglich Geschwindigkeit, Dämpfung und Leistungsverbrauch gerecht zu werden. Zusätzlich machen die einfache Herstellung und Gutmütigkeit gegenüber Parameterschwankungen sie zu idealen Bestandteilen in integrierten Senderschaltungen, bestehend aus Modulator und Treiber.

Um die spezifischen Leistungsgrenzen der Verarmungstyp Phasenschieber auszunutzen, werden drei verschiedene pn-Übergangsgeometrien vorgestellt und verglichen. Mit Hilfe eines mathematischen MZM Modells wird die optische Übertragungsfunktion vorhergesagt. Um die elektrische Leistungsfähigkeit der MZM zu vergleichen, wird der Wanderwellenansatz gewählt. Bei diesem Ansatz erfolgt die Ausbreitung des elektrischen Signals entlang einer Leitung und parallel zum optischen Signal, um den Hochgeschwindigkeitsbetrieb zu gewährleisten. Um die Kompatibilität zur leistungseffizienten Treiberelektronik beizubehalten, wird der Vergleich der Phasenschieber mit Annahme einer niedrigen Versorgungsspannung (2V) durchgeführt. Mit dieser Voraussetzung wird die Eignung der Siliziummodulatoren für höherwertige Modulationsformate untersucht. Diese sind nötig, um den wachsenden Bandbreitenbedarf zu decken. Obwohl die optischen Eigenschaften der Silizium MZM vergleichbar zu anderen Materialsystemen wie Lithiumniobat oder Indiumphosphit sind, wird gezeigt, dass die elektro-optischen Eigenschaften hauptsächlich aufgrund von Bandbreite-Dämpfung Abwägungen im Nachteil sind. Dies begründet den Bedarf für elektronisch-photonische Integration, wobei ein anderer als der Wanderwellenansatz, also zum Beispiel eine verteilte Treiberstruktur, implementiert werden soll.

Es werden zwei monolithisch integrierte Verarmungstyp MZM mit verteilter Treiberstruktur gezeigt, einer mit linearer Übertragungsfunktion und einer mit auf dem Chip integrierten Digital-Analog Umsetzer (DAC). Die erste Topologie hat überragende Eigenschaften hinsichtlich seines Auslöschungsverhältnisses (etwa 13dB) und der Datenrate (28Gb/s und 32Gb/s), im Vergleich zu anderen On-Off-Keying (OOK) Sendern aber einen höheren Leistungsumsatz (1.8W). Mit dem zweiten leistungseffizienten Ansatz wurde PAM-4 bei 40Gb/s demonstriert. Die hier gezeigten experimentellen Ergebnisse der integrierten Sender basieren auf vorläufigen, nicht optimierten Entwürfen und sind folglich noch weit entfernt von den theoretisch zu erwartenden. Dennoch ist das Ziel dieser Arbeit, die großartigen Möglichkeiten der monolithischen Integration zu zeigen, bei der der Modulator und der Treiber gleichzeitig verbessert werden können. Es ist zu erwarten, dass bei

Verwendung der verteilten Treibertopologie, die Nachteile des Wanderwellenansatzes, namentlich Auslöschungsverhältnis und Geschwindigkeit, überwunden werden können. Dies eröffnet die Möglichkeit höherwertige Modulationsformate zu demonstrieren, wenn eine der beiden hier gezeigten Treiberarchitekturen, je nach Systemanforderung, benutzt wird. Auf diese Art und Weise können Siliziummodulatoren die Bandbreiten- und Wirtschaftlichkeitsforderung erfüllen und ein Teil zukünftiger kohärenter optischer Netzwerke werden.