

DISS. ETH NO. 26110

BARIUM TITANATE POCKELS MODULATORS  
INTEGRATED WITH SILICON PHOTONIC  
CIRCUITS

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by  
FELIX ELTES  
M. Sc. Eng., Lunds Universitet  
born on 25 March 1991  
citizen of Sweden

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. M. Fiebig, examiner  
Dr. Stefan Abel, co-examiner  
Prof. Dr. Jérôme Faist, co-examiner  
Dr. Frédéric Boeuf, co-examiner

2019

## ABSTRACT

---

Driven by the ever-increasing demands of video streaming, social media, and cloud computing, the traffic inside data centers has exploded, reaching 10 ZB in 2019. To cope with the increasing traffic, optical communication, which was previously only used for long-distance communication, has made its way inside data centers. The development of high-speed optical transceivers based on silicon photonic integrated circuit (PIC) technology has allowed optical fibers to replace electrical wires for communication down to the rack-level (distances  $>1$  m). By leveraging the existing complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) technology, silicon photonics is a highly integrated, cheap, and scalable platform for optical transceivers. However, the intrinsic performance of silicon PICs is limited and the scaling of transceiver data rates has had to rely on costly and complex multiplexing schemes.

The current limitation of silicon photonic bandwidth lies with the electro-optic modulator (EOM). The low efficiency of electro-optic effects in silicon fundamentally limits the achievable performance. To overcome this limitation alternative concepts for EOMs are being explored. One of the most promising approaches takes inspiration from long-distance optical communications where modulators exploit a different physical effect, the Pockels effect. To bring this effect to silicon PICs, combining the best of both worlds, requires heterogeneous integration of new materials. While many material systems have been, and are being, investigated, a viable technology to bring Pockels modulators to silicon photonics does not exist.

In this thesis, integration of Pockels modulators based on barium titanate ( $\text{BaTiO}_3$ , BTO) with silicon photonics was developed. To this end, three main challenges of integrated BTO-based devices were addressed: i) propagation losses, ii) proof of Pockels effect in BTO-on-Si, and iii) monolithic integration with silicon PICs.

Prior work on BTO-Si modulators has reported unexpectedly large propagation losses. In this thesis the origin of these losses was investigated, and found to be chemical reactions within the materials during device

fabrication. Based on this new insight, an adjusted fabrication process was used to produce BTO-on-Si waveguides with low propagation losses.

Based on the process for low-loss waveguides and with integration aspects in mind, a new waveguide cross-section was developed and used to probe the electro-optic (EO) properties of the BTO thin films. For the first time unambiguous proof of the Pockels effect in BTO-on-Si devices was shown in the form of an anisotropic EO response, a large EO bandwidth of 30 GHz, and a hysteresis of the EO response caused by ferroelectric switching in BTO. The measured Pockels coefficients are close to those of bulk BTO, and the  $r_{42}$  coefficient of 923 pm/V ( $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ) is the largest in-device coefficient reported for any material.

Having established the fundamental aspects of BTO as a material in BTO-Si waveguides, a scheme for integration with advanced silicon PICs was demonstrated: BTO modulators were fabricated in the back-end-of-line (BEOL) of PIC wafers through molecular wafer bonding. The integrated BTO modulators showed excellent performance metrics, and represent a milestone in PIC-compatible integration of Pockels modulators.

Since BTO-on-Si technology brings fundamentally new properties to silicon photonics, the platform was also explored beyond conventional EOMs. First, plasmonic BTO modulators were investigated. A novel fabrication process was developed to fabricate nano-scale plasmonic BTO modulators. Excellent thermal stability of the devices was shown, and their high-speed performance was demonstrated by data transmission experiments of 72 and 116 Gbps. Second, the potential for BTO to impact cryogenic PICs was explored. For the first time, the structural and EO properties of BTO-on-Si were measured at cryogenic temperatures. Crystalline phase transitions in the BTO were found to differ from those of bulk BTO crystals. The presence of a strong Pockels effect at 4 K was demonstrated, and the potential for real applications was shown with 4-K data transmission at a record rate of 20 Gbps.

The technology developed in this thesis provides a viable path for large-scale integration of high-performance Pockels modulators with advanced silicon PICs. Along the way, fundamental aspects of BTO-on-Si thin films have been explored leading to new understanding of the material. The demonstration of efficient EO modulators for cryogenic photonics removes the largest remaining roadblock towards the development of optical quantum technologies.

## ZUSAMMENFASSUNG

---

Bedingt durch die rasant wachsende Nachfrage nach Videostreaming, sozialen Medien, und Cloud-Computing Diensten ist die Menge des Datenverkehrs innerhalb von Grossrechenzentrum explodiert. Im Jahr 2019 wurden mehr als 10 Zetabytes an Daten innerhalb solcher Rechenzentren versandt. Um diesen steigenden Datenverkehr zu bewältigen wird heutzutage eine optische Kommunikationstechnologie innerhalb von Rechenzentren verwendet, welche ursprünglich für die Kommunikation über grosse Distanzen entwickelt wurde. Durch die Entwicklung von optischen Hochgeschwindigkeitstransceivern auf einer Silizium-basierten integrierten optischen Technologie (Photonic Integrated Circuit, PIC) konnten für die Kommunikation zwischen verschiedenen Racks innerhalb eines Servers (Distanzen  $>1$  m) elektrische Kabel durch Glasfasern ersetzt werden. Durch die Nutzung etablierter CMOS-Technologie (Complementary Metal Oxide Semiconductor) ist Siliziumphotonik (silicon photonics) eine integrierte, kostengünstige und skalierbare Plattform für optische Transceiver. Die intrinsische Leistung von optischen Schaltkreisen aus Silizium und die Skalierung der Datenraten von Transceivern sind jedoch auf kostspielige und komplexe Multiplexverfahren angewiesen.

Heutzutage begrenzen elektrooptische Modulatoren (EOM) die Bandbreite der Siliziumphotonik. Dabei beschränkt die geringe Effizienz der in Silizium verfügbaren elektrooptischen Effekte die maximal erzielbare Leistung der Modulatoren. Um diese Einschränkung zu überwinden werden alternative Konzepte für elektrooptische Modulatoren untersucht. Einer der vielversprechendsten Ansätze ist von der optischen Technologie inspiriert, die zur Überbrückung grosser Entfernungen verwendet wird, und die auf Modulatoren setzt, welche auf einem anderen physikalischen Effekt, dem sogenannten Pockels-Effekt, beruhen. Um diesen Effekt in einer Silizium-basierten Plattform zu verwenden und somit das Beste aus beiden Welten zu kombinieren ist eine heterogene Integration neuer Materialien nötig. Obwohl viele Materialsysteme sowohl in der Vergangenheit untersucht wurden als auch gegenwärtig untersucht werden, existiert heute keine praktikable Technologie, um Pockels-Modulatoren in einer Siliziumphotonik Plattform zu realisieren.

In dieser Arbeit wurde die Integration von auf Bariumtitanat ( $\text{BaTiO}_3$ , BTO) basierenden Pockels-Modulatoren in eine Siliziumphotonik Plattform entwickelt. Zu diesem Zweck wurden drei grosse Herausforderungen für integrierte, BTO-basierte, optische Bauteile gelöst: i) Die Reduktion optischer Verluste in Wellenleitern, ii) der Nachweis des Pockels-Effekts in, auf Silizium integrierten, BTO-basierten Wellenleitern und iii) die monolithische Integration mit Silizium-PIC.

In vorangehenden wissenschaftlichen Arbeiten an BTO-basierten Modulatoren, die auf eine Silizium Plattform integriert wurden, wurden unerwartet hohe optische Verluste berichtet. In dieser Doktorarbeit wurde der Ursprung dieser Verluste als eine chemische Reaktion innerhalb der Materialien während der Herstellung der Bauteile identifiziert. Diese neuen Erkenntnisse erlauben eine Anpassung des Fertigungsverfahrens, das zu BTO-basierten Wellenleitern integriert auf Silizium Substraten mit geringen optischen Verlusten führt.

Basierend auf diesem Verfahren für Wellenleiter mit geringen optischen Verlusten und unter Berücksichtigung von Integrationsaspekten wurde ein neuer Wellenleiterquerschnitt entwickelt um die elektrooptischen Eigenschaften von BTO Dünnschichten zu untersuchen. Zum ersten Mal wurde ein eindeutiger Beweis des Pockels-Effekts in BTO-basierten, optischen Bauteilen in Form eines anisotropen elektrooptischen Effekts, einer grossen elektrooptischen Bandbreite von 30 GHz und einer Hysterese des elektrooptischen Effekts, bedingt durch das Umklappen ferroelektrischer Domänen in BTO, gezeigt. Die gemessenen Pockels-Koeffizienten in BTO Dünnschichten sind vergleichbar zu denen im BTO Volumenkristall. Bemerkenswert ist der Wert des  $r_{42}$  Koeffizienten von 923 pm/V ( $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ ), der den grössten, jemals in einem elektrooptischen Bauteil gemessenen Pockels-Koeffizienten darstellt.

Nach der Untersuchung grundlegender Aspekte von BTO als Material in hybriden BTO-Silizium Wellenleitern wurde ein Verfahren für die Integration von BTO auf Silizium-basierter integrierter optischer Schaltkreise (PIC) entwickelt: BTO-basierte Modulatoren wurden während der sogenannten «Back-End-of-Line» (BEOL) Fertigungsphase von PIC-Substraten unter Ausnutzung molekularer Waferbonding-Technologie hergestellt. Die integrierten, BTO-basierten Modulatoren zeigen hervorragende Leistungskennzahlen und sind ein Meilenstein bei der PIC-kompatiblen Integration von Pockels-Modulatoren.

Die BTO-basierte, optische Technologie erweitert die Siliziumphotonik mit grundlegenden und neuen physikalischen Eigenschaften. Aus diesem Grund wurde die Plattform für neue Anwendungen und Bauteile über herkömmliche elektrooptische Modulatoren hinaus untersucht. Zunächst wurden plasmonische BTO-Modulatoren untersucht. Zum einen wurde dazu ein neuartiger Herstellungsprozess entwickelt um plasmonische, BTO-basierte Modulatoren mit Abmessungen im Nanometerbereich herzustellen. Die plasmonischen Modulatoren zeigen eine exzellente thermische Stabilität und ein hervorragendes Verhalten bei der Übertragung von Daten mit extrem hohen Datenraten von 72 und 116 Gbps. Zum anderen wurde das Potenzial der BTO-Technologie für kryogene optische Anwendungen untersucht. Zum ersten Mal überhaupt wurden die strukturellen und elektrooptischen Eigenschaften von auf Silizium integrierte BTO Dünnschichten bei Tieftemperaturen untersucht. Die Resultate zeigen Unterschiede bei den kristallinen Phasenübergängen zwischen Dünnschichten und Volumenkristallen. Die Existenz eines grossen Pockels-Effekts bei 4 K und die Möglichkeit, diesen Effekt für praktische Anwendungen auszunutzen, wurden ebenfalls nachgewiesen. Insbesondere wurden die kryogenen Bauteile für eine Datenübertragung mit einer Rate 20 Gbps bei 4 K verwendet, was einen neuen Rekord in diesem Temperaturbereich darstellt.

Die in dieser Arbeit entwickelte BTO-Technologie bietet einen Weg für die Integration von Hochleistungs-Pockels-Modulatoren auf Silizium-basierten, integrierten optischen Schaltkreisen. Um dieses Ziel zu erreichen wurden grundlegende Aspekte von auf Silizium integrierten BTO Dünnschichten erforscht und ein neues Verständnis der optischen und elektrooptischen Eigenschaften des Materialsystems erlangt. Die Demonstration effizienter elektrooptischer Modulatoren für kryogene optische Anwendungen beseitigt eine der grössten Hürden für die Entwicklung einer integrierten, optischen Quantentechnologie.