

Electro-Optic Space Switches in InGaAsP/InP for Optical Communication

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

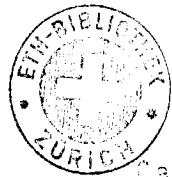
for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

Roger Krähenbühl
dipl. Phys. ETH
born on April 4th, 1964
citizen of Signau BE, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. H. Melchior, examiner
Prof. Dr. P. Günter, co-examiner



Abstract

This thesis deals with the realization of low-loss, polarization-insensitive, high-speed, electro-optic waveguide space switch matrix modules for packet switching applications in fiber-optic communication networks.

Electro-optic Mach-Zehnder interferometer (MZI) type space switches in InGaAsP/InP were selected for their advantages compared to several types of optical space switches concerning physical effects, materials technology, waveguide fabrication and performance. Space switches exploiting the linear and Franz-Keldysh electro-optic effect are well suited for polarization-insensitive, high-speed operation with low crosstalk and high on-off ratios over an extended optical wavelength range. The switches were realized in the quaternary InGaAsP material system that is lattice-matched to (100) InP substrates and that has the potential for monolithic integration of lasers, amplifiers and detectors operating in the 1.55 μm wavelength range. Electro-optic field effects in reverse biased p-i-n junctions were chosen, due to their potential for operation at high speeds.

In view of polarization-insensitive operation of MZI space switches, different electro-optic effects for refractive-index changes in InGaAsP/InP double-heterojunction waveguides were studied. Thereby, the linear and quadratic electro-optic coefficients, as well as its related electro-absorption coefficients were measured and analyzed as functions of wavelength, state of polarization, and different directions to the crystallographic axes. By choosing the orientation of the waveguides at 34° with respect to the $[0\bar{1}1]$ cleavage direction, polarization-insensitive operation has been achieved, because at this angle the polarization dependences of the linear and Franz-Keldysh electro-optic effect cancel.

In order to obtain low-loss, highly efficient and broadband optical switch devices, the most critical design parameters, such as epitaxial waveguide layer structure, doping profile, waveguide etch depth, and 3 dB coupler dimensions were optimized. Furthermore, for the fabrication of space switch matrices with integrated mode size adapters, an intricate processing sequence was developed. Thereby, space switch matrices with four switches in a two-stage arrangement with four input and four output waveguides were realized, reaching record low-losses below 5 dB. In addition, polarization-insensitiveness within 0.5 dB, as well as on-off ratios and crosstalk suppressions better than 15 dB have been achieved over 35 nm in the 1.55 μm optical communication wavelength window.

To be usable in fiber-optic communication systems, these space switch matrix devices need to be available in a packaged form with commonly used optical and electrical interfaces. To realize high-performance switch modules, a self-aligned

flip-chip packaging technology on silicon motherboards was adapted. This technique requires the integration of alignment indentations on the MZI switch devices and etched V-grooves on the silicon motherboards for optical alignment. Furthermore, beam-leads on the switching chip provide the electrical connections to the striplines on the silicon motherboard. Using this technique, space switch modules consisting of polarization-insensitive four-switch matrices with four optical inputs and four optical outputs were packaged complete with lensed fiber arrays and InP heterobipolar transistor drivers. Thereby, the presently best combination of performances, such as fiber-to-fiber losses lower 7 dB, polarization sensitivities within 0.5 dB, crosstalk less than -15 dB, optical bandwidth larger 35 nm, and switching speeds faster 200 ps, were achieved.

Diverse of these switch modules have been successfully incorporated into several fiber-optic systems demonstrators of communication systems manufacturers and operator partners within the RACE-ATMOS and the ACTS-KEOPS projects of the European Community. In particular, for the space switch part of a wavelength-converter 4x4 space switch demonstrator, eight individually packaged 1x4 switch modules were realized and delivered. In this demonstrator our switches allow multi-wavelength and multifunctional operation with high on-off ratios, low fiber-to-fiber losses, polarization independence, and high switching speeds. For access network applications extended InGaAsP/InP optical space switch matrices with 5 polarization-insensitive MZI switches in three stages and with 6 inputs and 6 outputs were realized and delivered. These modules have typically shown on-state polarization sensitivities of less than 0.5 dB, insertion losses below 11 dB, on-off ratios above 15 dB and high-speed switching capabilities up to 3 Gb/s. For the use as optical time domain demultiplexers, optical space switch devices were realized, that combine the low-loss, polarization-independent four-switch matrices with special high-speed, travelling-wave electrodes. Very promising devices, which are capable of optical time domain demultiplexing with high on-off ratios (>15 dB) up to 12:3 Gb/s have been demonstrated. Finally, advanced space-switch modules were realized and delivered to cell synchronizers for fast packet switching applications. These synchronizer switches reach fiber-to-fiber losses of below 7 dB, crosstalk suppression of 15 dB/30 dB in regular/dilated arrangements, and optical dynamic range exceeding 20 mW.

This work constitutes an important step towards the exploitation of small fabric size InGaAsP/InP space switch modules for fiber-optic communication systems. These modules have demonstrated outstanding performances in terms of fiber-to-fiber losses, polarization insensitivity, crosstalk, optical bandwidth, optical dynamic range and switching speeds. They meet the requirements for switches in advanced optical networks.

Zusammenfassung

Diese Dissertation behandelt die Realisierung von verlustarmen, polarisationsunabhängigen, schnellen elektrooptischen Wellenleiterschaltern für faseroptische Telekommunikationsnetzwerke.

Elektrooptische Mach-Zehnder Interferometer (MZI) Schalter in InGaAsP/InP wurden aufgrund von Vorteilen bezüglich der physikalischen Effekte, der Material-Technologie, der Wellenleiterherstellung und der Leistungsdaten, aus verschiedenen Raumschalter ausgewählt. Raumschalter, die sowohl den linearen elektrooptischen als auch den Franz-Keldysh Effekt ausnutzen, sind bestens geeignet für polarisationsunabhängiges, schnelles Schalten mit kleinem Übersprechen über ein breites Wellenlängenspektrum. Die Schalter wurden in quaternären, an (100) InP Substratgitter angepassten, InGaAsP-Materialsystem realisiert, da damit die Möglichkeit zur Integration von Lasern, optischen Verstärkern und Detektoren für Wellenlängen um 1.55 Mikrometer gegeben ist. Elektrooptische Effekte in rückwärts gepolten p-i-n Dioden wurden dank ihrer potentiell hohen Schaltgeschwindigkeiten gewählt.

Im Hinblick auf polarisationsunabhängiges Schalten in 2x2 MZI, wurden die zur Brechungsindexänderung verfügbaren elektrooptischen Effekte in InGaAsP/InP Wellenleiterdioden studiert. Dabei wurden die linearen und quadratischen elektrooptische Koeffizienten, sowie die dazugehörigen Elektroabsorptionskoeffizienten als Funktion der Wellenlänge, der Polarisation und der verschiedenen Ausbreitungsrichtungen auf dem Kristall gemessen und analysiert. Die Wahl des Winkels von 34° zwischen Wellenleiter und Bruchkante garantiert vollständige Polarisationsunabhängigkeit, da sich bei diesem Winkel die Polarisationsabhängigkeiten des linear und Franz-Keldysh elektrooptischen Effekts gegenseitig auslöschen.

Um effiziente, breitbandige optische Schalter mit möglichst kleinen Verluste zu realisieren wurden die kritischen Größen, wie Schichtdicke, Dotierungsprofil, Wellenleiter-Ätztiefe und 3 dB Koppler-Dimensionen optimiert. Für die Herstellung von Schaltern mit integrierten Modenadapter wurde überdies ein genau abgestimmter Fabrikationsablauf entwickelt. Damit konnten zweistufige Schaltmatrizen mit vier 2x2 MZI's realisiert werden, welche kleinste optische Verluste von 5 dB aufweisen. Weiterhin konnten Polarisationsunabhängigkeit innerhalb 0.5 dB und eine Übersprechunterdrückung von mehr als 15 dB über einen Bereich von über 35 nm im 1.55 μm Wellenlängenbereich erreicht werden.

Für den Gebrauch in faseroptischen Kommunikationssysteme müssen diese Schalter vollständig verpackt und mit allgemein üblichen optischen und elektri-

schen Steckern versehen werden. Für die Montage unserer hochentwickelten Schalter wurde eine selbstjustierende Flip-Chip Verpackungstechnik auf Silizium Grundträgern angewendet. Diese Technik verlangt für die optische Verbindung die Integration von Justiernocken auf der MZI Schaltmatrix und geätzte V-Nuten auf dem Silizium Grundträger. Zusätzlich dienen "Beam-leads" auf den Schaltern als elektrische Verbindung zu den elektrischen Leitungen auf dem Silizium Grundträger. Vier Flip-Chip montierte Schaltmatrizen mit jeweils vier optischen Ein- und Ausgängen, wurden komplett mit optischen Faserarrays und elektronischen Verstärkern versehen. Dabei konnten in einem Modul kleinste Faser zu Faserverluste von unter 7 dB, Polarizationsunabhängigkeit kleiner 0.5 dB, Übersprechen kleiner 15 dB und Schaltzeiten schneller als 200 ps vereinigt werden, was momentan weltweit unerreich ist.

Verschiedene realisierte Module wurden erfolgreich in faseroptische System-Demonstratoren innerhalb der europäischen Projekte RACE-ATMOS und ACTS-KEOPS eingesetzt. Um den Teil des 4x4 Wellenlängenumsetzer Demonstrators, der für das räumliche Umschalten verantwortlich ist, zu realisieren, wurden acht vollständig verpackte 1x4 Schaltmodule realisiert und geliefert. Die meisten dieser Module erfüllen die gegebenen Anforderungen, wie multiwellenlängen und multifunktionelles Schalten mit kleinem Übersprechen, kleinen optischen Verlusten, Polarisationsunabhängigkeit und schnellem Umschaltvorgang. Für Zugriffsnetzwerke wurden erweiterte Schaltmatrizen mit fünf 2x2 Schaltern in drei Stufen mit 6 optischen Ein- und Ausgängen realisiert. Auch diese Schaltmodule zeigen geringe Polarisationsabhängigkeiten, kleine optischen Verluste um 11 dB, niedriges Übersprechen um 15 dB und schnelles Umschalten für Datenraten bis zu 3 Gb/s. Zur Herstellung von optischen Zeitdemultiplexern wurden schnelle Schalter realisiert, welche die polarisationsunabhängigen Vier-Schaltmatrizen mit speziellen Hochgeschwindigkeits-Wanderwellen-Elektroden integrierten. Dabei konnten vielversprechende Schalter für optisches Zeitdemultiplexen von 12 Gb/s zu 3 Gb/s mit grossen Ein-Ausschaltverhältnissen realisiert werden. Weiterentwickelte Schaltmodule, welche sehr kleine optische Verluste um 7 dB und sehr geringes Übersprechen um 15 dB bei normalen und um 30 dB bei erweitertem Gebrauch aufweisen, wurden realisiert und für die Datenpaket-Synchronisation in schnellen Übertragungssystemen geliefert.

Diese Arbeit ist somit ein wichtiger Schritt in Richtung Einsatz von InGaAsP/InP Raumschaltern in faseroptischen Telekommunikationsnetzwerke. Die Module zeigen hervorragende Eigenschaften wie kleine Faser zu Faserverluste, niedrige Polarizationsabhängigkeit, geringes Übersprechen, schnelle Umschaltzeiten und erfüllen die Anforderungen, die von fortschrittlichen optischer Netzwerke gestellt werden.