

Diss. ETH Nr. 14353

**Electro–Optic Effects and Their Application in Indium  
Phosphide Waveguide Devices for Fibre Optic Access  
Networks**

A dissertation submitted to the  
Swiss Federal Institute of Technology Zürich  
for the degree of  
Doctor of Natural Sciences

submitted by

GERHARD HAGN  
Dipl. Phys. ETH  
born 07. February 1971  
in Feldkirch (Vorarlberg), Austria

accepted on the recommendation of

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

2001

## ABSTRACT

Integrated electro-optic space switches are key components in modern telecommunication systems. They are required to route data packets to their destination or modulate information onto an optical carrier. Mach-Zehnder type space switches, based on the InP/InGaAsP material system and using reverse biased pin-diodes as phase shifters, allow polarisation insensitive operation, very high switching speeds and low losses.

In order to optimise electro-optical space switches it is necessary to understand the electro optical effects involved. Electro-optic space switches are very well suited to determine the electro-optic effects very accurately by measuring the optical response to an applied electric field.

In this thesis the electro-optical effects, caused by the electric field in a reversed biased p-i-n diode, realised in quaternary InGaAsP lattice matched to (100) InP substrates, are analysed. Furthermore the integrability of space switches with photodetectors and mode-size adapters is demonstrated.

The main effects occurring in the field of a reverse biased p-i-n diode are the Pockels effect, the Franz-Keldysh effect and the "free carrier" effect. Models of these effects are presented.

As a contribution to the physics of the Franz-Keldysh effect it was possible to determine the coefficients  $R_{11}$  and  $R_{12}$  in InGaAsP for the first time. For an energy detuning of 154 meV  $R_{11}$  and  $R_{12}$  were found to be  $18 \cdot 10^{-20} \frac{m^2}{V^2}$  and  $12 \cdot 10^{-20} \frac{m^2}{V^2}$  respectively. The Franz-Keldysh effect depends only on the polarisation while the Pockels effect depends on polarisation and crystal orientation.

To determine the contribution of the Franz Keldysh, Pockels and free carrier effects to the refractive index change experimentally. A chip featuring switches under different angles  $\varphi$  with respect to the  $[0\bar{1}1]$  cleavage plane was manufactured. The refractive index change caused by the electric field  $\Delta n(E)$  and the related absorption  $\Delta\alpha(E)$  was measured and the different electro

optical effects isolated and analysed as a function of the wavelength, state of polarisation and direction to the crystallographic axes. The contribution of the electro-optic effects to the refractive index change agrees well with the theoretical predictions.

As a demonstration of the useful combination of these switches with other functions, the feasibility of monolithic integration of switches based on the effects mentioned above, mode size adapters and photodetectors was demonstrated. As an example for practical applications a transceiver chip intended for use in subscriber terminals of passive optical access networks has been manufactured. Due to the monolithic integration of a photodetector for the reception of downstream data, a reflective Mach-Zehnder interferometric switch for transmitting upstream data and beam splitters to separate the up- and downstream data were monolithically integrated into a single chip, only a single expensive fibre to chip interface is necessary. Furthermore mode size adapters were integrated to reduce fibre to chip coupling losses and to ease alignment tolerances. A special process had to be developed to manufacture the mode size adapters all over the wafer with sufficient homogeneity.

Experimental results show fibre to fibre losses as low as 8dB. The modulator is capable of an on-off ratio of 15dB over a optical wavelength range of 30nm and a bandwidth of several hundred megabits per second.

## ZUSAMMENFASSUNG

Integrierte elektro-optische Raumschalter sind Schlüsselkomponenten in modernen Telekommunikationssystemen. Sie werden benötigt um Datenpakete zu ihrem Ziel zu leiten oder um Information auf einen optisch Träger aufzudemulieren. Mach-Zehnder Raumschalter, in denen rückwärtsgespannte pin-Dioden als Phasenschieber verwendet werden, und die auf dem InP / InGaAsP Materialsystem basieren, können polarisationsunabhängig betrieben werden, erreichen sehr schnelle Schaltgeschwindigkeiten und weisen niedere optische Verluste auf.

Um elektro-optische Raumschalter optimieren zu können ist ein gutes Verständnis der beteiligten elektro-optischen Effekte unbedingt notwendig. Elektro-optische Raumschalter eignen sich auch sehr gut zur Bestimmung der elektro-optischen Effekte, indem man die optische Antwort auf ein angelegtes elektrisches Feld misst.

In dieser Arbeit elektro-optische Effekte untersucht, die von einem elektrischen Feld einer rückwärtsgespannten pin-Diode hervorgerufen worden sind. Die pin-Diode basiert auf an (100) InP Substraten gitterangepassten InGaAsP. Ausserdem wird die Integrierbarkeit von Raumschaltern mit Photodetektoren und Modenadaptoren demonstriert

Die wichtigsten Effekte, die im elektrischen Feld einer rückwärtsgespannten pin-Diode auftreten, sind der Pockels Effekt, der Franz-Keldysh Effekt und der „Freie Ladungsträger“ Effekt. Modelle dieser Effekte werden in dieser Arbeit vorgestellt.

Als Beitrag zur Physik des Franz-Keldysh Effekts konnten die Koeffizienten  $R_{11}$  und  $R_{12}$  zum ersten mal in InGaAsP bestimmt werden. Bei einem Energieabstand der Photonenenergie zur Bandlücke von 154 meV beträgt der Wert für  $R_{11}$   $18 \cdot 10^{-20} \frac{m^2}{V^2}$  und für  $R_{12}$   $12 \cdot 10^{-20} \frac{m^2}{V^2}$ . Der Franz-Keldysh Effekt hängt in der (100) Ebene von InP/InGaAsP nur von der Polarisation ab. Der Pockels Effekt hingegen hängt von der Polarisation und der Kristallorientierung ab.

Um die Beiträge des Franz-Keldysh, Pockels und Ladungsträgereffekts zu der Änderung des Brechungsindizes experimentell zu bestimmen wurde ein Chip hergestellt, auf dem Schalter deren Elektroden verschiedene Winkel  $\varphi$  bezüglich der  $[0\bar{1}1]$  Ebene angeordnet worden sind. Die durch ein angelegtes elektrisches Feld verursachte Brechungsindexänderung  $\Delta n(E)$  und die Änderung des Absorptionsindex  $\Delta\alpha(E)$  wurden gemessen, die verschiedenen elektro-optischen Effekte isoliert und deren Abhängigkeit von der Wellenlänge, Polarisierung und Richtung zu den Kristallachsen bestimmt. Die experimentell gewonnenen Daten stimmen gut mit den theoretischen Voraussagen überein. Die beobachtete Änderung des Absorptionsindex  $\Delta\alpha(E)$  ist um etwa 3 Größenordnungen grösser als vom Modell für das Franz-Keldysheffekt vorausgesagt. Diese Diskrepanz kann jedoch aufgelöst werden, indem man zu dem Modell freie Ladungsträger mit der effektiven Masse von freien Elektronen hinzufügt.

Um zu zeigen, dass diese Schalter auch mit anderen Elementen sinnvoll kombiniert werden können, wurde die Machbarkeit der monolithischen Integration von Schaltern, die auf den oben beschriebenen Effekten basieren, Modeadaptern und Photodetektoren demonstriert. Als praktisches Anwendungsbeispiel wurde ein ein Sende- und Empfangsbauteil hergestellt, das für den Einsatz in einem Endgerät eines passiv optischen Netzwerks konzipiert worden ist. Dank der monolithischen Integration von einer Photodiode zum Empfangen von gesendeten Information, ein reflektiver Mach-Zehnder interferometrischer Schalter um Daten senden zu können und Strahlteiler zur Trennung von empfangenen und zu sendenden Daten, auf einem Chip konnte die Anzahl teurer Faser zu Chip Übergänge auf eine einzige reduziert werden. Weiter wurden Konverter für die optischen Moden integriert um die Faser Chip Verluste gering zu halten und die Justiertoleranzen zu vergrössern. Ein spezieller Prozess musste entwickelt werden, um die optischen Moden Konverter mit ausreichender Homogenität an beliebigen Stellen des Wafers herstellen zu können.

Messungen an den fertigen Bauteilen ergeben einen Faser zu Faser Verlust von nur 8 dB, unabhängig von der Polarisierung des Lichtes mit einem Ein/Aus Verhältnis von 15dB über eine optisches Fenster von über 30 nm Breite. Der Modulator kann mit mehreren hundert Megabit pro Sekunde betrieben werden. Die integrierte Photodiode ist in der Lage, mit Datenraten von mehreren Gigabit pro Sekunde umzugehen.