

Berichte aus der Mikrosystemtechnik

**Thomas Kusserow**

**Periodic InP/Air Structures in Optical Filter Devices**

D 34 (Diss. Univ. Kassel)

Shaker Verlag  
Aachen 2011

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9900-2

ISSN 1610-5907

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

Filter devices are a crucial element of analytic information systems which provide selective and evaluated signals when combined with detectors and processing units. Optical signals are advantageous due to their low susceptibility to perturbations, high potential bandwidth and fast propagation speed. Applications in the fields of data transmission or spectroscopic sensors are mainly located in the near infrared spectral range. In this thesis optical filter devices are investigated which are optimised for this spectral range and take further advantage of the properties of miniaturised structures (MEMS technology). As material system Indium Phosphide (InP) has been chosen which gives the best opportunity for integration of passive as well as active optoelectronic devices in the spectral range between 900 nm and 2400 nm.

Periodic structures are implemented as base design element since these show a strong impact on the propagation properties which cannot be achieved by absorptive or dispersive elements and are due to interference effects of the also periodic light waves. An Introduction to elements like Bragg reflectors, Fabry-Pérot filters and Photonic Crystals is given. High contrast of refractive indices in the periodic structures is desired and hence air is introduced as second material to Indium Phosphide. A process for fabrication of such air-gap Fabry-Pérot filters based on semiconductor processing technology and especially on a sacrificial layer etch process is discussed.

A scientific investigation on the residual stress in Indium Phosphide layers, caused by an arsenic carry-over effect, is presented and different methods to compensate this undesired effect are given. Studying the influence of nanooptical structures implemented in the released thin-films is part of the investigation as well. Sacrificial layer etching is one of the crucial process steps during fabrication of the filter devices and defines the quality of the resulting structures. Since this particular wet etching process has not been investigated in detail prior to this work a thorough experimental study on different parameters has been conducted in order to gain more knowledge on the specific properties. Based on the results from this research a model of selective GaInAs etching over adjacent InP layers has been established, providing better insight and leading to an improved design approach of the filter devices.

Processing technology for the monolithic integration of a photodetector element with the filter devices is discussed. Especially an opaque cover layer, reduction of the effective detector area and optimised electrical contacts are of high importance. For all these constraints different approaches are presented and researched. A detailed investigation on ohmic contacts with low resistance is conducted implementing the evaporation of Zn/Au layers. Since the condensation properties of thermally evaporated Zn are rather poor, a pre-nucleating step introducing condensation centers is studied, leading to an improved deposition rate of Zn.

High refractive indices of semiconductors in the near infrared range are rather beneficial for many optoelectronic applications, but the strong surface reflexes can also lead to severe problems. Minimising this undesired effect in multilayer Fabry-Pérot filter on InP substrates is investigated using two different methods. First a classic  $\lambda/4$  layer is presented then a second new method making use of a high refractive index layer is given.

A polarising element based on an InP membrane with Photonic Crystals is presented. The single layer design is optimised and considered as base for integration with a narrowband Fabry-Pérot filter. The fundamental effect used to achieve the polarising properties, are so-called Fano resonances, which describe the interference of a resonant mode inside a slab waveguide and a free space mode. By introducing a disturbance of the symmetry in a square Photonic Crystal in the form of elliptical base elements, coupling of waves to the waveguide modes becomes polarisation selective. The numerical investigation of the structures is presented as well as a fabrication process based on electron beam lithography. Improving the dry-etch durability of PMMA resist is achieved by a new method consisting of an electron beam flood exposure. In order to meet the requirements of the polarisation selective filter devices a second fabrication process based on a hard mask layer structured by FIB milling lithography and a subsequent dry-etching process is investigated. Different materials for the hard mask are considered and the resulting Photonic Crystal structures are shown. Optical characterisation of samples with elliptical base elements yields clear polarisation selective properties.

In the conclusion of this thesis the results are discussed regarding the current state of research as well as the future prospects for optical filter elements.

Filterbauelemente bilden zusammen mit Detektoren und Signalauswertung eine Verarbeitungskette, die Selektion und Bewertung von Informationen ermöglicht. Optische Signale bieten hierbei viele Vorteile, wie die geringe Beeinflussung durch Störparameter, die hohe Bandbreitenkapazität und die hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit. Anwendungen im Bereich der Datenübertragung und der spektroskopischen Sensortechnologie, sind spektral im nahen Infrarotbereich konzentriert. In dieser Arbeit werden optische Filterbauelemente untersucht, die für diesen Spektralbereich optimiert sind und sich darüber hinaus die Vorteile der Miniaturisierung (MEMS Technologie) zu Nutze machen. Als Materialsystem wird Indiumphosphid verwendet, daß eine optimale Integration mit passiven und aktiven optoelektronischen Bauelementen in dem Spektralbereich zwischen 950 nm und 2400 nm ermöglicht.

Periodische Strukturen werden als bestimmendes Entwurfselement für die Filter verwendet, da aufgrund von Interferenzeffekten der ebenfalls periodischen Lichtwellen in diesen Strukturen, eine deutlich stärkere Beeinflussung der Ausbreitungseigenschaften als mit absorbierenden oder dispersiven Elementen möglich ist. Ausführungen in Form von Braggreflektoren, Fabry-Pérot Filtern und Photonischen Kristallen werden vorgestellt. Um einen ausreichend hohen Unterschied der Brechungsindizes in den periodischen Strukturen zu erzielen wird neben Indiumphosphid (InP) als zweites Material Luft verwendet. Ein Fertigungsprozeß zur Herstellung von solchen Luftspalt-Fabry-Pérot Filtern, basierend auf Halbleitertechnologie und im speziellen unter Verwendung eines Opferschichtätzprozesses, wird diskutiert.

Wissenschaftliche Untersuchungen zur Verspannung von Indiumphosphidschichten, resultierend aus der Verschleppung von Arsen, werden vorgestellt und Methoden zur Kompensation dieses ungewünschten Effekts präsentiert. Der Einfluß einer nanoskaligen Strukturierung der Dünnschichten mit Nanooptischen Strukturen ist ebenfalls Teil der Untersuchung. Der Opferschichtätzprozeß stellt einen elementar wichtigen Schritt in der Herstellung der Filterbauelemente dar und ist maßgeblich für die Qualität der Ergebnisse. Um die bis dahin nicht bekannten Eigenschaften dieses Ätzvorgangs zu verstehen wurde eine Vielzahl von experimentellen Untersuchungen durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen wird ein Modell für die selektive Ätzung von GaInAs Schichten, eingebettet zwischen InP Schichten entwickelt, das für die weiteren Entwurfsarbeiten der Filterbauelemente wichtige Erkenntnisse liefert.

Prozessparameter für die monolithische Integration eines Photodetektors mit den Filterbauelementen werden diskutiert. Insbesondere sind eine lichtdichte Deckschicht, die Reduzierung der Detektorfläche und optimierte elektrische Kontakte von Wichtigkeit. Für diese Problemstellungen werden unterschiedliche Lösungen vorgeschlagen und untersucht. Im Speziellen wird für elektrische Kontakte mit ohm'schen Charakter und geringem Widerstand eine Untersuchung zur Abscheidung von Zn/Au Kontakten durchgeführt. Um die ungünstigen Kondensationseigenschaften von thermisch verdampftem Zn zu kompensieren, wird eine Vorbekernung mit Kondensationskeimen untersucht, die zu einer deutlich erhöhten Aufwachsrate von Zn führt.

Halbleiter besitzen allgemein einen sehr hohen Brechungsindex im Nahinfrarotbereich, der sie für viele Anwendungen sehr interessant macht, aber auch zu Problemen mit Oberflächenreflexen führt. Um diesen unerwünschten Effekt bei Fabry-Pérot Mehrschichtfiltern auf InP Substraten zu vermeiden werden zwei Methoden zur Unterdrückung des Oberflächenreflexes vorgestellt. Neben der klassischen  $\lambda/4$ -Schicht wird eine neuartige Methode unter Verwendung einer hochbrechenden Dünnschicht untersucht.

Polarisationsselektivität einer InP Membran mit Photonischen Kristallen wird vorgestellt. Diese Einzelschicht soll für eine spätere Integration mit einem schmalbandigen Fabry-Pérot Filter optimiert werden. Als grundlegender Effekt, um diese Eigenschaft zu erreichen, werden sogenannte Fanoresonanzen, die auf der Interferenz von resonanten Moden in einem Schichtwellenleiter mit Moden im freien Raum basieren, verwendet. Um die Kopplung der Moden in den Wellenleiter mit polarisationsselektiven Eigenschaften zu versehen, wird ein Symmetriebruch in einem quadratischen Photonischen Kristall durch die Verwendung von elliptischen Basiselementen herbeigeführt. Die numerische Modellierung sowie ein Herstellungsprozeß mit Elektronenstrahlolithographie wird vorgestellt. Für die Verbesserung der Trockenätzstabilität von PMMA als Resist wird eine neue Methode unter Verwendung einer Elektronenstrahlbelichtung präsentiert. Um die Anforderungen der polarisationsselektiven Filterbauelemente zu erfüllen wird ein zweiter Prozeß untersucht, der auf der Strukturierung einer Hartmaske mit Hilfe einer FIB-Anlage und einem anschließenden Trockenätzschritt basiert. Die Untersuchung verschiedener Materialien für die Hartmaske wird vorgestellt und Ergebnisse der Strukturierung mit Photonischen Kristallen gezeigt. Die optische Charakterisierung der Proben mit elliptischen Basiselementen zeigt einen deutlich polarisationsselektiven Effekt.

In der abschließenden Betrachtung der Arbeit werden die Ergebnisse hinsichtlich des bestehenden Stands der Forschung und der zukünftig möglichen Entwicklungen diskutiert.