



Doctoral Thesis

Elektro-nanomechanisch angesteuerte integriert-optische Interferometer als Intensitätsmodulatoren und Schalter

Author(s):

Dangel, Roger F.

Publication Date:

1997

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001850987> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 12312

Elektro-nanomechanisch angesteuerte integriert-optische Interferometer als Intensitätsmodulatoren und Schalter

Abhandlung zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER NATURWISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

ROGER F. DANGEL

Dipl. Phys. ETH
geboren am 12. Januar 1966
von Hemberg (SG)

angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. Walter Lukosz, Referent
Prof. Dr. Rudolf A. Buser, Korreferent

Zürich 1997

Kurzfassung

In dieser Dissertation wird über die *Realisierung* und *Charakterisierung* von drei integriert-optischen *Interferometer-Typen* berichtet, die mit Hilfe des *integriert-optischen nanomechanischen Effekts* als *Intensitätsmodulatoren* bzw. *Richtungsschalter* verwendet werden können. Grundlage dieses Effekts ist die Tatsache, dass die *effektive Brechzahl* eines geführten Modes in einem optischen Wellenleiter durch kleine Bewegungen eines dielektrischen Plättchens nahe der Wellenleiter-Oberfläche verändert werden kann. Der physikalische Ursprung liegt in der abstandsabhängigen Wechselwirkung zwischen dem quergedämpften Feld des Modes im nahen Aussenraum des Wellenleiters und dem dielektrischen, nicht-absorbierenden Plättchen, dem sogenannten "*effektive-Brechzahl-ändernden Element E*". Für den Betrieb der realisierten Interferometer als Intensitätsmodulatoren bzw. Schalter genügen bereits Abstandsvariationen im Nanometer- oder Sub-Nanometer-Bereich.

Ausgehend von planaren SiO₂-TiO₂- bzw. Si₃N₄-Wellenleitern auf thermisch oxidierten Siliziumsubstraten (Si/SiO₂) wurden Rippen-Wellenleiter, Koppler und Interferometer für die Wellenlänge von $\lambda = 633$ nm hergestellt. Für diese *Mikrostrukturierung* konnten Standardprozesse der *Silizium-Technologie*, wie z. B. Photolithographie und nasschemisches Ätzen in gepufferter Flusssäure, verwendet werden. Die Methode der *Gitter- bzw. Prismenkopplung* erlaubte die Bestimmung verschiedener Parameter der gefertigten Rippen-Wellenleiter, wie z. B. die Rippenhöhe bzw. Ätztiefe und die Rippenbreite.

Die Realisierung der effektive-Brechzahl-ändernden Elemente E erfolgte ebenfalls unter Ausnutzung der Silizium-Technologie. Durch nasschemisches Ätzen von thermisch oxidierten Siliziumsubstraten mit gepufferter bzw. hochkonzentrierter Flusssäure wurden sowohl *brückenartige* als auch *zungenartige* Elemente E hergestellt.

Das grundlegende Modulator- und Schalterprinzip lässt sich wie folgt erklären: Mit Hilfe des interferometrischen Aufbaus können Änderungen der effektiven

Brechzahl, die durch den integriert-optischen nanomechanischen Effekt induziert werden, in messbare Intensitätsänderungen umgewandelt werden. Zu diesem Zweck wurde über jeweils einem Arm des Interferometers ein effektive-Brechzahl-änderndes Element E positioniert. In dieser Anordnung bilden die Siliziumsubstrate des Wellenleiters und des Elements E die Platten eines *elektrischen Kondensators*. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung wurde eine *elektrostatische Anziehungskraft* zwischen den beiden Komponenten erzeugt. Aufgrund der resultierenden elastischen Durchbiegung des Elements E konnten mechanische Bewegungen im Nanometer-Bereich erzielt werden. Die Bezeichnung “*elektro-nanomechanisch*“ wird dadurch verständlich.

Es wurden drei verschiedene Typen von Interferometern realisiert, nämlich (a) *Differenz-Interferometer*, (b) *Mach-Zehnder-Interferometer mit Y-Verzweigungen* und (c) *Mach-Zehnder-Interferometer mit 2×2 MMI-Kopplern*. Im Gegensatz zu den Interferometern (a) und (b) besitzt der Typus (c) nicht nur einen, sondern *zwei* optische Ausgänge. Damit kann er wie die andern beiden als Intensitätsmodulator, aber darüber hinaus auch als optischer Richtungsschalter (engl. space switch) verwendet werden.

Für alle drei elektro-nanomechanisch angesteuerten Interferometer-Typen konnten *sinusförmige* Intensitätsmodulationen mit Frequenzen bis zu einigen MHz nachgewiesen werden. Bedingt durch die *Fourierspektren* der Signale und den *mechanischen Frequenzgang*, der von der Dimensionierung des Elements E abhängt, lag die maximale Modulationsfrequenz für formtreue *Dreieck-* bzw. *Rechteck-Signale* bei etwa 10 kHz bzw. 1 kHz. Eine optische Drift, die während der Modulationsexperimente beobachtet wurde, konnte durch eine Oberflächen-Silanisierung der Wellenleiter und Elemente E praktisch eliminiert werden.

Anhand der Mach-Zehnder-Interferometer mit 2×2 MMI-Kopplern konnte optisches (Hin- und Her-) Schalten zwischen den beiden Ausgängen demonstriert werden. Es wurde ein *EIN-AUS-Leistungsverhältnis* von 13 - 18 dB erreicht. Für die *minimale Schaltzeit* wurde eine untere Schranke von 50 µs ermittelt. Bezüglich dieses Werts lässt sich der realisierte Schalter zwischen die langsamen *thermo-optischen* und die schnellen *elektro-optischen* Schalter einreihen.

Abstract

(Kurzfassung in englischer Sprache)

This thesis reports on the *realization* and *characterization* of three types of integrated-optical *interferometers* which work – based on the *integrated-optical nanomechanical effect* – as *intensity modulators* or *space switches*. The principle of the effect is the following: the *effective refractive index* of a guided mode in an optical waveguide can be varied by moving a dielectric platelet near the waveguide surface. The physical reason is the gap-width-dependent interaction between the evanescent field of the mode and the dielectric, non-absorptive platelet, called “*effective-refractive-index-shifting element E*“. For the operation of these interferometers as intensity modulators or switches, gap-width variations in the order of nanometers or sub-nanometers are sufficient.

Using planar SiO₂-TiO₂ and Si₃N₄ waveguides on thermally oxidized silicon substrates (Si/SiO₂), we fabricated rib waveguides, couplers and interferometers for the wavelength of $\lambda = 633$ nm. For this *microstructuring* we used standard *silicon technology* processes, e. g., photolithography or chemical wet etching in buffered hydrofluoric acid. The *grating-* or *prism-coupling* method permitted the determination of different parameters of the fabricated rib waveguides, e. g., the rib height, i. e., the etch depth, and the rib width.

For the realization of the effective-refractive-index-shifting elements E we also took advantage of the silicon technology. By chemical wet etching of thermally oxidized silicon substrates with buffered or highly concentrated hydrofluoric acid, elements E in form of *bridges* and *cantilevers* were produced.

The basic operation principle of the modulators and switches can be explained as follows: by means of the interferometric set-up, variations of the effective refractive index induced by the integrated-optical nanomechanical effect can be transformed into measurable intensity variations. For this purpose an effective-refractive-index-shifting element E was positioned over one leg of the interferometer. Thus, the silicon substrates of the waveguide and the element E form the two plates of a *capacitor*. An applied voltage caused an attractive *electrostatic force*

between the two components. The resulting elastic deflections of the element E led to *mechanical* movements in the order of *nanometers*. Therefore, the expression “*electro-nanomechanically actuation*“ is used.

We realized three different types of interferometers, namely, (a) *difference* interferometers, (b) *Mach-Zehnder* interferometers with *Y-junctions*, and (c) *Mach-Zehnder* interferometers with *2×2 MMI couplers*. In contrast to the interferometers (a) and (b), the type (c) has not only one but *two* optical outputs. Hence, it can be used as an intensity modulator like the other two interferometers, but additionally as an optical space switch.

With all three types of electro-nanomechanically actuated interferometers, we demonstrated *sinusoidal* intensity modulation with frequencies up to a few MHz. Due to the *Fourier spectra* of the signals and the *mechanical frequency response* depending on the dimensions of the element E, the maximum modulation frequency for distortion-free *saw-tooth* and *square-wave* signals was 10 kHz and 1 kHz, respectively. By *silanization* of the waveguides and elements E, an optical drift effect experienced during the modulation experiments was practically eliminated.

With the Mach-Zehnder interferometers comprising 2×2 MMI couplers we demonstrated spatial switching between the two output ports. We achieved an *ON-OFF ratio* of 13 - 18 dB. For the *minimum switching time* a lower limit of 50 μ s was found. This value is between the value of the slow *thermo-optic* switches and the one of the fast *electro-optic* switches.