

Diss. ETH No. 10 503

INTEGRATED-OPTICAL NANOMECHANICAL COMPONENTS

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY (ETH) ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

presented by

Pavel PLISKA

Dipl. Phys. ETH
born 7 April 1962
citizen of Wallisellen, ZH

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Walter LUKOSZ, examiner
Prof. Dr. Henry BALTES, co-examiner

Zurich, 1994

Abstract

We report on first experimental investigations of the *integrated-optical nanomechanical effect*. This novel effect changes the effective refractive index of a guided mode in an optical waveguide by small movements of an "*effective-refractive-index-shifting element*". Such elements are dielectric plates in the form of bridges, membranes, or cantilevers positioned closely above the waveguide. The evanescent field of the guided mode interacts with the effective-refractive-index-shifting element; therefore, the effective refractive index depends on the width of the gap between the waveguide and the effective-refractive-index-shifting element. Gap-width variations of the order of nanometers induce effective-refractive-index changes required for the operation of integrated-optical devices. The integrated-optical nanomechanical effect permits the realization of active integrated-optical devices without recourse to electro-, magneto-, or elasto-optical materials.

We experimentally demonstrated integrated-optical nanomechanical modulators, switches, deflectors, and microphones.

1. In the *modulator*, nanometer movements of the effective-refractive-index-shifting element induce a phase modulation of the guided mode. This phase modulation is transformed into an intensity modulation in a difference interferometer; any other integrated-optical interferometer could serve for the same purpose. Modulation was observed up to frequencies of a few megahertz.
2. The difference interferometer also works as a *directional switch*. The integrated-optical nanomechanical effect switches the light power from one to the other output port of the interferometer. Typical switching times were a few microseconds.
3. The same effective-refractive-index-shifting elements as used for the modulators and switches can act as tunable *integrated-optical prisms, positive, or negative lenses*. Due to a spatially inhomogeneous gap between the planar waveguide and the effective-refractive-index-shifting element, the effective refractive index varies with the coordinate perpendicular to the propagation direction of the mode; therefore, the mode is deflected, focused, or defocused.

4. We demonstrated the feasibility of novel *integrated-optical microphones* which directly transform sound-pressure variations into an intensity modulation of guided light. They have high sensitivities comparable with those of fiber-optic microphones. Since they use no electric components, they are immune to electromagnetic interference.

In our experiments, the active integrated-optical nanomechanical components were actuated either piezoelectrically or electrostatically. We used planar $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ waveguides on glass or Si/SiO_2 substrates; the waveguiding films were fabricated by dipcoating with the sol-gel process. The effective-refractive-index-shifting elements were made of glass or Si/SiO_2 platelets structured by wet etching. The full potential of the integrated-optical nanomechanical components could be realized with miniaturized effective-refractive-index-shifting elements fabricated by micromachining. Furthermore, we developed a simple yet accurate method for determining the thicknesses and refractive indices of SiO_2 films on silicon substrates.

Kurzfassung

(Abstract in German)

Wir berichten über erste experimentelle Untersuchungen des *integriert-optischen nanomechanischen Effektes*. Dieser neuartige Effekt verändert die effektive Brechzahl eines geführten Modes in einem optischen Wellenleiter durch kleine Bewegungen eines "*effektive-Brechzahl-schiebenden Elementes*". Solche Elemente sind dielektrische Plättchen in Form von Brücken, Membranen oder Zungen, die in sehr kleiner Entfernung über dem Wellenleiter angebracht sind. Zwischen dem quergedämpften Feld des geführten Modes und dem dielektrischen Material des effektive-Brechzahl-schiebenden Elementes findet eine Wechselwirkung statt; deshalb hängt die effektive Brechzahl vom Abstand zwischen dem Wellenleiter und dem effektive-Brechzahl-schiebenden Element ab. Abstandsänderungen im Bereich von Nanometern genügen, um Änderungen der effektiven Brechzahl herbeizuführen, die für den Betrieb von integriert-optischen Bauelementen nötig sind. Dank dem integriert-optischen nanomechanischen Effekt können aktive integriert-optische Bauelemente ohne Verwendung von elektro-, magneto- oder elastooptischen Materialien hergestellt werden.

In unseren Experimenten haben wir integriert-optische nanomechanische Modulatoren, Schalter, Lichtblenker und Mikrofone verwirklicht.

1. Beim *Modulator* verursachen nanometergrosse Bewegungen des effektive-Brechzahl-schiebenden Elementes eine Phasenmodulation des geführten Modes. Diese Phasenmodulation wird von einem Differenz-Interferometer in eine Intensitätsmodulation umgewandelt; stattdessen könnte auch jedes andere integriert-optische Interferometer eingesetzt werden. Es wurde Modulation bis zu Frequenzen von einigen Megahertz beobachtet.
2. Das Differenz-Interferometer kann auch als *Richtungsschalter* betrieben werden. Der integriert-optische nanomechanische Effekt schaltet die Lichtleistung vom einen zum anderen Interferometerausgang. Typische Schaltzeiten waren einige Mikrosekunden.

3. Dieselben effektive-Brechzahl-schiebenden Elemente, welche für die Modulatoren und Schalter benützt wurden, können als *abstimmbare integriert-optische Prismen, Positiv- oder Negativlinsen* wirken. Eine örtlich veränderliche Dicke des Spaltes zwischen dem planaren Wellenleiter und dem effektive-Brechzahl-schiebenden Element führt dazu, dass die effektive Brechzahl mit der zur Modenausbreitungsrichtung senkrechten Koordinate variiert; deshalb wird der Mode abgelenkt, fokussiert oder defokussiert.
4. Wir haben die Realisierbarkeit von neuartigen *integriert-optischen Mikrofonen* gezeigt, welche Schalldruckänderungen direkt in eine Intensitätsmodulation von geführtem Licht umwandeln. Sie haben vergleichbar hohe Empfindlichkeiten wie faseroptische Mikrofone. Wie letztere haben sie den Vorteil, dass sie nicht auf elektromagnetische Störungen reagieren, weil sie keine elektrischen Komponenten beinhalten.

In unseren Experimenten wurden die aktiven integriert-optischen nanomechanischen Komponenten entweder piezoelektrisch oder elektrostatisch betrieben. Wir benützten planare $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ -Wellenleiter auf Glas- oder Si/SiO_2 -Substraten; die wellenleitenden Filme wurden mit einem Tauchziehverfahren unter Verwendung des Sol-Gel-Prozesses hergestellt. Die effektive-Brechzahl-schiebenden Elemente waren Glas- oder Si/SiO_2 -Plättchen, welche mittels Nassätzen strukturiert worden waren. Die Möglichkeiten der integriert-optischen nanomechanischen Komponenten könnten mit miniaturisierten effektive-Brechzahl-schiebenden Elementen unter Ausnützung der modernen Mikrostrukturieretechnik voll ausgeschöpft werden. Ausserdem entwickelten wir eine einfache, aber genaue Methode zur Bestimmung von Dicke und Brechzahl von SiO_2 -Schichten auf Siliziumsubstraten.