

DISS. ETH Nr. 18558

Fabrication of Photonic Elements by Focused Ion Beam (FIB)

A B H A N D L U N G
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

ETH ZÜRICH

vorgelegt von

VICTOR CALLEGARI

Dipl. Ing. Mikrotechnik, EPFL

geboren am 17.05.1979

von

STÄFA, ZH

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Heinz Jäckel
Dr. Urs Sennhauser
Dr. Richard Langford

2009

Zusammenfassung

Focused Ion Beam (FIB, fokussierter Ionenstrahl) wurde in dieser Dissertation bezüglich der Eignung als Fabrikationsmethode von Prototypen und Kleinserien von photonischen Strukturen untersucht. Der Fabrikationsprozess wurde für jede Struktur optimiert, um fabrizierte Formen zu erhalten, die möglichst nahe an dem Design sind. Der Einfluss der Abweichungen der hergestellten Struktur vom Design sowie die durch den Ionenbeschuss entstandenen Schäden im Substrat wurden untersucht und mit den optischen Eigenschaften der Strukturen in Verbindung gebracht. Eines der Ziele der vorliegenden Dissertation war zu demonstrieren, dass FIB die bessere Fabrikationsmethode sein oder zumindest gleichwertige Resultate liefern kann wie mehr etablierte, aber auch komplexere Fabrikationsmethoden. Die analysierten Strukturen umfassten:

1. Fresnel-Linsen auf einer Monomode-Glasfaser;
2. Licht-Intensitätsteiler, welche auf photonischen Kristallstrukturen (PhC) basieren sowie Zugangswellenleiter im InP/InGaAsP Materialsystem;
3. Plasmonische Gold-Dipol-Antennen auf einem Quarz-Substrat.

Um die fabrizierten Formen besser vorhersagen und analysieren zu können wurden Simulationen des Sputter Prozesses und der Evolution der Oberflächentopographie entwickelt und eingesetzt, sowie mittels Teststrukturen validiert. Der Sputter Prozess wurde mittels Monte Carlo (MC) Codes simuliert: Transport of Ions in Matter (TRIM) und der open-source Code GEANT4, in welchen der Mendenhall-Weller Algorithmus für die Simulation von Ionenstreuung in Festkörpern implementiert wurde. Die Simulationen der Oberflächentopographie wurden von einem Code, welcher auf einer analytischen Formel zur Berechnung des winkelabhängigen Sputteryields basiert und dem kommerziellen Programm Ionshaper, welches Daten von MC Simulationen oder von Experimenten benutzt, durchgeführt.

Die Fabrikation mittels FIB basiert auf dem Sputter Prozess und/oder dem Gas-assistierten Ätzen (GAE). Für die Fresnel-Linse wurde insbesondere der Einfluss der Strahlführungsstrategie, bestehend aus der

Strahlverweilzeit, der Pixelsequenz und der Anzahl Wiederholungen des Musters untersucht. Die schlussendliche Form wurde mit Rasterelektronenmikroskopie (SEM) und Rasterkraftmikroskopie (AFM) charakterisiert. Die minimale Weite des Fokus wurde mittels optischer Rasternahfeldmikroskopie (SNOM) gemessen und mit den Werten einer optischen Simulation verglichen. Eine Fokusweite von 740 nm FWHM wurde gemessen bei einer Wellenlänge von 840 nm in einer Distanz von ca. $5\ \mu\text{m}$ von der Oberfläche einer Monomode-Faser, was dem derzeitigen Stand der Technik markiert.

Die Vorteile von GAE über Sputtering wurden analysiert und der Einfluss von GAE auf das maximale Tiefe-zu-Breite Verhältnis wurde zuerst simuliert und dann mittels Experimenten untersucht. Ein neuer Fabrikationsprozess wurde entwickelt mit Hilfe einer W-Maske auf InP/InGaAsP. Photonische Kristalle wurden hergestellt oder vorgefertigte PhC Y- Intensitätsteiler wurden modifiziert, indem das mittlere Loch, welches Lichtreflexionen vermindert, durch FIB fabriziert wurde. Die Transmission sowie das Teilverhältnis wurde mit der Endfire Methode gemessen. Die Transmission der gesputterten Löcher war zwischen 5 bis 20 dB tiefer als die von mittels Elektronenstrahlolithographie und reaktiven Ionenätzen hergestellten Teilern. Für GAE war die Transmission der zwei Fabrikationsmethoden gleichwertig. Das Teilverhältnis hängt stark von der Position des zentralen Loches ab und es wurde gezeigt, dass FIB eine Positionierungspräzision von unter 50 nm hat. Die PhC Löcher habe das höchste bisher für FIB berichtete Tiefe-zu-Breite Verhältnis (>11) und eine automatisierte FIB-Fertigungsmethode für optische Graben-Wellenleiter wurde in dieser Arbeit entwickelt.

Die plasmonischen Antennenstrukturen wurden mit einer neuartigen Herstellungsmethode fabriziert, bei der eine Chromschicht auf das unterliegende Gold aufgebracht wurde, um die Goldschicht vor Ionenbeschuss zu schützen und den unerwünschten Channelingeffekt von Ionen im polykristallinen Au-Film zu vermindern. Der Abstand zwischen den beiden Antennenarmen konnte dadurch auf rund 15 nm reduziert werden. Die minimale Linienbreite wird mit Hilfe von MC Simulationen diskutiert und weitere Verbesserungen um die minimale Linienbreite weiter zu reduzieren und die Reproduzierbarkeit zu erhöhen werden vorgeschlagen. Der Einfluss der Cr-Schicht auf die plasmonischen Oszillationen wurde mittels einer Simulation und im Experiment untersucht und es wurde festgestellt, dass diese Schicht die Resonanz der Plasmonen dämpft. Deshalb wurde die Cr-Schicht durch nasschemisches Ätzen selektiv entfernt.

Abstract

In this thesis, focused ion beam (FIB) was investigated as a fabrication technique for rapid-prototyping and small-series production of photonic structures. The fabrication process of each structure was optimized in order to obtain a final shape as close as possible to the design. The influence of fabrication-induced deviations from design as well as fabrication induced damage to the substrate was investigated and linked to the optical performance of each structure. One of the goals of the thesis was to demonstrate that FIB may be the best fabrication approach or at least yield similar fabrication quality than established but more complex fabrication processes. Structures investigated were:

1. Fresnel lenses on the facet of optical single-mode fibers;
2. Photonic crystal (PhC) power splitters and waveguides in InP / InGaAsP;
3. Plasmonic dipole antennas of gold on a quartz substrate.

In order to better predict and to analyze the shape of the fabricated structures, simulations of the sputter process and the topography evolution were developed and validated using test structures. The sputter process was simulated using two Monte Carlo (MC) codes: Transport of Ions in Matter (TRIM) and the open-source code GEANT4, for which the Mendenhall-Weller algorithm to simulate the ion scattering process in solids was implemented. The topography simulations were carried out by a simulation based on an analytical formula to calculate the angle-dependent sputter yield and the commercial program Ionshaper, which uses input data obtained from MC programs or from experiments.

FIB-fabrication relies on physical sputtering and/or gas-assisted etching (GAE). For the Fresnel lens, the influence of the scanning strategy, namely the dwell time, the pixel sequence and the number of pattern repetitions was investigated. The final shape was characterized by scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM). The minimum waist of the lens was measured by scanning near field optical microscopy (SNOM) and compared to expected results from a simulation. A state-of-the-art minimum waist of 740 nm FWHM was

measured for a wavelength of 840 nm about $5\ \mu\text{m}$ from the facet of a monomode optical fiber.

The advantages of GAE over sputtering were analyzed and the influence of GAE on the maximum aspect ratio of holes was first simulated and then experimentally investigated. A new fabrication process was developed using a W-mask on InP/InGaAsP. Photonic crystal structures were fabricated or pre-fabricated PhC Y-splitters were modified by fabricating the central hole, which minimizes light reflections. The transmission and splitting ratio of the PhC Y-splitters was measured using an endfire setup. The transmission of sputtered holes decreases between 5 to 20 dB compared to structures fabricated using electron beam lithography followed by deep reactive ion etching. For GAE, the transmission between the two methods is equal. The splitting ratio is very sensitive on the position of the central hole and it is shown that FIB placement precision is better than 50 nm. The PhC holes have the highest (> 11) aspect ratio reported to date with FIB and an automated trench waveguide fabrication technique was developed in this work.

The plasmonic dipole antennas were fabricated using a novel method based on a Cr layer to protect the underlying Au layer and to lower the probability of unwanted channeling of ions in the polycrystalline Au film. A minimum separation distance of 15 nm between the antenna arms was obtained. The minimum line width is discussed using MC simulations and improvements to further lower the minimum line width and to increase the reproducibility are proposed. The influence of the Cr layer on the plasmonic oscillations was investigated by simulation and experiment and it was found that this layer dampens the plasmonic resonance and therefore it was selectively removed by chemical wet-etching.