

# Herstellung und Charakterisierung eines Sub-Wellenlängen strukturierten Polarisationskonverters mittels Zwei-Photonen-Polymerisation

Stefan Belle\*, Ralf Hellmann\*; Stefan Helfert\*\*, Jürgen Jahns\*\*

\*AG Angewandte Lasertechnik & Photonik, Hochschule Aschaffenburg

\*\*Lehrgebiet Mikro- und Nanophotonik, FernUniversität in Hagen

<mailto:stefan.belle@h-ab.de>

In diesem Beitrag diskutieren wir die Herstellung und Charakterisierung eines metallischen Sub-Wellenlängen strukturierten Polarisationskonverters. Mit der galvanischen Goldabscheidung in zuvor mit der Zwei-Photonen-Polymerisation strukturierten Fotolack, ließen sich metallische Strukturen mit einer minimalen Breite von 300nm und einer Höhe von 1µm realisieren.

## 1 Einführung

Definierte Polarisationszustände sowie die definierte Änderung dieser Zustände in Strahlquellen oder in photonischen Systemen sind heutzutage Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Versuchsdurchführung. Die Kenntnis dieser definierten Zustände ist unter anderem wichtig in der Lasermaterialbearbeitung, der optischen Sensorik oder beispielsweise auch bei der Ankopplung von THz-Strahlung auf einen Kupferdraht [1-3].

Neben den weit verbreiteten Wellenplatten bei denen die Polarisationsänderung auf der Anisotropie des Brechungsindex entlang der Ausbreitungsrichtung basiert, ist es ebenfalls möglich die Polarisationsänderung durch örtlich variante Sub-Wellenlängen Strukturen zu erreichen. Ein von Helfert et al. [3] vorgestellter theoretischer Ansatz sieht vor, den Polarisationszustand mit Sub-Wellenlängen strukturierten metallischen Hohlleitern geeigneter Geometrie zu beeinflussen. Dieser Ansatz wird in dieser Arbeit aufgegriffen und praktisch durch einen Zwei-Photonen-Polymerisationsprozess gefolgt von einer galvanischen Goldabscheidung realisiert.

## 2 Theorie

Die Polarisationsänderung in einem metallischen Hohlleiterfeld basiert auf den unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten der beiden orthogonalen Moden  $TE_{10}$  und  $TE_{01}$ . Verantwortlich für die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die Differenz des effektiven Brechungsindex für die beiden Moden. Allgemein kann der effektive Brechungsindex der im Hohlwellenleiter ausbreitungsfähigen orthogonalen Moden beschrieben werden durch.

$$n_{eff,mn} = \sqrt{\epsilon_r - \frac{1}{4} \left( \frac{m^2 \lambda_0^2}{w_x^2} + \frac{n^2 \lambda_0^2}{w_y^2} \right)}$$

Mit  $\epsilon_r = 1$  für die mit Luft gefüllten Hohlleiter reduziert sich die Formel für die beiden fundamentalen Ausbreitungsfähigen Moden ( $TE_{10}$  und  $TE_{01}$ ) zu

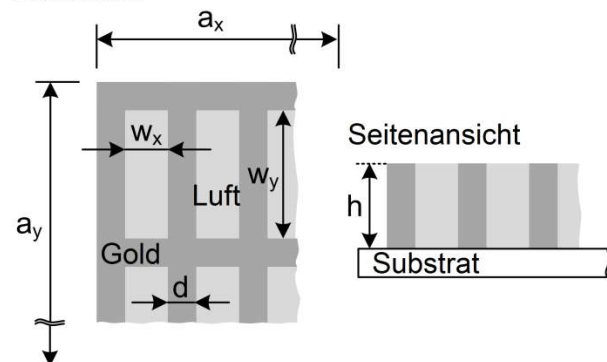
$$n_{eff,10} = \sqrt{1 - \frac{\lambda_0^2}{4w_x^2}}$$

und

$$n_{eff,01} = \sqrt{1 - \frac{\lambda_0^2}{4w_y^2}}$$

Anhand der beiden zuletzt genannten Formeln ist es ersichtlich, dass die Polarisationsänderung bei einer festen Betriebswellenlänge  $\lambda_0$  nur von den Abmaßen  $w_{x/y}$  der Hohlleiter abhängig ist. Durch anpassen der entsprechenden Dimensionen lässt sich sowohl der gewünschte Phasenunterschied einstellen, als auch einfach auf andere Wellenlängenbereiche skalieren. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung eines Hohlleiterfeldes.

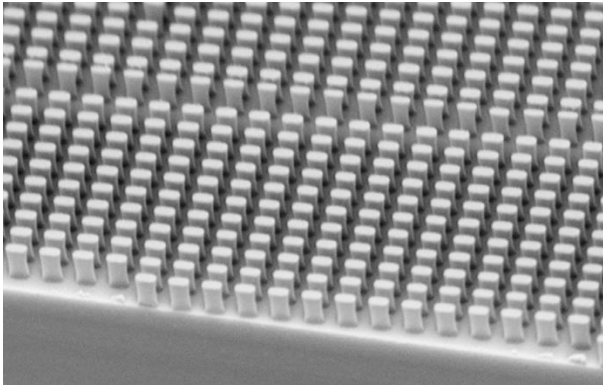
Draufsicht



**Abb. 1** Schematische Darstellung eines Abschnitts aus einem Hohlleiterfeld. Die Maße eines einzelnen Hohlleiters ( $w_{x/y}$ ), der Breite der Goldstege ( $d$ ), die Größe des kompletten Polarisationskonverters ( $a_{x/y}$ ) sowie dessen Höhe ( $h$ ) sind in der Darstellung eingezeichnet.

### 3 Herstellung und Charakterisierung

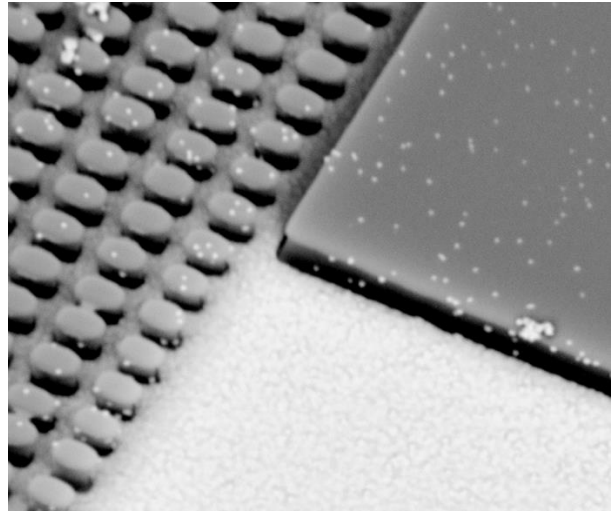
Die Herstellung des Polarisationskonverters erfolgt in einer mehrstufigen Prozesskette. Zu Beginn werden die mit ITO beschichteten Glassubstrate gesäubert, gefolgt von einem Ausheizschritt bei 120°C für 15min. Für eine bessere Haftung wird nach dem Ausheizen ein O<sub>2</sub>-Plasmaprozess durchgeführt. Daran anschließend erfolgt die Beschichtung mit einem positiven Fotolack (AZ 3027 von MicroChemicals), ein Softbake bei 100°C für 1min und anschließend die Belichtung mittels der Zwei-Photonen-Polymerisation. Mit der Zwei-Photonen-Polymerisation wird das Negativ zur eigentlichen Struktur erzeugt. Es entstehen freistehende Fotolacksäulen deren Zwischenräume in einem späteren Prozessschritt galvanisch mit Gold gefüllt werden. Die nachfolgende Abbildung 2 zeigt das Ergebnis nach der Entwicklung des Fotolacks.



**Abb.2** REM-Aufnahme der entwickelten Fotolackstruktur.

Vor der galvanischen Goldabscheidung findet ein Trocken-Ätzprozess statt. Dieser Prozessschritt ist notwendig, um den restlichen Fotolack, der sich noch stellenweise in den Zwischenräumen befindet, komplett zu entfernen und das ebenfalls stellenweise vorhandene Verkleben der Strukturen zu unterbinden. Das Füllen der Zwischenräume des hergestellten Negativs erfolgt mittels gepulster Stromabscheidung. Das abzuschneidende Gold befindet sich in einer Elektrolytlösung und lagert sich, verursacht durch das Anlegen eines elektrischen Feldes, an der freiliegenden leitfähigen ITO-Oberfläche ab. Abschließend findet noch eine Veraschung der Fotolacksäulen statt. Abbildung 3 zeigt den Randbereich der Fotolackstruktur die etwa zur Hälfte mit galvanisch abgeschiedenem Gold gefüllt ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der hergestellte Polarisationskonverter hinsichtlich seiner Abmaße charakterisiert. Um bei einer Betriebswellenlänge von  $\lambda_0=1064\text{nm}$  einen Phasenunterschied von  $\pi$  zu erreichen ist eine Größe der Hohlleiter von  $w_x=1000\text{nm}$ ,  $w_y=640\text{nm}$  und eine Bauteilhöhe von  $h=2\mu\text{m}$  notwendig. Die Breite der metallischen Struktur der Hohlleiter soll  $d_{xy}=300\text{nm}$  betragen.



**Abb.2** REM-Aufnahme der galvanischen Goldabscheidung.

Nach der Entwicklung des mit der Zwei-Photonen-Polymerisation belichteten Fotolacks und des Trockenätzprozesses betragen die Abmaße der freistehenden Fotolacksäulen  $w_x=1000\text{nm}$ ,  $w_y=610\text{nm}$  und  $h=2,5\mu\text{m}$ . Dies entspricht den eingangs getroffenen Anforderungen, nur in der x-Ausdehnung ist eine Abweichung von 30nm vorhanden. Die Breite der Zwischenräume betragen in  $d_x=450\text{nm}$  und in  $d_y=300\text{nm}$ . Die Abweichung resultiert aus einer leicht elliptischen Polarisation, anstelle einer zirkularen Polarisation, des Belichtungslasers. Die Höhe des galvanisch abgeschiedenen Goldes beträgt  $1\mu\text{m}$ . Bei einer längeren Abscheidung kommt es auf Grund von Verbiegungen der Feldlinien an den Kanten zu einem Überwuchs der sich schnell über das komplette Bauteil ausbreitet.

### 4 Zusammenfassung

Die Kombination der Prozesse Zwei-Photonen-Polymerisation und galvanische Schichtabscheidung erscheint für die Herstellung eines Polarisationskonverters als geeignet. Zukünftige Arbeiten beschäftigen sich mit der Verbesserung der galvanischen Schichtabscheidung, um die finale Bauteilhöhe von  $2\mu\text{m}$  zu erreichen und mit der optischen Charakterisierung des Bauteils.

### Literatur

- [1] S. Schwarz, S. Rung, R. Hellmann, „Generation of laser-induced periodic surface structures on transparent material-fused silica“, Appl. Phys. Lett. 108, 181607 (2016)
- [2] J. S. Tyo, D. L. Goldstein, D. B. Chenault, J. A. Shaw, „Review of passive imaging polarimetry for remote sensing application“, Appl. Opt. 45/22, 5453 (2006)
- [3] S. F. Helfer, A. Edelmann, J. Jahns, „Hollow waveguides as polarization converting elements: a theoretical study“, J. Eur. Opt. Soc.-Rapid Comm. 10, 15006 (2015)