

Simulation zur Herstellung von planar integrierten Multimode-Wellenleitern in Glas

Felix Brand, Daniel Schäffer, Wolfgang Foß, Maria Kufner

Institut für Sensor- und Aktorteknik, Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg

mailto:Felix.Brand@hs-coburg.de

Mithilfe einer Simulation des Ionenaustauschs können selbst bei komplizierten Maskendesigns die geometrischen Eigenschaften von Multimode-Wellenleitern berechnet werden. Der Vergleich zwischen einem Modell mit konstanter und einem Modell mit konzentrationsabhängiger elektrischer Leitfähigkeit zeigt Unterschiede im Brechzahlprofil sowie der Vergrabetiefe.

1 Motivation und Zielsetzung

Die Geometrie der Brechzahlprofile in planar integrierten ionenaustauschten Multimode-Wellenleiterkomponenten wie z.B. bei asymmetrischen Verzweigungen lassen sich aus Erfahrungswerten nur schwer abschätzen. Die Simulation des Ionenaustauschs ermöglicht bei gegebenen Austauschparameter die Form und Größe der Wellenleiter selbst bei komplizierten Maskendesigns zuverlässig zu berechnen. Ebenso können die Austauschparameter optimiert werden.

Zur Simulation des Ionenaustauschs existieren in der Literatur verschiedene mathematische Modelle. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Modell mit einer konstanten und ein Modell mit einer konzentrationsabhängigen Leitfähigkeit bzgl. den geometrischen Abmessungen und der Vergrabetiefe miteinander verglichen.

2 Ionenaustausch

Der Herstellungsprozess eines integrierten Wellenleiters über Ionendiffusion ist in Abbildung 1 dargestellt. Typischerweise werden die im Glas befindlichen Natriumionen mit Silberionen aus einer Salzschmelze ausgetauscht. Aufgrund des höheren Ionenradius sowie der Polarisierbarkeit bewirken die Silberionen einen Anstieg des Brechungsindex [1]. Diese Erhöhung verhält sich linear zu der Konzentration der Silberionen [2].

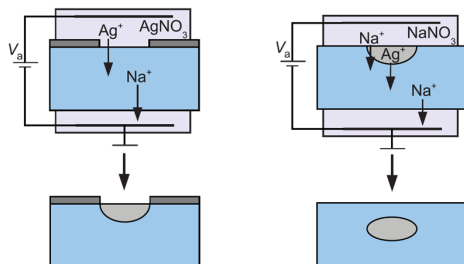


Abb. 1 Herstellungsprozess von integrierten Wellenleitern über Ionendiffusion (nach [2])

Der Prozess gliedert sich in zwei Schritte. Im ersten Schritt wird ein Glaswafer in eine Salzschmelze mit Silberionen positioniert und ein elektrisches Feld angelegt. Dies bewirkt einen Austausch der im Glas befindlichen Natriumionen mit den Silberionen aus der Schmelze und resultiert in einem Bereich erhöhter Silberionenkonzentration nahe der Maskenöffnung. Im zweiten Teilschritt wird die Silberionenschmelze mit einer Natriumionenschmelze ersetzt. In diesem Austauschprozess diffundieren die Natriumionen aus der Salzschmelze in den Glaswafer und schieben dadurch die Silberionen tiefer in das Glas.

3 Mathematische Modelle

3.1 Konstante elektr. Leitfähigkeit

Das erste mathematische Modell basiert auf der Beschreibung der Ionenflüsse. Über die Annahme der lokalen Ladungserhaltung sowie die Normierung der Silberionenkonzentration auf die ursprünglich im Glas vorhandenen Natriumionenkonzentration ergibt sich folgende Gleichung: [2]

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{D_{Ag}}{1 - \alpha c} \left(\Delta c + \frac{\alpha (\nabla c)^2}{1 - \alpha c} - \frac{e}{H k_B T} E_{ext} \right) \quad (1)$$

c	Konzentration der Silberionen
$D_{Ag/Na}$	Diffusionskonstanten der Ionen
H	Haven-Korrelationskoeffizient
k_B	Boltzmann-Konstante
T	Absolute Temperatur
E_{ext}	Externes elektrisches Feld
α	$1 - \frac{D_{Ag}}{D_{Na}}$

Das externe elektrische Feld wird über die Laplace-Gleichung berechnet.

3.2 Konzentrationsabhängige elektr. Leitfähigkeit

Das zweite Modell unterscheidet sich vom vorherigen, indem für die Leitfähigkeit σ des Glases eine lineare Abhängigkeit von der Konzentration der Silberionen angenommen wird [3].

$$\sigma(c) = (1 - c)\sigma_{Na} + c\sigma_{Ag} \quad (2)$$

$$= \frac{D_{Ag}c_0e^2}{k_B T} \left(\frac{D_{Ag}}{D_{Na}}(1 - c) + c \right) \quad (3)$$

$$\propto \frac{D_{Ag}}{D_{Na}}(1 - c) + c \quad (4)$$

c_0 Anfangskonzentration der Natriumionen
 e Elementarladung

Aufgrund der sich zeitlich ändernden Leitfähigkeit des Glases muss die Laplace-Gleichung für das elektrische Feld zu jedem Zeitschritt neu berechnet werden.

4 Simulationsergebnisse

In der Abbildung 2 sind die Verläufe der normierten Silberionenkonzentrationen in vertikaler Richtung für verschiedene Maskenöffnungen w von beiden hier vorgestellten mathematischen Modellen dargestellt.

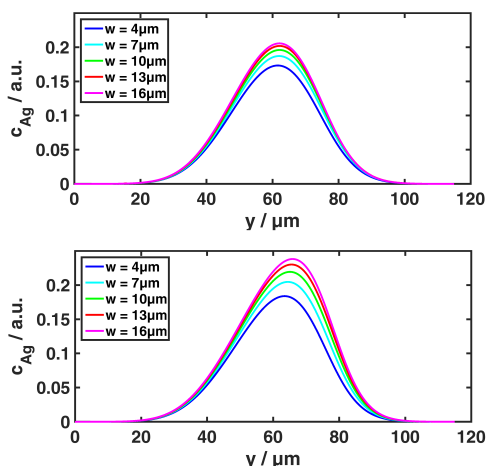


Abb. 2 Normierte Silberionenkonzentration für verschiedene Maskenöffnungen w , oben: konstante Leitfähigkeit, unten: konzentrationsabhängige Leitfähigkeit

In den Simulationsergebnissen ist zu sehen, dass sich die Konzentrationsprofile im Fall einer konstanten Leitfähigkeit (siehe Abbildung 2 oben) für die untersuchten Maskenöffnungen nur geringfügig in der maximalen Konzentration unterscheiden. Die Vergrabetiefe sowie die Profilform sind annähernd konstant.

In den Konzentrationsprofilen, die mit einer abhängigen Leitfähigkeit berechnet worden sind (Abbildung 2 unten), ist mit zunehmender Maskenöffnung eine steigende Vergrabetiefe zu beobachten sowie eine steigende Asymmetrie bezüglich des Wellenleitermittelpunktes.

Über die Darstellung der Deformation des elektrischen Feldes aufgrund der konzentrationsabhängigen Leitfähigkeit (siehe Abbildung 3) lässt sich

die unterschiedliche Vergrabetiefe sowie die Asymmetrie erklären. Hier kann beobachtet werden, dass die auftretende Deformation des Feldes eine zusätzliche Kraft in Richtung des unteren Ende des Wellenleiters bewirkt. Diese Kraft nimmt mit steigender Konzentration und somit auch mit steigenden Maskenöffnungen zu und bewirkt damit die erwähnte Asymmetrie sowie die erhöhte Vergrabetiefe.

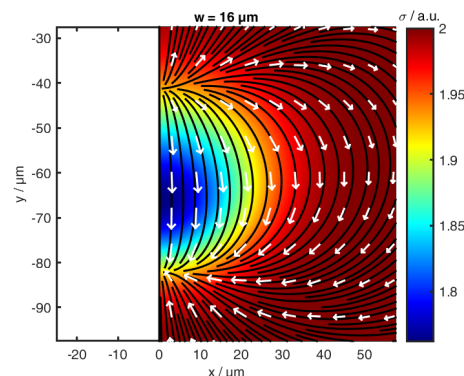


Abb. 3 Darstellung der örtlich variablen Leitfähigkeit (Falschfarbendarstellung) sowie die Feldlinien des elektrischen Feldes aufgrund der variablen Leitfähigkeit.

5 Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass über die Erweiterung des Modells um eine konzentrationsabhängige Leitfähigkeit detailliertere Berechnungen möglich sind, jedoch muss dafür das elektrische Feld innerhalb der Simulation für jeden Zeitschritt neu berechnet werden. Somit muss abgewogen werden, ob bei einem angestrebten Design der Wellenleiter die Berechnung einer genaueren Vergrabetiefe sowie der Asymmetrie notwendig ist. Zeigt das Simulationsmodell mit konstanter Leitfähigkeit bereits alle gewünschten Effekte mit ausreichender Genauigkeit, so ist dieses aufgrund der deutlich kürzeren Rechenzeit zu bevorzugen.

6 Danksagung

Diese Arbeit wurde durch das Programm Forschung an Fachhochschulen (FHprofUnt) des Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03FH008PX5 gefördert.

References

- [1] T. Findakly, "Glass Waveguides By Ion Exchange: A Review," *Optical Engineering* **24**(2), 242,244 (1985).
- [2] A. Tervonen, B. R. West, and S. Honkanen, "Ion-exchanged glass waveguide technology: a review," *Optical Engineering* **50**(7), 071,107 (2011).
- [3] B. R. West, P. Madasamy, N. Peyghambarian, and S. Honkanen, "Modeling of ion-exchanged glass waveguide structures," *Journal of Non-Crystalline Solids* **347**(1-3), 18–26 (2004).