

Modellierung der Ausbreitungseigenschaften und des Herstellungsprozesses von Gradientenindexwellenleitern in Dünnglasfolien

**Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informatik der
Universität Siegen**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation

von

Diplom-Ingenieur Thomas Kühler

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Elmar Griese
 2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolívar
- Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Mario Pacas

Tag der mündlichen Prüfung: 15.12.2011

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Theoretische
Elektrotechnik & Photonik der Universität Siegen

Band 2

Thomas Kühler

**Modellierung der Ausbreitungseigenschaften und
des Herstellungsprozesses von Gradientenindex-
wellenleitern in Dünnglasfolien**

Shaker Verlag
Aachen 2012

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Siegen, Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1280-4

ISSN 1869-3784

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Dissertation ist an der Universität Siegen am *Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik und Photonik* unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Elmar Griese entstanden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Griese danke ich ganz besonders für die interessante Themenstellung, die Betreuung der Promotion sowie für die Anregungen, die diese Arbeit möglich gemacht haben. Bei meinen Kolleginnen und Kollegen bedanke ich mich für die zahlreichen Diskussionen, die oft neue Ideen hervorgebracht haben. Besonders in Erinnerung bleiben wird mir die freundliche und familiäre Atmosphäre im Lehrstuhl.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolívar danke ich für sein Engagement als zweiter Gutachter. Ebenso gilt mein Dank der Prüfungskommission, bestehend aus Prof. Dr.-Ing. Mario Pacas, Prof. Dr. Udo Kelter und Prof. Dr. Andreas Kolb.

Für die Unterstützung als studentische Hilfskräfte und im Rahmen von Studienarbeiten dank ich Peter Schneider und Jan Hinnerk Stosch.

Ein sehr herzlicher Dank gilt meinen Eltern und insbesondere meiner Frau Sandra für ihre rückhaltlose Unterstützung.

Kurzfassung

Steigende Datenraten auf Leiterplattenebene erfordern neue Ansätze bei der Verbindungstechnologie. Die Realisierung von elektrischen Leiterplatten mit integrierten optischen Wellenleitern ist eine Möglichkeit, die Bandbreite deutlich zu erhöhen. Ein Verfahren ist die Verwendung von Glasfolien als Zwischenlage. In diesen Glasfolien werden Wellenleiter durch eine lokale Anhebung des Brechungsindex mittels eines Diffusionsprozesses eingebracht. Diese optischen Lagen können in herkömmliche elektrische Leiterplatten einlaminiert werden. Durch den Diffusionsprozess entstehen multimodale Gradientenindex-Wellenleiter. Das Indexprofil ist stark abhängig von den Prozessparametern wie Temperatur, Ionenkonzentration und der Diffusionszeit. In dieser Arbeit wird ein Ansatz zur Modellierung des Diffusionsprozesses mit der Hilfe der Methode der finiten Elemente vorgestellt. Auch die Nutzung eines elektrischen Feldes zur Unterstützung und Optimierung des Diffusionsvorganges wird betrachtet.

Die Ausbreitungseigenschaften dieser Wellenleiter können auf Grund des nicht exakt bekannten Brechzahlverlaufs nicht analytisch bestimmt werden. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein numerischer Ansatz basierend auf der Methode der finiten Elemente vorgestellt. Herkömmliche Ansätze mit Knoten basierenden Diskretisierungselementen führen zu dem Auftreten von nichtphysikalischen Lösungen. Deshalb wurde ein neuer Ansatz mit Kanten basierenden Diskretisierungselementen verwendet. Mit dessen Hilfe können detaillierte Informationen über die modalen Ausbreitungseigenschaften gewonnen werden.

Oft ist es im Hinblick auf die Herstellung von größerem Interesse, die Lage und Form des Brechzahlprofils auf Grund von technologischen Überlegungen festzulegen und daraus die benötigten Prozessparameter abzuleiten. Resultierend aus den Ergebnissen der Simulation des Diffusionsprozesses werden einige Untersuchungen zur Entwicklung eines Modells, dass die Abhängigkeit der verschiedenen Prozessparameter beschreibt, durchgeführt.

Summary

Increasing demand on bandwidth on printed circuit boards rises the necessity for new interconnection concepts. For this reason, several methods for integrating optical waveguides into electrical printed circuit boards are known. A novel approach is a local increase of the refractive index within thin-glass sheets by ion-exchange processes resulting in optical layers with embedded graded-index waveguides. These optical layers can be combined with conventional electrical layers in order to obtain electro-optical printed circuit boards. The ion-exchange process produces graded-index multimode waveguides where the index profile depends strongly on the process and its parameters like temperature, ion concentration and diffusion time. This work presents an approach to describe and to model the diffusion process by using the finite element method. For optimisation of the resulting index profile, the application of an electrical field is investigated.

The propagation characteristics of these waveguides cannot be determined by analytical methods. A method based on finite elements is presented. Because nodal based elements lead to spurious modes, vector based discretisation elements are used. The results are detailed information about the modal propagation characteristics and the power distribution of the guided modes.

From manufacturers point of view, deriving the process parameters from the desired position and shape of the refractive index profile is of great interest. For that reason, the results of the diffusion process are investigated with regard to the dependencies between the different parameters.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Anwendung optischer Technologien	1
1.2	Wellenleiterherstellung	5
1.3	Modellierung und Simulation	7
1.4	Übersicht	8
2	Stand der Technik	9
3	Elektromagnetische Wellenausbreitung	13
3.1	Sinusförmige Zeitabhängigkeit	13
3.2	Wellengleichung	14
3.2.1	Vektorielle Wellengleichung	14
3.2.2	Skalare Wellengleichung	15
3.3	Randbedingungen	15
3.3.1	Randbedingungen zwischen zwei homogenen Materialien	15
3.3.2	Perfekt leitende Oberfläche	16
3.4	Randwertprobleme	17
4	Methode der Finiten Elemente	19
4.1	Randwertproblem	20
4.2	Formulierung des Funktionals	21
4.3	Das Variationsprinzip	22
4.4	Diskretisierung mit Knoten basierenden Elementen	24
4.4.1	Interpolationsfunktionen	25
4.4.2	Nichtphysikalische Moden	27
4.5	Kantenelemente	29
4.5.1	Lokale Koordinaten	30
4.5.2	Interpolationsfunktionen	31
4.6	Validierung	32
4.6.1	Hohlleiter	32

4.6.2	Inhomogener Hohlleiter	38
5	Ionenaustauschprozesse	45
5.1	Eigenschaften von Gläsern	46
5.2	Thermische Diffusion	48
5.2.1	Diffusionsgleichung	49
5.2.2	Eindimensionale Diffusion	50
5.2.3	Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten	51
5.2.4	Konzentrationsabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten	52
5.3	Feldgestützte Diffusion	53
5.3.1	Nernst-Einstein-Relation	53
5.3.2	Beschreibung der feldgestützten Diffusion	54
5.3.3	Eindimensionale feldgestützte Diffusion	56
6	Wellenleiterherstellung durch Diffusion	59
6.1	Herstellung von Wellenleitern durch Ionenaustausch	59
6.2	Eigenschaften und Parameter des Herstellungsprozesses	61
6.3	Konzentrationsprofil bei thermischer Diffusion	63
6.3.1	Eindiffusion	64
6.3.2	Ausdiffusion	68
6.4	Konzentrationsprofil bei feldgestützter Diffusion	75
6.5	Bestimmung des Brechzahlprofils	81
7	Charakterisierung der Wellenleiter	85
7.1	Problembeschreibung	85
7.2	Wellenleitermoden	86
7.3	Dispersionskurve	87
8	Modell zur Gewinnung der Prozessgrößen	93
8.1	Interpolation des Brechzahlprofils	93
8.2	Temperaturabhängigkeit	97
8.3	Einfluss der Maskenbreite	98
8.4	Einfluss der Diffusionszeiten	102
8.5	Bestimmung der Prozessparameter	106
9	Zusammenfassung und Ausblick	107