

Semi-analytische Modellierung optischer Multimode-Wellenleiter mit rechteckigem Querschnitt

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

zur Erlangung des akademischen Grades

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

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Kilian Halbe

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elmar Griese
 2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolivar
- Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietmar Ehrhardt

Tag der mündlichen Prüfung: 31.10.2008

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Theoretische
Elektrotechnik & Photonik der Universität Siegen

Band 1

Kilian Halbe

**Semi-analytische Modellierung optischer Multimode-
Wellenleiter mit rechteckigem Querschnitt**

Shaker Verlag
Aachen 2009

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., 2008

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8606-4

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

Die vorliegende Arbeit ist an der Universität Siegen an dem im Jahr 2002 neu gegründeten *Institut für Theoretische Elektrotechnik und Photonik* unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Elmar Griese entstanden.

An dieser Stelle bedanke ich mich herzlichst bei Herrn Griese für seine Betreuung und Unterstützung, die auch über den Umfang dieser Arbeit hinausging. Ferner bedanke ich mich für die sehr schöne Zeit, die ich als Mitarbeiter an seinem Institut mit tollen Kolleginnen und Kollegen verbracht habe und dementsprechend in Erinnerung behalten werde.

Auch bei Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolívar, Leiter des *Instituts für Höchstfrequenztechnik und Quantenelektronik* an der Universität Siegen, bedanke ich mich für sein Engagement und seine Anregungen als zweiter Gutachter.

Bei der gesamten Prüfungskommission, zusätzlich bestehend aus Prof. Dr.-Ing. Dietmar Ehrhardt, Prof. Dr. Horst Bessai und Prof. Dr. Udo Kelter, bedanke ich mich ebenfalls.

Für unterstützende Studien- und Diplomarbeiten sowie für die Mitarbeit als studentische Hilfskraft bedanke ich mich bei den Herren Thomas Kühler, Michael Wirtz, Oleksandr Melnychuk, Ingo Roda und Abongwa Theurer.

Für starke Rückendeckung und ständige Unterstützung bedanke ich mich herzlichst bei meiner Familie und insbesondere bei meiner Ehefrau.

Kurzfassung

Die Bedeutung optischer Verbindungstechnologien auf Leiterplattenebene wächst mit steigenden Datenraten. Für eine kostengünstige industrielle Herstellung ist eine größtmögliche Kompatibilität zur bestehenden Leiterplattentechnologie eine wichtige Voraussetzung. Dies hat zur Folge, dass die gefertigten Wellenleiter einen im Verhältnis zur Wellenlänge großen Querschnitt haben. Bei Herstellungsverfahren wie beispielsweise Prägeverfahren oder lithographischen Verfahren ist der Querschnitt nahezu rechteckig.

Um den Fortschritt der Integration von optischen Wellenleitern auch innerhalb des Entwurfsprozesses von Leiterplatten voranzutreiben, sind Werkzeuge zur Modellierung und Simulation von großem Interesse. Unter Berücksichtigung der großen Anzahl geführter Moden wird hierzu in dieser Arbeit ein modaler Ansatz gewählt.

Auf Grund von prozessbedingten Rauheiten an der Grenzfläche zwischen Wellenleiterkern und -mantel, die sich nur mit großem Aufwand minimieren lassen, kommt es zur Kopplung von geführten Moden untereinander und auch von geführten Moden zu nicht geführten Moden. Letztere verursacht zusätzliche Verluste. Durch die Anwendung der *Coupled-Mode-Theorie* kann diese Kopplung modelliert werden. Basierend auf den Ergebnissen der *Coupled-Mode-Theorie* kann mit Hilfe der *Coupled-Power-Theorie* die Ausbreitung der optischen Leistung von jedem einzelnen Mode als Funktion der Anfangsleistung und der longitudinalen Koordinate des Wellenleiters beschrieben werden. Durch die Erweiterung der Zeitabhängigkeit kann diese Formulierung auf die Beschreibung der Ausbreitung von Pulsen ausgeweitet werden. Die Kopplung zwischen zwei verschiedenen Wellenleitern oder zwischen einem Laser und einem Wellenleiter kann durch die Anwendung der *Mode-Matching-Methode* modelliert werden.

Bezogen auf die Kopplung der Moden untereinander stellt sich heraus, dass sich die Verluste der Moden mit größer werdender Modenordnung ebenfalls vergrößern. Das Ziel einer verlustoptimierten Einkopplung muss daher sein, ausschließlich den Grundmode anzuregen. Die Anwendung der *Coupled-Mode-* und der *Coupled-Power-Theorien* verursacht signifikanten numerischen Aufwand. Sind die Koppelkoeffizienten der Moden jedoch einmal bestimmt und abgespeichert, erfolgt die Simulation der Ausbreitung der optischen Leistung sehr effizient. Die Simulaton zeitabhängiger Signale ist ebenfalls sehr schnell und führt zu guten Ergebnissen.

Summary

Optical interconnection technology on the printed circuit board level belongs to the most important key technologies for future micro-electronic equipment. It goes without saying that the highest grade of compatibility with the established printed circuit board technology is required, taking into account the existing high level of standardization during the manufacturing process. To provide the most possible compatibility with the established printed circuit board technologies there are restrictions concerning the size of the cross section of the waveguide resulting in highly multimodal waveguides. Production processes like hot embossing or lithographical processes lead to waveguides with nearly rectangular cross sections.

Accurate modelling of signal propagation on optical interconnects is very important to improve the progress of integrating optical interconnections into the conventional manufacturing process of electrical-optical layouts. Regarding the high number of guided modes in this work a modal approach is chosen to model the propagation of optical power within the waveguide.

Process dependent surface roughness which is only hard avoidable leads to mode coupling between the guided modes and between guided modes and the continuous spectrum of radiation modes resulting in additional losses to the intrinsic losses. This coupling mechanism can be analysed by applying the *Coupled Mode Theory*. Basing on the *Coupled Mode Theory* the *Coupled Power Theory* provides the possibility to describe the propagation of the optical power of each guided mode as a function of the initial power distribution and the propagated distance. With the help of the time dependent *Coupled Power Theory* the simulation of an optical signal is possible. The coupling between different interfaces like the coupling from laser to a waveguide or between two different waveguides is modelled by a *Mode Matching Method*.

Concerning the coupling of the modes within the waveguide itself the main results of this work are that the losses of the guided modes increase with the mode order. So the goal of the coupling between laser and waveguide has to be to excite the fundamental mode mainly. The application of the *Coupled Mode* and the *Coupled Power Theory* results in a significant numerical effort. Once the coupling coefficients are calculated and stored the simulation of propagating optical power can be done very efficiently. The simulation of pulses by integrating the time dependence to the *Coupled Power Theory* is very fast also and leads to good results.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	3
1.2	Vorgehensweise	6
2	Stand der Technik	7
2.1	Technologie	7
2.2	Simulation	9
3	Elektromagnetische Wellen	13
3.1	Die Wellengleichungen	14
3.2	Ebene Wellen	16
3.3	Polarisation	17
3.4	Phasen- und Gruppengeschwindigkeit	19
3.5	Der Poyntingsche Satz	19
3.6	Reflexion und Transmission	20
3.6.1	Totaltransmission	22
3.6.2	Totalreflexion	22
3.7	Moden	23
3.7.1	Cutoff	24
3.7.2	Nichtgeführte Moden	24
3.7.3	Orthogonalität der Moden	25
4	Coupled-Mode-Theorie	27
4.1	Entwicklung in ideale Moden	28
4.2	Entwicklung in lokal normale Moden	31
5	Coupled-Power-Theorie	33
6	Zeitabhängige Coupled-Power-Theorie	37
7	Der ideale, dielektrische Wellenleiter mit rechteckigem Querschnitt	41
7.1	Berechnung der geführten Moden	42
7.1.1	Bestimmung der E_{mn}^x -Moden	45

7.1.2	Bestimmung der E_{mn}^y -Moden	51
7.1.3	Lösung der Eigenwertgleichungen	53
7.2	Genauigkeit der Berechnung der Ausbreitungskonstanten der geführten Moden	55
7.3	Modellierung der nichtgeführten Moden	57
8	Der reale, dielektrische Wellenleiter mit rechteckigem Querschnitt	59
8.1	Berechnung der Koppelkoeffizienten	61
8.2	Berechnung der Dämpfungskoeffizienten	64
8.3	Analyse des Dämpfungsverhaltens	65
8.4	Signalausbreitung im Wellenleiter	70
9	Stirnkopplung von geraden Wellenleitern	73
10	Modell einer geraden Strecke von Wellenleitern	79
11	Validierung des Modells	83
12	Weiterführende Arbeiten	87
12.1	Zweidimensionale Störfunktionen	87
12.2	Wellenleiterkrümmungen	88
13	Zusammenfassung	93
A	Vergleich des Gauß- und des Exponentialmodells bezüglich der Dämpfung	95
B	Leistungsverteilungen bei verschiedenen Korrelationslängen	97
B.1	Geringe Korrelationslänge	97
B.2	Große Korrelationslänge	102
C	Dämpfungsverhalten bei verschiedenen Anregungen	107
	Literaturverzeichnis	110
	Die wichtigsten Symbole und Zeichen	119