

**Mikro- und integriert-optische
Silizium-Mikrofone
mit intensitätsmoduliertem Ausgangssignal**

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing.

Martin Klaiber

Geboren am 13. September 1971
in Ichenhausen

Referent: Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. Gerhard M. Sessler
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Peter Meißner

Tag der Einreichung: 26. Mai 2003
Tag der mündlichen Prüfung: 18. Juli 2003

D 17
Darmstädter Dissertation
2003

Berichte aus der Mikromechanik

Martin Klaiber

**Mikro- und integriert-optische Silizium-Mikrofone
mit intensitätsmoduliertem Ausgangssignal**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2003

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2003

Copyright Shaker Verlag 2003

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-1956-0

ISSN 0947-2398

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Fachgebiet Elektroakustik des Instituts für Nachrichtentechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. G. M. Sessler, für die Betreuung und stete Förderung der Arbeit, die vielen interessanten Diskussionen und die von ihm gewährten Freiheiten.

Herrn Prof. Dr.-Ing. P. Meißner danke ich für die Übernahme des Korreferats und die Unterstützung, die ich während der Entstehung der Arbeit von ihm erfahren durfte. Herrn Prof. Dr.-Ing. H. F. Schlaak und Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Balzer darf ich für ihre Mitwirkung in der Prüfungskommission danken, Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Kostka für die Übernahme des Vorsitzes bei der Prüfung.

Einen wesentlichen Anteil am Zustandekommen dieser Dissertation haben die vielen Vorschläge und Diskussionsbeiträge meiner Kollegen vom Fachgebiet Elektroakustik. Mein Dank gebührt den Dres. Houman Amjadi, Helmut Berger, Marc Fischer, Joachim Hillenbrand, Reiner Kreßmann, Jens Meyer und Christiane Thielemann.

Für die engagierte und stets gewissenhafte Durchführung der technologischen Arbeiten bedanke ich mich bei Frau Ing. grad. Gisela Heß und dem Team des Instituts für Halbleitertechnik ganz herzlich.

Unterstützung durfte ich auch von meinen Freunden von der Universität Ulm erfahren. Herrn Dr.-Ing. Frank Bögelsack danke ich für viele Hinweise zu feldtheoretischen Problemen, Herrn Dipl.-Ing. Felix Mederer für die Hilfe bei der Montagetechnik.

Finanziell wurde die Arbeit in Teilen von der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Hermann-Gieß-Stiftung gefördert. Beiden Institutionen danke ich ebenfalls. Herrn Dr.-Ing. R. Herber und Herrn Dr.-Ing. J. J. Johann als Vertretern der letztgenannten danke ich persönlich ganz herzlich.

Schließlich möchte ich mich in besonderer Weise bei meinen Eltern bedanken, die mir das Studium ermöglicht und mich auch danach in vielfältiger Weise unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Funktionsprinzipien optischer Mikrofone	9
2.1	Grundlagen und Klassifikation	9
2.2	Stand der Forschung	10
2.2.1	Intensitätsmodulation	11
2.2.2	Phasenmodulation	17
2.2.3	Polarisationsmodulation	24
2.2.4	Spezialfälle	25
2.3	Auswahl des Modulationsprinzips	25
3	Mikromechanik, Mikro- und integrierte Optik	29
3.1	Grundlagen	29
3.1.1	Begriffsbildungen	29
3.1.2	Silizium als Basismaterial	30
3.2	Wesentliche Technologieprozesse	31
3.2.1	Schichtherstellung	31
3.2.2	Photolithographie	33
3.2.3	Ätzverfahren	35

Naßchemisches Ätzen	35
Trockenätzverfahren	37
3.3 Anwendungsbeispiele	38
3.3.1 Integriert-optische Wellenleiter	38
3.3.2 Mikrostrukturierte Hohlleiter	42
3.3.3 Membranen	43
4 Systemeigenschaften und Rauschen	47
4.1 Allgemeine Systembeschreibung	47
4.2 Rauschquellen	51
4.2.1 Lichtquelle	52
4.2.2 Membran	54
4.2.3 Detektor	55
4.2.4 Übertragungsstrecke	60
4.3 Konsequenz für den Sensorentwurf	61
5 Berechnungsverfahren in der Optik	63
5.1 Vorbemerkungen	64
5.2 Mode-Matching Technique	65
5.3 Power-Loss Method	69
5.4 Discrete Spectral Index Method	72
5.5 Berechnung von Moden in Glasfasern	74
5.6 Gauß'sche Strahlen	78
5.7 Kopplung an Wellenleiter-Übergängen	80
5.8 Transfer-Matrix Method	81

6	Integriert-optisches Hohlleiter-Mikrofon	85
6.1	Aufbau und Funktionsweise	85
6.2	Voraussetzungen der Mikrofonauslegung	87
6.3	Rechteckhohlleiter als einfaches Modell	91
6.4	Mechanische Eigenschaften	95
6.5	Optische Eigenschaften	106
6.6	Herstellungsprozeß	113
6.6.1	Maskendesign	113
6.6.2	Technologiefolge	117
6.6.3	Montage	122
7	Mikrofon mit Fabry-Perot-Cavity	123
7.1	Aufbau und Funktionsweise	123
7.2	Grundlagen der Sensorgestaltung	124
7.3	Mechanische Eigenschaften	130
7.4	Optische Eigenschaften	134
7.5	Herstellungsprozeß	138
7.5.1	Maskendesign	138
7.5.2	Technologiefolge	139
7.5.3	Montage	141
8	Akustische Messungen	143
8.1	Hohlleiter-Mikrofon	143
8.2	Mikrofon mit Fabry-Perot-Cavity	145

9 Zusammenfassung und Ausblick	151
A Verfahren zur Feldberechnung	157
A.1 Mode-Matching Technique	157
A.2 Discrete Spectral Index Method	162
A.3 Moden in Glasfasern	166