

Optische Hochfrequenztechnik und Photonik

Herausgeber: B. Schmauß, R. Engelbrecht

Manuel Rosenberger

Polymere planare Bragg-Gitter

Polymere planare Bragg-Gitter

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Doktorgrades
Doktor-Ingenieur

vorgelegt von

Manuel Rosenberger
aus Offenbach am Main

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Februar 2018

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Schmauß
Prof. Dr. rer. nat. Uli Lemmer
Prof. Dr. rer. nat. Ralf Hellmann

Optische Hochfrequenztechnik und Photonik

Manuel Rosenberger

Polymere planare Bragg-Gitter

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6008-9

ISSN 1866-6043

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

Für meine Eltern

Zusammenfassung

Durch die zunehmende Automatisierung in Kraftfahrzeugen, der Gebäudeüberwachung und der industriellen Produktion wächst der Bedarf an miniaturisierten und kostengünstigen Sensoren. Insbesondere optische Sensoren finden aufgrund ihrer Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Feldern, der Möglichkeit der hohen Datenübertragung über große Entfernungen sowie der platzsparenden Integration zahlreiche Einsatzmöglichkeiten. Während bisher meist Quarzglas als Ausgangswerkstoff optischer Sensoren Verwendung findet, besitzen Polymere aufgrund ihres geringen Gewichts und der geringen Beschaffungskosten großes technisches und wirtschaftliches Potential auf dem Gebiet der optischen Sensorik. Da sich Polymere außerdem hinsichtlich ihrer Eigenschaften deutlich von Quarzglas unterscheiden, ergeben sich durch ihre Verwendung zahlreiche neue Anwendungsfelder.

In dieser Arbeit wurde daher ein neues Verfahren zur UV-laserbasierten Herstellung polymerer planarer Bragg-Gitter-Sensoren entwickelt. Dabei wurde zunächst der Einfluss der UV-Strahlung auf die optischen Eigenschaften der Polymere untersucht und ausgehend von diesen Ergebnissen ein Verfahren zur Herstellung von planaren Bragg-Gittern in Polymermaterialien entwickelt. Dieses innovative Herstellungsverfahren basiert auf einer Amplituden-Phasenmasken-Anordnung und erlaubt eine lokal begrenzte UV-induzierte Brechungsindexerhöhung, die das gleichzeitige Einschreiben eines integrierten Wellenleiters samt Bragg-Gitter in einem einzigen Bestrahlungsschritt ermöglicht. Mit diesem effizienten, sogenannten Single-Writing-Step-Verfahren (SWS-Verfahren) wurden polymere planare Bragg-Gitter (PPBG) in zwei unterschiedlichen Polymeren erzeugt. Bei diesen Polymeren handelt es sich um Polymethylmethacrylat (PMMA), das Standardmaterial in der Polymeroptik, sowie um Cycloolefin-Copolymer (COC). Während PMMA eine große Affinität zur Wasseraufnahme und eine geringe Glasübergangstemperatur besitzt, nimmt COC nahezu keine Feuchtigkeit auf und kann selbst bei höheren Temperaturen eingesetzt werden. Nach der Charakterisierung der integrierten Wellenleiter sowie der spektralen Eigenschaften der Bragg-Gitter-Strukturen in PMMA und COC wurden die PPBGs hinsichtlich ihres sensorischen Verhaltens untersucht. Zunächst wurden der Einfluss von Temperaturänderungen und Änderungen der relativen Luftfeuchte auf die polymeren planaren Bragg-Gitter charakterisiert. Anschließend wurde die Eignung der PPBGs für den Einsatz auf dem Gebiet der Spannungs-Dehnungs-Sensorik demonstriert, wobei die PPBGs eine hohe Sensitivität und eine vernachlässigbare Hysterese aufwiesen. Es zeigte sich, dass diese PPBGs, im Gegensatz

zu optischen Faser-Bragg-Gittern, neben mechanischer Dehnung auch mechanischen Druck aufnehmen und messen können. Darüber hinaus verdeutlichen die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit den großen Einfluss der Belastungsrichtung auf die Sensitivität der PPBGs. Dieser Effekt in Kombination mit der frei wählbaren geometrischen Form der polymeren Substrate konnte anschließend bei der Entwicklung von optischen Sensoren ausgenutzt werden. Im Laufe dieser Arbeit wurden drei unterschiedliche Prototypen realisiert und hinsichtlich ihres sensorischen Verhaltens charakterisiert. Bei diesen entwickelten Prototypen handelt es sich um einen zweidimensionalen Spannungs-Dehnungs-Sensor, einen temperatur-referenzierten Spannungs-Dehnungs-Sensor und einen Formsensoren. Anhand dieser Prototypen wird das große Potential der polymeren planaren Bragg-Gitter auf dem Gebiet der optischen Sensorik ausführlich demonstriert.

Abstract

The increasing automation in industrial production, structural monitoring and automotive vehicles entails a growing demand for miniaturized and cost-effective sensors. In particular, optical sensors can be found in numerous applications due to their immunity to electromagnetic fields, the possibility of high data rate and long distance transmission and a space-saving integration. While nowadays mainly silica is used for optical sensors, polymers possess a high technical and economic potential as light-weight and low-cost optical sensors. In addition, polymers differ significantly from silica regarding their material properties, which in turn makes them applicable in numerous new applications.

In this thesis, a novel UV-laser-based process for the fabrication of polymer planar Bragg grating sensors is developed. First, the influence of the UV-irradiation onto the optical properties of the polymer materials is investigated and discussed. Following, based on these results a fabrication process to write planar Bragg gratings into polymer substrates is developed. This innovative fabrication process is based on a stacked mask configuration consisting of a phase mask which is covered by an amplitude mask allowing a local UV-induced refractive index modification and the creation of an integrated waveguide and a Bragg grating in a single writing step. This efficient single writing step process (SWS) is used to fabricate polymer planar Bragg gratings (PPBG) in two different polymer materials, namely polymethylmethacrylate (PMMA), the standard material in polymer optics, and cyclo-olefin copolymers (COC). While PMMA exhibits a strong affinity to absorb water and a low glass transition temperature, COC does not absorb moisture and can withstand even high temperatures. Following the characterization of the integrated waveguides and the spectral properties of the Bragg grating structures in PMMA and COC, the sensory behavior of the PPBGs is evaluated. First, the influence of changes in temperature and relative humidity onto the polymer planar Bragg gratings are investigated, while subsequently the applicability of the PPBGs for tensile and compressive strain sensing is demonstrated. It is shown that the PPBGs exhibit high sensitivities and a negligible hysteresis making them promising candidates for optical strain sensing. Compared to optical fiber Bragg gratings the PPBGs can not only be loaded with tensile but also with compressive strain. In addition our experiments illustrate that the direction of the loading has a strong influence onto the sensory behavior. Taking advantage of this behavior and the free selectable geometry of the planar substrates, three sensor prototypes are developed and characterized. These developed prototypes are a two-dimensional tensile and compressive strain sensor, a temperature referenced strain sensor, and

a one component shape sensor. Overall, these prototypes demonstrate the promising potential of the polymer planar Bragg gratings and pave the way for manifold applications of the PPBGs in the field of optical sensing.

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellungen	2
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2. STAND DER TECHNIK	7
2.1 Optische Polymere	7
2.2 Herstellungsverfahren	13
2.3 Einsatzgebiete	17
3. PHYSIKALISCHE UND CHEMISCHE GRUNDLAGEN	23
3.1 Wellenleitertheorie und Beam-Propagation-Methode	23
3.2 Bragg-Gitter-Strukturen	26
3.2.1 Spektrale Eigenschaften	28
3.2.2 Bragg-Gitter in der Sensorik	32
3.3 Photosensitivität – Brechzahlmodifizierung durch UV-Bestrahlung	32
4. MATERIAL UND METHODEN	39
4.1 Polymere Substratmaterialien	39
4.1.1 Polymethylmethacrylat	39
4.1.2 Cycloolefin-Copolymere	40
4.2 Methoden	40
4.2.1 Probenvorbereitung	40
4.2.2 KrF-Excimerlaser	41
4.2.3 Bestimmung des Absorptionsverhaltens	42
4.2.4 Charakterisierung der integrierten Wellenleiter	43
4.2.4.1 Phasenschiebende Mach-Zehnder-Interferometrie	43
4.2.4.2 Mikroskopische Betrachtung der bestrahlten Polymeroberfläche	46
4.2.4.3 Einkoppelplatz für integrierte Wellenleiter und Bragg-Gitter	47

4.2.5 Simulation	48
4.2.6 Herstellungsverfahren polymerer Wellenleiter und Bragg-Gitter	50
4.2.6.1 Charakterisierung der spektralen Eigenschaften	52
4.2.6.2 Multi-reflektive Bragg-Gitter	56
4.2.7 Untersuchungen der Umwelteinflüsse	58
4.2.7.1 Einfluss der relativen Luftfeuchte und der Wasseraufnahme auf PMMA-PPBGs	58
4.2.7.2 Einfluss der relativen Luftfeuchte auf COC-PPBGs	59
4.2.7.3 Bestimmung der Temperatursensitivität von COC-PPBGs	60
4.2.8 Mechanische Deformationen und Anwendungsbeispiele	60
4.2.8.1 Auswirkung der Belastung entlang des Wellenleiters	60
4.2.8.2 Auswirkungen bei Belastung aus unterschiedlichen Richtungen	63
4.2.8.3 Zweidimensionaler Spannungs-Dehnungs-Sensor in PMMA	64
4.2.8.4 Temperaturkompensierter polymerer planarer Bragg-Gitter-Sensor in COC	64
4.2.8.5 Formsensoren	66
5. ERGEBNISSE UND DISKUSSION	71
5.1 Planare Bragg-Gitter in Polymethylmethacrylat	71
5.1.1 Bestimmung des Absorptionsverhaltens und der Eindringtiefe	71
5.1.2 Brechungsindexprofil	72
5.1.3 Integrierte Wellenleiter	74
5.1.4 Dämpfungsmessung integrierter Wellenleiter	76
5.1.5 Einfluss der UV-Dosis auf die spektralen Eigenschaften der PMMA-PPBGs	77
5.1.6 Einfluss der Gitterlänge	83
5.1.7 Langzeitstabilität	84
5.1.8 Multi-reflektive Bragg-Gitter	85
5.1.9 Auswirkungen der Wasseraufnahme von PMMA	88
5.1.9.1 Sensitivität der PPBGs gegenüber relativer Luftfeuchte	88
5.1.9.2 Verhalten bei maximaler Wasseraufnahme	89
5.1.10 PMMA-PPBG als Spannungs-Dehnungs-Sensor	92
5.1.10.1 Auswirkungen mechanischer Belastung entlang des Wellenleiters	92
5.1.10.2 Auswirkungen mechanischer Belastung aus unterschiedlichen Richtungen	96
5.1.10.3 Zweidimensionaler Spannungs-Dehnungs-Sensor	98

5.1.11 Zusammenfassung	101
5.2 Planare Bragg-Gitter in Cycloolefin-Copolymeren	103
5.2.1 Bestimmung des Absorptionsverhaltens und der Eindringtiefe	103
5.2.2 Brechungsindextiefenprofile	104
5.2.3 Einfluss der UV-Dosis auf die spektralen Eigenschaften der COC-PPBGs	106
5.2.4 Dämpfungsmessung von Wellenleiter und Bragg-Gitter	111
5.2.5 Einfluss der Gitterlänge auf die spektralen Eigenschaften der Bragg-Gitter	112
5.2.6 Auswirkungen der Umwelteinflüsse	114
5.2.6.1 Sensitivität gegenüber Änderungen der relativen Luftfeuchte	114
5.2.6.2 Temperatursensitivität	116
5.2.6.3 Einsatz in der Spannungs-Dehnungs-Sensorik	117
5.2.7 Anwendungsbeispiele	119
5.2.7.1 Temperaturkompensierte Spannungs-Dehnungs-Sensorik	119
5.2.7.2 Formsensoren	124
5.2.8 Zusammenfassung	128
6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	129
Literatur	134
Abkürzungsverzeichnis	145
Danksagung	146
Publikationsliste	147
Anhang	151